

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇELİK LİFLİ BETON PANELLERİN DÜZLEM DIŞI
YÜKLEME ALTINDA DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

ÖZGE ERSU ÇAKIR

DENİZLİ, NİSAN- 2022

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ÇELİK LİFLİ BETON PANELLERİN DÜZLEM DIŞI
YÜKLEME ALTINDA DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

ÖZGE ERSU ÇAKIR

DENİZLİ, NİSAN- 2022

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

ÖZGE ERSU ÇAKIR

ÖZET

**ÇELİK LİFLİ BETON PANELLERİN DÜZLEM DIŞI YÜKLEME
ALTINDA DAVRANIŞI
DOKTORA TEZİ
ÖZGE ERSU ÇAKIR
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. FATİH CETİŞLİ)**

DENİZLİ, NİSAN- 2022

Dayanıklılığı, yangına karşı direnci, su geçirmezliği, ekonomik üretimi, enerji verimliliği, yerinde imalat gibi özelliklerinden dolayı beton en sık tercih edilen yapı malzemesidir. Betonun çekme dayanımının basınç dayanımına göre daha az olması ve bu olumsuz özelliğin giderilmeye ve/veya azaltılmaya çalışılması için yapılan araştırmalar bazı gelişmelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu gelişmelerden birisi de lifli betonların üretilmesidir. Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler üretildikleri malzemeye göre; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Bunlardan en sık kullanılanı çelik liflerdir. Yapısal uygulamalarda çelik lifli beton sadece kırılmayı önlemek için kullanılmaz, aynı zamanda betonun patlama gibi dinamik yükleme ve darbe mukavemetini arttırmak ve malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek için de betona çelik lif ilave edilir. Bu çalışmada, çelik lifli beton panellerin basınç-yer değiştirme ilişkisine etki eden parametrelerin öneminin araştırılması amaçlanmıştır. Panel kalınlığı, panel boyutları, malzeme türü ve panellerin sınır koşulları incelenen parametrelerdir. Çalışmada kullanılacak olan çelik lifli beton model, çeşitli standartlar ve literatür araştırmaları sonucunda elde edilmiş ve literatürdeki deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Çelik lifli beton paneller yüzey basıncına maruz bırakılmış ve sonuç olarak kalınlık ve lif oranı arttıkça nihai taşıma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Panellerin sadece köşe noktalarında desteklenmesinin yeterli olmayabileceği, ara desteklere ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Destek aralığı azaldıkça, yüzey basıncına olan direnci artmıştır. Beton malzemesinde çelik lif miktarının artmasının dayanım, sehim ve süneklik değerlerini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Sunulmuş olan çalışmanın ana çıktısı ise çelik lifli beton panellerin basınç-yer değiştirme ilişkisini öngörmek üzere nümerik bir modelin elde edilmesi olmuştur. Önerilen matematiksel model ile analiz sonuçları karşılaştırıldığında aralarında anlamlı bir ilişkinin olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Çelik lifli beton, panel eleman, sonlu eleman analizi, yüzey basıncı.

ABSTRACT

BEHAVIOR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE PANELS UNDER OUT OF PLANE LOADING

PH. D THESIS

OZGE ERSU CAKIR

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. FATİH CETİSLİ)

DENİZLİ, APRIL 2022

Concrete is the most preferred building material due to its durability, fire resistance, waterproofing, economical production, energy efficiency and on-site manufacturing. The research carried out to reduce the tensile strength of concrete compared to the compressive strength and to try to eliminate and/or reduce this negative feature have led to some developments. One of these developments is the production of fiber concrete. Fibers commonly used in concrete, according to the material from which they are produced, steel, polypropylene, carbon, and alkali resistant glass fibers. The most commonly used of these are steel fibers. In structural applications, steel fiber concrete is not only used to prevent failure, but also to increase the dynamic loading and impact strength of concrete such as explosion, and to prevent shedding, fragmentation and dispersion of the material, steel fiber is added to the concrete. In this study, it is aimed to investigate the importance of parameters affecting the pressure-displacement relationship of steel fiber reinforced concrete panels. Panel thickness, panel dimensions, material type and boundary conditions of the panels are the parameters examined. The steel fiber concrete model to be used in the study has been obtained as a result of various standards and literature research and has been confirmed by the experimental results in the literature. Steel fiber concrete panels were subjected to surface pressure and as a result, it was observed that the as the thickness and the fiber ratio increased, the ultimate bearing capacity increased. It was determined that it may not be enough to support the panels only at the corner points, and intermediate supports are needed. As the support spacing decreased, the absorbed surface pressure increased. In addition, it was concluded that the increase in the amount of steel fiber in the concrete material increased the strength, deflection, and ductility values. In addition, another aim of the study is to obtain a mathematical model that will predict the pressure-displacement relationship of steel fiber concrete panels. When the proposed mathematical model and the analysis results were compared, it was seen that there was a significant relationship between them.

KEYWORDS: Steel fiber reinforced concrete, panel element, finite element analysis, surface pressure.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	xix
SEMBOL LİSTESİ	xx
KISALTMA LİSTESİ	xxii
ÖNSÖZ.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problemin Tanımı	2
1.2 Amaç ve Kapsam.....	3
1.3 Daha Önce Yapılan Çalışmalar	4
1.3.1 SFRC'nin Mekanik Özellikleri ile İlgili Çalışmalar.....	4
1.3.2 SFRC'nin Patlama ve Darbe Etkisine Karşı Kullanımı ile İlgili Çalışmalar	25
1.3.3 Plak Elemanlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar	36
1.4 Tezin Düzeni	42
2. LİFLİ BETON ÖZELLİKLERİ VE İLGİLİ YÖNETMELİKLER.....	44
2.1 Çelik Lifli Betonun Kullanım Alanları	47
2.2 Çelik Lifli Betonun Mekanik Özellikleri	49
2.2.1 Basınç Dayanımı.....	50
2.2.2 Çekme Dayanımı	51
2.2.3 Eğilme Dayanımı	52
2.2.4 Darbe direnci ve Dinamik Yükler Altındaki Dayanımı.....	55
2.2.5 Tokluk.....	55
2.2.6 Yorulma Dayanımı	56
2.2.7 Aşınma Dayanımı	56
2.2.8 Elastisite Modülü ve Poisson Oranı.....	56
2.2.9 Büzülme (Rötre)	56
2.3 Çelik Lifli Beton ile İlgili Yönetmelikler ve Test Metotları	57
2.3.1 ACI-544.4R-18: Lif Takviyeli Beton ile Tasarım Rehberi.....	57
2.3.2 RILEM TC 162-TDF: Çelik Lif Takviyeli Beton İçin Test ve Tasarım Yöntemleri	70
2.3.3 Model Kodu 2010 (fib).....	74
3. PLAK VE KİRİŞ TEORİLERİ	84
3.1 Plak Teorileri	84
3.1.1 Kirchhoff Plak Teorisi	86
3.1.2 Mindlin Plak Teorisi	87
3.2 Kiriş Teorileri	89
3.2.1 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi	89
3.2.2 Timoshenko Kiriş Teorisi	90
3.3 Plak ve Kirişler için Çözüm Yaklaşımı.....	91
3.4 Elastik Kiriş Teorisi.....	94
4. ÇELİK LİFLİ BETON MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE PARAMETRİK ÇALIŞMA	98

4.1	Çelik Lifli Beton Malzeme Modelinin Oluşturulması	98
4.2	Malzeme Modelinin Literatür ile Karşılaştırılması	102
4.2.1	Birinci Karşılaştırma	102
4.2.2	İkinci Karşılaştırma	112
4.3	Parametrik Çalışma ve Sonuçları	116
4.3.1	Sonlu Elemanlar Analizi Detayları	116
4.3.2	Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	121
4.3.3	Sonuçların Değerlendirilmesi	162
4.3.3.1	Kalınlık Bakımından Değerlendirme	162
4.3.3.2	En-Boy Oranı (Alan) Bakımında Değerlendirme	163
4.3.3.3	Kısa Kenar Mesnet Aralığı Bakımından Değerlendirme	165
4.3.3.4	Uzun Kenar Mesnet Aralığı Bakımından Değerlendirme	166
4.3.3.5	Malzeme Tipi Bakımından Değerlendirme	167
5.	ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL VE MATEMATİKSEL MODELİN SONLU ELEMANLAR SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI	172
5.1	1.Karakteristik Nokta Yüzey Basıncı Değeri	174
5.2	1.Karakteristik Nokta Deplasman Değeri	190
5.3	2.Karakteristik Nokta Yüzey Basıncı Değeri	213
5.4	2.Karakteristik Nokta Deplasman Değeri	226
5.5	Matematiksel Model ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	250
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	254
6.1	Özet	254
6.2	Sonuçlar	254
6.3	Öneriler	257
7.	KAYNAKLAR	259
8.	EKLER	271
	EK A SP45 MALZEMELİ PANELLER İÇİN GERİLME-ZAMAN GRAFİKLERİ	271
	EK B SP60 MALZEMELİ PANELLER İÇİN GERİLME-ZAMAN GRAFİKLERİ	288
9.	ÖZGEÇMİŞ	305

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Üretildikleri malzemeye göre lifler	45
Şekil 2.2: Betonda kullanılan çelik liflerin geometrik şekilleri: (a) liflerin yüzey şekilleri, (b) liflerin kesit geometrileri (yuvarlak ve düz) (Naaman, 2003; Yalçın, 2009).	45
Şekil 2.3: Çoklu kanca uçlu çelik lifler (Venkateshwaran ve diğ., 2018)	46
Şekil 2.4: Çelik Liflerin Köprüleme Özelliği	46
Şekil 2.5: Çelik lifli beton uygulamaları: (a) endüstriyel zemin, (b) pist, (c) püskürtme beton uygulaması, (d) ince kabuk elemanlar (URL-1, 2013), Prefabrik üretimde ÇLDB, (e) Öngerilmeli köprü kirişi, (f) tünel segmentleri (g) Kore’de bulunan, açıklığı 120 m ve kemer yüksekliği 130 m olan Köprü (Mehta ve Monteiro, 2006).	49
Şekil 2.6: Geleneksel betonun ve ÇLDB’lerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Shah vd., 1978).	50
Şekil 2.7: Direk çekme deneyinde ÇLDB’un tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Toutanji ve Bayasi, 1998; Yalçın, 2009).	51
Şekil 2.8: Farklı tip çelik lif içeren harçların çekmede gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Shah vd., 1978).	52
Şekil 2.9: Eğilme etkisinde kiriş kesitinde oluşan gerilme ve şekil değiştirme diyagramları, (a) normal beton için, (b) ÇLDB için (Yalçın, 2009)	53
Şekil 2.10: (a) Eğilme deneyi sırasında oluşan tipik yük-deplasman eğrileri, (b) eğilme deneyine tabi tutulan kiriş numuneleri (Mehta ve Monteiro, 2006).....	54
Şekil 2.11: Fiber takviyesinin çalıştığı mekanizmanın şemaları	59
Şekil 2.12: (a) Tipik bir ASTM C1609/C1609M test sonucunun şemaları (strain-softening FRC); ve (b) dört nokta eğilme testi altındaki FRC kirişi. (Not: 1 inç = 25 mm.)	61
Şekil 2.13: (a) Tipik BS EN 14651:2005 test sonuçlarının şemaları (strain-softening FRC); ve (b) üç nokta eğilme testi altındaki FRC kirişin şemaları. (Not: 1 inç = 25 mm.)	62
Şekil 2.14: Tek eksenli testten elde edilen, yumuşama ve sertleşme davranışlarını gösteren, FRC için basitleştirilmiş çatlak sonrası gerilme-çatlak genişliği ilişkisi (fib 2013).	64
Şekil 2.15: Yumuşama ve sertleşme davranışları gösteren, eğilme testinden elde edilen liflerin çekme/esneme performansına katkısı.	64
Şekil 2.16: Gerilim, eğilme ve bir sistem altında FRC’de gerinim yumuşatma ve gerinim sertleştirme şemaları (Model Kodu 2010 [fib 2013]). İlk üçü gerinim yumuşatma davranışı gösterir; alttaki üç gerinim sertleşmesi tepkisini gösterir	65
Şekil 2.17: RILEM TC 162-TDF (2003) ve Vandewalle’e (2003) göre tek eksenli çekme ve basınçta FRC için tipik bir gerilme-birim şekil değiştirme diyagramının şemaları	67
Şekil 2.18: Fibersiz çatlaklı betonarme eğilme elemanı için gerilim bloğu şemaları: (a) betonarme kiriş kesiti; (b) normal gerilimlerin gerçek dağılımı; ve (c) normal gerilimlerin basitleştirilmiş dağılımı.	67

Şekil 2.19: Çatlak bir FRC eğilme elemanı için gerilim bloğu şemaları. (a) FRC giriş bölümü; (b) normal gerilimlerin gerçek dağılımı; ve (c) normal gerilimlerin basitleştirilmiş dağılımı.....	68
Şekil 2.20: Çatlamış bir FRC eğilme elemanı için gerilim bloğu şemaları: (a) FRC giriş bölümü; (b) eğilme gerilmelerinin dağılımı; ve (c) normal gerilimlerin basitleştirilmiş dağılımı.....	69
Şekil 2.21: Yük-CMOD diyagramı.....	73
Şekil 2.22: Gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı ve boyut faktörü κ_h	74
Şekil 2.23: Eksenel çekme altında (a) yumuşama (b) sertleşme davranışı.....	75
Şekil 2.24: Malzemeden yapısal seviyeye yumuşama veya sertleşme davranışı gösteren malzemeler arasındaki temel farklar.....	76
Şekil 2.25: Gerilme-çatlak açıklığı ilişkisini elde etmek için yapılan eğilme altındaki girişin ters analizi	76
Şekil 2.26: Gerilme-çatlak açıklığı ilişkisini elde etmek için yapılan eğilme altındaki girişin ters analizi	77
Şekil 2.27: Gerilme-çatlak açma ilişkisini elde etmek için yapılan eğilmede girişin ters analizi-Yük-CMOD ilişkisi	77
Şekil 2.28: Basitleştirilmiş çatlak sonrası kurucu yasalar: gerilme-çatlak açılması (sürekli ve kesikli çizgiler, sırasıyla, yumuşama ve sertleşme çatlak sonrası davranışı ifade eder).....	79
Şekil 2.29: Artık nominal eğilme mukavemeti f_{R3} aracılığıyla tek eksenli gerilim f_{FTu} 'da nihai çekme mukavemetini hesaplamak için benimsenen basitleştirilmiş model	79
Şekil 2.30: Artık nominal eğilme mukavemeti f_{R3} aracılığıyla tek eksenli gerilim f_{FTu} 'da nihai çekme mukavemetini hesaplamak için benimsenen basitleştirilmiş model	80
Şekil 2.31: (a) Yumuşatıcı bir malzeme üzerinde bir eğilme testinden elde edilen tipik sonuçlar; (b) lineer çatlama sonrası kurucu yasa.	81
Şekil 2.32: FRC'nin (a) yumuşama ve (b) sertleşme davranışı için SLS için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri.....	83
Şekil 3.1: Kanal kapağı ve betonarme döşeme (Dal, 2011)	84
Şekil 3.2: Köprü ve plak elemanı (Dal, 2011)	85
Şekil 3.3: Tanker ve hızlı tren (Dal, 2011)	85
Şekil 3.4: Otomobil ve uydu (Dal, 2011)	85
Şekil 3.5: Yolcu uçağı ve mekik (Amabili, 2008).....	85
Şekil 3.6: Giriş genişliğinin derinliğine oranının (b/d) bir fonksiyonu olarak antiklastik eğrilik parametresi ϕ (A) metalik malzemeler için ($v=0.285$) ve (B) kırılğan metalik olmayan malzemeler için ($v=0.250$) (Baratta, 1981).....	93
Şekil 3.7: Giriş ve plak eleman.....	94
Şekil 3.8: Basit eğilme etkisindeki giriş ve enkesiti	95
Şekil 3.9: Beton bir girişin eğilme etkisinde kırılması	96
Şekil 3.10: Düşey yüklü girişlerde eğme momenti ve çökme (sehim) eşitlikleri	97
Şekil 4.1: Model Kodu 2010 (fib)'nin tavsiyelerine göre FRC için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı (Venkateshwaran ve diğ., 2018)	100
Şekil 4.2: Tezde kullanılan iki tip malzeme davranışı.....	101

Şekil 4.3: Kullanılan kanca uçlu çelik liflerin görünümü.....	102
Şekil 4.4: Betonun mekanik özellikleri için test düzeneği	104
Şekil 4.5: $w/c=0.45$, $V_f=\%0.5$ ve $L_f=40$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	105
Şekil 4.6: $w/c=0.45$, $V_f=\%0.5$ ve $L_f=50$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	105
Şekil 4.7: $w/c=0.45$, $V_f=\%0.5$ ve $L_f=60$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	106
Şekil 4.8: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.0$ ve $L_f=40$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	106
Şekil 4.9: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.0$ ve $L_f=50$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	107
Şekil 4.10: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.0$ ve $L_f=60$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	107
Şekil 4.11: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ ve $L_f=40$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	108
Şekil 4.12: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ ve $L_f=50$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	108
Şekil 4.13: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ ve $L_f=60$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	109
Şekil 4.14: $w/c=0.45$, $V_f=\%0.5$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40$ mm,50mm ve 60mm) için deneysel sonuçlar.....	109
Şekil 4.15: $w/c=0.45$, $V_f=\%0.5$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40$ mm,50mm ve 60mm) için fem sonuçları.....	110
Şekil 4.16: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.0$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40$ mm,50mm ve 60mm) için deneysel sonuçlar.....	110
Şekil 4.17: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.0$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40$ mm,50mm ve 60mm) için fem sonuçları.....	111
Şekil 4.18: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40$ mm,50mm ve 60mm) için deneysel sonuçlar.....	111
Şekil 4.19: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40$ mm,50mm ve 60mm) için fem sonuçları.....	112
Şekil 4.20: Test düzeneği.....	114
Şekil 4.21: SP45 malzeme için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	115
Şekil 4.22: SP60 malzeme için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları.....	115
Şekil 4.23: (a) yüzey basıncı uygulanan panel, (b) panelin arka yüzeyindeki mesnet detayları, (c) von-Misses gerilmeleri.....	117
Şekil 4.24: Panel üzerinde sınır koşullarının gösterimi.....	118
Şekil 4.25: Grafiklerde kullanılan kısaltmaların açıklamaları.....	121
Şekil 4.26: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi.....	121
Şekil 4.27: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi.....	122
Şekil 4.28: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi.....	122

Şekil 4.29: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	123
Şekil 4.30: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	123
Şekil 4.31: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	124
Şekil 4.32: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	124
Şekil 4.33: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	125
Şekil 4.34: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	125
Şekil 4.35: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	126
Şekil 4.36: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	126
Şekil 4.37: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	127
Şekil 4.38: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	127
Şekil 4.39: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	128
Şekil 4.40: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	128
Şekil 4.41: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	129
Şekil 4.42: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	129
Şekil 4.43: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	130
Şekil 4.44: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	130

Şekil 4.45: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	131
Şekil 4.46: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	131
Şekil 4.47: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	132
Şekil 4.48: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	132
Şekil 4.49: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	133
Şekil 4.50: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	133
Şekil 4.51: SP45 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	134
Şekil 4.52: SP45 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	134
Şekil 4.53: SP45 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	135
Şekil 4.54: SP45 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	135
Şekil 4.55: SP45 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	136
Şekil 4.56: SP45 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	136
Şekil 4.57: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	137
Şekil 4.58: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	137
Şekil 4.59: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	138
Şekil 4.60: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	138

Şekil 4.61: SP45 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	139
Şekil 4.62: SP45 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	139
Şekil 4.63: SP45 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	140
Şekil 4.64: SP45 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	140
Şekil 4.65: SP45 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	141
Şekil 4.66: SP45 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	141
Şekil 4.67: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	142
Şekil 4.68: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	142
Şekil 4.69: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	143
Şekil 4.70: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	143
Şekil 4.71: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	144
Şekil 4.72: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	144
Şekil 4.73: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	145
Şekil 4.74: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	145
Şekil 4.75: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	146
Şekil 4.76: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	146

Şekil 4.77: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	147
Şekil 4.78: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	147
Şekil 4.79: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	148
Şekil 4.80: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	148
Şekil 4.81: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	149
Şekil 4.82: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	149
Şekil 4.83: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	150
Şekil 4.84: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	150
Şekil 4.85: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	151
Şekil 4.86: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	151
Şekil 4.87: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	152
Şekil 4.88: SP60 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	152
Şekil 4.89: SP60 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	153
Şekil 4.90: SP60 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	153
Şekil 4.91: SP60 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	154
Şekil 4.92: SP60 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	154

Şekil 4.93: SP60 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	155
Şekil 4.94: SP60 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	155
Şekil 4.95: SP60 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	156
Şekil 4.96: SP60 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	156
Şekil 4.97: SP60 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	157
Şekil 4.98: SP60 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	157
Şekil 4.99: SP60 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	158
Şekil 4.100: SP60 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	158
Şekil 4.101: SP60 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	159
Şekil 4.102: SP60 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	159
Şekil 4.103: SP60 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	160
Şekil 4.104: SP60 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	160
Şekil 4.105: SP60 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	161
Şekil 4.106: SP60 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	161
Şekil 4.107: SP60 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi	162
Şekil 4.108: Nihai taşıma kapasitesinde kalınlığın açıklık ortası sehimine etkisi	163
Şekil 4.109: Gözlenen nihai taşıma kapasitesindeki değişim	164
Şekil 4.110: Nihai taşıma kapasitesinde gözlenen orta açıklık sapmasındaki değişim	164

Şekil 4.111: Gözlenen nihai orta açıklık sapmasındaki değişim	164
Şekil 4.112: 600 × 750 × 120 boyutlu SP45 panelin farklı sınır koşullarına göre karşılaştırılması.	166
Şekil 4.113: En boy oranının 2 farklı sınır koşuluna etkisi	166
Şekil 4.114: Farklı çelik lif içeriğine sahip (benzer sınır koşullarına ve boyuta sahip) panellerin davranışlarının karşılaştırılması.....	167
Şekil 5.1: Çelik lifli betonun basınç ve çekme altında davranışı.....	173
Şekil 5.2: Panelin üst ve alt yüzeylerinden alınan elemanlar	173
Şekil 5.3: 600x1350x120 boyutundaki SP45 malzemeye ve sınır şartı 2'ye ait panelin gerilme-zaman grafiği	173
Şekil 5.4: 1.karakteristik noktadaki yüzey basıncı-deplasman ilişkisi	174
Şekil 5.5: 1. ve 2.karakteristik noktadaki yüzey basıncı ilişkisi.....	174
Şekil 5.6: Yüzey basıncının çeşitli parametrelere göre dağılımı	175
Şekil 5.7: 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi.....	177
Şekil 5.8: 80 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	177
Şekil 5.9: 100 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	178
Şekil 5.10: 120 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	178
Şekil 5.11: 150 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	179
Şekil 5.12: $t=80$ mm ve $b_e/b=0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	179
Şekil 5.13: $t=80$ mm ve $b_e/b=0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	180
Şekil 5.14: $t=80$ mm ve $b_e/b=0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	180
Şekil 5.15: $t=80$ mm ve $b_e/b=0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	181
Şekil 5.16: $t=80$ mm ve $b_e/b=1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	181
Şekil 5.17: $t=100$ mm ve $b_e/b=0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	182
Şekil 5.18: $t=100$ mm ve $b_e/b=0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	182
Şekil 5.19: $t=100$ mm ve $b_e/b=0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	183
Şekil 5.20: $t=100$ mm ve $b_e/b=0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	183
Şekil 5.21: $t=100$ mm ve $b_e/b=1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	184
Şekil 5.22: $t=120$ mm ve $b_e/b=0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	184
Şekil 5.23: $t=120$ mm ve $b_e/b=0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	185
Şekil 5.24: $t=120$ mm ve $b_e/b=0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	185
Şekil 5.25: $t=120$ mm ve $b_e/b=0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	186

Şekil 5.26: $t=120$ mm ve $b_e/b = 1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	186
Şekil 5.27: $t=150$ mm $b_e/b = 0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	187
Şekil 5.28: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	187
Şekil 5.29: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	188
Şekil 5.30: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	188
Şekil 5.31: $t=150$ mm ve $b_e/b = 1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi	189
Şekil 5.32: 1 nokta için deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	190
Şekil 5.33: $L_e/L = 0.05$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	191
Şekil 5.34: $L_e/L = 0.056$ için 1. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	191
Şekil 5.35: $L_e/L = 0.056$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 29'un alt grupları)	192
Şekil 5.36: $L_e/L = 0.056$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 29'un alt grupları)	192
Şekil 5.37: $L_e/L = 0.056$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 29'un alt grupları)	193
Şekil 5.38: $L_e/L = 0.0625$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	193
Şekil 5.39: $L_e/L = 0.0667$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	194
Şekil 5.40: $L_e/L = 0.0714$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	194
Şekil 5.41: $L_e/L = 0.0714$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 35'in alt grupları)	195
Şekil 5.42: $L_e/L = 0.0714$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 35'in alt grupları)	195
Şekil 5.43: $L_e/L = 0.0714$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 35'in alt grupları)	196
Şekil 5.44: $L_e/L = 0.0833$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	196
Şekil 5.45: $L_e/L = 0.083$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 39'un alt grupları)	197
Şekil 5.46: $L_e/L = 0.0833$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 39'un alt grupları)	197
Şekil 5.47: $L_e/L = 0.1$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	198
Şekil 5.48: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları).....	198
Şekil 5.49: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları).....	199
Şekil 5.50: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları).....	199

Şekil 5.51: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları).....	200
Şekil 5.52: $L_e/L = 0.111$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	200
Şekil 5.53: $L_e/L = 0.111$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 47'nin alt grupları).....	201
Şekil 5.54: $L_e/L = 0.111$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 47'nin alt grupları).....	201
Şekil 5.55: $L_e/L = 0.111$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 47'nin alt grupları).....	202
Şekil 5.56: $L_e/L = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	202
Şekil 5.57: $L_e/L = 0.125$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 51'in alt grupları).....	203
Şekil 5.58: $L_e/L = 0.125$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 51'in alt grupları).....	203
Şekil 5.59: $L_e/L = 0.143$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	204
Şekil 5.60: $L_e/L = 0.143$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 54'ün alt grupları).....	204
Şekil 5.61: $L_e/L = 0.143$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 54'ün alt grupları).....	205
Şekil 5.62: $L_e/L = 0.143$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 54'ün alt grupları).....	205
Şekil 5.63: $L_e/L = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	206
Şekil 5.64: $L_e/L = 0.167$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 58'in alt grupları).....	206
Şekil 5.65: $L_e/L = 0.167$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 58'in alt grupları).....	207
Şekil 5.66: $L_e/L = 0.200$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	207
Şekil 5.67: $L_e/L = 0.200$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 61'in alt grupları).....	208
Şekil 5.68: $L_e/L = 0.200$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 61'in alt grupları).....	208
Şekil 5.69: $L_e/L = 0.200$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 61'in alt grupları).....	209
Şekil 5.70: $L_e/L = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	209
Şekil 5.71: $L_e/L = 0.250$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 65'in alt grupları).....	210
Şekil 5.72: $L_e/L = 0.250$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 65'in alt grupları).....	210
Şekil 5.73: $L_e/L = 0.333$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	211
Şekil 5.74: $L_e/L = 0.500$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	211
Şekil 5.75: $L_e/L = 1.00$ ve $b_e/b = 1.00$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	212

Şekil 5.76: Göçme noktası için basınç katsayısının α^2 ile değişimi	213
Şekil 5.77: 80 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	214
Şekil 5.78: 100 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	214
Şekil 5.79: 120 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	215
Şekil 5.80: 150 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	215
Şekil 5.81: $t=80$ mm ve $b_0/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	216
Şekil 5.82: $t=80$ mm ve $b_0/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	216
Şekil 5.83: $t=80$ mm ve $b_0/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	217
Şekil 5.84: $t=80$ mm ve $b_0/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	217
Şekil 5.85: $t=80$ mm ve $b_0/b = 1.00$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	218
Şekil 5.86: $t=100$ mm ve $b_0/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	218
Şekil 5.87: $t=100$ mm ve $b_0/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	219
Şekil 5.88: $t=100$ mm ve $b_0/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	219
Şekil 5.89: $t=100$ mm ve $b_0/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	220
Şekil 5.90: $t=100$ mm ve $b_0/b = 1.000$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	220
Şekil 5.91: $t=120$ mm ve $b_0/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	221
Şekil 5.92: $t=120$ mm ve $b_0/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	221
Şekil 5.93: $t=120$ mm ve $b_0/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	222
Şekil 5.94: $t=120$ mm ve $b_0/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	222
Şekil 5.95: $t=120$ mm ve $b_0/b = 1.000$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	223
Şekil 5.96: $t=150$ mm ve $b_0/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	223
Şekil 5.97: $t=150$ mm ve $b_0/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	224
Şekil 5.98: $t=150$ mm ve $b_0/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	224
Şekil 5.99: $t=150$ mm ve $b_0/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	225
Şekil 5.100: $t=150$ mm ve $b_0/b = 1.000$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi	225
Şekil 5.101: 2 nokta için deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	227

Şekil 5.102: $L_e/L=0.05$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	227
Şekil 5.103: $L_e/L=0.056$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	228
Şekil 5.104: $L_e/L=0.056$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 100'ün alt grupları)	228
Şekil 5.105: $L_e/L=0.056$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 100'ün alt grupları)	229
Şekil 5.106: $L_e/L=0.056$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 100'ün alt grupları)	229
Şekil 5.107: $L_e/L=0.0625$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	230
Şekil 5.108: $L_e/L=0.0667$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	230
Şekil 5.109: $L_e/L=0.0714$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	231
Şekil 5.110: $L_e/L=0.0714$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 106'nın alt grupları)	231
Şekil 5.111: $L_e/L=0.0714$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 106'nın alt grupları)	232
Şekil 5.112: $L_e/L=0.0714$ ve $b_e/b=0.500$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 106'nın alt grupları)	232
Şekil 5.113: $L_e/L=0.0833$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	233
Şekil 5.114: $L_e/L=0.083$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 110'un alt grupları)	233
Şekil 5.115: $L_e/L=0.0833$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 110'un alt grupları)	234
Şekil 5.116: $L_e/L=0.1$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	234
Şekil 5.117: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)	235
Şekil 5.118: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)	235
Şekil 5.119: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)	236
Şekil 5.120: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)	236
Şekil 5.121: $L_e/L=0.111$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	237
Şekil 5.122: $L_e/L=0.111$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 118'in alt grupları)	237
Şekil 5.123: $L_e/L=0.111$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 118'in alt grupları)	238
Şekil 5.124: $L_e/L=0.111$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 118'in alt grupları)	238
Şekil 5.125: $L_e/L=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	239
Şekil 5.126: $L_e/L=0.125$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 124'nin alt grupları)	239

Şekil 5.127: $L_e/L=0.125$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 124'nin alt grupları)	240
Şekil 5.128: $L_e/L=0.143$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	240
Şekil 5.129: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 127'in alt grupları)	241
Şekil 5.130: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 127'in alt grupları)	241
Şekil 5.131: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.500$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 127'in alt grupları).....	242
Şekil 5.132: $L_e/L=0.167$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	242
Şekil 5.133: $L_e/L=0.167$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 131'un alt grupları)	243
Şekil 5.134: $L_e/L=0.167$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 131'un alt grupları)	243
Şekil 5.135: $L_e/L=0.200$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	244
Şekil 5.136: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 134'ün alt grupları)	244
Şekil 5.137: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 134'ün alt grupları)	245
Şekil 5.138: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 134'ün alt grupları)	245
Şekil 5.139: $L_e/L=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	246
Şekil 5.140: $L_e/L=0.250$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 138'in alt grupları)	246
Şekil 5.141: $L_e/L=0.250$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 138'in alt grupları)	247
Şekil 5.142: $L_e/L=0.333$ ve $b_e/b=0.500$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	247
Şekil 5.143: $L_e/L=0.500$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi	248
Şekil 5.144: $L_e/L=1.00$ ve $b_e/b=1.00$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi.....	248
Şekil 5.145: Akma ve göçme noktasına ait deplasman değerlerinin ilişkisi (malzeme ayrımı yapmadan).....	249
Şekil 5.146: Akma ve göçme noktasına ait deplasman değerlerinin ilişkisi (SP45 ve SP60 ayrı)	250
Şekil 5.147: 1.karakteristik nokta yüzey basıncı değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması	251
Şekil 5.148: 1.karakteristik nokta deplasman değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması	251
Şekil 5.149: 2.karakteristik nokta yüzey basıncı değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması	252
Şekil 5.150: 2.karakteristik nokta deplasman değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması	252

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Çelik lifli betonarme dayanım sınıfları: karakteristik basınç dayanımı f_{ck} (silindirler), ortalama $f_{cm,fl}$ ve karakteristik $f_{ctk,fl}$ N/mm ² cinsinden eğilme çekme dayanımı; E_{fcm} kN/mm ² cinsinden ortalama sekant elastisite modülü	71
Tablo 2.2: Numune sayısının bir fonksiyonu olarak k_x	72
Tablo 2.3: LOP ve artık eğilme mukavemetleri için ampirik denklemler	83
Şekil tablosu ögesi bulunamadı.	
Tablo 4.1: Malzemeler için hesaplanan veriler	101
Tablo 4.2: Beton karışım oranları	103
Tablo 4.3: FRC45 ve FRC60 malzemeye ait karışım detayları	113
Tablo 4.4: Kullanılan beton malzemelere ait mekanik özellikler	113
Tablo 4.5: Sonlu eleman analizinde kullanılan beton parametreleri.....	117
Tablo 4.6: Parametreler ve detayları	118
Tablo 4.7: Sınır durumları ve açıklamaları	119
Tablo 4.8: Test matrisi	120
Tablo 4.9: Nihai taşıma kapasitesi (SP45 için)	168
Tablo 4.10: Nihai taşıma kapasitesindeki orta nokta deplasmanı (SP45 için)	169
Tablo 4.11: Nihai taşıma kapasitesi (SP60 için)	170
Tablo 4.12: Nihai taşıma kapasitesindeki orta nokta deplasmanı (SP60 için).	171

SEMBOL LİSTESİ

b	: Panel yüksekliği
b_e	: Kısa kenar mesnet aralığı
E_{fcm}	: Sekant modülü
E_c	: Betonun elastisite modülü
f_{ut-FRC}	: ULS için, çatlamış FRC'nin nihai çekme mukavemeti
f^{D}_{150}	: ASTM C1609/C1609M testinden ölçülen, artık eğilme mukavemeti
f^{D}_{600}	:
f_{Ftu}	: Nihai çekme artık mukavemeti
f_{Fts}	: Belirli çatlak genişlikleri için çatlama sonrası dayanım olarak tanımlanan, kullanılabilirlik artık dayanımı
$F_{R,i}$: Yük-CMOD eğrisi üzerindeki i noktasındaki artık yüküdür
$f_{R,i}$: Eşdeğer eğilme artık mukavemeti
$f_{R,3}$: Çatlak açıklığının 2,5 mm olduğu $i = 3$ noktasındaki artık mukavemet
$f_{R,1}$:
$f_{fck,L}$: LOP'un karakteristik değeri (N/mm ²)
$f_{fctm,L}$: LOP'un ortalama değeri (N/mm ²)
$f_{Ftu-FRC}$: FRC'nin nihai çekme mukavemeti
f_L	: Orantılılık sınırı
f_{fck}	: 28 günlük karakteristik silindir beton dayanımı
$f_{fck,küp}$: 28 günlük karakteristik küp beton dayanımı
h_{sp}	: Kirişin net yüksekliği
i	: 1, 2, 3 veya 4 değerini alan bir alt indis
I	: Atalet momenti
k	: Antiklastik eğrilik sabiti
k_x	: Numune sayısına bağlı bir faktör
L	: Panel genişliği
L_e	: Uzun kenar mesnet aralığı
M_c	: Antiklastik eğriliğin etkilerini içeren moment
M_{n-RC}	: Geleneksel bir betonarme kesit için nominal eğilme momenti
M_{n-FRC}	: FRC kesiti için nominal eğilme momenti
n	: numune sayısı
SP_1	: 1.karaktersitik nokta yüzey basıncı
SP_2	: 2.karaktersitik nokta yüzey basıncı
s_p	: standart sapma
t	: Panel kalınlığı
Δ_1	: 1.karaktersitik nokta deplasmanı
Δ_2	: 2.karaktersitik nokta deplasmanı
w	: çatlak genişliği
w_u	: belirli bir tasarım için nihai çatlak genişliği
σ_1	: ilk çatlamanın başlangıcında çekme gerilimi
σ_2	: kararlı yumuşama dalının başlangıcındaki gerilim
σ_3	: yumuşatma kolunun sonundaki gerilim
ε_1	: ilk çatlamanın başlangıcında çekme gerilimine karşılık gelen birim şekil değiştirme

- ϵ_2 : kararlı yumuşama dalının başlangıcındaki gerilime karşılık gelen birim şekil değiştirme
- ϵ_3 : yumuşatma kolunun sonundaki gerilime karşılık gelen birim şekil değiştirme
- ρ : eğilme elemanın eğrilik yarıçapı
- ϕ : Antiklastik eğrilik parametresi
- ν : Poisson oranı

KISALTMA LİSTESİ

3D	:	3 boyutlu
4D	:	4 boyutlu
5D	:	5 boyutlu
C1F1L1	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %0.5 ve 40 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F1L2	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %0.5 ve 50 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F1L3	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %0.5 ve 60 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F2L1	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %1.0 ve 40 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F2L2	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %1.0 ve 50 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F2L3	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %1.0 ve 60 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F3L1	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %1.5 ve 40 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F3L2	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %1.5 ve 50 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
C1F3L3	:	Su/çimento oranı 0.45, çelik lif hacim fraksiyonu %1.5 ve 60 mm lif uzunluğuna sahip olan beton
CDP	:	Concrete Damaged Plasticity
CMOD	:	Çatlak ağız açıklığı deplasmanı (Crack Mouth Opening Displacement)
exp	:	Deneysel çalışma sonuçları
fem	:	Sonlu elemanlar metodu sonuçları
FRC	:	Lifli beton (fiber reinforced concrete)
LOP	:	orantılılık sınırı
RC	:	Betonarme (lifsiz beton-reinforced concrete)
SP45	:	45 kg/m ³ çelik lif içeren beton
SP60	:	60 kg/m ³ çelik lif içeren beton
SFRC	:	Çelik lifli beton
SLS	:	hizmet verebilirlik sınır durumu
ULS	:	nihai sınır durumu

ÖNSÖZ

Öncelikle tüm doktora sürecimde en büyük destekçim olan, bu çalışma konusunu bana öneren, bilgisiyle, insanlığıyla, kişiliğiyle kendisine hayran olduğum saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Fatih Cetişli, sizinle çalışmak benim için bir onurdu. Tüm emekleriniz için sonsuz teşekkürler. İyi ki varsınız, hepte var olun hocam.

Saygıdeğer jüri üyelerim Prof. Dr. Şevket Murat Şenel, Prof. Dr. Mehmet İnel, Prof. Dr. Recep Birgül ve Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Saatci, sayenizde çok güzel bakış açıları kazandım, katkılarınız benim için çok değerliydi, çok teşekkürler.

Dr. Ali Kalkan... Analizlerimi daha hızlı yapabilmem için bilgisayar kasasını kolunun altına alıp da odamdan içeriye girişin hala göztümün önünde. Koridorda yürürken ayak tabanlarını vura vura gidişini ve şen kahkahaları çok özledik. Mekânın cennet, ruhun şad olsun, ışıklar içinde uyu güzel arkadaşım.

Değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Ersin Bahar ve Arş. Gör. Dr. Muhammet Kamal, son ana kadar verdiğiniz desteğiniz, dostluğunuz ve katkılarınız için çok teşekkür ederim, iyi ki varsınız.

Benim canım ailem... Hayattaki en büyük şansım böyle bir aileye doğmaktı sanırım. Gösterdiğiniz her türlü fedakârlık ve emek için canım babam Hacı Ersu ve canım annem Şerife Ersu, sizlere çok teşekkür ederim. Kardeş olmanın bu kadar güzel olduğunu hissettirdiğiniz ve beni her zaman desteklediğiniz için ablam Betül Tokluman, kardeşim Emin Ersu ve abim Faruk Tokluman hepimize çok teşekkür ederim. Varlıklarıyla, sesleriyle, görüntüleriyle bana enerji veren ve ışık saçan güzel yeğenlerim Aysel Mina'm ve Eylül Berra'm sizi çok seviyorum. Hepinizde iyi ki varsınız güzel ailem.

İkinci annem Filiz Gencer, en yoğun zamanımdaki tüm emek ve yardımların için ve değerli abim Umut Çakır desteklerin için çok teşekkür ederim, sizlerle aile olmakta çok büyük bir şans oldu benim için iyi ki varsınız. Rahmetli babamız Yaşar Çakır, en büyük destekçilerimden biri de sendin ve bugünü görsen ne kadar gururlanacağını ve mutlu olacağını çok iyi biliyorum, umarım bir yerlerden görüyorsundur.

Ve eşim, şansım, yol arkadaşım... İnşaat Yük. Müh. Hasan Utku Çakır, yeri geldi tüm stresimi karşıladın, yeri geldi sabaha kadar oturup benimle ders çalıştın. Hayatı bana kolaylaştırdığın için ve bu kadar anlamlı kıldığın için sana minnettarım. Hayat seninle çok güzel iyi ki varsın.

1. GİRİŞ

Dayanıklılığı, yangına karşı direnci, su geçirmezliği, ekonomik üretimi, enerji verimliliği, yerinde imalat gibi özelliklerinden dolayı beton en sık tercih edilen yapı malzemesidir. Betonun çekme dayanımının basınç dayanımına göre daha az olması ve bu olumsuz özelliğin giderilmeye ve/veya azaltılmaya çalışılması için yapılan araştırmalar bazı gelişmelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu gelişmelerden birisi de lifli betonların üretilmesidir.

Lifler metalik, polimerik, mineral veya tabii yapıdaki malzemelerden oluşur. Lifli beton özelliklerini etkileyen en önemli faktörler narinlik oranı, lif miktarı, lifin beton matris içinde homojen olarak dağılması, lifin tipi ve geometrisi olarak sayılabilir. Bu çalışmada betona göre çok daha yüksek elastisite modülüne sahip olan çelikteki, yüksek ve üniform çekme gerilmelerine karşılık düşük uzama özelliğinden yararlanmak adına betona katılacak liflerin, çelik malzemeden olması planlanmıştır.

Çelik lifli betonlar son yıllarda; onarım ve güçlendirme işlerinde, havaalanı ve limanlarda, baraj inşaatlarında, beton büz borularda, tünellerde, şev stabilitesi çalışmalarında ve patlamaya karşı dayanıklı yapılarda, beton dayanımına olan olumlu katkıları ve enerji yutma kapasitesinin yüksek olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Patlama yüklerine dayanıklı yapı tasarımı anlayışında amaç, yapının tamamen yıkılmaması ve ölümcül hasarlara neden olmamasıdır. Her ne kadar patlamanın şiddeti ve etkiyecek kuvvetlerin büyüklüğü tam olarak bilinemese de muhtemel değerlerin tahmin edilmesi sonucunda her türlü mühendislik hesabının yapılması mümkündür. Kullanılabilecek patlayıcı miktarı, patlama kaynağı ile hedef arasındaki minimum mesafe ve benzeri parametreler bilinirse, etkiyecek yük ve karşı koyacak kesitler hesaplanabilmektedir.

Yapı yönetmeliklerinde terörist saldırılarının ve patlamalara dayanıklı yapı tasarımına ilişkin hususların göz ardı edildiği görülmüştür. Patlamaların da deprem,

rüzgâr, sel gibi yapıları ve içinde yaşayanları tehdit eden bir tür afet olduğu gerçeği kabul edilmelidir.

1.1 Problemin Tanımı

Yaşadığımız çevredeki hemen hemen tüm barınma ve alt yapı tesislerinin yapımında kullanılan temel malzeme; kolay ve basit yapılabilirliği, ekonomikliği ve teknik özelliklerinden dolayı betondur. Basınç dayanımı yüksek çekme dayanımı az olan betonun zayıf özelliklerinin belirgin olarak iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi için beton içerisine değişik malzemeler katılarak teknik özellikleri geliştirilebilmektedir.

Günümüzde betonu değişik alanlarda kullanma ihtiyacının ortaya çıkması, beton teknolojisinde bazı gelişmelerin yaşanmasına neden olmuştur. Bu gelişmelerden birisi de lifli betonların üretilmesidir. Lifler çeşitli türdeki yapı malzemelerinden oluşabilmektedir. Narinlik oranı, lif miktarı, lifin beton matris içinde homojen olarak dağılması, lifin tipi ve geometrisi lifli betonun özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Buradaki narinlik oranı (ACI komitesi tarafından da lifi tanımlayan en önemli nümerik parametre), lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen “boy/çap” (aspect ratio) oranıdır.

Çeliğin elastisite modülünün diğer lif türlerinin elastisite modüllülerine kıyasla çok daha büyük olmasından dolayı yapıya gelen yükün taşınmasında çelik lif diğer lif türlerine göre avantaj sağlamaktadır. Ayrıca çelik liflerin en önemli özellikleri yüksek ve üniform çekme gerilmelerine karşılık düşük uzama özelliklerinin olmasıdır. Bu sebeple bu çalışmada beton içine katılacak lif türü çelik lif olarak belirlenmiştir.

Çelik lifli beton malzeme kullanılarak oluşturulmuş panel elemanlara yüzey basıncı verilmiş ve panellerin davranışları gözlemlenmiştir. Panel boyutları, panel kalınlığı, malzeme tipi ve mesnetlenme şartları çalışmada incelenen parametreleri oluşturmaktadır. Elde edilen analiz sonuçları kullanılarak lifli betonun mekanik özelliklerini tahmin edecek matematiksel model önerilmiştir.

1.2 Amaç ve Kapsam

Türkiye gibi deprem kuşağında yer alan ülkelerde gevrek bir malzeme olduğu bilinen betonun bu zayıf yönünün iyileştirilmesinin önemli olduğu açıktır. Çelik lifli betonun yapının sünekliğini arttırdığı bilinmektedir. Yapısal uygulamalarda çelik lifli beton sadece kırılmayı önlemek için kullanılmamakta, aynı zamanda betonun patlama gibi dinamik yükleme ve darbe mukavemetini arttırmak ve malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek için de betona çelik lif ilave edilebilmektedir.

Patlama büyük miktarda enerjinin çabuk ve ani olarak serbest kalması sonucu oluşan bir olaydır. Patlamanın yapılar üzerindeki etkisi, önceleri askeri amaçlar için ortaya çıkarken, günümüzde sivil hayatta da terör saldırıları ile karşımıza çıkmaya başlamıştır. Bu konunun kapsama alanına; patlayıcı silah depoları yapımı, çeşitli patlayıcı gaz ve sıvı depolarının yapımı, banka kasası veya askeri stratejik hedefler gibi patlayıcı ile saldırıya uğrayabilecek yapılar girmektedir.

Bu tez çalışması yapılandırılırken, çelik lifli panellerin yapıda birden fazla maksat ile kullanılabilmesi öngörülerek parametreler farklılaştırılma yoluna gidilmiştir. Bu kapsamda düzlem dışı yüklemelere karşı çalışması öngörülen çelik lifli beton paneller bir çerçeve sistem içinde dolgu duvar etkisi ile yapı sistemi davranışına etki etmesi muhtemel olduğundan bu panellerin yeri geldiğinde düzlem içi yüklemelere karşı da dayanım göstermesinin gerekli olabileceği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda ele alınan paneller için kiriş teorisine yakın olabilecek boyutlar ile modeller oluşturulmuştur. Ardından kiriş teorisindeki elastik eğilme davranışından yola çıkarak en uçtaki alt lifin çekme dayanımına ulaştığı an değerlendirilmiştir. Daha sonra da çelik lifli beton panelin kapasite olarak ulaşabildiği nokta ve bu noktadan sonraki davranışına dair bilgi toplanmaya çalışılmıştır. Sınır şartları ve panel boyutları farklılaşacağından dolayı özellikle sınır koşullarının etkisi değerlendirmeye alınmıştır. Sınır koşullarının değişimi beklenenin üzerinde davranışı etkilediği görülmüştür. Bu aslında beklenen bir davranış olmasına rağmen literatürde bu tarz bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde boyutlarla ilgili veya sürekli olarak tutulan kenarlarla (komşu iki kenar sürekli, karşı iki kenar sürekli, tek kenar sürekli, 3 kenar sürekli tutulu gibi) ilgili çalışmalar olsa da sınır koşullarının bu tez çalışmasında yapıldığı gibi aralıklı olması, yalın haliyle düzlem dışı yüzey basıncı doğrultusunda ötelenmenin

engellenmesi durumu hiç değerlendirilmemiştir. Bu sebeple bu tez çalışmasının literatüre bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.3 Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında incelenen önceki çalışmalar bu bölümde üç başlık altında toplanmıştır. Bunlardan ilki çelik lifli betonun mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan deneysel ve nümerik çalışmaları kapsamaktadır. Bu çalışmalar değerlendirilerek çelik lifli betonun basınç ve çekme altındaki davranışının modellenmesi aşamasında gerekli olabilecek veriler değerlendirilmiştir. İkinci başlıkta, çelik lifli betonların patlama ve darbe yükü etkisindeki davranışını gösteren çalışmalar ele alınmaktadır. Yapılan incelemeler neticesinde yüzey basıncı altında çelik lifli beton panellerin davranışın ne seviyede incelenmiş olduğu hakkında değerlendirmeler yapılmaya çalışılmıştır. İlk iki grupta yer alan literatür çalışmaları ışığı altında çelik lifli beton panellerin düzlem dışı yüzey basıncına (patlama çalışmaları hariç) tabi tutulmaları durumunda davranışına dair çalışmaların literatürde yer almadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, hali hazırda yürürlükte yer alan yönetmelik ve tasarım kodları esas alınarak üçüncü başlıkta tez çalışmasının mekanik alt yapısını ve matematiksel modelde kullanılan parametreleri destekleyecek çalışmalar değerlendirilmiştir.

1.3.1 SFRC'nin Mekanik Özellikleri ile İlgili Çalışmalar

Barros ve Figueiras (1997), beton yapıların birinci göçme modunun davranışı üzerinde çelik liflerin etkisini incelemiştir. Bunun için hasır çelik ve farklı lif oranlarıyla takviye edilmiş levha şeritleri üzerinde eğilme testleri yapılmıştır. Kullanılan lif içeriğine göre çatlama yükü artmıştır. Bununla birlikte yük taşıma kapasitesi ve süneklikte önemli bir artış ve lif içeriğinin artmasıyla daha küçük bir çatlak aralığı gözlemlenmiştir.

Gao ve diğ. (1997), yapmış olduğu çalışmada, sırasıyla 85.4 MPa ve 11.8 MPa'ya kadar basınç ve eğilme mukavemetine sahip çelik elyaf takviyeli, yüksek mukavemetli, hafif betonun mekanik özellikleri hakkında temel bilgiler sunulmaktadır. Çelik elyafın esneklik modülü ve Poisson'un beton oranı üzerindeki etkisi araştırılmış ve eğilme kırılma tokluğu hesaplanmıştır. Test sonuçları, lif hacmi fraksiyonunun ve en boy oranının eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğu üzerindeki etkisinin son derece belirgin olduğunu, basınç mukavemetinin sadece hafifçe iyileştirildiğini ve gerilme-basınç mukavemeti oranının açıkça arttığını göstermektedir.

Yapıların analizi ve tasarımı için basınç etkisindeki malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi gereklidir. Nataraja ve diğ. (1999) yapmış olduğu çalışmada, 30 ile 50 MPa arasında değişen basınç dayanıma sahip çelik lifle güçlendirilmiş beton için deneysel olarak gerilme-şekil değiştirme eğrisini oluşturmak adına bir girişim yapılmıştır. Üç farklı hacim fraksiyonuna ve 2 farklı en/boy oranına sahip lifler dikkate alınarak, betona lif eklenmesinin pik gerilme, pik gerilme altındaki şekil değiştirme ve betonun tokluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin hem yükselen hem de azalan kısımlarını oluşturmak için basit bir analitik model önerilmiştir.

Son zamanlarda, yeraltı inşaatlarında çelik takviyenin çelik elyaf takviyeli beton/püskürtme beton ile değiştirilmesi giderek daha yaygın hale geldi. Bu nedenle, çelik lifli beton ve geleneksel betonarme davranışının karşılaştırılması büyük önem taşımaktadır. Ding ve Kusterle 'ye ait çalışmada (1999), paneller için zımbalama ve eğilme sünekliğinin gelişimini değerlendirmek için, EFNARC'a uygun olarak laboratuvar betonu üzerinde deneysel araştırmalar yapılmıştır. Fiber takviyesi, zımbalama kapasitesini büyük ölçüde artırmıştır. Fiber içeriği 20 kg/m³'ü aştığında geleneksel betonarmedeki zımbalama göçmesi eğilme göçmesine dönüşmüştür. Fiber takviyesi, eğilme kapasitesini önemli ölçüde artırır, ancak SFR40'ın enerji absorpsiyonu, 10 ila 30 saatte SFRC60'inkinden daha yüksek çıkmıştır. Bu, 40 kg/m³'lük lif içeriğinin, 40 ila 60 kg/m³ arasındaki dozaj bölgesi için olası bir ekonomik nokta olabileceği anlamına gelmektedir.

Yüksek mukavemetli betonun (HSC) düşük çekme mukavemeti ve gerinim kapasiteleri ile belirgin kırılmalık, çelik liflerin eklenmesi ile aşılabılır. Song ve

Hwang (2004) yapmış oldukları çalışmada, yüksek mukavemetli çelik elyaf takviyeli betonun mekanik özelliklerini araştırmıştır. Özellikleri arasında basınç ve yarıma gerilme mukavemetleri, kopma modülü ve tokluk endeksi bulunmaktadır. Çelik lifler % 0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 hacim fraksiyonlarında ilave edilmiştir. Elyaf takviyeli betonun basınç dayanımı, HSC'ye göre %15,3'lük bir iyileştirme ile maksimuma %1.5 hacim fraksiyonunda ulaştı. Lif takviyeli betonun yarıma gerilme mukavemeti ve kopma modülü, hacim fraksiyonunun artırılmasıyla gelişerek, %2.0 hacim fraksiyonunda sırasıyla %98.3 ve %126.6 iyileşme sağladı. Elyaf takviyeli betonun tokluk endeksi, fraksiyonun artırılmasıyla iyileşti. Lifle güçlendirilmiş betonun basınç ve yarıma gerilme mukavemetlerini ve kopma modülünü tahmin etmek için mukavemet modelleri oluşturulmuştur.

Olivito ve Zuccarello (2010), çelik lif takviyeli betonun mekanik davranışı, lif içeriği ve karışım tasarım varyasyonları açısından sınıflandırılmasını ele almıştır. Hem karışım tasarımı (lif içeriği %1 ve %2) hem de elyaf uzunluğu bakımından farklı karışımlar hazırlanmış ve lifli betonun nihai basınç dayanımını elde etmek amacıyla tek eksenli sıkıştırma testleri yapılmıştır. İlk çatlak dayanımını ve süneklik indekslerini elde etmek için çentikli numuneler üzerinde dört nokta eğilme testleri yapılmıştır. Çelik elyaf takviyeli betonun (SFRC) çekme dayanımı hem deneysel bir prosedürden hem de analitik bir modelleme kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak, literatürde bildirilen ve doğrudan çekme kuvvetinin teorik olarak belirlenmesinde kullanılan analitik bir model, deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmak amacıyla uygulanmıştır ve iyi bir sonuç elde edilmiştir.

Susetyo ve diğ. (2011), çelik liflerin beton çatlamasını kontrol etmedeki etkinliğini değerlendirmek için düzlem içi saf kesme monotonik yükleme koşulları altında on adet beton panel test etmiştir. Test sonuçları sünek davranış, iyi bir kayma direnci ve çatlak kontrolü özellikleri sergileyen beton elemanların yeterli miktarda çelik lif takviyesiyle elde edilebileceğini göstermiştir.

Köksal ve diğ. (2013)'nin yapmış olduğu bu çalışmanın temel amacı, çelik lif takviyeli beton (SFRC) plaklar için, plak dayanıklılığını maksimize ederek ve karışım maliyetlerini minimize ederek, optimum en boy oranını ve hacim fraksiyonunu oluşturan optimum bir karışım tasarımı elde etmektir. Bu amaca ulaşmak için, 600x600x100 mm boyutlarında 60 plak örneği farklı SFRC karışımlarına dayanılarak

üretilep ve test edilmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak, optimum SFRC karışım tasarımını belirlemek için çok amaçlı bir eşzamanlı optimizasyon tekniğı kullanılmıştır. Optimizasyon sırasında dikkate alınan değışkenler, iki farklı beton sınıfı için fiberlerin en boy oranı ve hacim oranıdır. Her beton sınıfı için optimum karışım tasarımını belirlenmiştir.

Ou ve diğ. (2012), çelik elyaf takviyeli betonun (SFRC) yüksek takviye indeksine sahip basınç gerilme-gerinim davranışını karakterize etmek için silindirler üzerinde sıkıştırma testleri gerçekleştirmiştir. Çeşitli uzunluklarda ve en boy oranlarına sahip çengel uçlu lifler dikkate alınmıştır. Çelik liflerinin eklenmesinin, SFRC'nin esneklik ve basınç dayanımı modülü üzerinde çok az etkisi olmuştur. Uzun çelik fiberler ve daha düşük en boy oranına sahip fiberler, SFRC'nin tokluğunun daha büyük bir artışıyla sonuçlandığı görülmüştür.

Park ve diğ. (2012)'nin yapmış olduğı çalışmada, kullanılan liflerinin Ultra Yüksek Performanslı Hibrit Elyaf Takviyeli Betonun (UHP-HFRC) gerilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dört tip çelik makro fiber (farklı uzunluk veya geometriye sahip) ve bir tip çelik mikro fiber dikkate alınmıştır. Örneklerin üretilmesinde makro fiberin hacim içeriğı %1.0'da tutulurken, mikro fiberin hacim içeriğı %0.0 ila %1.5 arasında değışmektedir. UHP-HFRC'nin gerilme gerilme-gerinim eğrilerinin genel şekli, esas olarak makro-lif tipine bağılıdır, ancak mikro-liflerin eklenmesi, gerinim sertleşmesini ve çoklu çatlama davranışlarını olumlu yönde etkilemiştir. Bükülmüş geometriye sahip makro fiberlerden üretilen UHP-HFRC, çatlama sonrası mukavemet, gerinim kapasitesi ve çoklu mikro çatlama davranışı açısından en iyi performansı sağlarken, uzun, pürüzsüz makro fiberlerle üretilen UHP-HFRC en kötü performansı göstermiştir.

Çelik elyaf takviyeli beton (SFRC) teorisindeki en kritik noktalardan biri artık gerilmeleri ölçmektir. Liflerle beton etkileşimi nedeniyle, çatlamış bir bölüm, artık gerilmeler adı verilen çekme gerilmelerinin önemli bir bölümünü taşıyabilir. Liflerin şekil ve en-boy oranında büyük bir çeşitlilik ve sonuç olarak değışen bağ karakteristikleri nedeniyle, şu anda mevcut güvenilir yapı modelleri yoktur. Mevcut uygulamalarda, mukavemet, sapma ve çatlak genişliğı analizi için ihtiyaç duyulan artık gerilmeler, standart bükme testleri ile ölçülmektedir. Bununla birlikte, bu tür testler, yer değıştirme kontrollü yüklemeye dayanan nispeten karmaşık ve pahalı

ekipman gerektirir. Ayrıca, test sonuçları oldukça dağınıktır. Gribniak ve diğ. (2012), artık gerilmeleri tanımlamak için alternatif bir yaklaşım araştırmaktadır. Yaklaşım, eğilme beton elemanlarının sıradan takviye ve çelik liflerle momenti-eğrilik ilişkilerini kullanarak çatlak çekme betonunun eşdeğer gerilme-gerinim ilişkilerini elde etmeyi amaçlamaktadır.

Meskenas ve diğ. (2013)'nin yapmış olduğu çalışmada (2013), çelik lifli betonun gerilme-çatlak açıklığı ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Çentikli kirişler üzerinde yapılan üç nokta eğilme deneylerinden elde edilen deneysel veriler kullanılarak gerilmenin saptanması için ters teknik önerilmiştir. Elde edilen kalıcı gerilme-çatlak açıklığı ilişkileri, RILEM tekniği kullanılarak tanımlanan çatlama sonrası davranış ile karşılaştırılmıştır. Önerilen tekniğin SFRC'nin kalıcı gerilmelerinin belirlenmesi için doğru yöntem olduğu gözlemlenmiştir.

Susetyo ve diğ. (2013), saf kesme altında test edilen çelik lif takviyeli beton (SFRC) panellerin davranışının öngörülmesinde mevcut beton yapı modellerinin doğruluğunu araştırmak için sonlu elemanlar (SE) çalışmaları yapmıştır. Panellerin gerilme-sertleşme, gerilme-yumuşama ve basınç-yumuşama davranışları değerlendirilir ve Disturbed Stress Field Modeli (DSFM) ve mevcut beton yapı modelleri kullanılarak yapılan tahminlerle karşılaştırılmıştır. SE analiz sonuçları, mevcut kurucu modellerin geleneksel betonarme panellerin davranışını doğru şekilde simüle edebilmesine rağmen, modellerin SFRC elemanlarının güç ve deformasyon kapasitesini abarttığını göstermektedir.

Abrishambaf ve diğ. (2013)'nin çalışmasında, çelik lif ile güçlendirilmiş kendiliğinden yerleşen beton (SFRSCC) panellerin çatlama sonrası davranışında lif dağılımı ve yöneliminin etkisi incelenmiştir. Her bir SFRSCC panel üzerinden silindirik örnekler, lif dispersiyonunun ve oryantasyonun çekme performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için beton akış yönüne paralel ya da dik olarak çıkarılmıştır. Çatlama sonrası davranış hem yarma çekme testi hem de tek eksenli çekme testi ile değerlendirilmiştir. Beton akış yönüne paralel alınan örnekler, akış yönüne dik alınan örneklere göre, çatlama sonrası mukavemeti önemli ölçüde daha yüksek çıkmıştır.

Monotonik yüklemeye maruz kalan SFRC kirişlerinin davranışı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmasına rağmen, SFRC kirişlerinin döngüsel veya ters-döngüsel yükleme altındaki davranışları hakkında sınırlı araştırma bulunmaktadır. Nima Aghniaey'nın yaptığı yüksek lisans tezinde (2013), yük ters dönüşleri altında test edilen dokuz SFRC kiriş örneği üzerinde yapılan deneysel ve analitik bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Bu araştırma programının temel amacı, liflerin yapısal davranışlar üzerindeki etkisini araştırmak ve çelik liflerin enine takviyenin yerini alabilme yeteneğini incelemektir. Deneysel ve analitik sonuçlar, elyaf kullanımının, geliştirilmiş hasar toleransı ve pik sonrası süneklik dahil olmak üzere davranışta çeşitli iyileştirmeler sağladığını göstermektedir. Sonuçlar ayrıca çelik liflerin kirişlerde enine takviyenin azaltılmasına izin vermek için potansiyel olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Salehian ve diğ. (2014)'nin yapmış olduğu çalışmada, kenarları basit mesnetli kare panelin yük-deformasyon tepkisi üzerine SFRC'nin çatlak sonrası gerilme etkisini değerlendirmek için yapılan bir deneysel program tanımlanmıştır. Kare panel üzerinde yapılan testten sonra nümerik bir model geliştirilmiş ve dairesel bir eleman üzerinde elde edilen nümerik model ile parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Islam ve diğ. (2014), çelik lif katkılı kirişin kesme kapasitesini deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile araştırmış ve çalışma sonunda kesme kapasitesinin %30'lardan %170'e arttığı görülmüştür.

Abrishambaf ve diğ. (2015) çalışmasında, çatlaklı çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun uzun vadeli davranışını incelemeyi amaçlayan kapsamlı bir deneysel programın sonuçları tartışılmıştır. Birinci aşamada, başlangıç çatlak açma seviyesinin ($w_{cr} = 0.3$ ve 0.5 mm), uygulanan gerilme seviyesinin, lif oryantasyonunun / dispersiyonunun ve döküm noktasından mesafenin SFRSCC'nin eğilme sürünme davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, sürünme fenomeninin kalıntı eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir dizi monotonik test de yapılmıştır. $w_{cr} = 0.5$ mm serisinin, daha düşük bir başlangıç çatlak açıklığı olan serilere kıyasla daha yüksek sürünme katsayısı gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, SFRSCC'nin sünme performansı, döküm panel içindeki beton akışının yönünü dikkate alarak çıkarılan prizmatik numunelerin oryantasyonundan etkilenmiştir.

Kim ve diğ. (2015)'nin yapmış olduğu çalışmada, amorf metalik lif ve kancalı çelik lif takviyeli betonların statik mekanik özellikleri ve darbe dayanımı açısından karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuçta şu veriler elde edilmiştir: (1) Amorf metalik lif takviyeli beton, kancalı uçlu çelik lifli betona göre karıştırma sonucu akışkanlığının önemli bir kısmını kaybetti. Bunun nedeni, verilen bir lif hacmi oranı için, daha fazla sayıda lifin olması ve ince bir plak şekline sahip olmalarından dolayı kancalı çelik liften daha büyük bir spesifik yüzey alanı oluşturmalarıdır. (2) Bükülme mukavemeti açısından, amorf metalik lif takviyeli beton, kanca uçlu çelik lif takviyeli betondan daha büyük bir bükülme mukavemetine sahiptir, ancak çok az esneklik sergiler. (3) Fiber şeklinin, mermi darbelerinden kaynaklanan beton çatlakları üzerindeki etkileri de gözlenmiştir. Çelik lif takviyeli beton, amorf metalik lif takviyeli betona göre daha büyük bir kırılma enerjisine sahip olduğu halde, amorf metalik elyaf takviyeli betonun darbeye neden olan çatlaklara karşı daha etkili olduğu bulunmuştur. (4) Bu sonuçlara dayanarak, amorf metalik lifin, lif takviyeli çimento kompozit malzemeler ve yapılarında, yapısal malzemeler ve koruma panelleri için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Betonarme yapıların modellenmesi Abaqus yazılımı kullanılarak yapılabilir. Michal ve Andrze (2015) çalışmalarında, Abaqus programında uygulanan beton için hasarlı plastisite modelinin (Concrete Damaged Plasticity-CDP) kullanılmasına karar vermiştir. CDP'nin bazı parametreleri uygun ve gerçekçi sonuçlar elde etmek için belirleyicidir. Bu parametreler şunlardır: viskozite parametresi, p-q düzlemindeki dilatasyon açısı, akış potansiyeli dışmerkezliği, başlangıçtaki çift eksenli basınç verimi gerilmesinin başlangıç tek eksenli basınç verimi gerilmesine oranı. Diğer bir konu ise, betonun uygun bir kırılma enerjisinin tanımlanmasıdır. Çalışmada bir örnek beton numunesinin tek eksenli ve çift eksenli sıkıştırılması ve tek eksenli gerginliği ile ilgili sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar deneysel testlerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan sonra yukarıda belirtilen tüm parametreler rasyonel bir şekilde belirlenmiştir.

Betona çelik liflerin eklenmesi ile özellikleri kırılığandan süneklığe değiştirilir. Hafif beton kullanmak, ek yüklerde azalmaya izin verirken, kendiliğinden sıkıştırılmış beton, mevcut yapıların yenilenmesi veya güçlendirilmesi durumunda beton sıkışması için vibratör kullanımını önler. Iqbal ve diğ. (2015)'nin yapmış olduğu çalışma, mikro

çelik elyaf içeriğindeki değişikliğin, çelik elyaf takviyeli yüksek mukavemetli hafif kendiliğinden yerleşen betonun (SHLSCC) özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Taze beton karışımının işlenebilirliğini bulmak için çökme akışı testi yapılmıştır. Sertleştirilmiş betonun daha fazla basınç mukavemeti, yarıлма gerilme mukavemeti, elastikiyet modülü ve eğilme mukavemeti test edilmiştir. Taze ve sertleştirilmiş özelliklerindeki değişimi incelemek için farklı lif içerikli beş beton SHLSCC karışımı (% 0,% 0.5,% 0.75,% 1 ve% 1.25) hazırlanmıştır. Sonuçlar, çelik lif içeriği% 1 veya daha fazla olan SHLSCC'nin işlenebilirliği üzerinde güçlü bir etki olduğunu göstermektedir. Esneklik modülü değişmeden kalırken, basınç mukavemetinde yaklaşık% 12 azalma, yarıлма gerilme mukavemeti ve bükülme mukavemetinde sırasıyla% 37 ve% 110 artış olurken, esneklik modülü değişmeden kalır.

Abrishambaf ve diğ. (2016)'nin çalışmalarında, çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun laminer yapılarda mekanik davranışını belirlemek için deneysel ve sayısal bir yaklaşım sunulmaktadır. SFRSCC panelinden çıkarılan prizmatik numuneler üzerinde dört noktalı eğilme testleri yapıldı. Örneklerin davranışı daha sonra FEM çerçevesi altında modellenmiştir. SFRSCC düz beton ve ayrık çelik lifler olmak üzere iki fazlı bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Düz matrisin doğrusal olmayan malzeme davranışı, 3D smeared crack modeli kullanılarak simule edilirken, fiber güçlendirme mekanizmaları deneysel lif çekme testlerinden belirlenen mikro-mekanik davranış kuralları ile modellenmiştir.

Pikus (2016), çelik lifli beton için mevcut beton karışımı işlenebilirlik tahminleri parametrelerine genel bir bakış sunar. Çalışma hareketlilik, sertlik, yayılma, viskozite gibi standart beton işlenebilirlik parametrelerinin çelik lifli beton karışımları için kullanılamayacağını göstermektedir.

Moradi ve diğ. (2016)'ne ait çalışmada, demonte bir kompozit köprü tabliyesinde enine sınırlandırılmış prekast çelik-elyaf takviyeli beton (SFRC) levhaların davranışını araştırılmaktadır. On dört prekast SFRC levhası, statik nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Döşemelerinin yük taşıma kapasitesini arttırmak için harici sökülebilir kayışlar ve çapraz destekler kullanılarak tutulmuştur. Takviye çubuklarının konfigürasyonu ve oranı, beton basınç dayanımı, liflerin dozajı ve harici sınırlama sisteminin tipi (çapraz gerdirme/şerit) testlerdeki ana değişkenlerdi. %0,5

dozajlı çelik liflerin, çelik çubuk içermeyen, dışarıdan sınırlandırılmış prekast döşeme levhalarının yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceği ve enine sınırlandırıcı sistemin enerji bazlı sünekliği artırabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, geleneksel takviye çubuklarının bir kısmının yapısal çelik liflerle değiştirilmesinin, harici olarak kısıtlanmış SFRC/RC prekast güverte levhalarının enerji bazlı sünekliğini biraz iyileştirebileceği gösterilmiştir.

Wu ve diğ. (2016)'nin yapmış olduğu çalışmada, farklı lif muhtevasına sahip ($V_f = 0, \% 1, \% 2$ ve $\% 3$) üç farklı şekilli çelik lifin (straight, corrugated, and hooked-end) ultra yüksek performanslı betonun (UHPC) mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, artan lif içeriğinin ve deforme olmuş liflerin kullanımının, UHPC'nin akışkanlığını kademeli olarak azaltabileceğini ve UHPC'nin basınç ve eğilme davranışı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Çelik lif içeriğinin, UHPC'nin eğilme yükü sapma eğrisinin ilk çatlak mukavemeti ve ilk çatlak sapması üzerinde sınırlı etkiye sahip olduğu, ancak pik yük üzerinde önemli etkiler gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Mousavi (2017), çimentonun silis dumanı ile kısmen değişmesinin, çelik lifli ve çelik hasırlı basit mesnetli panellerin eğilme dayanımı ve çatlak gelişimine etkisini araştırmıştır. Çalışma neticesinde, çelik liflerin çatlama direnci ve eğilme kapasitesini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Nehme ve diğ. (2017), çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton panellerin farklı lif dozajı ve donatı dizilimini dikkate alarak çelik lifli betonun mekanik özelliklerini incelemek istemişlerdir. Çalışma neticesinde çelik lif içeriğinin artmasıyla kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğinin azaldığı ancak liflerin artmasıyla yük-deformasyon kapasitesinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Betonun çelik liflerle takviye edilmesinin, betonun gerilme kapasitesi, darbe dayanımı, enerji emilimi ve çekme dayanımı gibi özelliklerini geliştirebildiği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Son yıllarda yapılan bazı laboratuvar testleri çelik liflerin spiral geometrisinin süneklik, çatlak kontrol edilebilirliği, dinamik kuvvetler ve enerji emilimi açısından diğer lif tiplerine göre üstünlüğünü göstermiştir. Düz, kanca uçlu ve bükümlü çelik elyafların çekme davranışı birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Bununla birlikte, literatürdeki spiral liflerin çekilme davranışına odaklanan bir çalışma

yapılmamıştır. Hao ve Hao (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada, çelik lifin beton matrinden spiral geometrisi ile çekme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Ek olarak, kancalı uçlu çelik lifler de hazırlanmış ve karşılaştırma için test edilmiştir. Eğim uzunluğu, gömme uzunluğu ve bobin çapı gibi çeşitli geometrik özelliklere sahip olan spiral lifler farklı oranlarda beton matrinden çıkarılmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak, yerleştirme uzunluğu, çekme oranı, bobin çapı ve lif uzunluğunun etkileri araştırılmıştır. Test sonuçlarının analiz edilmesiyle, SFRC malzemelerinin ve yapılarının performansını daha da arttırmak için çengel uçlu liflerin ve spiral liflerin birleştirilmesi hibrit çelik lif takviye tekniği olarak önerilmiştir. Bu çalışmada yapılan laboratuvar testleri, bu tekniğin betonarme yapı kapasitesinin artırılmasındaki etkinliğini kanıtlamıştır.

Moradi ve diğ. (2017) yapmış olduğu çalışmada, enine sınırlandırılmış on beş adet, yarı yarıya ölçeklenmiş, parçalanabilir prekast RC/SFRC döşeme plakaları, orta noktasına uygulanan statik ve döngüsel yorulma yükü altında test edilmiştir. Ayrıca, geleneksel takviye donatı oranı ve konumu ile çelik lif dozajının (%0.25 ve %0.50) RC plakalarının yük taşıma kapasitesi ve yorulma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Kendiliğinden yerleşen betonun uygulanması pratikte geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bununla birlikte, uygulaması genellikle laboratuvar testlerinden elde edilen malzeme parametreleri hakkında bilgi eksikliği ile sınırlıdır, bu da ilerici bina yapılarının ve doğrusal olmayan sonlu eleman analizinin kullanılması gereken binaların tasarımında zorluklarla sonuçlanır. Sucharda ve diğ. (2017) yapmış olduğu çalışmada, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri için geçerli olan kendiliğinden yerleşen seçilmiş beton kirişlerin mekanik ve kırılma özelliklerinin tanımlanmasının sonuçlarını sunulmaktadır. İncelenen malzeme, iki tip ve üç hacim çelik fiber ile güçlendirilmiş yüksek performanslı bir betondur.

Dere ve Koroğlu (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada, düz ve güçlendirilmiş betonların doğrusal olmayan sonlu elemanlar modellemesi çalışılmıştır. Betonarme modelini etkileyen çeşitli parametreler tartışılmıştır. Betonarme yapı elemanlarının modellenmesinde beton hasarlı plastisite modeli (Concrete Damaged Plasticity) ile birlikte ABAQUS yazılım paketinin kullanılması önerilmiştir. ABAQUS'te etkili bir şekilde kullanılacak beton malzeme için basınç ve çekme tek eksenli gerilim-gerinim

ilişkisi ve hasar parametre eğrileri önerilmiştir. Önerilen kurucu ve hasar modellerinin performansı, basit doğrusal olmayan bir model ile doğrulanmıştır.

Betonarme perde duvarların alt köşesinde bulunan beton, düşük çekme dayanımı sayesinde düşey ve yatay yükler altında kolayca kırılır. Perde duvarların altındaki plastik kritik bölgede yüksek mukavemetli çelik lif takviyeli betonun (SFRHSC) dökülmesiyle perde duvarların sismik performansının iyileşmesi beklenmektedir. Lu ve diğ. (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada, daha önce belirlenmiş SFRHSC mekanik özelliklerine dayanarak, bir çeşit SFRHSC kompozit perde duvar geliştirilmiş ve çelik lif hacim fraksiyonunun SFRHSC kompozit perde duvarının doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. SFRHSC ve HSC, sırasıyla alt ve üst yarılar dökülmüş ve duvarların her bir sınır elemanına bir çelik profil yerleştirilmiştir. 1/2 ölçekli ve 2.25 kayma oranı ile dört SFRHSC kompozit perde duvarı düşük devirli yarı-statik testlere tabi tutulmuştur. Her bir örnek döngüsel olarak artan yanal yükler ve arızaya kadar sabit nispeten yüksek bir dikey yük altında test edilmiştir. % 0, % 1.0, % 1.5 ve % 2.0 oranında çelik lif hacmine sahip olan kompozit elemanların sismik performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, SFRHSC kompozit perde duvarın koordineli çalışma performansını ortaya koymuştur. SFRHSC kompozit numunesinin deformasyon kapasitesi, HSC kompozit perde duvarından daha yüksek çıkmış ve çelik lif çimento matrisinin çatlamasını önlediğinden eğilme deformasyonunun kademeli olarak iyileştirildiği görülmüştür. Çatlak ve hasar süreci ertelenmiş ve artan çelik lif hacim fraksiyonuyla hasar derecesi azaltılmıştır. Ayrıca, %2.0'lik bir lif hacim oranı kullanıldığında, enerji dağıtma yeteneği önemli ölçüde gelişmiştir.

Betonda takviye olarak lifli polimer (FRP) kumaşların kullanılması, yüksek çekme mukavemeti, korozyon direnci ve hafiflik gibi birçok avantaj sağlar. Meng ve diğ. (2018)'nin yaptığı çalışmada, FRP kumaş takviyeli ultra yüksek performanslı beton (UHPC) panellerin eğilme davranışları üzerinde deneysel ve mekanik çalışmalar sunulmaktadır. Cam lif takviyeli polimer (GFRP) ve karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kumaşlar incelenmiştir. GFRP ve CFRP kumaşların, yüksek mukavemetli harç ve mikro çelik lif içeren UHPC'nin mekanik özellikleri deneysel olarak değerlendirilmiştir. FRP kumaşı ve çimento esaslı matris arasındaki ara yüz özellikleri, itme-çekme testleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Farklı takviye

yapılandırmalarına sahip panellerin eğilme performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. GFRP veya CFRP kumaşının kullanılması, UHPC panellerinin bükülme özelliklerini arttırmış, ancak yüksek dayanımlı harç ile yapılan paneller için bükülme dayanımında herhangi bir artışa neden olmamıştır. FRP kumaş takviyeli UHPC panellerin eğilme davranışını anlamak ve tahmin etmek için mekanik bir analiz yapılır. Önerilen kumaş takviyeli UHPC panelin, hafif, yüksek performanslı kalıcı kalıplama sisteminin geliştirilmesi için umut verici olduğu gösterilmiştir. Bu kalıp, potansiyel olarak arttırılmış çatlak direnci ve uzatılmış servis ömrü ile kritik altyapının yapımında kullanılabilir.

Alsaif ve diğ. (2018), asfalt betonu veya polimere bağlı kauçuk yüzeylere alternatif olarak esnek beton kaplamalar için malzemeler geliştirmeyi ve çelik elyaf takviyeli kauçuklu beton (SFRRuC) üzerinde bir çalışma sunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, çelik liflerin (üretilen ve / veya geri dönüştürülmüş liflerin), atık lastik kauçuk (w_{tr}) içeren kauçuklanmış betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. On farklı karışımda incelenen ana parametreler kauçuk ve lif içerikleridir. Sonuçlar, RuC karışımlarına WTR karıştırılmasının, kauçuk içeriği nedeniyle eğilme dayanımı kaybını (geleneksel betona kıyasla % 50 ila % 9.6 oranında) önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. RuC'de liflerin kullanılması ayrıca yeterli bükülme mukavemetinin gelişmesini sağlayabilir ve gerilme kapasitesini ve pik sonrası enerji emilimini artırabilir, böylece SFRRuC'yi esnek döşemeler için ideal bir alternatif yapı malzemesi haline getirir.

Sun ve diğ. (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada, yüksek gerilme oranlı sıkıştırma yüküne maruz kalan çelik lifli betonun (SFRC) tek eksenli mekanik özellikleri hakkında deneysel bir çalışma sunulmaktadır. 6 farklı çelik lif hacmi fraksiyonunun (% 0.0, % 0.75, % 1.5, % 3.0, % 4.5 ve % 6.0) SFRC numuneleri üretildi ve 75 mm çapında bir bölünmüş Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) kullanılarak test edilmiştir. SHPB'nin iki temel varsayımının doğru kalmasını ve SFRC örneklerinde sabit gerilme oranının korunmasını sağlamak için dalga şekillendiriciler araştırılır. Elde edilen dinamik gerilme-birim şekil değiştirme ilişkilerine dayanarak, dinamik gerilme artış faktörü, fiber güçlendirme faktörü, kritik gerilme ve enerji emilimi hem gerilme hızı hem de fiber hacim oranı ile incelenmiştir. Bu, gerilme oranı etkisi ve düz beton ve SFRC'nin dinamik davranışı üzerindeki lif takviye etkisi

hakkında bir fikir verir. Şekil değiştirme etkisinin ve lif takviye etkisinin altında yatan mekanizmalar tartişılmaktadır.

Endüstriyel atıkların sürdürülebilir beton üretiminde kullanımı son yıllarda atık malzemelerin düşük maliyetli olmasından ve atık depolama alanlarına önemli bir yer kazandırılmasından ve ayrıca betonun performansını arttırmasından dolayı büyük ilgi görmüştür. Mohammadhosseini ve diğ. (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada, beton metal kompozit üretiminde atık metalize plastik (WMP) lif ve palm yağı yakıt külü (POFA) uygulanabilirliği, darbe dayanımı ve dayanım özellikleri değerlendirilerek incelenmiştir. WMP lifleri içeren %0 ila 1.25 arasında değişen, 20 mm uzunluğunda 20 beton karışımı sıradan Portland imentosundan (OPC) yapılmıştır. %20 POFA'nın OPC'yi ikame ettiği aynı lif içeriğine sahip farklı bir altı beton karışımı daha yapılmıştır. WMP liflerinin ve POFA'nın kombinasyonu, beton karışımlarının çökme değerlerini azaltmıştır. WMP liflerinin OPC ve POFA beton karışımlarına katılması, basınç dayanımını azaltmıştır. Bununla birlikte, 91 günlük kürlenme süresinde, POFA bazlı karışımlar, OPC bazlı karışımlardan daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde etmişlerdir. WMP lifleri ve POFA arasındaki pozitif etkileşim sonuç olarak darbe dayanımı, eğilme ve ayrılma çekme dayanımlarını geliştirmiş, böylece enerji emme kapasitesi ve beton sünekliği geliştirilmiştir. Sürdürülebilir beton kompozitlerinin üretiminde WMP liflerinin ve POFA'nın kullanılmasının, yapısal ve yapısal olmayan uygulamalarda kullanılabilecek beton bileşenlerinin darbe dayanımı ve dayanım özelliklerini arttırma potansiyeli olduğu sonucuna varılmıştır.

Beton düşük kırılma mukavemeti ve çekme gerilme kapasiteleri ile birlikte yüksek kırılmalığa sahiptir. Bu tür tatmin edici olmayan performans, betona elik liflerin eklenmesi ile geliştirilebilir. elik elyaf takviyeli beton (SFRC), üstün performansı nedeniyle son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Başlıca avantajları arasında makro çatlak yayılımındaki engelleme, mikro çatlakların makroskopik seviyeye çıkmasının önlenmesi, süneklikteki iyileşme ve ilk çatlak oluştuktan sonra artık mukavemet ve yüksek tokluk bulunmaktadır. Bu çalışmada, farklı uzunluk ve çaplarda elik liflerin eklenmesinin, üç beton dayanımı değeri için betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Abbass ve diğ. (2018) alışmalarında, üç su/imento oranıyla (0.25, 0.35 ve 0.45) üç uzunlukta (40, 50 ve 60 mm) ve iki çapta (0.62 ve 0.75 mm) kancalı uçlu lifler kullanmış ve elik elyaflar % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 olmak üzere

üç hacim fraksiyonu ile ilave edilmiştir. Otuz beton karışımı hazırlanmış ve sonuçlar, farklı su ve çimento oranlarına sahip çelik liflerin eklenmesinin, basınç mukavemetinde yaklaşık %10-25'lik bir artışla ve doğrudan çekme mukavemetinde yaklaşık %31-47 artışla betonun mekanik özelliklerinde önemli değişikliğe neden olduğunu göstermiştir.

Venkateshwaran ve diğ. (2018)'nin yaptıkları çalışmada, çatlak açılma yer değiştirme eğrilerine karşı gerilimi elde etmek için EN 14651'e göre yürütülen 69 çelik elyaf takviyeli beton (SFRC) prizmalar üzerinde 3 nokta eğilme testlerinin sonuçlarını sunulmaktadır. Fiber içeriği 20 kg/m³'ten daha fazla olan ve çok kancalı uçlu fiberler içeren SFRC prizmalarının, ilk çatlaktan sonra eğilmede sapma sertleştirme davranışı sergilediği bulunmuştur.

Borges ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, basitleştirilmiş bir DEWS (double edge wedge splitting) testi kullanarak düşük lif içeriğine sahip iki farklı lif takviyeli kompozitin (çelik lifli-SFRC ve makrosentetik lifli-MSFRC'nin) gerilme davranışı araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar DEWS test tepkisini etkileyen üç ana konuya odaklanmıştır: test yer değiştirme oranının etkisi, lif içeriğinin etkisi ve FRC'lerin ortotropisi. DEWS testi için başlangıçta önerilen minimumdan 10 kat daha büyük bir yer değiştirme hızı, ortalama çatlama sonrası mukavemetin saçılmasında geniş bir azalma sağlamıştır. Her iki FRC'nin (SFRC ve MSFRC) ortotropik davranışı, DEWS test oryantasyonu değiştirilerek açıkça tanımlanmıştır. DEWS testi, her iki kompozitten de lif içeriğini değiştirerek oluşan davranışsal farklılıkları tespit edebilmiştir. Çelik lif takviyesi, genel olarak, en yüksek yük taşıma kapasitesi bakımından daha etkili bir sonuç vermiştir. Bununla birlikte, makrosentetik liflerin kullanılması, özellikle numunenin çatlak bölgesinde çok sayıda kendi liflenme kapasiteleri nedeniyle, daha az saçılmış bir çatlama sonrası performansı ortaya koymuştur.

Endüstri inşaat sektöründe geleneksel malzemelerin kullanılmasıyla ortaya çıkan çevresel etkinin azaltılması ihtiyacı, bitkisel elyaflarla takviye edilmiş alternatif kompozit malzemelere dayanan araştırmaları teşvik etmiştir. Sánchez ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, geleneksel olmayan malzemeler kullanılarak inşa edilen panellerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde liflerin oryantasyonunun ve yüzey işlemlerinin etkisi analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, bitkisel liflerin

yüzeyine bir işlem uygulandığında kristallilik endeksinin ve ortalama pürüzlülüğün arttığını kanıtlamaktadır. Bu modifikasyonlar, emme kapasitesinin ve biyo-kompozit panellerin şişme yüzdesinin azaltılmasına katkıda bulunur, böylece kompozitin hizmet ömrü boyunca performansını artırır. Fiziksel karakterizasyonun sonuçları, fiberlerin oryantasyonunun biyo-kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkisini doğrulamıştır. Tek yönlü liflerle yapılan paneller daha yüksek yoğunluk değerleri, daha büyük boyutsal kararlılık ve daha düşük emme kapasitesi sergilemiştir. Mekanik testlerin sonuçları, bir plazma işlemi gerçekleştirilirken, özellikle malzeme eksenel yüklere maruz kaldığında (çekme, sıkıştırma) mekanik mukavemet ve kompozitin sertliğinin değerlerinin arttığını göstermiştir.

Feng ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, ultra yüksek performanslı hibrit lif takviyeli çimento esaslı kompozitin (UHP-HFRCC) penetrasyon direnci potansiyeli %2 lif içeriğinde incelenmiştir. Karşılaştırma analizleri için, çeşitli çimento karışımlarına sahip 12 grup UHP-HFRCC malzemesine karşı düz çimentolu kompozit (PCC) kullanılmıştır. Basınç dayanımını arttırmada polipropilen lif ve polivinil alkol liften daha iyi performans gösterdiğini belirten çelik lifin 7 ve 28 günlük basınç dayanımını belirlemek için tek eksenli sıkıştırma testleri yapılmıştır. Her karışım UHP-HFRCC hedefi için penetrasyon testleri yapılmış ve penetrasyon direnci performansı penetrasyon derinliği (DOP) ve krater alanı açısından değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, çelik lif takviyeli çimentolu kompozitin penetrasyon direnci gelişme potansiyelinin, polipropilen liflerin veya polivinil alkol liflerinin çimentolu kompozitinkine göre biraz daha ileri gittiğini göstermiştir. Çelik lif ve polipropilen lifin kombinasyonu penetrasyona karşı pozitif bir etkiye yol açarken, çelik lif ve polivinil alkol lifin çimentolu kompozitlere katılmasının genellikle olumsuz bir etki yarattığı gözlenmiştir.

Babaie ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada fiber tipi, içeriği ve hibridizasyonu içeren bir dizi fiber parametresinin polimer fiber takviyeli betonun (PFRC) ve çelik fiber takviyeli betonun (SFRC) mukavemeti ve sünekliği üzerindeki etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Çok sayıda silindirik ve prizmatik kiriş dökülmüş ve daha önce bahsedilen ana lif özelliklerinin değiştiği çeşitli testlere tabi tutulmuştur. SFRC'nin PFRC'ye kıyasla her mekanik özellikte üstün olduğu anlaşılmıştır. PFRC'nin çekme mukavemeti SFRC'den daha düşük ölçülmüştür. Fiber içeriğinin artırılması

çoğu durumda FRC'nin mekanik özelliklerini olumlu etkilemiştir. Farklı elyafların belirli bir elyaf karıştırma oranlarında hibridizasyonunun, daha aşındırıcı dirençli ve düşük maliyetli bir hibrit elyaf takviyeli betonun (HFRC) sünekliği ve mukavemeti üzerinde avantajlı etkileri olduğu gözlenmiştir.

Ribeiro ve Serna (2019)'nın yapmış olduğu çalışmada, betonarme bir modele dayanan çelik elyafli beton için basit bir sayısal model sunulmaktadır. Önerilen modelde beton, ANSYS kütüphanesinde bulunan kırılma malzemelere ayrılmış sonlu bir eleman kullanılarak modellenmiştir. Önerilen model Benidorm meydanının (İspanya) Duvarı'nın bir parçası olan kabuklara uygulanmış ve analizler, yapının kendi ağırlığı ve sıcaklık değişimleri dikkate alınarak duvar segmentleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçların yapısal davranışı iyi temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Jongvivatsakul ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, çelik lifli beton (SFRC) panelli, kayma için güçlendirilmiş betonarme (RC) kirişlerin performansları deney, analitik hesaplama ve sayısal analiz yoluyla incelenmiştir. Fiber hacim oranı, bağlantı tipi, cıvata sayısı ve çapının güçlendirilmiş kirişlerin yapısal tepkileri üzerindeki etkilerini araştırmak için, kirişlerin her iki tarafına da SFRC paneller kullanılarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel bir programı yürütülmüştür. Mevcut kayma direnci modeli, SFRC panellerinin kayma katkısı göz önüne alındığında test verilerini tartışmak için de kullanılır. Deneysel sonuçlar, SFRC panelleri kullanılarak güçlendirilen kirişlerin kayma etkinliğinin önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermektedir. Ayrıca bu güçlendirilmiş kirişlerin ABAQUS programında üç boyutlu (3B) olmayan doğrusal olmayan sonlu eleman (FE) analizleri de yapılmıştır. Deneysel ve analitik sonuçlar arasında uyum tespit edildikten sonra, Analitik çalışmayı tamamlamak için, panel kalınlığının, SFRC'nin basınç dayanımının ve kirişlerin performanslarındaki cıvata modelinin etkilerini daha da değerlendirmek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Sayısal ve deneysel analize dayanarak, güçlendirilmiş SFRC panellerinin diyagonal çatlağına dik olan ortalama çekme dayanımının basit formülasyonunu içeren bir kayma dirençli bir model, SFRC sisteminin çeşitli etkiler altında kesme katkısını tahmin etmek için kabul edilebilir doğrulukla önerilmektedir.

Michels ve diğ. (2013)'nin yapmış olduğu çalışmada, çelik fiber takviyeli betonun (SFRC) çatlama sonrası mukavemeti, enerji emilimi ve kırılma enerjisi üzerine deneysel ve sayısal bir araştırma sunulmaktadır. Yapılan araştırmanın amacı, fiber tipi, fiber dozajı ve numune boyutunun çelik fiber donatılı betonun çatlak sonrası davranışı üzerindeki etkisi üzerine bir çalışmadır. Diğer bir amaç, belirli bir deneysel test için çekmede gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini sağlayabilen sayısal bir prosedürünün geliştirilmesidir. Bu amaçla, plastik mafsal ve akma çizgisi teorisine dayalı bir kırılma modeli düşünölmüş ve ardından deneysel kuvvet-sehim eğrileri sayısal bir optimizasyon prosedürü ile uydurulmuştur. İlk adımda, bir SFRC tasarım önerisinin yanı sıra büyük ölçekli plakalar üzerinde 4 noktalı eğilme kiriş numuneleri üzerinde deneysel araştırma yapılmıştır. Bu sonuçlar, farklı malzeme ve geometri koşulları altında taşıma kuvvetlerinin ve enerji absorpsiyonlarının gelişimi hakkında ilk izlenimleri vermektedir. Fiber dozajı arttığında hem maksimum kuvvet hem de toplam enerji absorpsiyonunun arttığı gösterilebilir. Ayrıca, daha yüksek bir elyaf en-boy oranı, bahsedilen özellikler üzerinde de olumlu bir etkiye sahiptir. İkinci bir adımda, artan çekme gerilimi ile azalan gerilim evrimi ya üstel ya da tanjant hiperbolik varsayılarak, gerilimdeki iki çatlama sonrası kurucu yasa üzerinde simölasyon koduyla bir parametrik optimizasyon prosedürü gerçekleştirilmiştir. Üstel yasanın küçük sapma seviyelerinde daha yüksek hassasiyet sunmasına rağmen, hiperbolik bir ilişkinin deneysel eğrilerin daha doğru bir genel yaklaşımını sunduğu gösterilmiştir. Her ikisi için de kırılma enerjisinin değerlendirilmesi benzer değerleri ve eğilimleri ortaya çıkarır ve farklı numune boyutları arasındaki karşılaştırma, büyük ölçekli numunelerle uğraşırken daha düşük çekme mukavemeti ve kırılma enerjisi değerleri ile sonuçlanan bir boyut etkisini ortaya çıkarır .

Pérez ve diğ. (2021)'nin yapmış olduğu çalışmada, kanca uçlu çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özelliklerini, elastisite modölünü (E) ve kritik gerilme yoğunluk faktörünü (KIC), Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) uygulayarak dört nokta eğilme testi altındaki kirişlerin yatay ve dikey için yer değiştirme alanları değerlerini elde etmek için değerlendirilir. Düşey yer değiştirmeler ve çatlak ağız açıklığı yer değiştirmesine dayalı olarak, Timoshenko kirişi ve Griffith-Irwin tarafından önerilen kırılma modeli kullanılarak ters bir analizden E ve KIC değerleri elde edildi. Elde edilen sonuçlar, DIC'nin malzemelerin karakterizasyonu için geçerli ve verimli bir alternatif olduğunu göstermiştir.

Lee ve diğ. (2017)'nin yaptığı çalışmada, çift potansiyel kapasite modeli (DPCM) olarak adlandırılan çelik fiber takviyeli beton (SFRC) kirişler için bir kesme mukavemeti modeli önerilmektedir. Göz önünde bulundurulan kesitte, basınç tarafının ve çatlaklı çekme tarafının kesme katkıları dahil olmak üzere, baskın kesme yenilme modunu uygun bir şekilde göz önünde bulundurabilir. Önerilen yaklaşımda, çelik liflerin kesme katkısını hesaplamak için bir çatlak yüzeyinde çelik liflerin rastgele yönelimini ve bağ özelliklerini dikkate alabilen doğrudan çekme kuvveti transfer modeli (DTFTM) tanıtılmıştır. SFRC kirişlerin kesme testi sonuçları çeşitli referanslardan toplanmış ve önerilen DPCM'nin analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. DPCM'nin basitleştirilmiş bir versiyonu da yinelemeli hesaplama prosedürlerini azaltarak pratik uygulamalar için geliştirilmiştir.

Haido ve diğ. (2011)'nin yaptığı çalışmada, literatürde mevcut olan birçok deneysel veriye bağlı olarak, çelik lifli betonarme (SFRC) malzemenin yeni doğrusal olmayan malzeme kurucu matematiksel modellerinin formülasyonunu içermektedir. SFRC döşeme ve kirişlerin patlama ve darbe yükleri altındaki dinamik performansını araştırmak için sekiz düğümlü dejenere levha elemanları kullanıldı. Lifli beton malzemenin basınç davranışını simüle etmek için iki model, yani elastik mükemmel plastik ve gerinimle sertleşen plastisite modelleri kullanılır. Dinamik akma fonksiyonunun gerinim hızının bir fonksiyonu olduğu varsayılır. Von Karman varsayımlarını dikkate alarak toplam Lagrange yaklaşımına dayanan matematiksel modelde katmanlı yaklaşımdaki geometrik doğrusal olmama durumu ele alınmaktadır. Hareket denkleminin zaman entegrasyon çözümü için düzeltici-öngörü algoritmaları örtük Newmark benimsenmiştir. Beton çatlak deseni, bulaşmış sabit çatlak yaklaşımına göre belirlenmiştir. Mevcut sayısal çıktılar, sapmaları ve bozulma modelini içeren literatürde mevcut olan deneysel sonuçlarla uygun bir uyum göstermektedir.

Adhikary ve Mutsuyoshi (2006)'nin yaptığı çalışmada, çelik fiber takviyeli beton (SFRC) kirişlerin nihai kesme mukavemetini tahmin etmek için yapay sinir ağı modellerinin geliştirilmesini sunmaktadır. Literatürden elde edilen deneysel veriler kullanılarak iki model oluşturulmuştur ve sonuçlar birbirleriyle ve Swamy ve diğerleri tarafından önerilen formülle karşılaştırılmıştır. Ve Khuntia et al. Beş giriş parametrelili sinir ağı modelinin, kirişlerin kesme mukavemetini dört giriş parametrelili ağa göre daha

yakından tahmin ettiği bulunmuştur. Ayrıca, sinir ağı modelleri, SFRC kirişlerinin kesme mukavemetini yukarıda belirtilen formüllerden daha doğru bir şekilde tahmin eder. Ayrıca, tahmin edilen sonuçların doğruluğunun beton dayanımı, kesme açıklığı/derinlik oranı ve kiriş derinliği ile yanlı olmadığı bulunmuştur. Sınırlı parametrik çalışmalar, ağ modelinin RC kirişinin altında yatan kesme davranışını çok iyi yakaladığını göstermektedir.

Betonun basınç dayanımı (f_c) ve yarmada çekme dayanımı (f_{spt}), yapısal tasarımda iki önemli parametredir. Çekme testlerini gerçekleştirmenin karmaşıklığı, maliyeti ve zaman alıcı doğası nedeniyle, birçok araştırmacı bu özelliğın değerini basitleştirilmiş ancak doğru bir şekilde tahmin etmekle ilgilenmektedir. Behnood ve diğ. (2015)'nin yaptığı çalışmada, çelik fiber takviyeli ve takviyesiz betonların çekme mukavemetini (f_{spt}) tahmin etmek için doğrusal olmayan regresyon (NLR) analizi, yapay sinir ağı (YSA), destek vektör makinesi (SVM) ve M50 model ağacı (MT) tekniklerini sunmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen modeller ve diğeri araştırmacılar tarafından geliştirilen modeller dahil olmak üzere farklı modellerin performansını karşılaştırmak için hata ölçümleri kullanıldı. Sonuçlar, doğrusal olmayan regresyon analizinin, yapay sinir ağının, destek vektör makinesinin ve model ağacı algoritmalarının, çelik fiber takviyeli ve takviyesiz yapılan betonların yarma çekme mukavemetini tatmin edici bir doğrulukla tahmin edebileceğini göstermiştir. Ancak ANN, M50 model ağacı ve SVM gibi makine öğrenme teknikleri, NLR analizine kıyasla daha üstün modeller sağlamıştır.

Çelik elyaf katkılı betonarme (SFRC) uygulamaları, daha yüksek üst katmanlar, tünel kabukları, beton kanalizasyon boruları ve büyük endüstriyel binaların döşemeleri gibi alanlarda yaygınlaşmıştır. SFRC'nin geleneksel betonarme (RC) çerçevelere sahip binaların yük taşıyan elemanlarında kullanımı da hem enerji yutma kapasitesine hem de beton dayanımına olumlu katkısı nedeniyle son zamanlarda popülerlik kazanmaktadır. Özcan ve diğ. (2009)'nin yaptığı çalışmada (2009), üç SFRC kirişinin deneysel ve sonlu eleman analizini sunmaktadır. Bu amaçla 250x350x2000 mm boyutlarında üç adet SFRC kiriş 30 kg/m³ dozlu çelik lifli C20 beton sınıfı ve kesme etriyeli S420 çelik sınıfı kullanılarak üretilmektedir. SFRC kirişler, 28 gün boyunca nemli kürlendikten sonra, sertifikalı kiriş yükleme çerçevesinde dört noktadan yükleme düzeneği ile bükülmeye tabi tutulur. Testler

yüklerin kontrolü ile yapılır. Kirişler kırılıncaya kadar yüklenir ve çekme çelik çubuklar iki parçaya bölündüğünde yüklemeler durdurulur. Uygulanan yükler ve orta bölüm sapmaları, başlangıçtan nihai kırılmaya kadar her 5 kN yük artışında dikkatlice kaydedilir. Deneysel çalışmadan elde edilen doğrusal olmayan malzeme özellikleri kullanılarak modellenen SFRC kirişlerinden biri, ANSYS tarafından nihai kırılma çatlaklarına kadar analiz edilmiştir. Betonu modellemek için sekiz düğümlü katı tuğla elemanlar kullanılır. İç donatı, 3 boyutlu direk elemanları kullanılarak modellenmiştir. Modelleme sürecinde tam kirişin dörtte biri dikkate alınır. Sonlu elemanlar ve deneysel analizlerden elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılır. Sonlu elemanlar kırılma davranışının deneysel kırılma davranışı ile iyi bir uyum gösterdiği sonuçlardan görülmektedir.

Çelik elyaf takviyeli beton bileşimi için mevcut tasarım yaklaşımları, pratik olarak beton bileşenler arasındaki etkileşimi dikkate almaz. Tasarım verimliliğini ve doğruluğunu azaltır. Dvorkin ve diğ. (2011)'nin yaptığı çalışmada, katı karışımlara dayalı optimal çelik lifli ince taneli beton bileşiminin tasarımı için metodoloji ile ilgilidir. Bu tür beton, ince cidarlı hassas elemanların üretimi için kullanılır. Mevcut araştırma, ana faktörlerin (su-çimento oranı, lif içeriği, incelik ve kum miktarı) beton karışım sertliği, betonun basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisini bulmayı sağlar. Çalışma ayrıca somut özelliklerin karşılık gelen matematiksel modellerini elde etmeyi mümkün kılmıştır. Modellere dayalı olarak çelik lifli beton tasarımı için bir metodoloji geliştirilmiş ve uygun nomogramlar hazırlanmıştır. Önerilen metodoloji, betonun gerekli eğilme mukavemeti, kum inceliği ve beton karışımının işlenebilirliği dikkate alınarak optimal çelik lifli ince taneli beton bileşiminin elde edilmesini sağlar.

Ünal ve diğ. (2007)'nin yaptığı çalışmada, bulanık mantık sistemi (FLS) kullanılarak basınç altındaki çelik lif takviyeli betonun (SFRC) gerilme-şekil değiştirme eğrisini tahmin etmek için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ø150/300mm ebatlarında çelik lifli ve telsiz silindirik numuneler hazırlanmıştır. 0 (kontrol), 15, 30, 45 ve 60 kg/m³ oranlarında iki farklı çelik lif tipi (her ikisi de kanca uçlu) kullanılmıştır. Silindirik numunelerin 28 yaşı için gerilme-şekil değiştirme eğrileri tanımlanmıştır. İkinci olarak, SFRC için gerilim-şekil değiştirme eğrileri, bulanık mantık yaklaşımı

kullanılarak modellenmiş ve deneylerden ve modellemeden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak her iki sonuç arasında yakın bir ilişki görülmüştür.

Tlemat ve diğ. (2006)'nin yapmış olduğu çalışmada kullanılmış lastiklerden geri kazanılan çelik liflerle güçlendirilmiş beton için bir eğilme tasarımı çerçevesinin geliştirilmesine ilişkin kapsamlı bir çalışmanın çalışmasını sunmaktadır. Bu liflerle güçlendirilmiş çentikli beton prizmaların deneysel eğilme davranışı başlangıçta sunulmuştur. Karşılaştırma amacıyla, endüstriyel olarak üretilmiş liflerle güçlendirilmiş prizmalar da dikkate alınmıştır. Uygun çekme gerilimi-gerinim bloklarını üretmek için mevcut bir RILEM tasarım çerçevesini benimseme girişiminde bulunuldu, ancak çerçevenin temel parametreleriyle sorunlar belirlenmiştir. Çatlak yayılımının ve nötr eksen derinliğinin konumunun çekme gerilmesi dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analitik bir çalışmanın ardından, RILEM tarafından önerilen tek eksenli gerilme-şekil değiştirme modelinin yük taşıma kapasitesini olduğundan fazla tahmin ettiği ve daha gelişmiş analitik teknikler kullanılarak değiştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Son yıllarda prefabrikasyon endüstrisi, FRC araştırma projelerinde iş birliğine daha fazla ilgi göstermektedir. Minho Üniversitesi (UM) ve iki özel şirket tarafından konsorsiyumda kendiliğinden yerleşen çelik fiber takviyeli betonun (SCSFRC) geliştirilmesi için yürütülen araştırma, bu yeni stratejinin bir örneğidir. Barros ve diğ. (2004)'nin yaptığı bu çalışmanın ana görevleri şunlardır: rasyonel bir karışım tasarım yöntemi tasarlamak; en uygun malzeme özelliklerini ve laminer elemanların yapısal davranışlarını değerlendirmek ve sayısal araçlar geliştirmektir. Bu makale, SCSFRC projesinde benimsenen araştırma stratejisini göstermeyi amaçlamaktadır, çünkü bu, FRC alanında Portekiz'de en aktif olan UM araştırma grubu tarafından takip edilen metodolojinin tipik bir örneğidir. Bu çalışma, bina cephe uygulamaları için sandviç SCSFRC panelleri tasarlamak, üretmek ve tasarlamak için yürütülen deneysel ve sayısal araştırmalarla ilgilidir.

Bischoff ve diğ. (2003), SFRC elemanları ve statik yükler altındaki döşemeler üzerinde yapılan araştırma, eşdeğer miktarda donatı kullanıldığında geleneksel betonarme döşemelere kıyasla eşdeğer performans sağlayabileceklerini göstermiştir.

1.3.2 SFRC'nin Patlama ve Darbe Etkisine Karşı Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Vandenbergh ve Zwevegem (1990)'in yapmış olduğu çalışmada, çelik liflerin askeri sığınaklarda ve önemli görülen devlet binalarında kullanımı verilmiştir. Çalışmada, Dramix ZC 60/80 çelik lif tipi için 40 ve 60 kg/m³ dozajlı beton karışım oranları verilerek, Belçika telekomünikasyon binası ve uçak sığınak projelerinde kullanımı açıklanmıştır. Çalışma sonucunda, çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine sağladığı olumlu etkilerin, patlama yüklerine karşı da sağlayacağı açıklanmıştır.

Corley (2002)'nin çalışmasında, 1995 yılında Oklahoma kentinde bomba patlaması ile hasar gören Murrah federal yapısının incelenmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda; stratejik öneme sahip yapılarda, patlama yüklerinin de elverişsiz yük olarak hesaplarda dikkate alınması ile hasarların azalacağı ve ekonomik olabileceği rapor olarak sunulmuştur.

Abolhassan ve diğ. (2003)'nin yapmış olduğu çalışmada, yapının yakınında meydana gelen patlamaların yapıya verdiği basınç etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, patlayıcı ile oluşan basınç değerlerine karşı beton+çelik kompozit perdenin üstünlükleri verilirken, beton perdenin seçilen bir aks için ısı etkilerine karşı olumlu davranışları geliştirilen paket program yardımıyla modellenmiştir.

Li ve diğ. (2005)'nin yapmış olduğu çalışmada, sert bir merminin beton hedefler üzerindeki yerel darbe etkileri tartışılmıştır. Bildiri üç bölümden, ampirik formüllerden, analitik yöntemlerden ve sayısal modellemeden oluşmaktadır. Önceki çalışmaları incelemenin yanı sıra, devam etmekte olan araştırmalardan yeni sonuçlar dahil edilmiştir. Hem Imperial hem de SI birimlerinde penetrasyon derinliği, perforasyon ve sürtünme limitleri ve uygulama aralıkları ile ilgili ampirik formüller verilmiştir. Son zamanlarda, Birleşik Krallık nükleer güvenlik araştırma programının bir parçası olarak oluşturulan beton yapılar üzerindeki yerel etkilere ilişkin araştırma sonuçları burada ilk kez rapor edilmiştir. Darbeye veya patlamaya maruz kalan beton hedefleri için sayısal simülasyonun genel özellikleri, betonun yüksek zorlanma oranları altındaki kurucu denklemleri ve ilgili malzeme testleri tanımlanmıştır. Betonun tanımlanmamış tek eksenli basınç dayanımını belirlemeye yönelik mevcut

dinamik test yöntemleri, betonun dinamik kurucu denkleminde kilit bir parametredir ve kritik olarak değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Farklı gerilme oranlarında betonun dinamik basınç dayanımının belirlenmesinde mikro çatlakların dinamik büyümesinin rolünü anlamak için gerekli olan başka araştırmalar da tespit edilmiştir.

Vossoughi ve diğ. (2007)'nin yapmış olduğu çalışmada, sırasıyla Polipropilen ve Zylon kumaş tarafından korunan beton panellerin darbe davranışı sunulmuştur. Beton paneller farklı kalınlıkta dökülmüş ve çelik bir mermi tarafından darbeye maruz bırakılmıştır. İlk ve artık hızlar deneysel olarak ölçülmüş ve kumaşlı ve kumaşsız farklı beton paneller tarafından absorbe edilen enerji hesaplanmıştır. Birim kalınlık başına emilen enerji için üst ve alt sınırlar önerilmiştir ve penetrasyon sonuçları mevcut ampirik formüllerle karşılaştırılmıştır. Mevcut penetrasyon denklemlerinin, kumaş tarafından korunan beton için darbe parametrelerini doğru şekilde tahmin etmediği gösterilmiştir. Çalışma sonunda beton panellerin kalınlığının penetrasyon direnci üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Son yıllarda geliştirilen bir kompozit olan reaktif toz beton (RPC), betondan (yaklaşık 200 MPa) daha yüksek bir basınç dayanımı elde etmek için kürlenmiş özel bir karışımdır. Birkaç çelik lif eklemek, çekme ve eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve tokluk gibi mekanik özelliklerini belirgin şekilde artırabilir. Bu nedenle, RPC nükleer santrallerin muhafaza yapılarında ve askeri tesislerin korunmasında kullanım için oldukça ümit vericidir. Tai (2009)'nin yapmış olduğu çalışmada, ultra yüksek dayanımlı beton hedeflerin direnci yüksek hızlı darbe deneyleri ile değerlendirilmektedir. Test değişkenleri darbe hızını ve eklenen çelik elyaf miktarını içerir. Deneysel sonuçlar, RPC plakalarının, yüksek basınç dayanımlarından dolayı, normal beton (NC) plakalardan daha kırılğan olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, az miktarda çelik elyaf eklenmesi, hedef plakaların darbe direncini önemli ölçüde geliştirmiştir. Ayrıca, doğrusal olmayan sonlu elemanlar kodu LS-DYNA'ya dayanan sayısal bir simülasyon gerçekleştirilmiş ve simülasyonun sonuçları deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Kritik altyapıların bomba saldırılarına karşı korunması daha fazla dikkat gerektiriyor. Bu etkiyi azaltmak için etkili bir çözüm onları köpük malzeme kaplamasıyla korumaktır. Wu ve Sheikh (2013) çalışmalarında, kritik betonarme plakaları patlama yüklerine karşı koruyan hücresel bir katı olan, oldukça yüksek bir

patlama enerjisini emebilen metalik köpük kaplamanın özelliklerini araştırmaktadır. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar birbiri ile uyum içindedir.

Lin ve diğ. (2014)'nin yapmış olduğu çalışmada, betonarme panellerin LS-DYNA kullanılarak patlama yüküne yapısal tepkisinin simülasyonu için bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Eleman boyutunun betonun dinamik malzeme modeli üzerindeki etkisi araştırılmış ve çekme ve basınç altındaki betonun deformasyon hızı ayrı ayrı modelde hesaplanmıştır. Ayrıca yük ağırlıkları, emniyet mesafesi, panel kalınlığı ve donatı oranının betonarme panellerin patlama direncine etkisini araştırmak için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma sonucunda, patlayıcı yük kütlelerinin ve emniyet mesafesinin betonarme panellerin tepkisi üzerinde büyük etkiye sahip olduğu, panelin ortasındaki maksimum yer değiştirmenin patlayıcı yük kütleleri ve emniyet mesafesinin seçiminden büyük ölçüde etkilendiği ve betonarme panelin eğilmesinin panel kalınlığı ve donatı oranı artırılarak da düşürülebileceği gösterilmiştir.

Sert bir merminin beton bir hedef üzerindeki etkisi, farklı değişkenlerin ve ilgili fiziksel olayların etkilerini dikkate almadan doğru bir şekilde açıklanamayan karmaşık bir olaydır. Bu değişkenler arasında beton hedefteki donatı detayları bulunmaktadır. Abdel-Kader ve Fouda (2014)'nin yapmış olduğu çalışmada, 500x500x100 mm³ ebatta 26 beton örneğinin, 23 mm, 0,175 kg sert mermilerin etkisine olan tepkisi deneysel olarak incelenmiştir. Testler, bu tip yükleme altındaki betonun performansına donatı oranı ve tipinin etkisinin gözlenmesi amacıyla planlanmıştır. İncelenen değişkenler, donatı ağı ve çelik levha astarının (ön, arka ve hem ön hem arka) konumu idi. Ana bulgular, donatı ağının konumunun ön ve arka yüz kraterlerini etkilediğini göstermektedir. Ayrıca betonu ön ve arka çelik plakalarla kaplamak, delme direnci üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Mo ve diğ. (2014)'nin yapmış olduğu çalışmada, düz ve lif takviyeli palmye kabuklu (oil palm shell-OPS) beton panellerde (FROPSC) düşme çekici kullanılarak yapılan deneysel darbe testinin sonuçları sunulmaktadır. İncelenen değişkenler, ezilmemiş ve ezilmiş palmye kabuklu farklı çelik içerikleri (%0,75, %0,9, %1) ve polipropilen lif içerikleridir (%0,1, %0,25, %1). Ezilmemiş OPS'li FROPSC, ezilmiş OPS'li örneklere kıyasla daha yüksek başlangıç ve nihai darbe direnci geliştirmiştir. %0.9 çelik + %0.1 polipropilen (PP) hibrit-FROPSC içeren örnek, düz OPSC'den 60

kat daha yüksek olan yaklaşık 17 kJ'lik mükemmel darbe enerjisi geliştirmiştir. OPSC'ye hibrit liflerin eklenmesi, OPSC'nin hem darbe hem de çatlak büyüme direncini artırabilir, LWC ve hibrit liflerin birleşik etkisi inşaat maliyetlerini büyük ölçüde azaltabilir. Bununla birlikte, en iyi darbe direncini elde etmek için elyaf kombinasyonunun ne ölçüde kullanılabilceğinin belirsizliğı vardır. Bu nedenle, bu çalışmanın odak noktası farklı oranlardaki çelik-PP hibrit liflerinin FROPSC'nin darbe davranışına etkilerini araştırmaktır.

Pantelides ve diğ. (2014)'nin yapmış olduğu çalışmada, patlama altında betonarme panellerin deneysel sonuçları sunulmuştur. Testlerin temel amacı, patlama yükleri için simülasyon yöntemlerini doğrulamak için veri toplamaktı. Betonarme (RC) paneller; ek donatı olmadan lif takviyeli beton (FRC) paneller; çelik çubuklarla güçlendirilmiş FRC paneller; ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklarla güçlendirilmiş RC paneller olmak üzere 4 farklı duvarın performansını araştırmak için 1.2 m kare paneller patlama etkisine maruz bırakılmıştır. Panellerin performansı orta koruma, çok düşük koruma ve anti-terörizm standartlarının altında koruma olarak üç kategoriye ayrılmıştır. Deneyde çelik çubuklarla güçlendirilmiş FRC panellerin en iyi performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Aoude ve diğ. (2015)'nin yapmış olduğu çalışmada, ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton (UHPFRC) kolonların patlama yükü performansını inceleyen bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Deney programının bir parçası olarak, kompakt takviyeli kompozit (CRC), özel bir UHPFRC, ile inşa edilmiş dokuz tam ölçekli kolon, simüle edilmiş patlama yükü altında test edilmiş ve bir şok tüpü kullanarak çeşitli patlama basıncı impuls kombinasyonlarına maruz bırakılmıştır. Bu çalışmada ele alınan parametreler arasında beton tipi, lif içeriğı, lif özellikleri, enine donatı aralığı ve boyuna donatı oranı bulunmaktadır. Sonuçlar, UHPFRC kullanımının, maksimum ve artık yer değıştirmeleri azaltarak, hasar toleransını artırarak ve ikincil patlama parçalarını ortadan kaldırarak betonarme kolonların patlama performansını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir. Sonuçlar ayrıca lif içeriğı, lif özellikleri, sismik detaylandırma ve boyuna donatı oranının, UHPFRC kolonlarının patlama yükü davranışını ve arıza modunu etkileyebilecek önemli faktörler olduğunu göstermektedir.

Çelik lifli beton geleneksel olarak güçlendirilmiş betona göre daha yüksek sünekliğe sahip olduğu için patlama ve darbe yükü altında daha iyi performans göstermektedir. Yaygın amaçlı üretilmiş liflerin oldukça pahalı olması sebebiyle patlama ve darbe yüküne maruz kalan yapılarda daha uygun maliyetli atık malzemelerin kullanımının araştırılması fikriyle ortaya çıkan Foglar ve diğ. (2015)'nin yapmış olduğu çalışmada, düşük süneklik ve düşük dayanımlı atık çelik elyafların, bunların polipropilen elyaflarla kombinasyonunun betonun patlama performansına etkisi üzerine odaklanan saha deneylerinin sonuçları sunulmaktadır. Testler gerçek ölçekli prefabrik paneller ve panellerden belli bir mesafeye yerleştirilmiş 25 kg TNT yükleri kullanılarak yapılmıştır. Beton karışımına eklenen atık çelik liflerin, lifli betonun patlama performansı üzerinde minimum etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Yoo ve diğ. (2015)'nin yapmış olduğu çalışmada, yarı-statik ve darbe yükleri altında çelik lifli beton kirişlerin eğilme davranışlarını araştırmak amaçlanmıştır. Bunun için 3 farklı basınç dayanımı ve 4 farklı lif içeriğine sahip çelik lifli beton (SFRC) kirişler imal edilip test edilmiştir. Yarı statik yük söz konusu olduğunda lif içeriği ve dayanımı artırılarak eğilme dayanımı ve deformasyon kapasitesinde iyileşmeler olmuş ve lif içeriğindeki artışla yüksek tokluk gözlemlenmiştir. Darbe yükü durumunda potansiyel enerji ve dayanım artırılarak yük taşıma kapasitesinde artış görülmüştür. Lif içeriği ve dayanımındaki artışlar, çarpma hasarından sonra kalıcı eğilme performansında iyileşmelere neden olmuştur.

Çelik lif takviyeli betonun (SFRC) özellikleri arasında, çelik lif hacim oranı ve şekli, beton çarpma ve yüksek hızlı yüklemeye maruz kaldığında önemli bir rol oynar. Soufeiani ve diğ. (2016)'nin yaptığı çalışmada, düşme ağırlık testi, bölünmüş Hopkinson basınç çubuğu testi ve sallanan sarkaç testi gibi darbe testleriyle elde edilen maddi tepkiler sınıflandırılmış ve kısaca gösterilmiştir. Çeşitli lif takviyeli beton türlerinin çelik liflerle yapısal tepkileri tanıtılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu konunun önemi göz önüne alındığında, SFRC'nin değişen hacim fraksiyonları ve farklı yükleme hızları altındaki çelik liflerin şekilleriyle olan davranışına dair mevcut anlayışımızı geliştirmek için mevcut literatürün güncel bir incelemesi sunulmaktadır.

Feng ve diğ. (2016)'nin yapmış olduğu çalışmada, ultra katmanlı yüksek performanslı lif takviyeli beton (UHPRFC) ve zırh delici mermi etkisine maruz kalan

çelik zırhın dinamik tepkisini incelemek için deneysel ve sayısal araştırmalar yapılmıştır. İlk olarak, üç zırh çeliği ile bölümlendirilmiş UHPFRC hedef konfigürasyonunda 9 konik burun mermisi atma testi gerçekleştirilmiştir. Destek hedefindeki ölçülen penetrasyon derinliğine dayanarak, bileşik hedeflerin balistik verimi, Diferansiyel Verimlilik Faktörü ile kantitatif olarak analiz edilmiştir.

ABD’de 11 Eylül 2001’de meydana gelen terör eyleminden bu yana, nükleer santrallerin büyük ticari uçak kazalarına karşı korunması ortaya çıkmakta olan bir konudur. Nükleer santrallerin işletmedeki veya tasarımdaki emniyetinin doğrulanmasının yanı sıra, bu yapıların darbe direncini arttırmaya yönelik etkili yöntemler araştırılmıştır. Lif takviyeli beton (FRC) genellikle bu amaç için etkili bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Özellikle, FRC, gerilme dayanımı, süneklik ve tokluk gibi betonun gerilme davranışını geliştirmek için geliştirilmiştir. FRC'nin ana uygulama alanlarından biri patlamaya karşı korumalı veya patlamaya dayanıklı beton yapılarıdır. FRC uygulamasının yapısal davranış üzerindeki etkisini analitik olarak doğrulamak için, FRC'nin özel malzeme özellikleri, yapısal analiz programının malzeme modellemesine dahil edilmelidir. Jeon ve Jin (2016)’in yapmış olduğu çalışmada, malzeme davranışının çeşitli yönlerini temsil eden FRC'nin matematiksel modellemesini incelenmiştir. Normal beton ile karşılaştırıldığında FRC uygulamasıyla nükleer bir muhafaza binasının darbeye karşı direncinin artmış olduğunu göstermek adına iki sayısal örnek verilmiştir. Analiz sonuçları, yer değiştirmenin %43-67 oranında azaldığı, darbe direncinin lif türüne bağlı olarak %40-82 oranında arttığı gösterilmiştir.

Kıyılmış bazalt elyaf, çevre dostu üretim süreci ve mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle son zamanlarda betonarme donatı uygulamalarında popülerlik kazanmıştır. Branston ve diğ. (2016)’nin yapmış olduğu çalışmada, betonun mekanik davranışını arttırmada iki tür bazalt lifinin (“demet dağılım lifleri-bundle dispersion fibres” ve “küçük çubuklar-minibars”) bağlı yararını değerlendirmek amaçlanmıştır. Beton numuneleri, her liften üç farklı miktar ile dökülmüş, daha sonra eğilme ve düşme ağırlığı darbe testine göre değerlendirilmiştir. Elektron mikroskobu taranarak ara yüzey özellikleri de incelenmiştir. Sonuçlar, her iki lif türünün de ön çatlama mukavemetini arttırdığını, ancak yalnızca minibarların polimerden korunma nedeniyle çatlama sonrası davranışını arttırdığını göstermiştir.

Yao ve diğ. (2017)'nin yaptığı çalışmada, deneysel ve sayısal araştırmalar ile iç patlama yüküne maruz kalan çelik kutu yapılarının deformasyonunun ölçeklenmesi sorunu hedeflenmektedir. Geometrik benzerlik yasasına ("Replica") göre her biri Hopkinson'un ölçeklendirme yasasına dayanan üç farklı patlayıcı kütle ile üç farklı çelik faktörü ölçekleme seti tasarlandı. Sayısal sonuçlar, deneylerle iyi bir uyum gösterir ve sonuçlar, dış yüzeydeki şişkinliğin, sınır plakasının merkezi alanında ve her iki uçta burkulma içinde üretildiğini gösterir. Deformasyon şekilleri iyi benzerlik gösterse de levha merkezindeki sapmaların karşılaştırılmasında kusurlu benzerlik gözlemlenmiştir. Gözlemlenen ölçek değerleri, geometri ölçeğinden daha büyüktür ve fark, geometri ölçeğinin artmasıyla artar. Ayrıca, geleneksel ölçeklendirme yasasının sapmasının nedenleri tartışılmıştır. Daha sonra, deney sonuçlarına dayanarak, hem aşağı ölçekleme faktörü (boyut etkisi) hem de ölçek mesafesi (gerilme oranı etkisi) olarak değerlendirilen çelik kutu yapısı için ölçeklendirme yasasının düzeltilmesi yapıldı.

Patlama yüklü bir yapı analiz edildiğinde, iki ana tasarım sorunu ve bilimsel zorlukla karşılaşılmaktadır. İlk sorun, patlama ve patlayıcı türüne bağlı olan dinamik yükün girdilerinin (zaman-basınç dalgası) analizinden ve tanımlanmasından kaynaklanırken, ikinci sorun etki altındaki yapının gerçek dinamik tepkisinin analizi ile ilgilidir. Figuli ve diğ. (2017), patlama yüklü iki farklı en kesite sahip çelik kirişlerden (HEB100 ve IPE120) oluşan yapıların analizi yapmışlar ve deneysel gözlemleri, ABAQUS'te gerçekleştirilen tek serbestlik dereceli ve sonu elemanlar modellerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Yoo ve Banthia (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada, çeşitli etkili faktörleri göz önünde bulundurarak ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonun (UHPRFC) darbe ve patlama dirençleri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Malzeme düzeyinde, hıza bağlı lif çekme davranışı, dinamik sıkıştırma davranışı ve darbe çekme ve eğilme davranışları detaylı olarak incelenmiş ve normal betonun darbe direncini arttırmak için UHPRFC kullanmanın yararları tartışılmıştır. (1) UHPRFC'nin, lifli olan ve olmayan sıradan betondan çok daha yüksek enerjiyi dağıtabildiği görülmüştür. (2) Uzun düz çelik lif kullanımı, UHPRFC'nin yüksek hacimli fraksiyonlardaki deforme olmuş çelik liflere kıyasla darbe direncini arttırmada daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. (3) Lif yönelimi, UHPRFC'nin darbe direncini önemli ölçüde etkiler: daha fazla lif çekme

yükü yönünde hizalandığında, daha iyi darbe direnci elde edilmiştir. (4) Gerilme hızı ilişkisine göre dinamik artış faktörü üzerindeki boyut etkisi önemsizdir. UHPFRC kirişler, levhalar, kolonlar ve kompozit yapıların darbe ve patlama dirençleri de yapısal düzeyde incelenmiş ve çeşitli faydalı sonuçlar çıkarılmıştır.

Genellikle düşme ağırlığı testi, lif takviyeli betonun darbe performansını değerlendirmek için kullanılır. Bununla birlikte, düşme ağırlığı testinde çekicinin ağırlığı ve düşme yüksekliği hakkında tek tip parametre yoktur. Zhang ve diğ. (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada, kırıcının ağırlığının ve düşme yüksekliğinin, çelik lif ve polipropilen lif takviyeli betonun darbe performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar hem polipropilen lif hem de çelik lif takviyeli beton için, ilk darbe dayanımının (Si) ve son darbe dayanımının (Sf) düşme yüksekliğinin artmasıyla üssel olarak azaldığını göstermektedir.

Yüksek mukavemetli lifli betonun (HSFRC) birçok araştırmacı tarafından vurgulanan statik davranıştaki avantajları, dinamik yüklere dayanacak ümit verici bir malzeme olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, HSFRC yapısal elemanlarının patlama performansı ile ilgili deneysel sonuçlar hala sınırlıdır. Luccioni ve diğ. (2017)'ne ait çalışmada, uzun asmalı çelik liflerle güçlendirilmiş, 100 MPa'dan fazla basınç dayanımlı, yüksek mukavemetli beton kullanan keşif testlerinin sonuçları sunulmaktadır. Farklı lif içerikleri ile statik eğilme tepkisinde bulunan gelişmeler, patlama yükleri altında bulunanlarla karşılaştırılmıştır.

Ultra yüksek performanslı lifli beton (UHPFRC), darbelere ve şok yüklerine dayanacak ümit verici bir malzeme olarak kabul edilir. Statik ve dinamik yükler altında UHPFRC üyeleri için birçok fiziksel deney yapılmıştır. Bununla birlikte, sonlu elemanlar (FE) simülasyonlarında UHPFRC'nin kurucu modelinin rasyonelliğine daha az önem verilmiştir. Guo ve diğ. (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada, düşük hızlı darbe simülasyonları için yeterli bir kurucu UHPFRC modeli geliştirmek amaçlanmıştır. Patlama analizi için kullanılan Karagozian & Case beton (KCC) modelinin, darbenin neden olduğu tepkileri öngörmede düşük doğrulukta olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle, beton modellemede iyi davranan sürekli yüzey kapağı modeli (CSCM), mevcut deneysel veriler kullanılarak UHPFRC modeline değiştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, önerilen malzeme modelinin gerilme-sertleşme davranışını yeterince gösterebildiğini ve UHPFRC'nin tek eksenli ve üç eksenli

sıkıştırma kuvvetlerini önceden belirleyebildiğini göstermektedir. Önerilen kurucu model kullanılarak elde edilen darbeye bağlı tepkilerin, deneysel sonuçlarla çok iyi uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Yooa ve Banthia (2019)'nın yapmış olduğu çalışmada, çeşitli lifler içeren normal lif takviyeli betonların (FRC'ler) darbe direncinin teknik durumu incelenmiştir. İlk olarak, mevcut olan çeşitli darbe testi yöntemleri ve kapsamlı literatür taraması sunulmuştur. Daha sonra, elyaf türünden bağımsız olarak darbe yükü altındaki FRC'lerin ortak özellikleri, örneğin darbe altında artan dayanımın nedenleri, boyutların darbe direnci üzerindeki etkisi ve gerilme hızı duyarlılığını etkileyen bazı faktörler (yani matris gücü, yükleme koşulları ve elyafın varlığı) tartışılmıştır. Ayrıca, çeşitli elyaflarla (yani çelik, polimerik, karbon, bazalt, doğal ve hibrit elyaflar) FRC'lerin kapsamlı darbe dirençleri farklı yükleme koşulları altında incelenmiştir. FRC'lerin darbe özellikleri çeşitli liflerle özetlendikten sonra, FRC'lerin lif tipine göre karşılaştırmalı darbe direnci, hangi tipte darbe direncinin en iyi şekilde iyileştirildiğini belirlemek için değerlendirilmiştir. Son olarak, ek çimentolu malzemelerin (SCM), yani uçucu kül, silis dumanı ve cürufunun, FRC'lerin darbe dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir ve darbe etkisinin artmasına neden olan bazı SCM ve elyaf türleri kombinasyonları önerilmiştir.

Çelik lif takviyeli betonun (SFRC) koruyucu yapılarda kullanılması, üstün mekanik özellikleri nedeniyle dünya çapında ilgi görmüştür. Şu anda, hidrokod malzeme modelleri, darbe ve patlama yüklerine maruz SFRC'nin dinamik davranışını simüle etmek için sıklıkla kullanılmıştır. Bununla birlikte, bu malzeme modelleri normal beton için geliştirildiğinden, model kalibrasyonu için çok fazla değer gerekir ve kayma genişlemesinin ihmal edilmesi ve gerinim oranının yanlış değerlendirilmesi gibi diğer dezavantajları sayısal tahminlerde yanlışlıklara yol açabilir. Yanga ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, SFRC için hasar oluşumunun, kayma genişlemesinin ve zorlama oranına bağlı malzeme özelliklerinin uygun şekilde dikkate alındığı yeni bir kurucu malzeme modeli geliştirilmiştir. Yeni malzeme modeli, basit giriş parametreleriyle SFRC'nin mekanik davranışlarını (yani her iki sıkıştırma ve gerilmede gerilme sertleşmesi ve yumuşaması) doğru bir şekilde yakalayabilir. SFRC bileşenlerinin çeşitli yükleme koşulları altında yapısal davranışını simüle etmek için

LS-DYNA sonlu eleman koduna dahil edilmiştir. Yeni malzeme modelinin etkinliği ve doğruluğu rapor edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Çok sayıda çalışma, çelik lif takviyeli betonun (SFRC) kullanılmasının ve lif takviyeli polimer (FRP) kompozitlerin güçlendirilmesinin, betonarme (RC) yapıların darbe ve patlayıcı yüklere karşı dayanıklılığını ve sünekliğini artırabileceğini göstermiştir. FRP ve beton arasındaki arayüz, FRP ile güçlendirilmiş yapıların dinamik yüklemeye maruz kalan en zayıf kısımlarından biri olarak tanımlanmıştır. FRP ile güçlendirilmiş betonarme (RC) yapıların düzgün bir şekilde analiz edilmesi ve tasarlanması için, FRP ile beton arasındaki dinamik bağlanma kuvvetinin anlaşılması önemlidir. Yuan ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, bazalt lifi (BFRP) tabakaları ile SFRC arasındaki dinamik ara yüzey davranışına ilişkin deneysel bir araştırma yapılmıştır. Beton prizmalarda çekme dayanımlarını arttırmak için üç farklı çelik lif hacmi (%0.5, %1.0 ve %1.5) kullanılmıştır. Yüksek gerilme hızı elde etmek için, 8 m / s'ye kadar çeşitli yükleme hızlarında tek tur kesme testleri yapılmıştır. Bu çalışmada, gerilme dağılımı, bağ kuvveti ve bağ-kayma tepkisi gibi deneysel sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır. Fiber hacmini ve gerilme oranını içeren bir ampirik dinamik bağ-kayma modeli önerilmiş ve doğrulanmıştır.

Terör saldırıları gibi özel durumlarda beton yapılar zaman zaman ateşli silahlar gibi darbe yüklerine maruz kalmaktadır. Beton gevrek olduğundan, darbe yükleri altında genellikle birkaç parçaya ayrılır. Bu kırılma azaltmak için genellikle lifler betona dahil edilir. Jamnam ve diğ. (2020)'nin yapmış olduğu çalışmada (2020), farklı geometrilere sahip mermi darbe yüklerine maruz kalan çelik lifli betonarme paneller incelenmiştir. Mermi şeklindeki çarpma tertibatları, sırasıyla 468, 1972 ve 3259 J namli enerjisine ve 9, 11 ve 7.62 mm olmak üzere üç farklı kalibre boyutuna sahiptir. Kancalı uç tipi çelik lifler, %1-3'lük 3 hacim oranında kullanılmıştır. Numuneler, 400x400 mm boyutlarında ve 10 ila 100 mm arasında değişen kalınlıklarda kare panellere dökülmüştür. Her panel merkezde tek bir darbeye maruz kalmıştır. Hız (darbe olayı öncesi ve sonrası), arıza modları ve parçalanma çapları biçimindeki veriler toplanmıştır. Sonuçlar, panellerde yaygın olarak dört tipik arıza modunun bulunduğunu gösterdi: perforasyon, kabuklanma, parçalanma ve çatlama. Delici tip mermiler için kalınlık, panellerin darbe dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadı. Bununla birlikte, büyük ve kör uçlu mermiler için, yeterli darbe direncini sağlamak

için hem kalınlık hem de lif hacim oranı birlikte düşünölmelidir. Arıza modlarının esas olarak panel kalınlığına ve lif içeriğine bağılı olduğu bulundu. Aynı tip mermi altında, arıza modlarının perforasyondan kabuklanma veya kabarma veya hasar olmamasına kayması, artan panel kalınlığının ve fiber içeriğinin sonucuydu.

Yusof ve diğ. (2010)'nin yapmış olduğu çalışmada, patlayıcı yüklemeye maruz kalan düz betonarme ve normal dayanımlı çelik lifli betonarme panellerin (SFRC) davranışı üzerine deneysel bir araştırmanın sonuçları sunulmaktadır. Deney, Pertahanan Nasional Malezya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Patlama Araştırma Birimi tarafından gerçekleştirilmiştir. 600mm x 600mm x 100mm boyutlarında toplam 8 adet betonarme panel test edilmiştir. Çelik fiber takviyeli beton paneller, üç farklı hacim oranında (%0.5, %1.0 ve %1.5) kancalı çelik fiber içermektedir. Paneller, 0,6 m'lik bir mesafeye yerleştirilmiş 1 kg'lık patlayıcı yükün patlamasıyla oluşturulan patlayıcı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bu araştırma, %1.5 hacim oranı içeren çelik lifli betonarme panelin patlayıcı yükleme altında en iyi performansı verdiğini göstermektedir.

Teng ve diğ. (2008) yaptığı çalışmada, darbe yüklemesine maruz kalan çelik fiber takviyeli betonun (SFRC) dinamik tepkisini incelemek için hidrodinamik sonlu eleman kodu LS-DYNA'yı kullanmıştır. Elastik-plastik hidrodinamik malzeme modeli, SFRC'nin doğrusal olmayan yumuşama davranışını tablo haline getirilmiş gerilme-şekil değıştirme eğrisi ile modellemek için kullanıldı. SFRC'nin malzeme özelliklerini ve doğrusal olmayan gerilme gerinim eğrisini elde etmek için tek eksenli sıkıştırma testi ve yarma testi yapıldı. Bu yazıda element erozyon parametrelerini belirlemenin basit bir yolu önerilmiştir. Önerilen yöntemle tahmin edilen SFRC hedefinin arka yüzeyindeki merminin artık hızı ve kabuklanma çapları, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir. Önerilen metodoloji, askeri yapıların, nükleer santrallerin ve diğ. tesislerin yüksek hızlı mermilere karşı korunmasını tasarlamak için kullanışlı ve verimlidir.

Ye ve diğ. (2018)'nin yaptığı çalışmada, dinamik yapı denklemini analiz etmek için çelik fiber takviyeli beton (SFRC) numuneleri üzerinde dinamik darbe testlerinin deneylerini sunmaktadır. %0, %0.75 ve %1,5 fiber hacim oranına sahip SFRC'nin dinamik sıkıştırma deneyi, U75 mm çaplı bölünmüş Hopkinson basınç çubuğu deney sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece farklı gerinim oranları altında farklı

çelik lif içerikleri ve gerilme-gerinim eğrileri elde edilir. Sonuçlar, SFRC'nin tepe gerinim değeri ve tepe geriliminin, elyaf içeriği ve gerinim hızı ile aynı anda arttığını gösterdi. Holmquist-Johnson-Cook yapısal gerinim hızı etkisinin tanımı ve farklı gerinim oranlarının gerilim-gerinim eğrileri temelinde, sıkıştırma altında SFRC kompozitinin dinamik bir hasar oluşturucu modeli önerilmiştir. Önerilen beton malzeme dinamik yapı modeli, doğrudan gerinim, gerinim oranı, malzeme mukavemet faktörü ve çelik lif içerik faktörüne bağlıdır. Simülasyon ve deneysel eğriler yoluyla, karşılık gelen malzeme parametreleri elde edilir ve bu kurucu modelin kullanılmasının, uydurma sonuçlarının deneysel verilerle doğru bir şekilde uyuşmasına izin verdiğini gösterir.

Nataraja ve diğ. (2005), çelik liflerin beton malzemenin darbe direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini, malzemeyi darbe yüklerine maruz kalan yapılar için uygun bir malzeme haline getirdiğini belirtmiştir. Genel olarak, SFRC'nin yüksek yüklere maruz kalan yapısal levhalar için dikkate alınması gereken mühendislik ve ekonomik açıdan potansiyel olarak en faydalı malzeme türü olduğunu göstermektedir.

1.3.3 Plak Elemanlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Silindirik kabukların analizinde sınır koşullarının etkisi çok önemlidir ve zor deneysel simülasyonu nedeniyle literatürde nadiren çalışılmaktadır. Kabuk çatılar gibi büyük yapılar için, sınır mesnetlerinin türü, gerilmeleri ve sehimleri en aza indirebilecek ana faktörler arasındadır. Temami ve diğ. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, rijitleştirilmiş ve berkitilmemiş silindirik kabuklar için farklı sınır mesnetlerinin etkisinin deneysel ve sayısal incelemeleri yapılmıştır. Farklı sınır koşullarına sahip rijitleştirilmiş ve rijit diyaframlı, sertleştirilmiş ve berkitilmemiş silindirik kabukların iki farklı modeli incelenmiştir. Silindirik kabuklar için rijit diyaframlar kullanılarak sapmaların %80 ve sertleştirilmiş silindirik kabuklar için (45-50) en aza indirildiği gösterilmiştir. Deneysel araştırmalardan ve elde edilen sayısal sonuçlardan, silindirik kabuklar için önerilen sınır mesnet türlerinin etkinliği doğrulanmıştır, bu da ekonomik faydalar sağlayabilir.

Yaghoobi ve Torabi (2013) yaptıkları çalışmada, iki parametrelili Pasternak temelleri üzerine oturan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden (FGM'ler)

yapılan plakaların termal yükler altında burkulma analizi araştırılmaktadır. Kalınlık boyunca tek tip sıcaklık artışı (UTR), doğrusal ve doğrusal olmayan sıcaklık dağılımları (LTD ve NTD) olarak üç farklı termal yük dikkate alınmıştır. Levha en-boy oranı, kenar-kalınlık oranı, gradyan indeksi ve elastik temel rijitlikleri gibi parametrelerin kritik burkulma sıcaklık farkı üzerindeki etkileri gösterilmiş ve açıklanmıştır. Altı farklı sınır koşuluna sahip fonksiyonel olarak derecelendirilmiş dikdörtgen plakaların kritik burkulma sıcaklıkları ilk kez rapor edilmiştir ve araştırmacıların gelecekte sayısal ve analitik yöntemlerini doğrulamaları için kıyaslama sonuçları olarak hizmet edebilir.

Pervez ve diğ. (2010), sınır koşullarının ticari kodlardan elde edilen sehim ve gerilme değerleri üzerindeki etkisini sunmakta ve sonuçları üç boyutlu elastisite çözümü ve yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi ile karşılaştırmaktadır. Mevcut karşılaştırmalı çalışma için yaygın olarak kullanılan üç sonlu eleman analiz yazılımı, yani LUSAS, ANSYS ve ALGOR seçilmiştir. Dokuz farklı sınır koşulu dikkate alınmıştır; SSSS, CCCC, CSSS, CFCF, CSCS, CSCF, CFFF, FCCF ve CSFF burada C, S ve F sırasıyla kenetlenmiş (clamped), basit mesnetli (simply supported) ve serbest (free) kenarları ifade eder. Hem LUSAS hem de ANSYS yazılımı simetrik sınır koşulları için iyi sonuçlar verirken, simetrik olmayan sınır koşulları için doğruluk, HSDT sonuçlarına kıyasla özellikle enine kesme gerilmeleri için bozular. Gerilme değerlerinin doğruluğu kenar koşullarına bağlı olarak dalgalandığından, bir yazılımın diğerine üstünlüğünü iddia etmek zordur. Özellikle, enine kayma gerilmeleri için sınır koşullarına oldukça bağlıdır.

Usta ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada, panel kalınlığının farklılaşması durumunda, panellerin absorbe edilen enerjisi, temas kuvvetleri, reaksiyon kuvvetleri, arka yüzey yer değiştirmesi ve artık hızları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tan ve Paramasivam (1994), çelik lifli betonarme döşemelerin delme kesme davranışı incelenmiştir. 14 kare levhanın her biri tüm kenarları boyunca basitçe desteklenmiş ve merkezdeki kare bir alan üzerinde yoğun bir yük altında kırılmaya kadar yüklenmiştir. Test parametreleri, etkin açıklık/derinlik oranı (a/d oranı), çelik liflerin hacim oranı ρ_f , döşeme kalınlığı h , beton mukavemeti f_c ve taşıyıcı plakanın boyutu r idi. Test sonuçları, liflerin hacim fraksiyonlarının artmasının yük ve süneklik

değerlerini arttırdığı, plak kalınlığının artmasının daha yüksek çatlama yüküne, akma yüküne ve nihai yüke yol açtığı ve ayrıca her ne kadar maksimum deplasman kalınlığının artmasıyla birlikte azalsa bile sünekliğin arttığı, lifli betonun basınç dayanımını artırarak çatlama yükünün, akma yükünün, nihai yükün ve sünekliğin arttığını göstermektedir. Panel kalınlığının artması zımbalama davranışı önlemek için önemlidir. Döşeme kalınlığının artırılması, yapının ağırlığını ve maliyetini arttırdığı için genellikle uygun bir seçim değildir.

Tan and Venkateshwaran (2019), geleneksel donatı olmadan SFRC levhaların delme kapasitesini araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. 700x700 mm'lik on iki kare levha test edilmiştir. Ana parametreler fiber kanca geometrisi, beton basınç dayanımı, döşeme kalınlığı ve fiber takviye indeksi ($V_f L_f / D_f$); burada V_f hacim oranıdır, L_f uzunluktur ve D_f çelik liflerin çapıdır. Çalışma sonunda, nihai yük kapasitesi üzerinde en yüksek etkiye levha kalınlığının sahip olduğu, ardından fiber takviye indeksi ve betonun basınç dayanımının geldiği görülmüştür. Fiber kanca geometrisinin etkisi, nihai yük üzerinde marjinaldi.

Nguyen ve diğ. (2013), ultra yüksek performanslı hibrit fiber takviyeli betonun (UHPPHFRC) eğilme davranışı üzerindeki boyut etkisi araştırmıştır. Üç farklı boyutta numune, dört noktalı bükülme kullanılarak test edilmiştir (50x50x150 mm³ (küçük), 100x100x300 mm³ (orta) ve 150x150x450 mm³ (büyük)). Her boyut için, çekme sünekliğinin eğilmede UHP-HFRC'nin boyut etkisi üzerindeki etkisini araştırmak için farklı lif içeriklerine sahip iki UHP-HFRC test edilmiştir. UHP-HFRC1, hacimce %1,0 bükülü çelik makro elyaf ve %0.5 kısa, düz çelik mikro elyaf içerirken, UHP-HFRC2 %1,0 bükülü çelik makro elyaf ve %1,0 kısa, düz çelik mikro elyaf karışımı içeriyordu. Her iki UHP-HFRC, eğilme mukavemeti, normalleştirilmiş sapma ve normalleştirilmiş enerji emme kapasitesi üzerinde net boyut etkisi göstermiştir. Ayrıca, daha düşük çekme sünekliği ile UHP-HFRC1'in eğilme davranışı, numunenin boyutuna daha duyarlıydı. Numunenin boyutu azaldıkça, UHP-HFRC'nin eğilme mukavemeti, normalize edilmiş sehim ve normalize edilmiş enerji emme kapasitesi önemli ölçüde artarken numunenin alt yüzeyindeki ortalama çatlak aralığı belirgin şekilde azalmıştır. Daha yüksek çekme kapasitesine sahip UHP-HFRC2, numunenin boyutu arttıkça eğilme mukavemetinde, normalleştirilmiş sapmada ve normalleştirilmiş toklukta daha küçük azalmalar üretti; yani, daha yüksek bir çekme

gerinim kapasitesine sahip UHP-HFRC, numunenin boyutuna daha az hassasiyet göstermiştir.

Michels ve diğ. (2013)'nin yapmış olduğu çalışmada, çelik fiber takviyeli betonun (SFRC) çatlama sonrası mukavemeti, enerji emilimi ve kırılma enerjisi üzerine deneysel ve sayısal bir araştırma sunulmaktadır. Yapılan araştırmanın amacı, fiber tipi, fiber dozajı ve numune boyutunun çelik fiber donatılı betonun çatlak sonrası davranışı üzerindeki etkisi üzerine bir çalışmadır. Diğer bir amaç, belirli bir deneysel test için çekmede gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini sağlayabilen sayısal bir prosedürünün geliştirilmesidir. Bu amaçla, plastik mafsal ve akma çizgisi teorisine dayalı bir kırılma modeli düşünülmüş ve ardından deneysel kuvvet-sehim eğrileri sayısal bir optimizasyon prosedürü ile uydurulmuştur. İlk adımda, bir SFRC tasarım önerisinin yanı sıra büyük ölçekli plakalar üzerinde ve 4 noktalı eğilme kiriş numuneleri üzerinde deneysel araştırma yapılmıştır. Bu sonuçlar, farklı malzeme ve geometri koşulları altında taşıma kuvvetlerinin ve enerji absorpsiyonlarının gelişimi hakkında ilk izlenimleri vermektedir. Fiber dozajı arttığında hem maksimum kuvvet hem de toplam enerji absorpsiyonunun arttığı gösterilebilir. Ayrıca, daha yüksek bir elyaf en-boy oranı, bahsedilen özellikler üzerinde de olumlu bir etkiye sahiptir. İkinci bir adımda, artan çekme gerilimi ile azalan gerilim evrimi ya üstel ya da tanjant hiperbolik varsayılarak, gerilimdeki iki çatlama sonrası kurucu yasa üzerinde simülasyon koduyla bir parametrik optimizasyon prosedürü gerçekleştirilmiştir. Üstel yasanın küçük sapma seviyelerinde daha yüksek hassasiyet sunmasına rağmen, hiperbolik bir ilişkinin deneysel eğrilerin daha doğru bir genel yaklaşımını sunduğu gösterilmiştir. Her ikisi için de kırılma enerjisinin değerlendirilmesi benzer değerleri ve eğilimleri ortaya çıkarır ve farklı numune boyutları arasındaki karşılaştırma, büyük ölçekli numunelerle uğraşırken daha düşük çekme mukavemeti ve kırılma enerjisi değerleri ile sonuçlanan bir boyut etkisini ortaya çıkarmıştır.

Ganesan ve diğ. (2018), iki yönlü düzlem içi eylem altında bambu betonarme duvar panellerinin performansı üzerindeki açıklığın etkisini sunmuştur. Altı prototip bambu takviyeli beton duvar paneli numunesi, duvar paneli kalınlığının altıda biri kadar bir eksantriklikte uygulanan düzgün yayılı yük altında arıza için test edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan altı numuneden üçü masif duvar paneli ve geri kalan üçü merkezinde açıklığa sahip panellerdi. İncelenen numuneler, 25'lik sabit bir narinlik

oranına ve 1.67, 1.82 ve 2'lik değişen en boy oranlarına ve 12.50, 13.75 ve 15'lik incelik oranlarına sahipti. Sağlanan açıklığın alanı, numunenin alanının tam olarak %25'iydi. Çalışma, açıklığın varlığından bağımsız olarak en-boy oranındaki artışla duvar panellerinin nihai yükünün azaldığını, incelik oranındaki artışla birlikte nihai yükünün de arttığını göstermektedir.

Mohaisen ve diğ. (2017), değişen en-boy oranı ($AR=H/L$) ve beton tipi (beton dayanımı- f'_c) ile aksel eksantrik düzgün yayılı yüklemeye maruz kalan ince beton duvar panellerinin yapısal davranışına ilişkin deneysel bir çalışma sunmaktadır. Sonuçlar, AR değerinin 1,25'ten 2,00'ye artmasıyla normal dayanımlı beton (NSC) duvar panellerinin yük taşıma kapasitesinin azaldığını, AR 2,00'den 1.25'e düştüğünde nihai yükün %37,5'ten %14,6'ya düştüğünü göstermektedir. Reaktif Toz Beton (RPC) için, AR 2,00'den 1,25'e düştüğünde nihai yük %38,7'den %16'ya düşmüştür. 33,5 MPa'dan 120,4 MPa'ya yükselen beton mukavemeti (f'_c) ile beton duvarın mukavemeti artmakta, H/L sırasıyla 1,25, 1,50, 2.00 olan paneller için artış yaklaşık % 212.5, 207.3, 206.67 olmaktadır. Beton duvar panellerinin yanal sehimleri en-boy oranına (H/L) bağlıdır, burada NSC panellerin en-boy oranının 1,25'ten 2,00'ye yükselmesi beton duvar panellerinin yanal sehiminin artmasına neden olurken, RPC duvar panelleri en-boy oranının 1,25'ten 2,00'ye artması, beton duvar panellerinin yanal sehiminde azalmaya neden olmuştur. Ayrıca yanal sehim beton tipine bağlıdır (f'_c), beton duvar panelinin mukavemeti 33,5 MPa'dan 120,4 MPa'ya yükseldiğinde, yanal sehim azalır.

Duvarlar üzerinde iki yönlü eylem rapor edilmiş bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Saheb ve Desayi (1990), 24 RC duvar panelini test etmiş, duvarlar panel kalınlığının altıda birine eşit eksantriklik ile yüklere maruz bırakılmıştır. En-boy oranının (H/L 0.67 ile 2.00 arasında değişiyor) betonun küp basınç dayanımlarının (f_{cu} 20 ila 25 MPa arasında değişiyor) ve diğer parametrelerin RC duvar panellerinin nihai dayanımı üzerindeki etkisini incelediler. Bu durum için nihai dayanımın, en-boy oranlarındaki (H/L) artışla arttığı sonucuna varmışlardır.

Doh (2002)'un yaptığı çalışmada, altı kare beton duvar paneli (3 normal dayanımlı beton ve 3 yüksek dayanımlı beton) test edilerek narinlik oranı (SR), en boy oranı (AR) ve beton dayanımının beton duvar panellerinin nihai dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Doh, deneysel çalışmadan, normal ve yüksek dayanımlı beton paneller için aksel dayanım oranlarının (H/t)'deki artışla birlikte giderek azaldığı

sonucuna varmıştır. Normal ve yüksek dayanımlı beton panellerdeki eksenel dayanım oranlarındaki azalma, H/t 'de 30'dan 40'a bir artış için sırasıyla yaklaşık %10,6 ve %27,1 olmuştur.

Almeida (2009)'nın yaptığı yüksek lisans tezinde, sandviç panellerin yük taşıma kapasitesinin panel boyutlarına, yapısal geometriye ve malzemeye bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Himasree ve diğ. (2017), betonun cinsi ve kalitesi, donatı malzemeleri ve yüzdeleri, narinlik oranı ($SR=h/t$) ve en-boy oranı ($AR=h/L$) gibi çeşitli parametrelerin etkisini belirlemek için araştırmacılar tarafından duvar panelleri üzerinde yapılan çalışmaların incelemesini sunmaktadır. Ayrıca, çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen denklemler kullanılarak hesaplanan yüklerin deneysel nihai yükleri ile karşılaştırmasını da içermektedir. Çalışma ayrıca, duvar panellerinin yapımında çelik gibi enerji yoğunluğu oldukça fazla malzemelerin yerini alabilecek, çevresel açıdan sürdürülebilir bir doğal malzeme olan bambu kullanımından da bahsetmektedir.

Choudhary ve diğ. (2020)'nin yapmış olduğu çalışma, SFRC duvar panelinin tasarımı ve geleneksel beton (CC) duvar panellerine kıyasla performans özelliklerinin analizi etrafında dönmektedir. SFRC duvar panelleri ve küpleri, toplam karışımın bir hacmi olarak farklı yüzdelerde (%0, %1, %1.75 ve %2.5) çelik lifler ile dökülmüştür. Bu çalışma kapsamında, SFRC duvar panelleri ve CC duvar panelleri eğilme ve darbe yüklemelerine maruz bırakılmıştır. Ayrıca küpler 7 ve 28. günlerde basınç dayanımı açısından incelenmiştir. Beton üzerindeki basınç dayanımı testi, kancalı çelik liflerin eklenmesiyle daha yüksek değerler göstermiştir. Aynı şekilde, çelik lif yüzdesindeki büyüme ile çelik lif ile yapılan duvar panellerinin eğilme mukavemeti de artmıştır. Pik yük-sapma grafiği çizildiğinde, %1.75 fiber içeriği optimum tepe yükü göstermiştir. Ayrıca, darbe testinde, daha yüksek lif konsantrasyonu için darbelerinin değeri daha fazla bulunmuştur.

Yusof ve diğ. (2010)'nin yapmış olduğu çalışmada, patlayıcı yüklemeye maruz kalan düz betonarme ve normal dayanımlı çelik lifli betonarme panellerin (SFRC) davranışı üzerine deneysel bir araştırmanın sonuçları sunulmaktadır. Deney, Pertahanan Nasional Malezya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Patlama Araştırma Birimi tarafından gerçekleştirilmiştir. 600x600x100mm boyutlarında toplam 8 adet

betonarme panel test edilmiştir. Çelik fiber takviyeli beton paneller, üç farklı hacim oranında (%0.5, %1.0 ve %1.5) kancalı çelik fiber içermektedir. Paneller, 0,6 m'lik bir mesafeye yerleştirilmiş 1 kg'lık patlayıcı yükün patlamasıyla oluşturulan patlayıcı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bu araştırma, %1.5 hacim oranı içeren çelik lifli betonarme panelin patlayıcı yüklemeye altında en iyi performansı verdiğini göstermektedir.

Singhal ve diğ. (2018), ABAQUS kullanılarak sonlu eleman tabanlı sayısal modellerin doğruluğunu göstermek için betonarme döşeme üzerinde patlama yüklemesine karşı sayısal simülasyon gerçekleştirmiştir. Yüzey patlamasına maruz kalan TNT ağırlığı ve sınır koşulları gibi parametreler incelenmiştir. İncelenen durumlar; tüm kenarları sürekli, 2 uzun kenar süreksiz, 2 kısa kenar süreksiz, 1 kısa kenar süreksiz, 2 komşu kenar süreksiz, 3 komşu kenar süreksiz (uzun kenar sürekli) mesnet durumlarıdır. İki kısa kenar süreksiz uç koşuluna sahip döşemede sehim ve gerilmenin sırasıyla 32 mm, 6.99 m/s ve 11.03 MPa olduğu ve seçilen konfigürasyonlar arasında en iyi sınır koşullarının olduğu görülmektedir. İki kısa kenarı süreksiz olan levhada oluşan gerilmenin, bu çalışmada ele alınan diğer uç koşullara kıyasla yaklaşık %30-50 oranında azaldığı bulunmuştur. Bu nedenle, iki kısa kenar süreksiz olan döşemenin önemli yapıların tasarımında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

1.4 Tezin Düzeni

Yapılan tez çalışması toplam altı bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerin içeriği aşağıdaki gibi özetlenebilir:

İlk bölümde yapılan tez çalışması ile ilgili önceden yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir. Bu bölüm çelik lifli betonun mekanik özellikleri ile ilgili yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar, çelik lifli betonun patlama ve darbe etkisine karşı dayanımını ele alan çalışmalar, çalışmanın mekanik alt yapısını ve kullanılan parametreleri destekleyen çalışmalar olmak üzere üç başlık halinde değerlendirilmiştir.

İkinci bölümde lifli betonlar, çelik lifli beton malzeme mekanik özellikleri ve lifli betonlarla ilgili kullanılan yönetmelik ve test metotlarından bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde tez çalışması kapsamında incelenen plak ve kiriş teorilerinden bahsedilmiştir. Ayrıca burada matematiksel model oluştururken kullanılacak olan basit kiriş yaklaşımından ve bunun panellere uygulanmasından bahsedilmektedir.

Dördüncü bölümde çelik lifli malzeme modeli oluşturulması, oluşturulan modelin literatürde yer alan deneysel çalışmalarla karşılaştırılması ve son olarakta yapılan parametrik çalışma ve sonuçları yer almaktadır.

Beşinci bölümde çelik lifli beton panellerin basınç-yer değiştirme ilişkisini tahmin edecek matematiksel bir model önerilmiştir. Bu bölümde ayrıca önerilen matematiksel model ile sonlu elamanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması yer almaktadır.

Altıncı ve son bölümde ise tez çalışması kapsamında yapılan analizler ve incelenen parametrelere göre sonuçların değerlendirmelerine yer verilmiştir. Yine bu bölümde tez çalışması kapsamında gelecekte yapılabilecek araştırmalar hakkında öneriler yer almaktadır.

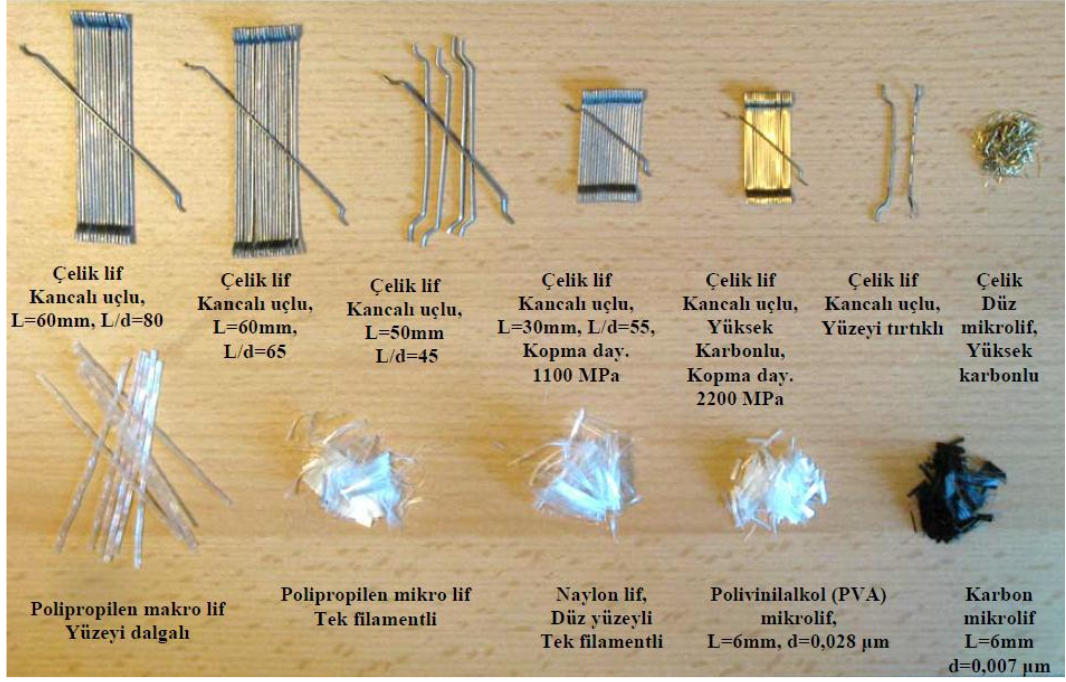
2. LİFLİ BETON ÖZELLİKLERİ VE İLGİLİ YÖNETMELİKLER

Her malzemenin özellikleri başka bir malzemenin özelliklerinden farklılık gösterir; bu nedenle tüm yapısal talepleri karşılayabilecek bir malzeme yoktur. Bu da malzemelerin uygun özelliklerini kullanan bir yapısal bileşen elde etmede, özelliklerinden tam olarak yararlanmak için iki veya daha fazla malzeme kullanmanın ve bunları birbirine bağlamanın nedenidir.

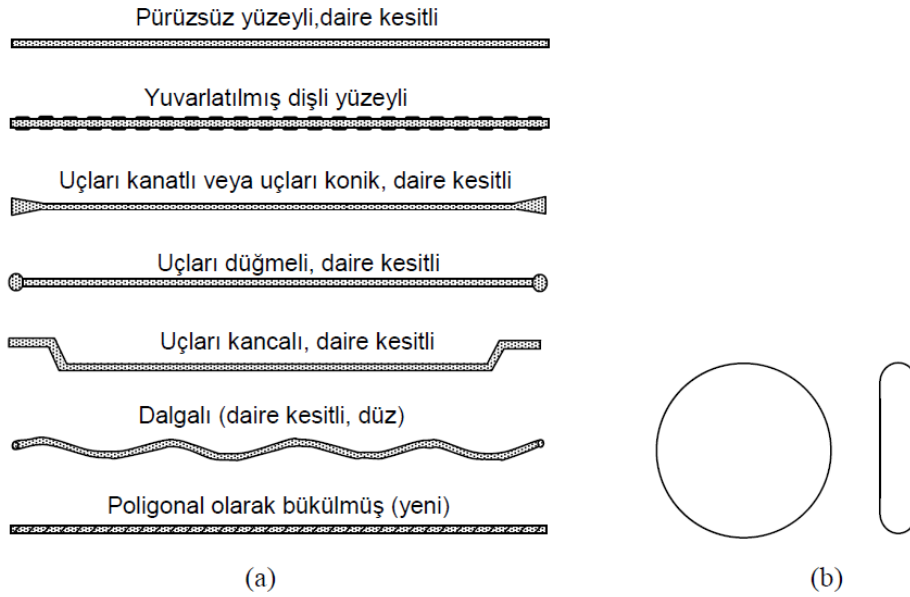
Gevrek bir malzeme olarak betonun istenmeyen özelliklerinden bazıları, çekme dayanımının (basınç dayanımının yaklaşık %10-15'i) ve kesme dayanımının (basınç dayanımının yaklaşık %35-80'i) düşük olmasıdır. Beton teknolojisindeki ilerlemeler ile bu gevreklik problemi, betona katılan lifler ile giderilebilmiştir.

Lifli beton; çimento, agrega ve çoğunlukla süreksiz liflerin su ile karıştırılmasıyla meydana gelen beton olarak tanımlanmaktadır. Bu betonda kullanılan lifler katkı malzemesi değil, betonun bileşenlerindedir. Lifler betonda dayanım, dayanıklılık, süneklik ve çatlak kontrolüne yönelik kullanılır.

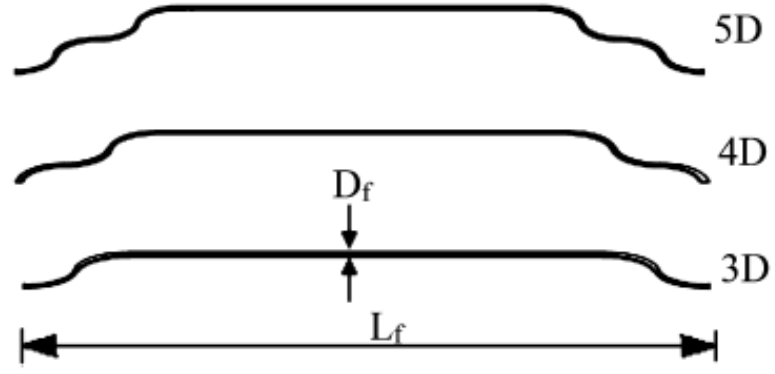
Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler ürettikleri malzemeye göre; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir (Şekil 2.1). Bunlar içerisinde en çok kullanılan lif tipi betona kazandırdığı üstün mekanik özellikler sayesinde çelik liflerdir. Ayrıca bu lif tiplerini, geometrik özelliklerine göre sınıflandırmak da mümkündür. Şekil 2.2'de uygulama ve araştırmalarda kullanılan liflerin şekilleri verilmiştir (Naaman, 2003). Buna göre liflerin kesitleri yuvarlak veya düz (plak gibi) olabildiği gibi, yüzey şekilleri ve geometrik formları bakımından da farklı çelik lif tiplerine rastlamak mümkündür. Şekil 3.2'deki geometrik farklılığın yanı sıra, çelik liflerin farklı boy (L) ve çaplarda (d) da üretilbildiği ve bu farklılıkların ÇLDB özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca çelik lifler için bir diğer önemli özellik de narinliktir (λ) ve lif boyunun çapına oranı (L/d) ile hesaplanan boyutsuz bir parametredir. Çelik lifler içerdikleri karbon oranına göre normal (düşük karbonlu) veya yüksek (yüksek karbonlu) dayanım özelliklerine de sahip olabilmektedirler. Çelik lifler ayrıca kanca sayısına göre de sınıflandırılır. Kanca sayısı da davranışı etkileyen parametreler arasındadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.1: Üretildikleri malzemeye göre lifler (Yardımcı, 2007)



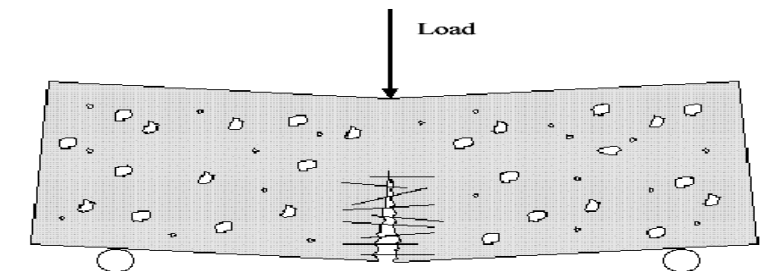
Şekil 2.2: Betonda kullanılan çelik liflerin geometrik şekilleri: (a) liflerin yüzey şekilleri, (b) liflerin kesit geometrileri (yuvarlak ve düz) (Naaman, 2003).



Şekil 2.3: Çoklu kanca uçlu çelik lifler (Venkateshwaran ve diğ., 2018)

Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır.

Betona çelik lif takviyesindeki asıl amaç, bünyesinde sayısız mikro çatlak bulunduran gevrek betonun sünekliğini arttırmaktır. Çelik lifler, gerilmeler altında betonda çatlak oluşumunu geciktirerek veya çatlak yayılımını önleyerek (Şekil 2.4) (köprüleme) malzemenin süneklik ve çekme dayanımının artmasına sebep olurlar (Mehta ve Monteiro, 2006). Böylece çekme dayanımı geleneksel betona göre artan çelik lifli betonun deformasyon yapabilme kapasitesi ve dolayısıyla tokluğu da artar (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Gopalaratnam ve Gettu, 1995; Nataraja vd., 1999). Bu durumda, özellikle eğilmenin etkili olduğu yerlerde, lifli beton betonarme donatıları ile kullanıldığında yapı elemanlarının kesitlerin ekonomik olarak boyutlandırılabilceğini söylemek mümkündür. Çelik liflerin, beton dayanımına etkisi bulunmamaktadır. Çatlamaya kadar geçen süre içerisinde beton yük taşıırken, çatlamadan sonra beton fazı devreden çıkar ve yük lifler sayesinde aktarılır.



Şekil 2.4: Çelik liflerin köprüleme özelliği

2.1 Çelik Lifli Betonun Kullanım Alanları

Kompozit bir malzeme olan beton genel olarak yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı, çatlak oluştuktan sonraki yük taşıma dayanımı ve enerji emme kapasitesi açısından zayıf özellikler gösterir. Çelik liflerin betona katılmasıyla bu zayıf özelliklerinde iyileşmeler olur. Çelik lifli betonların normal betonlara oranla sağladıkları belirgin üstünlüklerinden dolayı oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler (Şekil 2.5). Bu kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir.

- Depreme dayanıklı yapıların inşasında, Sünekliğin yüksek olması istenilen bu tür yapılarda kullanılabilir.
- Kolon-kiriş birleşim bölgesinde,
- Endüstri yapılarında,
- Şev stabilizesinin sağlanmasında,
- Beton-betonarme borular ve altyapı malzemeleri,
- Havaalanı kaplamalarında,
- Fabrika depo ve hangar döşemelerinde. Yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlanması, dinamik ve ani yüklemelere karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır.
- Liman kaplamalarında,
- Yol kaplamalarında. Genellikle yol temellerinde zayıf beton veya bitümlü malzeme kullanılır. Bu tür kaplamalar yüksek trafik yoğunluğu olan yerlerde büyük ölçüde yüzey düzensizliğine neden olurlar. Buna karşılık çelik lifler, oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmını taşır ve çatlamaya karşı koyar. Ayrıca yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollarda büyük önem taşıyan, kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı yüksek beton elde edilmesini sağlar.
- Püskürtme beton uygulamalarında, çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir.

- İnce kabuk yapılarda. Kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkân verdiğinden ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır.
- Büyük sıcaklık farklarına maruz kalan yapılarda,
- Hidrolik yapılarda. Geleneksel betonlara kıyasla, yüksek sünekliği, aşınma ve darbeye karşı direnci, deniz ortamında bozunmaya karşı direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı su yapılarında kullanılmaktadır
- Çok yüksek mukavemetli betonlarda,
- Patlamaya karşı dayanıklı yapılarda kullanılmaktadır.
- Yüksek dayanıma, sünekliğe ve dayanıklılığa sahip birçok prefabrike yapı elemanın üretiminde kullanılmaktadır (Akbaba, 2006).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

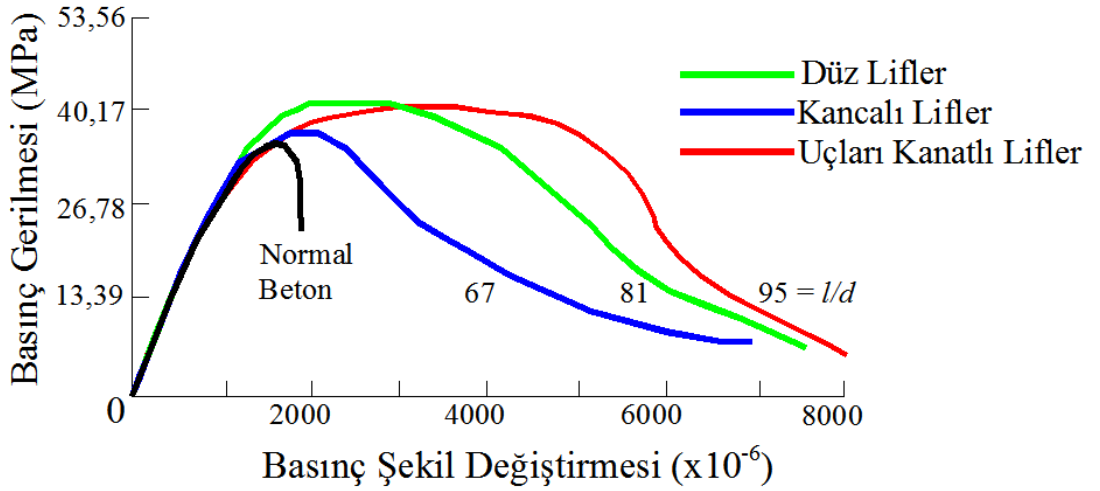
Şekil 2.5: Çelik lifli beton uygulamaları: (a) endüstriyel zemin, (b) pist, (c) püskürtme beton uygulaması, (d) ince kabuk elemanlar (URL-1, 2013), Prefabrik üretimde ÇLDB, (e) Öngerilmeli köprü kirişi, (f) tünel segmentleri (g) Kore’de bulunan, açıklığı 120 m ve kemer yüksekliği 130 m olan Köprü (Mehta ve Monteiro, 2006, Yalçın, 2009).

2.2 Çelik Lifli Betonun Mekanik Özellikleri

Betona çelik lif katkısının enerji yutma kapasitesini arttırdığı, darbe, ilk çatlak dayanımı, çekme ve eğilme dayanımını arttırdığı yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Alt başlıklarda detaylı bir şekilde çelik lifli betonun mekanik özelliklerinden bahsedilmiştir.

2.2.1 Basınç Dayanımı

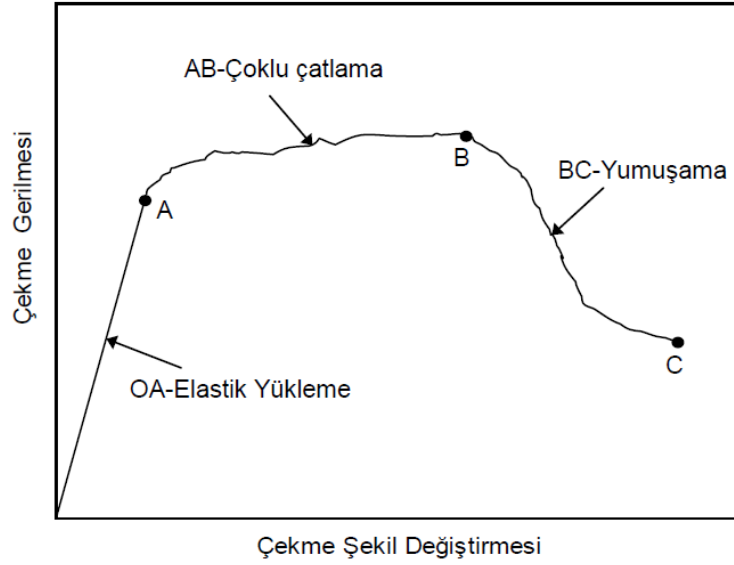
Betona çelik lif eklendiğinde, betonun çatlamasını geciktirdiği ya da çatlağın yayılmasını önlediği bilinmektedir. Dolayısıyla çatlak oluşumu neticesinde köprüleme etkisiyle devreye giren çelik lifler, çekme dayanımını önemli ölçüde arttırırken, basınç dayanımı üzerindeki etkileri ihmal edilebilir düzeydedir. 1974 yılında Williamson tarafından yapılan çalışmada, narınlığı 100 olan, hacimce %2 oranında çelik lif içeren ve $D_{max}=19$ mm olan çelik lifli beton silindir numuneleri üzerinde basınç deneyi yapılmış ve basınç dayanımının en fazla %23 arttığı söylenmiştir. 1978 yılında Shah vd. (1978) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, basınç deneyi sırasında elde edilmiş tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.13'te görülmektedir. Bu grafikte, lif içermeyen normal beton ile çeşitli tiplerde çelik lifler içeren çelik lifli betonlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi çelik lifler basınçta nihai gerilmeyi az miktarda etkilemişlerdir ve çelik lif tipinin bu gerilim üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Pikten sonra tamamen göçen normal beton yanında çelik lifli betonlar deformasyon yapmaya devam etmişlerdir. Eksenel basınç dayanımı anına kadar normal betonla benzer davranış gösteren çelik lifli betonun basınç dayanımına erişildikten sonra normal betona göre daha fazla şekil değiştirme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 2.6: Geleneksel betonun ve ÇLDB'lerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Shah vd., 1978).

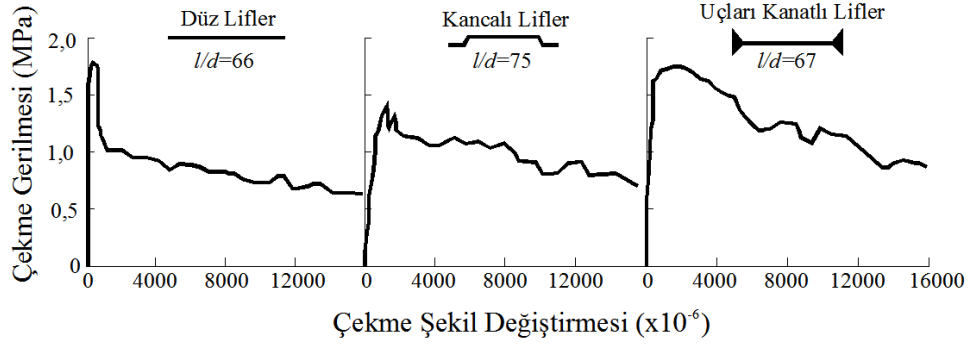
2.2.2 Çekme Dayanımı

Betonda çelik lif kullanımının öncelikli sebebi, çatlak oluşumunu geciktirmesi veya çatlak yayılımını engellemesidir. Liflerin kopma ve betondan sıyrılmaya davranışı nedeniyle oluşan bu mekanizma sayesinde çelik lifli beton, aksenal çekme dayanımında normal betondan çok daha iyi bir performans sergiler ve malzemenin sünekliği de bu davranış sonucunda ortaya çıkar. Beton aksenal çekme dayanımına ulaştığında betonun çatlaması neticesinde aksenal çekme dayanımına katkısı ortadan kalkar ve çelik lifler etkinleşir. Son lif betondan sıyrılmaya veya çatlak genişliği lif boyunun yarısına gelene kadar malzemenin yük taşımaya devam ettiği kabul edilirse, ÇLDB'nin çekme şekil değiştirme eğrisi ve dolayısıyla çekme tokluğu da normal betonunkine göre artmaya devam eder (Şekil 2.7)



Şekil 2.7: Direk çekme deneyinde ÇLDB'nin tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Toutanji ve Bayasi, 1998; Yalçın, 2009).

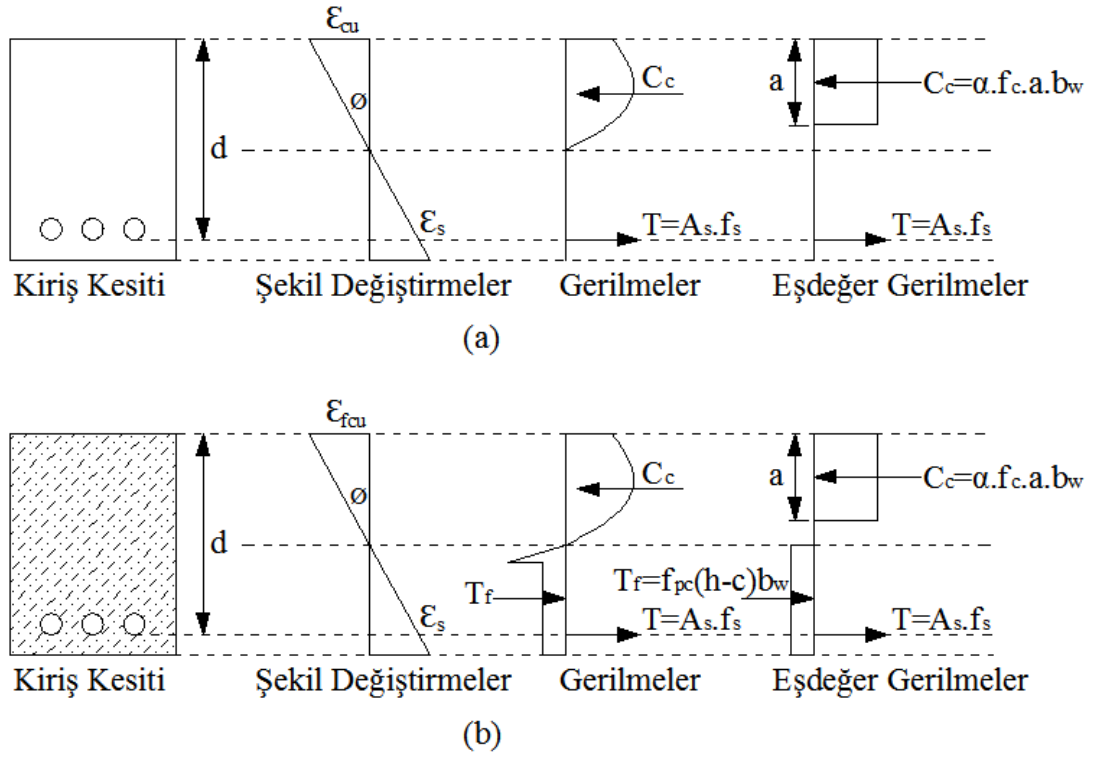
Ayrıca betonda kullanılan çelik lif tipinin de çekme davranışını etkilediği Shah vd. yaptığı çalışmada görülmüştür. Hacimce %1.73 oranında üç değişik tip çelik lif içeren beton numunelerinin çekme deneyi sırasında kaydedilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 2.8'de görülmektedir (Shah vd., 1978).



Şekil 2.8: Farklı tip çelik lif içeren harçların çekmede gerilme-şekil değişirme eğrisi (Shah vd., 1978).

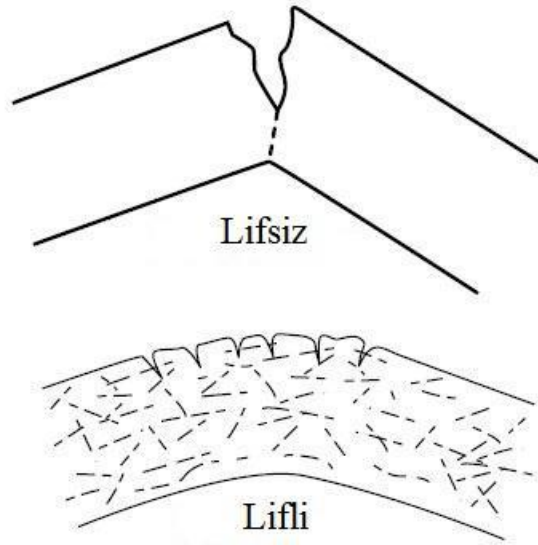
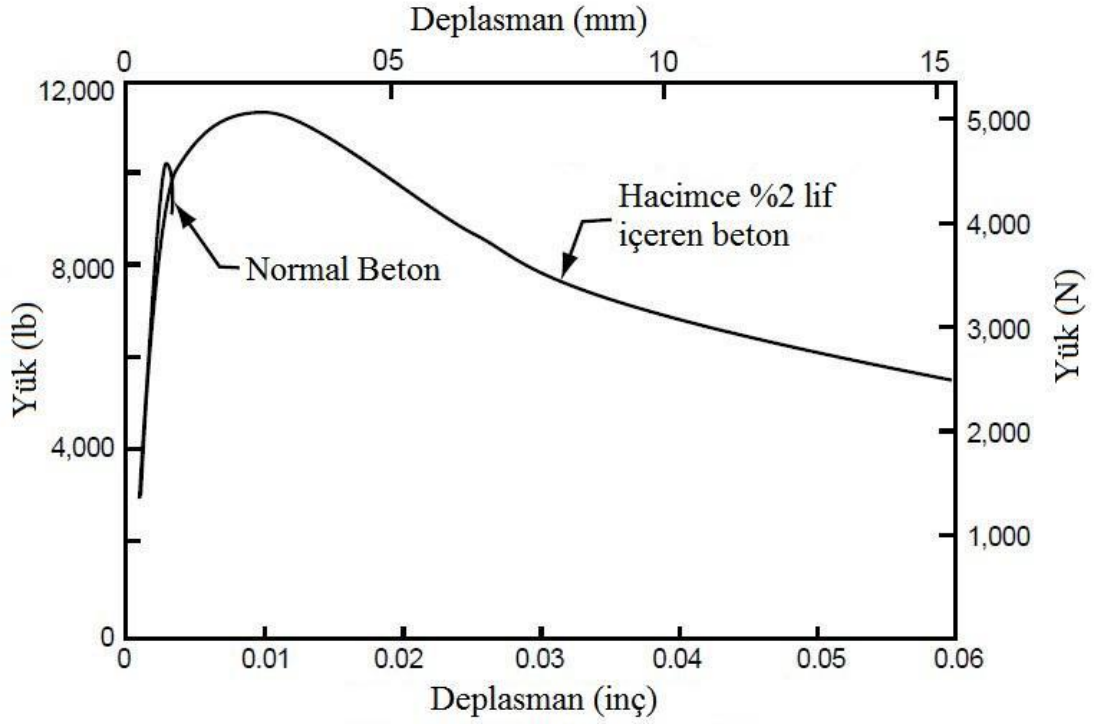
2.2.3 Eğilme Dayanımı

Çelik lifli betondaki eğilme dayanımındaki artışlar, basınç ve çekme dayanımına kıyasla daha fazladır. Malzemenin çatlak kontrolü nedeniyle sünek davranması bir yana, kiriş numunesinin kesitinde oluşan gerilme ve şekil değişirmeler de çelik lifli betonun bu performansı göstermesine katkıda bulunur. Eğilme deneyi sırasında kiriş kesitinin bir tarafında çekme gerilmeleri oluşurken, diğer tarafında basınç gerilmeleri oluşur. Bundan dolayı tarafsız eksen basınç bölgesine kayma eğilimi gösterir. Sonuçta çelik lifler ile birleşen bu mekanizma çelik lifli betonun hem eğilme dayanımı hem de eğilme tokluğu açısından diğer mekanik özelliklere göre üstün performans sergilemesini sağlar (Şekil 2.9) (ACI 544.1R, 2002; Mehta ve Monteiro, 2006).



Şekil 2.9: Eğilme etkisinde kiriş kesitinde oluşan gerilme ve şekil değiştirme diyagramları, (a) normal beton için, (b) ÇLDB için (Yalçın, 2009).

Eğilme dayanımının bu şekilde artmasının sebebi, çelik lifleri saran beton matriste ilk çatlak oluşuktan sonra çelik liflerin betona gelen yükü, lif ile beton arasındaki aderans bölgesinin çatlamasına veya lifin tamamen sıyrılmasına kadar taşınması olarak açıklanabilir.



Şekil 2.10: (a) Eğilme deneyi sırasında oluşan tipik yük-deplasman eğrileri, (b) eğilme deneyine tabi tutulan kiriş numuneleri (Mehta ve Monteiro, 2006).

Şekil 2.10’da eğilmede meydana gelen tipik bir yük-deplasman eğrisi görülmektedir. Burada iki parametre vardır. Birincisi ilk çatlak dayanımıdır ve bu dayanım genelde eğrinin doğrusallıktan ilk ayrıldığı (betonda ilk çatlağın meydana geldiği) noktaya denk gelir. İkincisi ise maksimum yüke karşılık gelen eğilme dayanımıdır (ACI 544.4R, 1999; ASTM C 1018, 1997).

2.2.4 Darbe direnci ve Dinamik Yükler Altındaki Dayanımı

Patlama, çarpma ve dinamik yüklemeler altında çelik lifli betonun dayanımı, dayanıklılığı ve bu yükler altında enerji yutması geleneksel betona göre oldukça fazladır. Çeşitli lif tipleri için gerçekleştirilen deneyler sonucunda, çelik lifli betonun dinamik yüklemeler altındaki dayanımının geleneksel betonunkinin 3~10 katına ulaşabildiği görülmüştür. Normal dayanım sınıfına sahip betonlarda, çelik lifli betonun darbeleri eğilme yüklemesi altında ulaştığı pik yükün, lifsiz betonunkine göre en az %40 artış gösterdiği de bilinmektedir (ACI 544.4R). Darbe dayanımı araştırmaları genellikle, ya lif içermeyen referans betonu ile çelik lifli betonun dayanımı ya da dinamik yükleme ile statik yükleme sonuçları karşılaştırılarak yapılmaktadır. Çelik lifli betonun dinamik yükler altındaki davranışı veya darbe dayanımı lif tipine bağlı olarak değişir. Ayrıca lif geometrisine ve matris özelliklerine bağlı olarak değişen lif-matris ara yüzey özellikleri de bu davranış üzerinde oldukça etkilidir. Beton matrisin dayanımı arttıkça darbeye gösterilen direnç artar (Nataraja ve diğ. 2005). Darbe yükleri altında çatlama ve göçmeye karşı gösterilen direnç ise genelde lif miktarı arttıkça artar. Nguyen-Minh ve diğ. (2012) çelik lif miktarının 30'dan 60 kg/m³'e çıkartılmasının plakların zımbalama dayanımlarında lifsiz plaklarınkine göre değişim oranının %8'den %26'ya ve enerji yutma kapasitelerinde de %10'dan %40'a çıktığını belirtmişlerdir. Choi ve diğ. (2007) zımbalama etkisindeki döşeme-kolon birleşimlerinde ÇLDB kullanımını araştırmışlar ve teorik bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca ÇLDB'nin zımbalama kapasitesini arttırdığını savunmuşlardır.

2.2.5 Tokluk

Tokluk, malzemenin kopana dek absorbe ettiği (soğurduğu) toplam enerjiyi ifade eder. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak hesaplanır. Sünek malzemelerin tokluğu yüksek, gevrek malzemelerin tokluğu ise düşüktür. Normal beton gevrek bir malzeme olduğu için tokluğu yok denecek kadar azdır. Fakat çelik lifin betona katılmasıyla birlikte artan süneklik sebebiyle tokluk kazanır.

Literatürde genelde tercih edilen tokluk hesabı eğilme altında elde edilen yükdeplasman eğrisinin altında kalan alandır. Bu grafiğe göre ilk çatlak oluşumuna kadar lifler etki göstermeseler bile, çatlama gerçekleşikten sonra lifler devreye girer

ve çatlağı köprüleyerek açılmayı önlerler. Artan yük ile lifler betondan sıyrılmaya başlar ve bu sırada enerji yutulmasına sebep olurlar. Lif matris etkileşimine, lif tipine ve matris özelliklerine bağlı olarak değişen bu sıyrılmaya davranışı sünekliğin ve tokluğun ortaya çıkma sebebidir. Genelde lif miktarı ve lif boyu ile narinliği arttıkça tokluk artar (Soulioti vd., 2011; Wang ve Wang, 2013).

2.2.6 Yorulma Dayanımı

Yorulma dayanımı, çelik lifli betonun eğilme ve çekme dayanımı normal betonunkinden fazla olduğu literatür çalışmalarında görülmüştür. Basınç etkisi altında ise, çelik liflerin yorulma dayanımı üzerinde etkisi neredeyse yoktur.

2.2.7 Aşınma Dayanımı

Aşınma dayanımı, yapılan deneysel ve laboratuvar çalışmaları sonucunda, çelik lif katkısının betonun aşınma dayanımına etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

2.2.8 Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

Genel olarak çelik lif içeriği çok yüksek olmadığı sürece (%2) normal beton ile çelik lifli betonun elastisite modülü ve poisson oranının aynı olduğu söylenebilir.

2.2.9 Büzülme (Rötire)

Çelik liflerin plastik rötire çatlakları üzerinde pek bir etkisi olduğu söylenmese de kuruma rötiresini içeriğindeki çelik lif miktarına göre belirli oranlarda azalttığı yapılan çalışmalarda görülmüştür. Atiş ve Karahan (2009), %0,25; 0,50; 1 ve 1,5 oranında kullanılan çelik liflerin betonun 210 günlük kuruma rötiresini sırasıyla %10, 21, 25 ve 26 oranlarında azalttığını ortaya koymuşlardır.

2.3 Çelik Lifli Beton ile İlgili Yönetmelikler ve Test Metotları

Klasik betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini öngören birçok model (Sheikh-Üzümeri, Saatçioğlu-Razvi, Hognestad, Kent-Park, Roy-Sozen, Solinman-Yu, Sargin vb) vardır. Fakat fiber takviyeli beton (FRC) tasarlamak ve fiberlerin katkılarını hesaba katmak için özel prosedürlerle ihtiyaç duyulmaktadır. Tezin bu bölümünde çelik lifli beton davranışını elde etmek için kullanılabilen standartlara ve test metotlarına (ACI-544.4R-18, RILEM TC 162-TDF ve Model Code 2010-fib) yer verilmiştir. Çalışmada kullanılan çelik lifli beton modeli için burada bahsi geçen yönetmeliklerden yararlanılmıştır.

2.3.1 ACI-544.4R-18: Lif Takviyeli Beton ile Tasarım Rehberi

Bu kılavuzun amacı, uygulamalı mühendislere lif takviyeli beton için tasarım yönergeleri ve öneriler sağlamaktır. Fiber takviyeli beton (FRC) tasarlamak için, fiberlerin katkılarını hesaba katmak için özel prosedürlerle değiştirilen geleneksel tasarım yöntemlerine dayanan yıllar içinde çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle, lifler tarafından sağlanan ek çekme kapasitesini hesaba katmak için elemandaki iç kuvvetleri değiştirir. Tam ölçekli test verileriyle karşılaştırıldığında, bu yöntemler FRC üyeleri için tatmin edici tasarımlar sağlamıştır (Parra-Montesinos 2006; Moccichino ve diğerleri 2006; Altoubat ve diğerleri 2009).

Beton, basınçta güçlü, çekmede zayıf olan kırılğan bir malzemedir. Çelik çubuklar, geleneksel olarak yapısal uygulamalarda beton çatladıktan sonra çekme kuvvetlerini taşımak için kullanılır. Betonarmede, çatlama sırasında betonun çekme şekil değiştirmesi, çelik çubukların akma şekil değiştirmesinden çok daha düşüktür, bu da çeliğe herhangi bir önemli yük aktarılmadan önce betonun çatlamasına neden olur. Çelik takviye, servis verilebilirlik gereksinimleri için belirtilen seviyelerin altındaki çatlak genişliklerini sınırlamak için de kullanılır. Takviye çubuklarının aksine, lifler beton hacminde eşit olarak dağılır; bu nedenle, lifler arasındaki mesafe, çubuklar arasındaki boşluktan çok daha küçüktür. Fiberler, beton elemanlarda çatlak sonrası çekme ve eğilme kapasitesi ve çatlak genişlik kontrolü sağlayabilir.

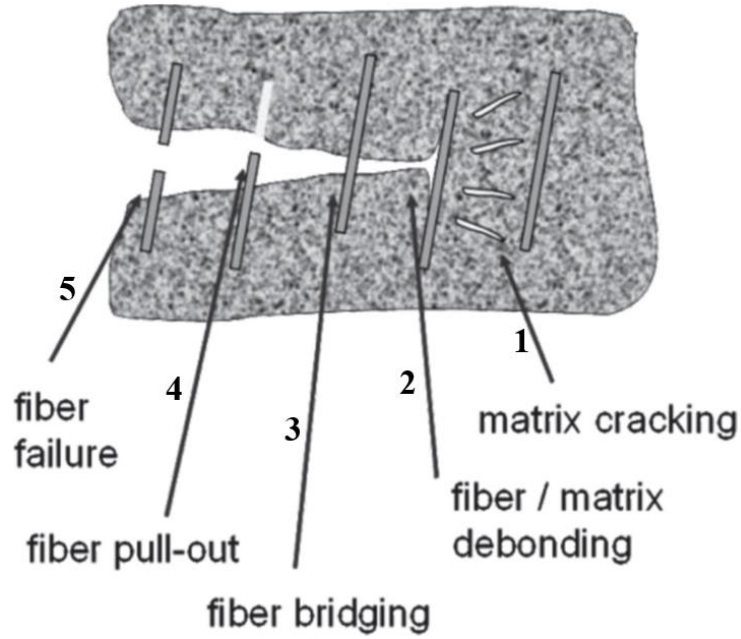
FRC'nin mekanik özelliklerini ve bunların fiber tipi ve dozajı ile değişimini anlamak, başarılı tasarımın önemli bir yönüdür. Lifler, sıkıştırma, çekme, eğilme, kesme, darbe ve yorulma dâhil olmak üzere tüm kırılma modlarında betonun mekanik özelliklerini etkiler (Gopalaratnam ve Shah 1987). Düz matris özellikleri hariç, FRC'nin özelliklerini yöneten en önemli değişkenler elyaf bağ verimliliği ve dozajıdır. Elyaf bağ verimliliği, lif-matris ara yüzündeki bağ kuvvetine bağlı olan, liflerin kopmaya karşı direnci tarafından kontrol edilir. Bazı lif türleri, enerji soğurma işlemi sırasında uzama ve nihayetinde kopma yaşayabilir.

Ticari olarak temin edilebilen çeşitli lif türleri olmasına rağmen, bu belge yalnızca ASTM C1116/C1116M ile uyumlu çelik lifler ve poliolefin sentetik makro lifler için geçerlidir.

Takviye çubuklarından farklı olarak, lifler betonda düzgün bir şekilde dağılır ve lifler arasındaki ortalama mesafe, takviye çubukları için tipik aralıktan çok daha küçüktür. Sonuç olarak, çekme gerilmeleri, çatlama işleminin çok erken aşamalarında lifler tarafından karşılanır ve bu nedenle, düz veya geleneksel olarak güçlendirilmiş betona göre çatlak gelişimi ve desenleri değişebilir. Lifler için tip, malzeme, boyut, geometri ve dozaj konusundaki karar, uygulamaya ve çevresel maruziyete bağlıdır. Sonuç olarak, FRC'nin performansı, kullanıldığı uygulama için standart test yöntemleri kullanılarak değerlendirilmelidir.

Fiberli beton, basınç, çekme, eğilme ve darbe dahil olmak üzere çeşitli yükler altında betonun çatlak sonrası tepkisini kırılığandan sünek hale getirebilir (Bonakdar et al. 2013). Betona liflerin eklenmesi, çekme ve eğilme yükleri altındaki çatlak direncini ve tokluğu özel olarak iyileştirebilir. Bu nedenle, yapısal amaçlar için ve gerekli geleneksel donatı miktarını azaltmak için kullanılabilirler. Eğilmede betonun çatlama noktasına kadar büyük bir değişiklik olmaz. Fiber güçlendirme mekanizmaları esas olarak çatlak gelişimi ile aktive edildiğinden, fiberlerin çatlama elemanlarının davranışını değiştirmesi beklenemez. FRC'nin çatlama zamanı homojen ve izotropik olduğu varsayılabilir, ancak bu varsayım kırık durumundaki FRC için geçerli değildir. Çatlama sonrası, lifler çatlakları köprüler ve çekme gerilmelerini taşımaya başlar ve çatlak durumunda FRC'ye yük taşıma kapasitesi verir. Bu genellikle artık mukavemet veya çatlama sonrası mukavemet olarak adlandırılır. Çelik ve sentetik makro liflerin, betonun çatlak sonrası tepkisini önemli ölçüde iyileştirdiği ve tasarım

amaçları için kullanılabilecek artık dayanım değerleri sağladığı gösterilmiştir (Buratti ve ark. 2011). Aynı karışım tasarımı, lif tipi ve beton mukavemeti ile, daha yüksek lif içerikleri, karışım lifleri uygun şekilde barındırabildiği sürece, çekme veya eğilmede daha yüksek artık mukavemet değerleri sağlar. Fiberlerin tipi ve geometrisi de FRC'nin çatlak sonrası özelliklerini etkiler.



Şekil 2.11: Fiber takviyesinin çalıştığı mekanizmanın şemaları

FRC arızasında yer alan aşamalar, Şekil 2.11'de şematik olarak gösterilmiştir ve aşağıda özetlenmiştir:

- 1) çimento matrisinde çatlak formları;
- 2) lif ve matris arasında bağların ayrılması ve kayması;
- 3) çatlak köprüleyen bağlı elyaf;
- 4) sürtünmeye bağlı kayma, ankrajın deformasyonu ve nihai olarak elyafın çekilmesi;
- 5) gerilim altında potansiyel lif kopması.

"Arıza" terimi, liflerin artık gerilmelere karşı koyamadığı veya mukavemetlerinin tasarımında göz ardı edildiği son aşama ile ilişkilendirilebilir. Liflerin belirli türleri veya

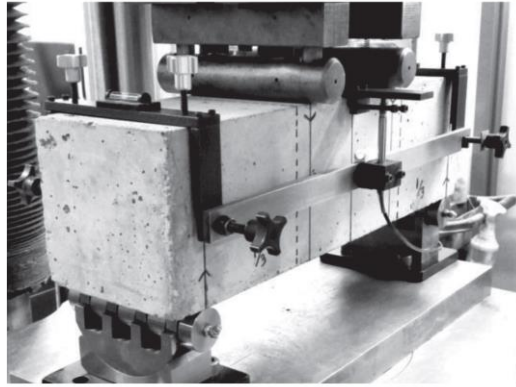
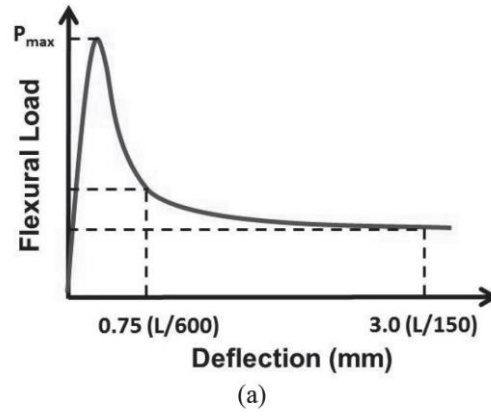
geometrileri için, açıklanan aşamalardan yalnızca bazıları gerçekleşebilir. Çatlaklı bir beton kesitte lifler tarafından taşınan yük veya gerilme seviyesi artık yük veya artık gerilme olarak adlandırılır. Yük-sapma eğrilerinin altındaki alan, FRC tarafından emilen enerjidir ve tasarım amaçları için kullanılan tokluk olarak adlandırılır. Şekil 4.1, bir eğilme yükü testi altında bir FRC kirişi için çatlak kontrolünün farklı aşamalarını göstermektedir. Kiriş, liflerin sürekli yükler altında çatlaklı köprüleme yeteneğini göstermek için bilerek, gerekenden çok daha büyük çatlak genişliklerine kadar kırılmıştır.

Fiberlerin amaçlanan işlevi plastik büzülme altında çatlak kontrolü ise, ASTM C1579 kullanılabilir. Liflerin kuruma büzülmesini (kısıtlama altında) kontrol etme ve çatlak genişliklerini azaltmadaki etkinliği ASTM C1581/C1581M izlenerek belirlenebilir. Bu iki testte, liflerin çatlak genişliğini azaltmadaki etkinliği belirlenir ve kontrole (düz beton) karşı yüzde olarak ifade edilir. Fiberlerden daha yüksek seviyelerde çatlak kontrolü ve çatlak sonrası eğilme kapasitesi bekleniyorsa, FRC kirişleri veya panelleri ASTM C1609/C1609M ve ASTM C1550 kullanılarak test edilmelidir. Eşdeğer Avrupa test yöntemleri sırasıyla BS EN 14651:2005 ve BS EN 14488:2006'dır.

Doğrudan gerilim testinin (statik veya kırılma) gerçekleştirilmesi, FRC için idealdir ve arzu edilir; bununla birlikte, betonun tutamaklarda potansiyel kayması veya ezilmesi veya FRC'nin heterojen doğası nedeniyle, çimento esaslı malzemeler için uygun bir çekme testi son derece zordur. Kabul edilen bir alternatif olarak, eğilme testleri yapılır ve sonuçlar, çekme özelliklerinin geri hesaplanması için kullanılır. Bu eğilme testleri, FRC'nin tam çatlak öncesi ve sonrası tepkisini elde etmek için tasarlanmıştır. FRC için mevcut tüm tasarım araçları, bir tür eğilme testinden elde edilen test parametrelerini kullanır. Bu belge, FRC tasarımında uygulanan parametre olan artık mukavemeti ölçmek için yaygın olarak kullanılan iki test yöntemini açıklar: ASTM C1609/C1609M ve BS EN 14651:2005.

ASTM C1609/C1609M test yöntemi, testi kontrol etmek için belli sehim değerini kullanarak FRC kirişlerinin tam çatlak öncesi ve sonrası eğilme tepkisini ölçer. Test tipik olarak 150x150x500 mm boyutunda ve 450 mm açıklığa sahip FRC kirişler üzerinde gerçekleştirilir. Açıklığın (L) 1/150'si oranında, yani 3 mm orta nokta sehimine ulaşana kadar iki yükleme noktası (dört noktalı eğilme) kullanılır. Şekil 4.2,

tipik bir ASTM C1609/C1609M testinin ve eğilmeye maruz kalan bir kirişin şemalarını göstermektedir. Aşağıdaki parametreler testten belirlenir ve $L/600$ (0,75 mm) ve $L/150$ (3 mm) değerindeki artık dayanım değerlerinin yanı sıra tepe kuvveti de içeren FRC'nin karakterize edilmesinde kullanılır. Burada b kirişin genişliği ve h kirişin yüksekliğidir. Bu parametreleri belirlemek için en az üç tekrarlı kiriş test edilmelidir, ancak FRC'nin artık dayanımı için temsili bir ortalama değer elde etmek için altı kirişin test edilmesi önerilir.



(b)

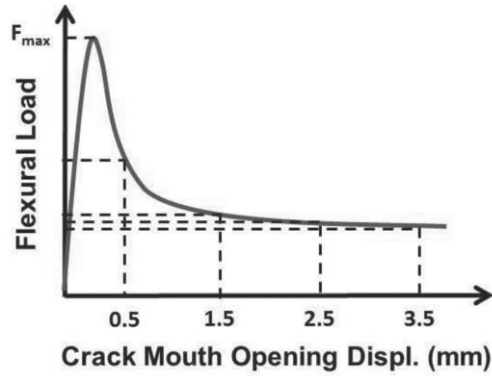
Şekil 2.12: (a) Tipik bir ASTM C1609/C1609M test sonucunun şemaları (strain-softening FRC); ve (b) dört nokta eğilme testi altındaki FRC kirişi. (Not: 1 inç = 25 mm.)

BS EN 14651:2005 test yöntemi ilk olarak RILEM TC 162-TDF (2003) tarafından tanıtılmıştır ve test parametreleri çeşitli tasarım kodları ve şartnamelerde tasarım için yaygın olarak kullanılmaktadır. Test, 500 mm açıklığa ve açıklığın ortasında 25 mm derinliğe sahip küçük bir çentik olan 150x150x550 mm boyutunda FRC kirişler üzerinde gerçekleştirilir. Çentik, bir çatlak başlatıcı olarak kullanılır ve sehim ve çatlak ağzı açıklığı yer değiştirmesi (CMOD), test sırasında orta açıklıkta

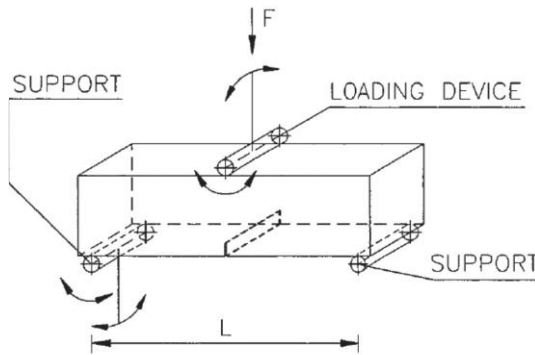
ölçülür. Kiriş, 3.5 mm'lik bir CMOD'ye ulaşana kadar bir yükleme noktasıyla (üç noktalı eğilme) kapalı döngü kontrolü altında test edilir. $F_{R,i}$ parametresi, yük-CMOD eğrisi üzerindeki i noktasındaki artık yüküdür ve $f_{R,i}$, eşdeğer eğilme artık mukavemetidir. Örneğin, $f_{R,3}$, çatlak açıklığının veya CMOD'nin 2.5 mm olduğu $i = 3$ noktasındaki artık mukavemettir. Eşitlik (4.1)'de, L yükleme uzunluğu (açıklık), b genişlik ve h_{sp} kirişin net yüksekliğidir (h_{sp} = toplam yükseklik – çentik yüksekliği).

$$f_{R,i} = \frac{3F_{R,i} \cdot L}{2b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.1)$$

Şekil 4.3, BS EN 14651:2005 için tipik bir testin ve eğilme altında bir kirişin şemalarını göstermektedir. 1, 2, 3 veya 4'lük bir i alt simgesi, bir beton elemanın tasarımında istenen belirli çatlak genişliği için kullanılan 0.5, 1.5, 2.5 veya 3.5 mm'lik çatlak açıklığına veya CMOD değerlerine işaret eder. Bu parametreleri belirlemek için en az üç tekrarlı kiriş test edilmelidir, ancak FRC'nin artık dayanımı için temsili bir ortalama değer elde etmek için altı kirişin test edilmesi önerilir.



(a)

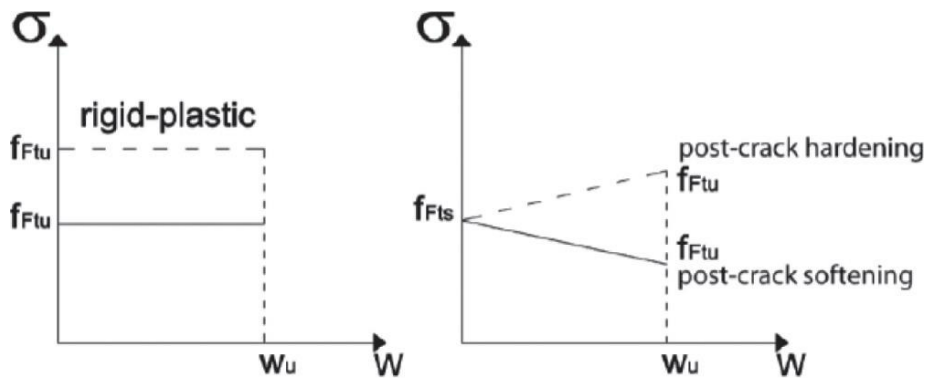


(b)

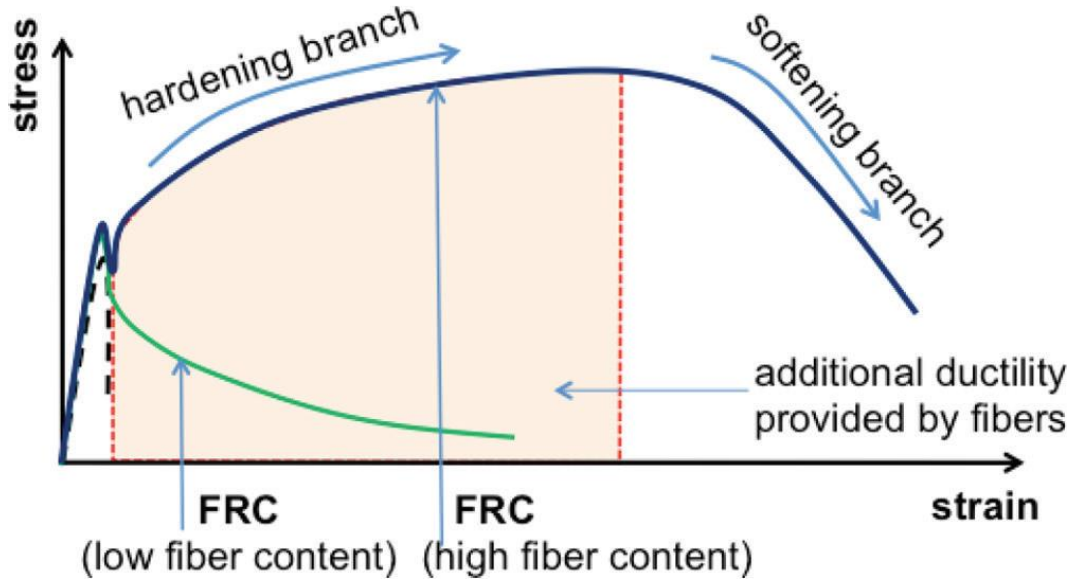
Şekil 2.13: (a) Tipik BS EN 14651:2005 test sonuçlarının şemaları (strain-softening FRC); ve (b) üç nokta eğilme testi altındaki FRC kirişin şemaları. (Not: 1 inç = 25 mm.)

Düşük ila orta dozda lifler, çekme veya eğilme testinde bir ana çatlak köprülemek için yeterli direnç sağlar ve tepki, gerinim yumuşaması (strain softening) olarak adlandırılır. Gerinim yumuşaması sırasında, kırış sehimi ve çatlak genişliği arttıkça artık dayanım kademeli olarak azalır. Gerinim yumuşama FRC, nihai çekme mukavemetinden daha düşük olan bir çatlama sonrası çekme gerilmesine sahiptir. Daha yüksek dozajları, sabitleme mekanizmalarını ve geliştirilmiş bağ kuvvetlerini içeren özel elyaf takviyesi ile elyaflar, birkaç çatlak köprülemek ve gerilimleri yeniden dağıtmak için ekstra direnç sağlayabilir. Bu tepki, gerinim sertleşmesi (strain hardening) olarak bilinir. Gerinim sertleşmesi sırasında, deformasyonlar ve çatlak genişlikleri bir kırılma noktasına kadar büyüdükçe artık dayanım kademeli olarak artar. Yeni nesil liflerin ve kimyasal katkıların geliştirilmesiyle, betonun çatlama stresinden daha yüksek çatlama sonrası çekme gerilimi ile gerinim sertleşen FRC üretmek mümkündür.

Şekil 2.14'te şematik olarak gösterildiği gibi, tek eksenli bir çekme testinden iki basitleştirilmiş gerilim-çatlak açılması kurucu yasası çıkarılabilir: plastik rijit davranış veya lineer çatlama sonrası davranış (sertleşme veya yumuşama). Bu grafiklerde σ çekme gerilimi, w çatlak genişliği ve w_u belirli bir tasarım için nihai çatlak genişliğidir. Rijit-plastik tepki varsayımı ile lifler, çatlak genişliğinden bağımsız olarak, çatlama sonrası sabit bir artık mukavemet sağlar. Bu modelde f_{Ftu} , nihai çekme artık mukavemetini temsil eder. Doğrusal tepki varsayımıyla, liflerin çatlama sonrası sağladığı artık mukavemet, çatlak büyüdükçe azalabilir (gerilme yumuşaması) veya artabilir (gerilme sertleşmesi). Bu modelde, f_{Fts} , belirli çatlak genişlikleri için çatlama sonrası dayanım olarak tanımlanan, kullanılabilirlik artık dayanımını temsil eder.



Şekil 2.14: Tek eksenli testten elde edilen, yumuşama ve sertleşme davranışlarını gösteren, FRC için basitleştirilmiş çatlak sonrası gerilme-çatlak genişliği ilişkisi (fib 2013).

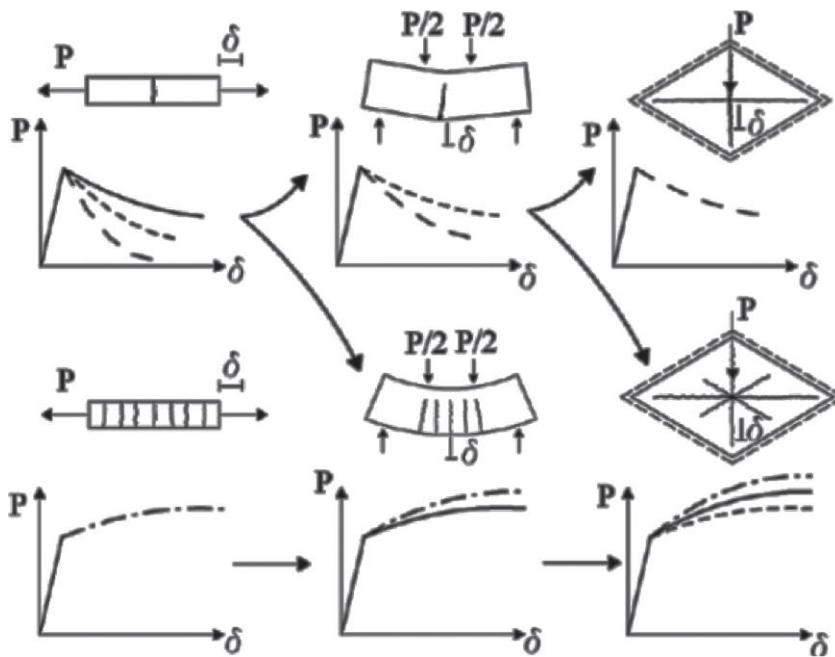


Şekil 2.15: Yumuşama ve sertleşme davranışları gösteren, eğilme testinden elde edilen liflerin çekme/esneme performansına katkısı.

Şekil 2.15, iki farklı fiber dozajı için eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrilerini göstermektedir. Donatısız betona karşılık gelen noktalı çizgi, çatlama yüküne ulaşıldığında kırılma bir göçme gösterir. Yeşil çizgi nispeten düşük lif dozajına sahip FRC'ye karşılık gelir; kırılma bir göçme yoktur, ancak ilk çatlak meydana geldiğinde, yük taşıma kapasitesi yavaş yavaş azalır (softening behavior). Mavi çizgi, nispeten yüksek lif dozajı ile FRC'nin davranışını temsil eder; çatlama yüküne ulaşıldıktan sonra, beton yük taşımayı sürdürebilir ve lifler, betonun çatlama yükünden daha yüksek olan pik sonrası bölgede maksimum bir stres değerine (nihai yük) ulaşana kadar artan yükleri (hardening behavior) taşımaya devam eder. Bundan sonra, yük taşıma kapasitesi yavaş yavaş azalır (final softening behavior). Liflerin katkısı nedeniyle, malzeme, güçlendirilmemiş muadili ile karşılaştırıldığında çok fazla ek deformasyon enerjisi (eğri altında gölgeli bölge) emebilir.

Yumuşama davranışı ve sertleşme davranışı arasındaki sınır, elyaf malzemesi, geometri ve dozaj dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Bununla ilgili olarak, di Prisco ve ark. (2009), aynı lif tipi için artık mukavemetin, aktif çatlakları geçen liflerin sayısına ve bunların yönüne önemli ölçüde bağlı olduğuna işaret etmiştir. Bu nedenle lifler, eleman tipine ve yük koşullarına göre seçilmelidir.

Belirli koşullar altında, bir yapının eğilme-sertleşme tepkisi, bir gerilim yumuşatıcı veya eğilme-yumuşatıcı malzeme ile bile elde edilebilir. Bu, Model Kodu 2010'a (fib 2013) uygun olarak yalnızca yeterli yeniden dağıtma kapasitesine sahip yapıların yumuşatıcı malzemelerle tasarlanabileceği anlamına gelir. Yalnızca fiberlerle güçlendirilmiş yapılar için sistem sünekliği kanıtlanamıyorsa, Model Kodu 2010 (fib 2013), yapının sünek tepkisini elde etmek için geleneksel donatı gerektirir. Bunlar, gerilim, eğilme ve bir sistem altındaki FRC için Şekil 2.16'da şematik olarak gösterilmiştir. En üstteki üç grafik, gerilim yumuşatma davranışını gösterirken, alttaki üç grafik, üç durum için gerilim sertleşmesi tepkisini gösterir.



Şekil 2.16: Gerilim, eğilme ve bir sistem altındaki FRC'de gerilim yumuşatma ve gerilim sertleşirme şemaları (Model Kodu 2010 [fib 2013]). İlk üçü gerilim yumuşatma davranışını gösterir; alttaki üç gerilim sertleşmesi tepkisini gösterir

FRC'nin tasarımı ve özelliklerinin yapısal hesaplamalara dahil edilmesi, tek tek fiberlerin değil, kompozit malzemenin performansına dayanmaktadır. Yapı fizibilitesi ve kısa vadeli ve uzun vadeli performans gereksinimleri, belirli uygulamalarda lif türlerini ve dozajını sınırlayabilir. Betonun özelliklerinin yanı sıra liflerin tipi ve dozajından da etkilendiği için ana parametre olarak artık mukavemete dikkat edilmelidir.

Artık mukavemet gibi malzeme özellikleri, önceki bölümde açıklanan standart kiriş testlerinden belirlenir. Bu özellikler daha sonra FRC'nin performansını ve ilgili

yük taşıma kapasitesini belirlemek için bu bölümde sunulduğu gibi denklemlere eklenir. Test programları, geleneksel tasarımda kısmi güvenlik faktörlerinin kapsadığı belirsizlikler için uygun toleransı içeren uygun bir tasarım mukavemeti oluşturulabilecek şekilde yapılmalıdır. Genel olarak, bir karakteristik (ve dolayısıyla tasarım) tepkisinin elde edilebilmesi için, davranış ve bunların değişkenliği üzerindeki malzeme mukavemetlerinin etkisini belirlemek gerekli olacaktır. Prototipten önemli ölçüde daha küçük veya daha büyük elemanlar üzerinde test yapıldığında, sonuçların yorumlanmasında boyut etkileri dikkate alınmalıdır. Her iki sınır durumunda da malzeme davranışına dikkat edilmelidir: Mukavemet gereksinimleri için nihai sınır durumu (ULS) ve çatlak genişliği ve sapma sınırları için hizmet verebilirlik sınır durumu (SLS).

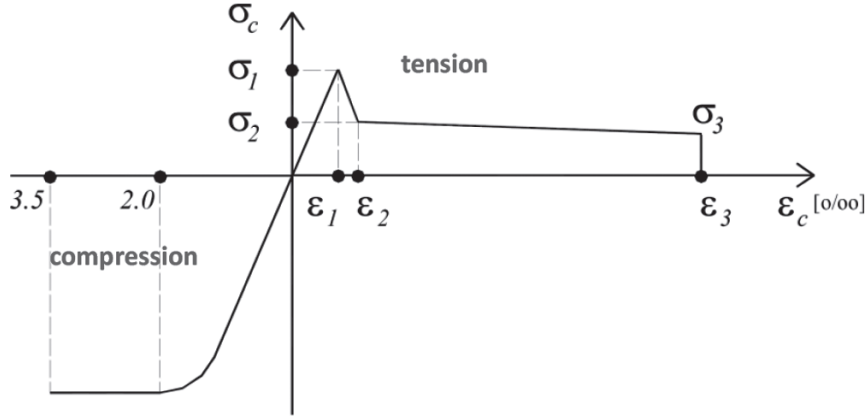
Düz betonun çekme dayanımı önemsizdir ve bu nedenle geleneksel bir betonarme bölümün tasarımında dikkate alınmaz. Betona çelik veya sentetik makro liflerin eklenmesi, çatlama sonrası çekme mukavemeti sağlar; bu nedenle, tasarım sürecinde FRC'nin etkin çekme mukavemeti kullanılır. Daha önce açıklandığı gibi, uygun bir çekme testi yapmak zordur ve alternatif olarak eğilme testleri yapılır. Artık çekme mukavemeti, daha sonra, dönüştürme faktörleri vasıtasıyla ölçülen artık eğilme mukavemetinden türetilir. Aşağıda tasarım konseptleri ve prosedürlerinin bir özeti verilmektedir; bununla birlikte, FRC'nin çekme gerilimi-birim şekil değiştirme davranışı ve bunun eğilme testi verileriyle korelasyonu hakkında daha fazla ayrıntı ACI 544.8R'de bulunabilir.

Doğrudan gerilimde FRC'nin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır (Shah ve diğerleri 1978; Gopalaratnam ve Shah 1987b); ancak ASTM tarafından tanınan standart bir test yöntemi yoktur. Bu belgede kullanılan idealleştirilmiş çekme gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı, Şekil 2.17'de gösterilen RILEM TC 162-TDF (2003) tarafından önerilenle aynıdır. Bu kurucu modeli tanımlayan değerler, tasarım sürecinde kullanılan ortalama veya karakteristik değerlere dayanmaktadır. Diyagramın basınç tarafının kilit noktaları, doğrudan standart basınçlı silindir testinden elde edilir. Diyagramın çekme tarafı için, kilit noktalar dolaylı olarak bir eğilme testinden elde edilir.

a) σ_1 ve ε_1 —ilk çatlamanın başlangıcında çekme gerilimi ve karşılık gelen gerinim.

b) σ_2 ve ε_2 —kararlı yumuşama dalının başlangıcındaki gerilim ve gerinim.

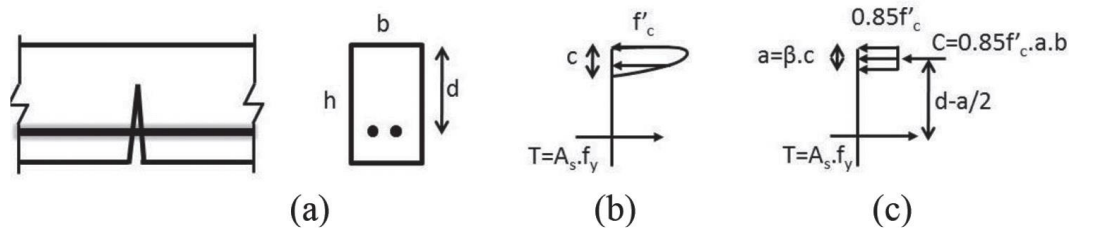
c) σ_3 ve ε_3 —yumuşatma kolunun sonundaki gerilim ve gerinim.



Şekil 2.17: RILEM TC 162-TDF (2003) ve Vandewalle'e (2003) göre tek eksenli çekme ve basınçta FRC için tipik bir gerilme-birim şekil değiştirme diyagramının şemaları

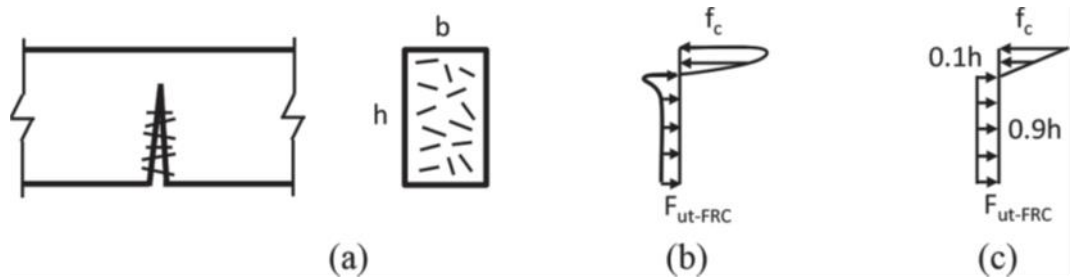
Fibersiz geleneksel bir betonarme kesit için nominal eğilme momenti, M_{n-RC} , Şekil 4.8'de gösterildiği gibi enine kesitteki kuvvet dengesinden, eşitlik 4.2'ye göre hesaplanır. Şekil 2.18(a) fibersiz bir RC kiriş bölümüdür, Şekil 2.18(b) normal gerilmelerin gerçek dağılımını gösterir ve Şekil 2.18(c), çatlak bölümdeki normal gerilmelerin basitleştirilmiş dağılımını gösterir. Beton çatladıktan sonra, basınç kuvveti C beton tarafından (nötr eksenin üzerinde) ve çekme kuvveti T ise donatı çubuğu tarafından (nötr eksenin altında) taşınır. Gerilim bloğunun, bir moment-eğrilik ilişkisi türetmek için değil, yalnızca nihai momentin hesaplanması için doğru olduğuna dikkat edilmelidir. Düz betonun çekme kapasitesi ihmal edilebilir düzeydedir ve bu hesaplamalarda dikkate alınmaz.

$$M_{n-RC} = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.2)$$



Şekil 2.18: Fibersiz çatlaklı betonarme eğilme elemanı için gerilim bloğu şemaları: (a) betonarme kiriş kesiti; (b) normal gerilmelerin gerçek dağılımı; ve (c) normal gerilmelerin basitleştirilmiş dağılımı.

Aynı stres bloğu konsepti bir FRC kesitine de uygulanabilir. ASTM C1609/C1609M, gerekli tasarım parametrelerini elde etmek için gerçekleştirilir. Bir FRC kesiti için nominal eğilme momenti M_{n-FRC} , Şekil 2.19'da gösterildiği gibi enine kesitteki kuvvet dengesinden eşitlik (2.3) ve (2.4)'ye göre hesaplanır. Şekil 2.19(a) fiberlerle güçlendirilmiş bir FRC kiriş kesitini, Şekil 2.19(b) normal gerilmelerin gerçek dağılımını ve Şekil 2.19(c), çatlaktaki normal gerilmelerin basitleştirilmiş dağılımını gösterir. Basınç gerilmeleri beton tarafından, çekme gerilmeleri ise takviye lifleri tarafından taşınır. FRC için basınç gerilmelerinin dağılımı, liflerin ve betonun nötr eksen üzerindeki bileşik etkisinden dolayı dikdörtgen yerine üçgen olarak basitleştirilmiştir. FRC'nin çekme dayanımı, düz betonunkinden çok daha yüksektir ve bu nedenle bu hesaplamalarda dikkate alınır. ULS için, çatlaklı FRC'nin nihai çekme mukavemeti, f_{ut-FRC} , eşitlik (2.3)'de gösterildiği gibi ASTM C1609/C1609M testinden ölçülen, artık eğilme mukavemeti f_{150}^D 'nin (veya f_{e3}) 0.37 katı olarak alınabilir. Çatlaklı bir FRC bölümünün moment kapasitesi, RILEM TC 162-TDF (2003) ve Vandewalle (2003) tarafından kullanılan benzer yöntemle birlikte geliştirilen eşitlik (2.4)'te gösterilmektedir. FRC, SLS gereksinimleri altında daha küçük çatlak genişlikleri için tasarlanmışsa, kiriş testinde daha küçük sapmaya karşılık gelen f_{600}^D gibi diğer parametreler kullanılabilir. Tasarım sınırının seçimi (ULS'ye karşı SLS) ve ilgili tasarım parametresi, uygulama ve servis verilebilirlik gereksinimlerine bağlıdır.



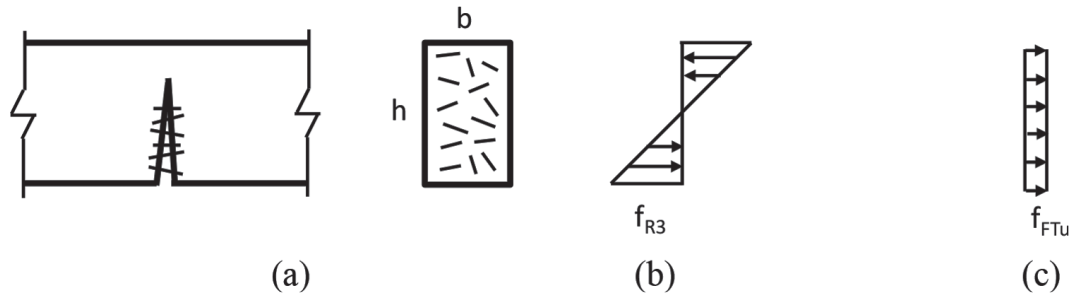
Şekil 2.19: Çatlak bir FRC eğilme elemanı için gerilim bloğu şemaları. (a) FRC kiriş bölümü; (b) normal gerilmelerin gerçek dağılımı ve (c) normal gerilmelerin basitleştirilmiş dağılımı.

$$f_{ut-FRC} = 0.37f_{150}^D \quad (2.3)$$

$$M_{n-RC} = f_{150}^D \times \frac{bh^2}{6} \quad (2.4)$$

FRC tasarımı, burada özetlenen Model Kodu 2010 (fib 2013) tasarım yönergeleri kullanılarak çentikli kirişler üzerinde BS EN 14651:2005 testinden elde

edilen moment-çatlak genişliği ilişkisi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bir FRC kesiti için nominal moment M_{n-FRC} , Şekil 2.20'de gösterildiği gibi, enine kesitteki kuvvet dengesinden, eşitlik (2.5) -(2.8)'den elde edilir. Şekil 2.20(a), fiberlerle güçlendirilmiş bir FRC kiriş kesitini, Şekil 2.20(b) eğilme gerilmelerinin dağılımını, Şekil 2.20(c) çatlak bölümdeki normal gerilmelerin basitleştirilmiş dağılımını göstermektedir. Nihai durum tasarımı için sabit bir çekme artık mukavemet değeri f_{FTu} kullanılır. Bu yöntemde FRC'nin çatlak sonrası çekme dayanımının hesaplanması için iki model önerilmiştir. Basitleştirilmiş rijit-plastik olarak adlandırılan ilk modelde, FRC'nin nihai çekme mukavemeti f_{Fu-FRC} , BS EN 14651:2005 kiriş testinden ölçülen FRC'nin artık eğilme mukavemeti $f_{R,3}$ 'ün üçte bir katı sabit bir değer olarak alınır. Çekme mukavemeti ve nominal eğilme momentinin hesaplanması için formüller sırasıyla eşitlik (2.5) ve (2.6)'da gösterilmiştir. İkinci model hem servis kolaylığı hem de bir FRC kesitinin nihai sınır tasarımı için artık dayanım ve çatlak genişliği arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayar. Çekme mukavemeti ve nominal eğilme momentinin hesaplanması için formüller sırasıyla eşitlik (2.7) ve (2.8)'de gösterilmiştir. Doğru denklemlerin seçiminde tasarımın durumuna dikkat edilmelidir (hizmet verilebilirlik sınır durumu (SLS) ile nihai sınır durumu (ULS) arasında). Model Kodu 2010'a (fib 2013) göre tasarımın yalnızca zaman veya sıcaklıktan veya her ikisinden önemli ölçüde etkilenmeyen bir Young modülüne sahip fiber malzemeleri kapsadığı belirtilmektedir. Ek olarak, $f_{R,1}/f_L > 0.4$ ve $f_{R,3}/f_{R,1} > 0.5$ gibi minimum gereklilikler geçerlidir; burada f_L , eşitlik (2.1)'e göre hesaplanan orantılılık sınırındır (LOP). Model Kodu 2010 (fib 2013) tarafından verilen kurallar, yalnızca çelik fiber takviyeli betonla ilgili deneyimlere dayanmaktadır.



Şekil 2.20: Çatlamış bir FRC eğilme elemanı için gerilim bloğu şemaları: (a) FRC kiriş bölümü; (b) eğilme gerilmelerinin dağılımı ve (c) normal gerilmelerin basitleştirilmiş dağılımı.

Rijit-plastik model için kullanılan formüller eşitlik (2.5) ve (2.6)'da verilmiştir (sadece ULS için).

$$f_{Ftu-FRC} = \frac{f_{R,3}}{3} \quad (2.5)$$

$$M_{nu-FRC} = f_{R,3} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \quad (2.6)$$

Lineer model için kullanılan formüller eşitlik (2.7) ve (2.8)'de verilmiştir (SLS ve ULS için).

$$\begin{cases} f_{Fts-FRC} = 0.45f_{R,1} \\ f_{Ftu-FRC} = (0.45f_{R,1}) \\ (0.45f_{R,1} - 0.5f_{R,3} + 0.2f_{R,1}) \end{cases} - \frac{w_u}{CMOD_3} \geq 0 \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} M_{ns-FRC} = f_{R,1} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \\ M_{nu-FRC} = f_{R,3} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \end{cases} \quad (2.8)$$

2.3.2 RILEM TC 162-TDF: Çelik Lif Takviyeli Beton İçin Test ve Tasarım Yöntemleri

Gerilme-birim şekil değiştirme (σ - ϵ) yöntemine göre çelik lifli betonarme tasarımı, normal betonarme tasarımı ile aynı temellere dayanmaktadır. Önerilen yöntem, basınç dayanımları C50/60'a kadar olan çelik lifli beton için geçerlidir. Çelik lifler ayrıca yüksek dayanımlı betonda, yani $f_{ck} > 50$ N/mm² olan betonda da kullanılabilir. Ancak çelik liflerin çekilmeden önce gevrek bir şekilde kırılmamasına dikkat edilmelidir.

Avrupa ön standardı ENV 1992-1-1 (Eurocode 2: Eurocode 2: Design of Concrete Structures- Part 1: General rules and rules for buildings), önerilen bu tasarım yöntemi için genel bir çerçeve olarak kullanılmıştır.

Çelik lif takviyeli betonun (SFR-beton) basınç dayanımı, ya beton silindirler ($\phi=150$ mm, $h=300$ mm) ya da beton küpler (150 mm) üzerinde standart testler vasıtasıyla belirlenmelidir.

Tasarım ilkeleri, dikkate alınan beton hacminin tüm olası dayanım belirlenmelerinin popülasyonunun %5'inden fazlasının altına düşmemesi beklenen dayanım değeri olarak tanımlanan 28 günlük karakteristik dayanıma dayanmaktadır. Sertleştirilmiş SFR-beton, silindir mukavemeti f_{fck} veya küp mukavemeti $f_{fck,küp}$ ile ilgili SFR-beton mukavemet sınıfları tarafından basınç mukavemetine göre sınıflandırılır (Tablo 2.1). Bu mukavemet sınıfları, düz beton ile aynıdır.

Tablo 2.1: Çelik lifli betonarme dayanım sınıfları: karakteristik basınç dayanımı f_{fck} (silindirler), ortalama $f_{fctm,fl}$ ve karakteristik $f_{fctk,fl}$ N/mm² cinsinden eğilme çekme dayanımı; E_{fcm} kN/mm² cinsinden ortalama sekant elastisite modülü

SFRC'nin							
dayanım sınıfı	C25/20	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{fck}	20	25	30	35	40	45	50
$f_{fctm,fl}$	3.7	4.3	4.8	5.3	5.8	6.3	6.8
$f_{fctk,fl}$	2.6	3.0	3.4	3.7	4.1	4.4	4.8
E_{fcm}	29	30.5	32	33.5	35	36	37

Yalnızca basınç dayanımı f_{fck} belirlendiğinde, çelik fiber takviyeli betonun tahmini ortalama ve karakteristik eğilme çekme dayanımı aşağıda verilen eşitlikler (2-9) -(2.12)'den türetilir. Birimler N/mm²'dir.

$$f_{fctm,ax} = 0.3 \cdot (f_{fck})^{2/3} \quad (2.9)$$

$$f_{fctk,ax} = 0.7 \cdot f_{fctm,ax} \quad (2.10)$$

$$f_{fct,ax} = 0.6 \cdot f_{fct,fl} \quad (2.11)$$

$$f_{fctk,fl} = 0.7 \cdot f_{fctm,fl} \quad (2.12)$$

Eğilme testleri yapılırsa, orantılılık sınırının (LOP) karakteristik değerini belirlemek için aşağıdaki yöntem kullanılabilir:

$$f_{fctk,L} = f_{fctm,L} - k_x s_p \quad (2.13)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (f_{fctm,L} - f_{fct,L})^2}{(n - 1)}} \quad (2.14)$$

$f_{fctk,L}$: LOP'un karakteristik değeri (N/mm²),

$f_{fctm,L}$: LOP'un ortalama değeri (N/mm²),

s_p : standart sapma (N/mm²),

n : numune sayısı,

k_x : numune sayısına bağlı faktör, bazı değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Eşitlik (2.12) ve (2.13) ifadelerinin maksimum değeri, SFR-betonunun eğilme gerilme mukavemeti olarak alınabilir. Tablo 2.2'de $k_{xunknown}$, popülasyon varyasyon katsayısının bilinmediği anlamına gelir; popülasyonun standart sapması yerine, nokta kontrolünün standart sapması kullanılacaktır. Sekant modülü E_{fcm} 'nin kN/mm² cinsinden ortalama değeri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.2: Numune sayısının bir fonksiyonu olarak k_x

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
k_{xknown}	2.31	2.01	1.89	1.83	1.80	1.77	1.74	1.72	1.68	1.67	1.64
$k_{xunknown}$	-	-	3.37	2.63	2.33	2.18	2.00	1.92	1.76	1.73	1.64

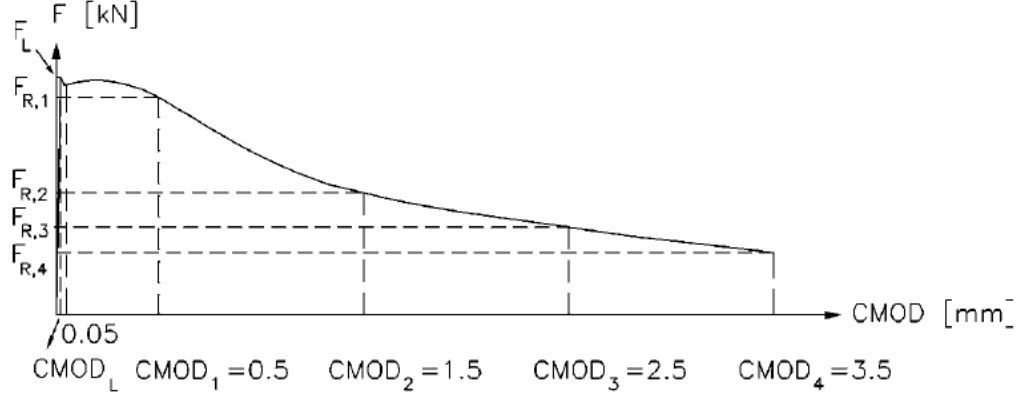
Çelik fiber takviyeli betonun çatlama sonrası davranışını karakterize eden önemli bir parametre olan artık eğilme çekme mukavemeti $f_{R,i}$, CMOD (çatlak ağzı açıklığı yer değiştirmesi) veya sehim kontrollü eğilme testi ile belirlenir. Yük-CMOD ilişkisi Şekil 2.21'de verilmiştir.

Kalan eğilme gerilme mukavemetleri sırasıyla $f_{R,1}$, $f_{R,4}$, aşağıdaki çatlak ağzı açıklığı yer değiştirmesinde (CMODi) veya orta açıklık sehimlerinde ($\delta_{R,i}$) tanımlanır:

$$\begin{aligned} \text{CMOD}_1 = 0.5 \text{ mm} & \quad - \quad \delta_{R,1} = 0.46 \text{ mm} \\ \text{CMOD}_4 = 3.5 \text{ mm} & \quad - \quad \delta_{R,4} = 3.00 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$f_{R,i} = \frac{3F_{R,i} \cdot L}{2b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.15)$$

Burada, b eleman genişliği (mm), h_{sp} eleman yüksekliğinden çentik boyunun çıkarıldığı net yükseklik (mm) ve L elamanın açıklığıdır.

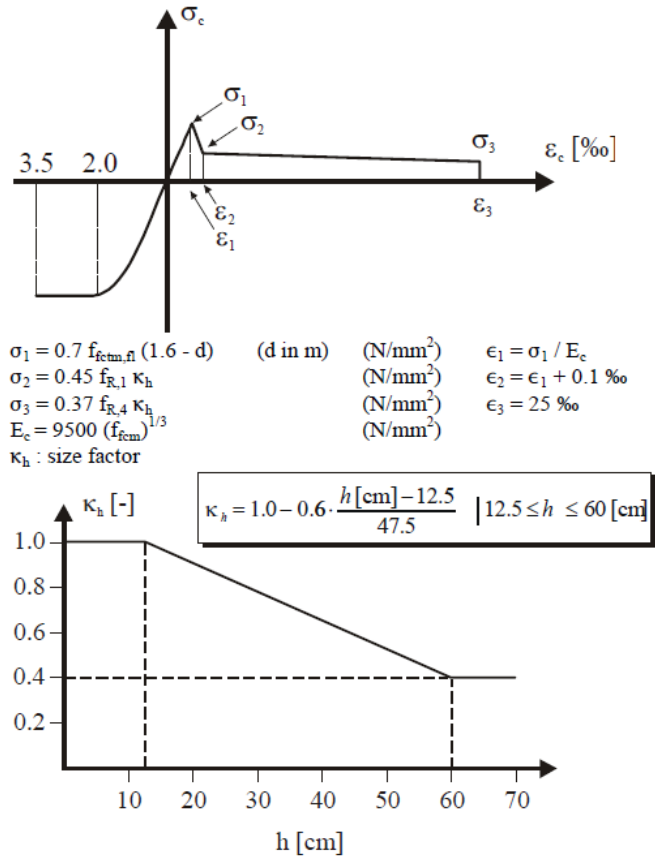


Şekil 2.21: Yük-CMOD diyagramı

“Karakteristik” ve “ortalama” artık eğilme çekme dayanımı arasındaki ilişki eşitlik (4.13) 'te verilmiştir.

Sertleştirilmiş SFR-beton, artık eğilme dayanımları $f_{R,1}$ ve $f_{R,4}$ tarafından belirlenen iki parametre kullanılarak sınıflandırılır. İlk parametre $FL_{0.5}$, 0.5 MPa'nın en yakın katına indirgenmiş $f_{R,1}$ değeri ile verilir ve 1 ile 6 MPa arasında değişebilir. İkinci parametre $FL_{3.5}$, 0.5 MPa'nın en yakın katına indirgenmiş $f_{R,4}$ değeri ile verilir ve 0 ile 4 MPa arasında değişebilir. Bu iki parametre, sırasıyla 0,5 ve 3,5 mm CMOD değerlerinde garanti edilen minimum karakteristik kalıntı dayanımları belirtir. Artık mukavemet sınıfı, iki parametrenin karşılık gelen değerleriyle $FL_{FL_{0.5}/FL_{3.5}}$ olarak temsil edilir. Örneğin, 30 MPa'lık bir karakteristik silindir basınç dayanımına ve $f_{R,1}=2,2$ MPa ve $f_{R,4}=1,5$ MPa'ya sahip bir SFRC, $FL_{0.5}=2.0$ MPa ve $FL_{3.5}=1.5$ MPa'ya sahip olacak ve C30/37 $FL_{2.0/1.5}$ olarak sınıflandırılacaktır.

Çelik elyaf takviyeli betonda, çekme ve basınç altındaki gerilmeler, Şekil 2.22'de gösterilen gerilme-şekil değiştirme diyagramından türetilir.



Şekil 2.22: Gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı ve boyut faktörü κ_h

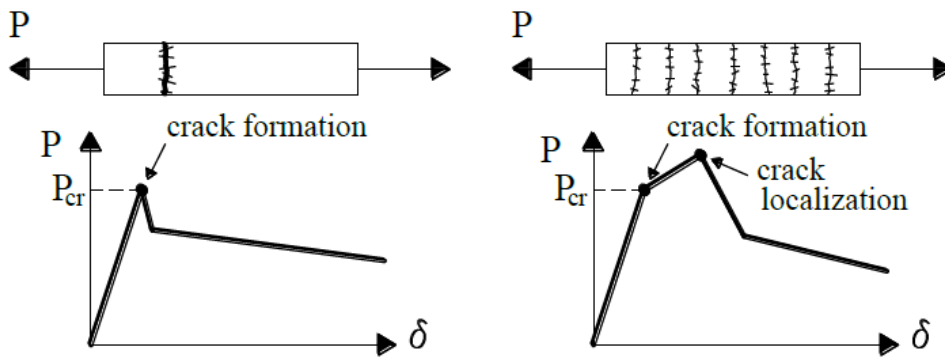
2.3.3 Model Kodu 2010 (fib)

Elyaf Takviyeli Beton (FRC), çimento matrisi ve ayrıık liflerle (süreksiz) karakterize edilen kompozit bir malzemedir. Matris beton veya harçtan yapılıır. Lifler çelik, polimerler, karbon, cam veya doğal malzemelerden yapılabilir. Farklı tipte ve / veya boyutta elyaf karışımları da kullanılabilir (hibrit elyaf takviyeli beton olarak adlandırılır). Yapısal uygulamalar için FRC, elyaf takviyesi ile sağlanan çatlama sonrası artık mukavemeti dikkate almak için tasarım kurucu yasaların kullanılması anlamına gelir. Erken yaş çatlak kontrolü veya yangına dayanıklılık gibi diğer durumlar FRC'nin yapısal olmayan kullanımı olarak kabul edilir. Yapısal kullanım için, FRC'nin minimum mekanik performansı garanti edilmelidir.

Lifler, SLS'deki davranışı iyileştirmek için kullanılabilir, çünkü çatlak aralığını ve çatlak genişliğini azaltarak dayanıklılığı artırır. Ayrıca, geleneksel takviyenin kısmen veya tamamen yerini alabilecekleri ULS'deki davranışı iyileştirmek için kullanılabilir.

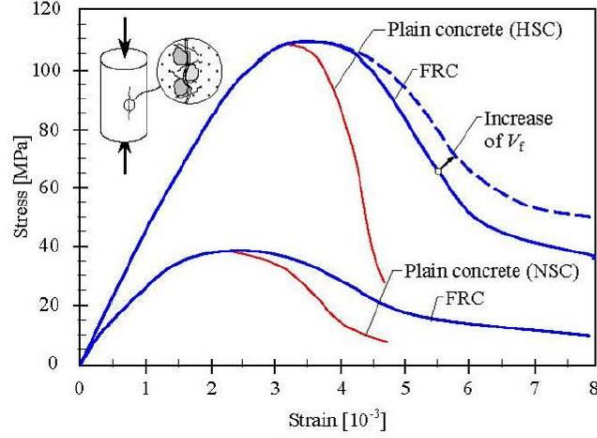
Çimentolu bir matrisin mekanik özellikleri, lifler eklendiğinde değişir. Bununla birlikte, elastik özellikler ve basınç dayanımı, yüksek oranda lif kullanılmadığı sürece liflerden önemli ölçüde etkilenmez.

Fiber Takviyeli Betonlar (FRC), bileşimlerine bağlı olarak sertleşme veya yumuşama davranışı gösterebilir (Şekil 2.23). Yumuşama davranışı durumunda (a) deformasyonlar bir çatlakta lokalize olur. Sertleşme davranışı durumunda (b) tepe değerine ulaşmadan önce birden fazla çatlama meydana gelir.



Şekil 2.23: Eksenel çekme altında (a) yumuşama (b) sertleşme davranışı

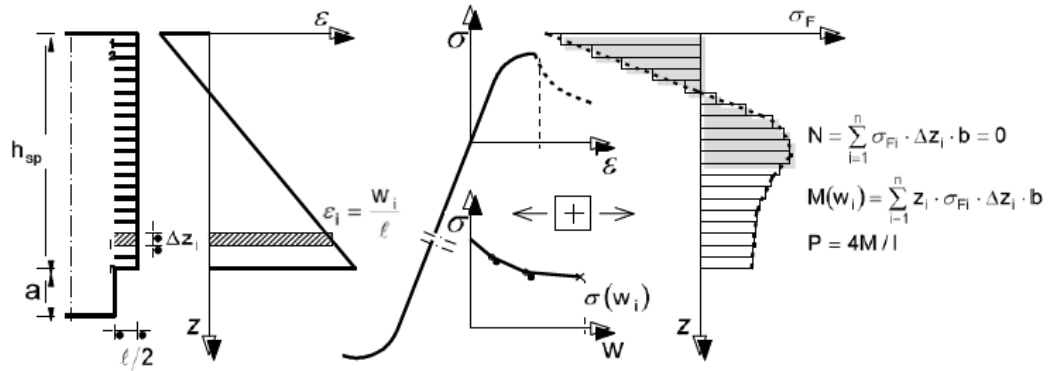
Genellikle düz beton için geçerli olan basınç bağıntıları FRC için de geçerlidir. Lifler, özellikle yüksek veya ultra yüksek dayanımlı betonda, sıkıştırma sırasında betonun kırılgenliğini azaltabilir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24: Malzemeden yapısal seviyeye yumuşama veya sertleşme davranışı gösteren malzemeler arasındaki temel farklar

FRC'nin en önemli yönü olan çekmedeki davranışıyla ilgili olarak çeşitli test yöntemleri mümkündür. Çekme testinin yapılması ve yorumlanması zor olduğu için, yük-sehim ilişkisini belirlemeye yönelik eğilme testlerinden yararlanır.

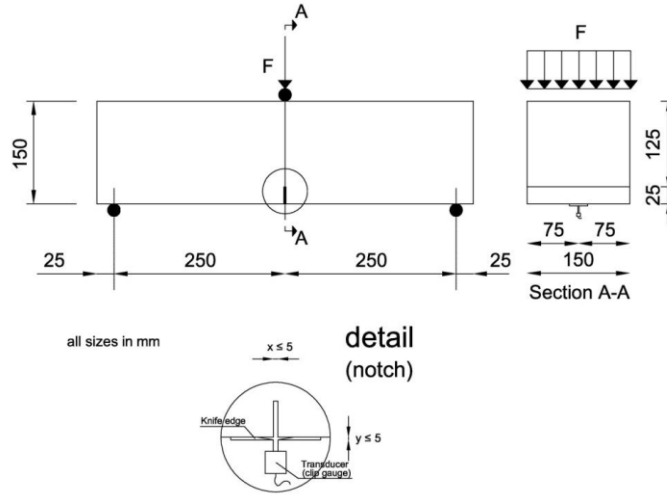
Eğilme testinden elde edilen sonuçlar, Şekil 2.25'te gösterildiği gibi çok sayıda çatlak açıklığı için denge hesaplamaları gerçekleştirerek, ters analiz yoluyla gerilim – çatlak genişliği ilişkilerini türetmek için kullanılabilir.



Şekil 2.25: Gerilme-çatlak açıklığı ilişkisini elde etmek için yapılan eğilme altındaki kirişin ters analizi

Nominal özellikler, EN 14651'e göre çentikli bir kiriş üzerinde 3 noktalı bir eğilme testi yapılarak belirlenebilir (Şekil 2.26). Uygulanan kuvvetin (F) deformasyona karşı diyagramı oluşturulmalıdır (Şekil 2.27). Deformasyon, çatlak ağız açıklığı ($CMOD$) cinsinden ifade edilecektir.

Artık eğilme çekme dayanımı parametreleri, f_{Rj} , F - $CMOD$ ilişkisinden elde edilir ve eşitlik (2.15)'te verilen ifade kullanılır.



Şekil 2.26: Gerilme-çatlak açıklığı ilişkisini elde etmek için yapılan eğilme altındaki kirişin ters analizi

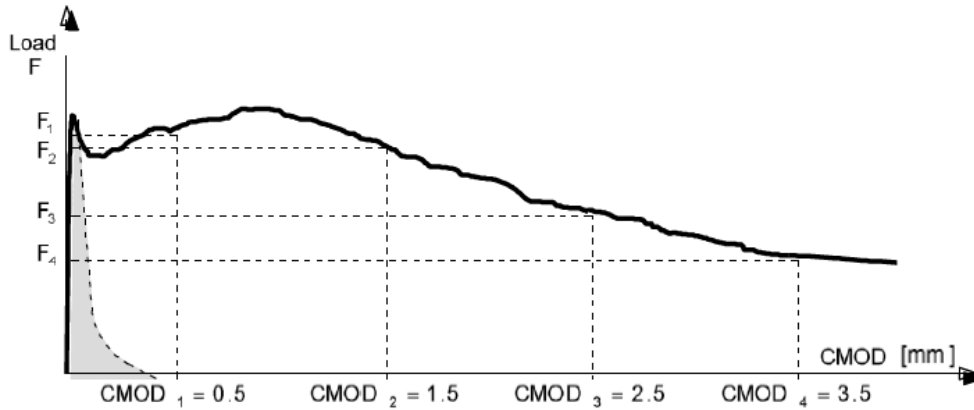


Figure 5.6-6: Inverse analysis of beam in bending performed to obtain stress – crack opening relation

Şekil 2.27: Gerilme-çatlak açma ilişkisini elde etmek için yapılan eğilmede kirişin ters analizi-
Yük-CMOD ilişkisi

FRC'nin çatlama sonrası dayanımını sınıflandırmak için, servis (f_{R1k}) ve nihai (f_{R3k}) koşulları için önemli olan karakteristik artık dayanımları dikkate alarak doğrusal bir elastik davranış varsayılabilir.

Çatlama sonrası artık dayanım, f_{R1k} (dayanım aralığını temsil eder) ve bir harf (a, b, c, d) olmak üzere iki parametre kullanılarak sınıflandırılabilir. Mukavemet

aralığı, serideki iki ardışık sayı ile tanımlanır: 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 [MPa] ve a, b, c, d harfleri artık mukavemet oranlarına karşılık gelir.

$$0.5 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 0.7 \text{ ise "a"}$$

$$0.7 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 0.9 \text{ ise "b"}$$

$$0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 1.1 \text{ ise "c"}$$

$$1.1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 1.3 \text{ ise "d"}$$

$$1.3 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \text{ ise "e"}$$

Örneğin, "3b" ile gösterilen bir malzeme, 3 ile 4 MPa arasında değişen bir f_{R1k} mukavemetine ve 0,7 ile 0,9 arasında değişen bir f_{R3k}/f_{R1k} oranına sahiptir. Tasarımcı, lifin sınıfını, artık mukavemet oranını ve malzemesini belirtmelidir.

Fiber takviyesi, aşağıdaki ilişkiler yerine getirilirse, nihai sınır durumunda geleneksel takviyeyi (kısmen de) değiştirilebilir:

$$f_{R1k}/f_{Lk} > 0.4$$

$$f_{R3k}/f_{R1k} > 0.5$$

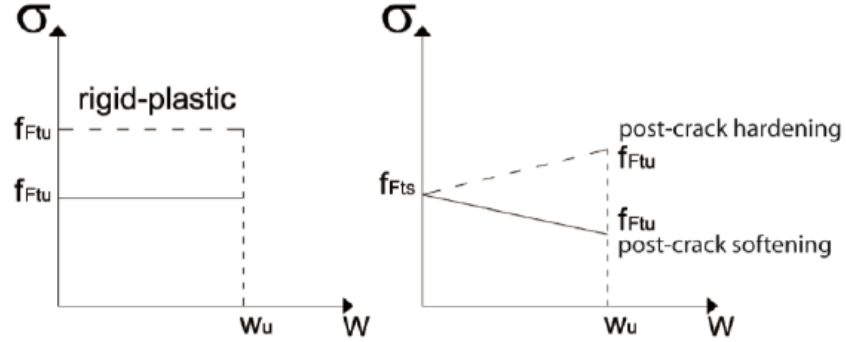
EN 14651'de tanımlandığı gibi orantılılık sınırı f_L , aşağıdaki eşitlik (2.16) uygulanarak belirlenebilir:

$$f_L = \frac{3F_L \cdot L}{2b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.16)$$

Tek eksenli çekmede gerilme-çatlak açıklığı (stress-crack opening) kuralı, çatlama sonrası aralığı için tanımlanmıştır.

Eğilme testi sonuçlarından Şekil 2.28'de şematik olarak gösterildiği gibi plastik bir rijit davranış veya doğrusal bir çatlama sonrası davranış (sertleşme veya yumuşama) için iki basitleştirilmiş gerilme-çatlak açıklığı bünye denklemi çıkarılabilir. Burada f_{Fts} , servis edilebilirlik çatlak açıklıkları için çatlama sonrası

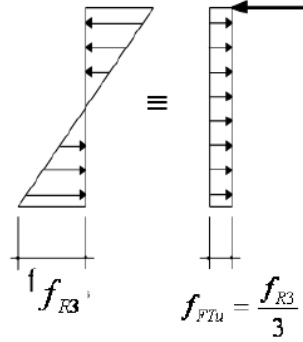
mukavemet olarak tanımlanan servis edilebilirlik artık mukavemetini temsil eder ve f_{FTu} nihai artık mukavemeti temsil eder.



Şekil 2.28: Basitleştirilmiş çatlak sonrası kurucu yasalar: gerilme-çatlak açılması (sürekli ve kesikli çizgiler, sırasıyla, yumuşama ve sertleşme çatlak sonrası davranışı ifade eder)

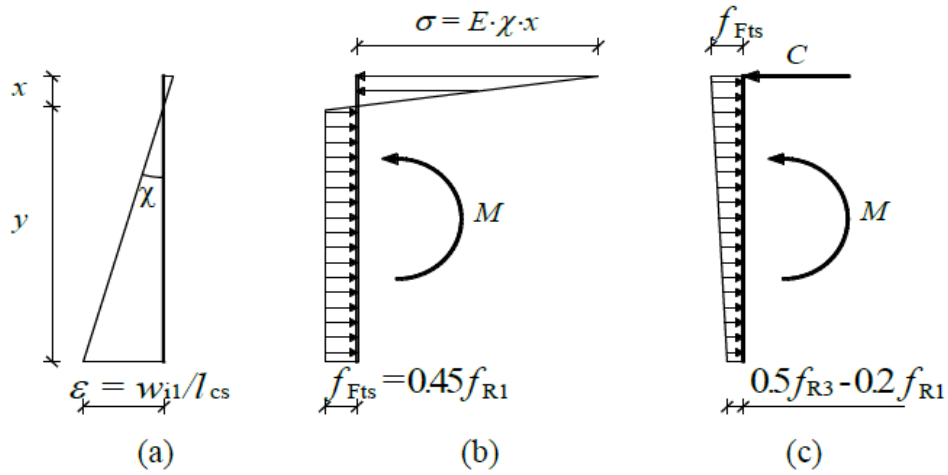
Rijit-plastik model, Şekil 2.29’da gösterildiği gibi statik denklığı hesaba katar, yani f_{FTu} , tüm sıkıştırma kuvvetinin bölümünün üst fiberinde yoğunlaştığı varsayımından kaynaklanır:

$$M_u = \frac{f_{R3} b h_{sp}^2}{6} = \frac{f_{FTu} b h_{sp}^2}{2}$$



Şekil 2.29: Artık nominal eğilme mukavemeti f_{R3} aracılığıyla tek eksenli gerilim f_{FTu} 'da nihai çekme mukavemetini hesaplamak için benimsenen basitleştirilmiş model

f_{FTu} ve $w_u = \text{CMOD}_3$ denklemi, Şekil 2.30b'de gösterildiği gibi kesit boyunca gerilimdeki bir gerilim bloğu dikkate alındığında, ULS'ye referansla dönme dengesinden elde edilir.



Şekil 2.30: Artık nominal eğilme mukavemeti f_{R3} aracılığıyla tek eksenli gerilim f_{Ftu} 'da nihai çekme mukavemetini hesaplamak için benimsenen basitleştirilmiş model

Rijit-Plastik Model

Rijit plastik model, nihai davranışa dayalı olarak benzersiz bir referans değeri olan f_{Ftu} 'yu tanımlar. Böyle bir değer şu şekilde belirlenir:

$$f_{Ftu-FRC} = \frac{f_{R,3}}{3} \quad (2.17)$$

$$M_{nu-FRC} = f_{R,3} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \quad (2.18)$$

Lineer Model

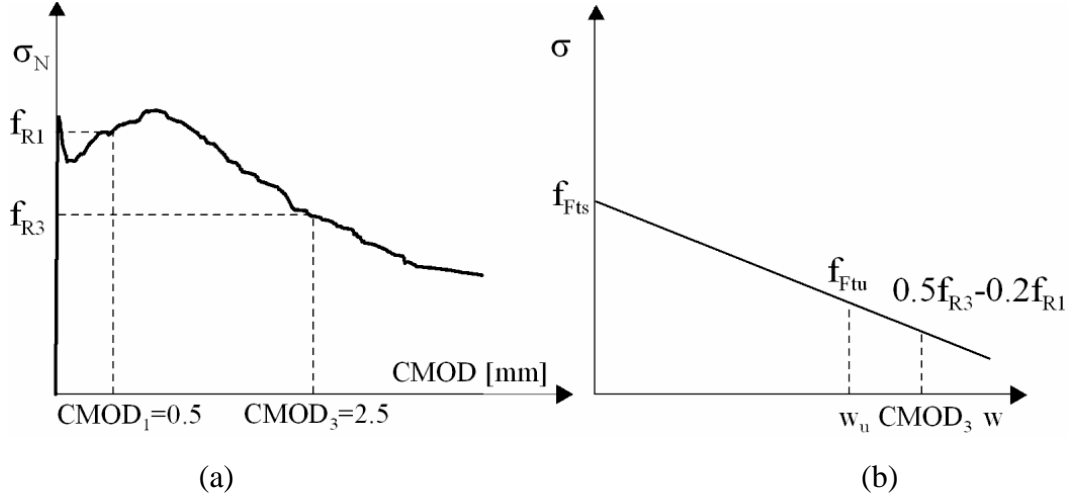
Doğrusal model, f_{Fts} ve f_{Ftu} olmak üzere iki referans değeri tanımlar. Aşağıdaki denklemler kullanılarak eğilme dayanımının artık değerleri aracılığıyla tanımlanmaları gerekir:

$$\begin{cases} f_{Fts-FRC} = 0.45f_{R,1} \\ f_{Ftu-FRC} = (0.45f_{R,1}) \\ (0.45f_{R,1} - 0.5f_{R,3} + 0.2f_{R,1}) \end{cases} - \frac{w_u}{CMOD_3} \geq 0 \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} M_{ns-FRC} = f_{R,1} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \\ M_{nu-FRC} = f_{R,3} \cdot \frac{bh_{sp}^2}{6} \end{cases} \quad (2.20)$$

w_u , yapısal tasarımda kabul edilen maksimum çatlak açıklığıdır. Değeri, gerekli sünekliğe bağlıdır.

f_{FTu} ve $w_u \neq CMOD_3$ denklemi, apsis w_u noktasına kadar apsis $CMOD_1$ ve $CMOD_3$ noktaları arasında doğrusal bir kurucu yasa göz önüne alınarak elde edilir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31: (a) Yumuşatıcı bir malzeme üzerinde bir eğilme testinden elde edilen tipik sonuçlar; (b) lineer çatlama sonrası kurucu yasa.

Çatlak açıklığına $CMOD_1$ karşılık gelen stres değeri, basınç stres dağılımının lineer olduğu (Şekil 2.30a) ve servis verilebilirlik sınır durumuna ($CMOD_1$) karşılık gelen bir çatlak açıklığı yer değiştirmesine kadar çekme davranışının elastoplastik olduğu varsayımıyla dengeden belirlenir.

Yumuşatıcı malzemeler düşünüldüğünde, gerilme-birim çekil değiştirme yasınının tanımı, yapısal elemanın çatlak genişliğinin ve karşılık gelen yapısal karakteristik uzunluğun, l_{cs} 'nin tanımlanmasına dayanır. Böylece, gerinim şuna eşit kabul edilebilir:

$$\varepsilon = w / l_{cs}$$

Geleneksel takviyeli elemanlarda (donatılar), karakteristik uzunluk, l_{cs} , şu şekilde değerlendirilebilir:

$$l_{cs} = \min\{s_{rm}, y\}$$

Burada s_{rm} , çatlaklar arasındaki ortalama mesafe değeridir, y , fiber takviyeli betonun çekme dayanımı olmadığı varsayılarak elastik çatlak fazda ve çatlak açıklığının ve çatlak aralığının kullanılabilirlik durumuna karşılık gelen bir yük konfigürasyonu için değerlendirilen, nötr eksen ile enine kesitin çekme tarafı arasındaki mesafedir.

Lineer modeldeki nihai çekme mukavemeti f_{Fu} , izin verilen çatlak genişliği ile ilgili gerekli sünekliğe bağlıdır. Nihai çatlak genişliği, ε_{Fu} 'nun kesit boyunca değişken gerinim dağılımı için %2'ye ve kesit boyunca sadece çekme gerilimi dağılımı için %1'e eşit olduğu varsayılarak, $w_u = l_{cs} * \varepsilon_{Fu}$ olarak hesaplanabilir. Maksimum çatlak genişliği 2,5 mm'yi geçmemelidir.

Eğilme altında veya birleşik çekme-eğilme ve basınç-eğilme kuvvetleri altında geleneksel donatının olmadığı bölümlerde, sonuçta ortaya çıkan kuvvetin kesit dışında olduğu varsayılır ($y=h$). Aynı varsayım levhalar için de alınabilir.

Gerinim sertleştirme malzemeleri düşünüldüğünde, aynı ε_{Fu} , ε_{Fu} 'nun kesit boyunca değişken gerinim dağılımı için %2'ye ve kesit boyunca sadece çekme gerinim dağılımı için %1'e eşit olduğu varsayılarak dikkate alınmalıdır.

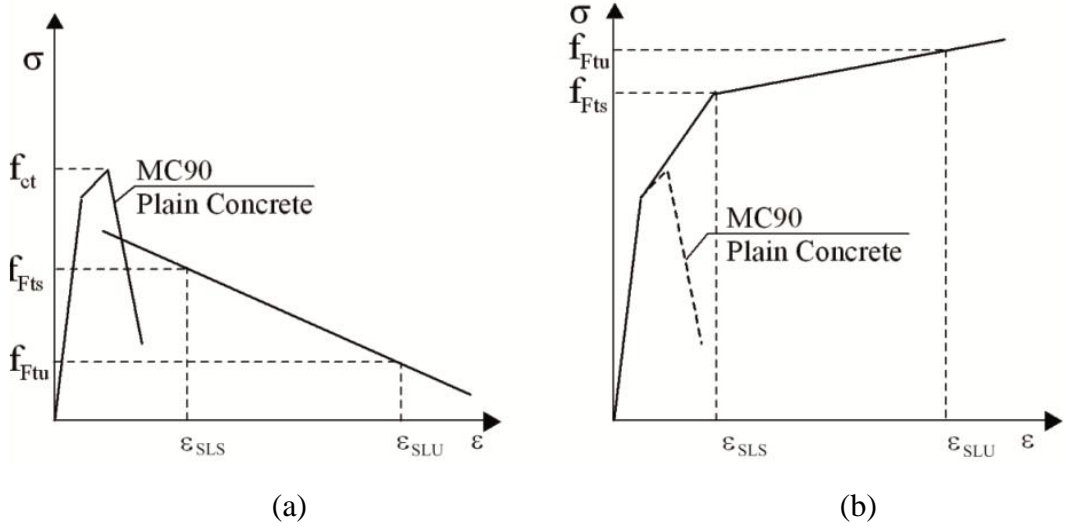
Malzeme, $\varepsilon_{Fu} = \%1$ 'e kadar gerilimde sertleşme davranışı gösteriyorsa, gerinim sertleşmesi olarak kabul edilir.

ULS için yukarıda açıklanan kurucu yasalar uygulanacaktır. SLS içinde, tek eksenli çekmede düz beton için benimsenen aynı kurucu ilişki, tepe dayanım f_{ct} 'ye kadar kullanılır. Çatlama sonrası aşamada çift doğrusal bir ilişki geçerlidir (Şekil 2.31). Yumuşatıcı malzeme için, artık mukavemet (ikinci dal), $(\varepsilon_{SLS}, f_{Ftsd})$ ve $(\varepsilon_{ULS}, f_{Ftud})$ 'a karşılık gelen iki nokta ile tanımlanır:

$$\varepsilon_{SLS} = CMOD_1 / l_{cs} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{ULS} = w_u / l_{cs} = \min (\varepsilon_{Fu}, 2.5 / l_{cs} = 2.5 / y) \quad (2.22)$$

ε_{Fu} = enine kesit boyunca değişken gerinim dağılımı için %2 ve kesit boyunca sadece çekme gerilimi dağılımı için %1'dir.



Şekil 2.32: FRC'nin (a) yumuşama ve (b) sertleşme davranışı için SLS için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Pik öncesi kurucu ilişkide önerilen ikinci dal, çatlak sonrası artık davranışı ile düz beton için kararsız çatlak yayılma kolu arasında bir kesişme bulunana kadar düz beton için olana karşılık gelir. Bu koşul geçerli olmadığında, Şekil 2.32b'de gösterildiği gibi yeni bir ikinci dal önerilir.

Venkateshwaran ve diğ. (2018) yaptığı, Model kodu 2010-fib destekli, deneysel ve parametrik çalışmada, tasarım kılavuzlarında ve test metotlarında yer alan denklemlerde kullanılmak üzere Tablo 2.3'te verilen eşitliklerin kullanılması önerilmiştir.

Tablo 2.3: LOP ve artık eğilme mukavemetleri için ampirik denklemler

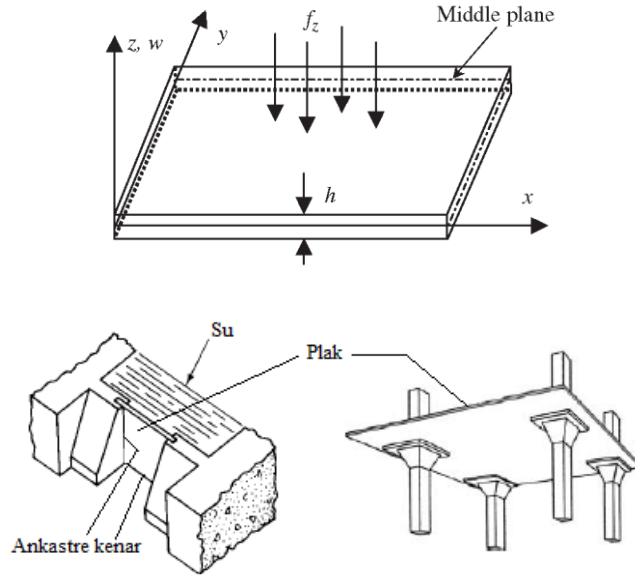
Mean flexural strengths
$f_L = 0.637(f_c')^{0.5} + 1.295(RI)$
$f_{r,1} = \varphi[0.320(f_c')^{0.5} + 6.214(RI) + 0.034N^2]$
$f_{r,2} = \varphi[0.353(f_c')^{0.5} + 7.337(RI) + 0.300N^2]$
$f_{r,3} = \varphi[0.300(f_c')^{0.5} + 7.629(RI) + 0.373N^2]$
$f_{r,4} = \varphi[0.284(f_c')^{0.5} + 7.018(RI) + 0.343N^2]$
$\varphi = (1 + L_f/100)^{0.5}$, burada L_f lif uzunluğudur (mm).

3. PLAK VE KİRİŞ TEORİLERİ

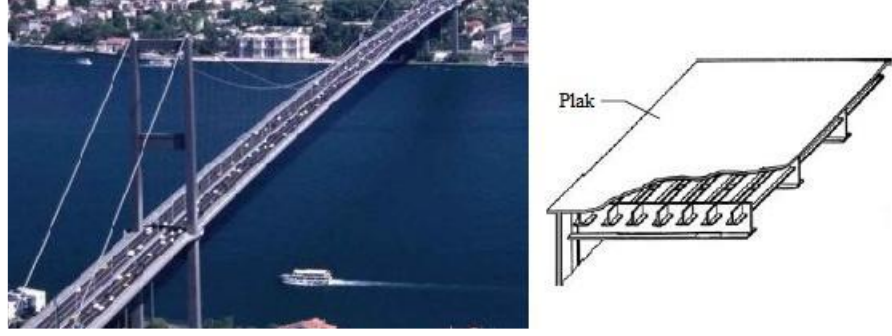
Tez çalışmasında incelenen panel elemanların plak gibi mi yoksa kiriş gibi mi ele alınıp değerlendirileceği sonuçlar kısmı için önem arz etmektedir. Eğer, plakların basit kiriş gibi düşünülmesi söz konusu olacak ise temel mukavemet formüllerinden yola çıkılarak, sonuçların daha hızlı bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olacaktır. Bu kapsamda, öncelikle plak ve kiriş teorileri incelenmiş, ardından bu kabulün yapılabilmeyeceğine dair literatür alt yapısı araştırılmıştır. Plaklar için Kirchhoff ve Mindlin teorileri, kirişler içinde Euler-Bernoulli ve Timoshenko teorileri incelenmiş ve detayları aşağıda sunulmuştur.

3.1 Plak Teorileri

Kalınlığı diğer iki boyutuna küçük ve düzlemine dik yük etkisinde olan düzlem taşıyıcı sisteme plak denir. Yapıların döşemeleri, su yapıları, konteynerler, köprüler, uçak, füze ve gemiler, bazı makine parçaları gibi çeşitli mühendislik alanlarında plaklar yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.1-3.5).



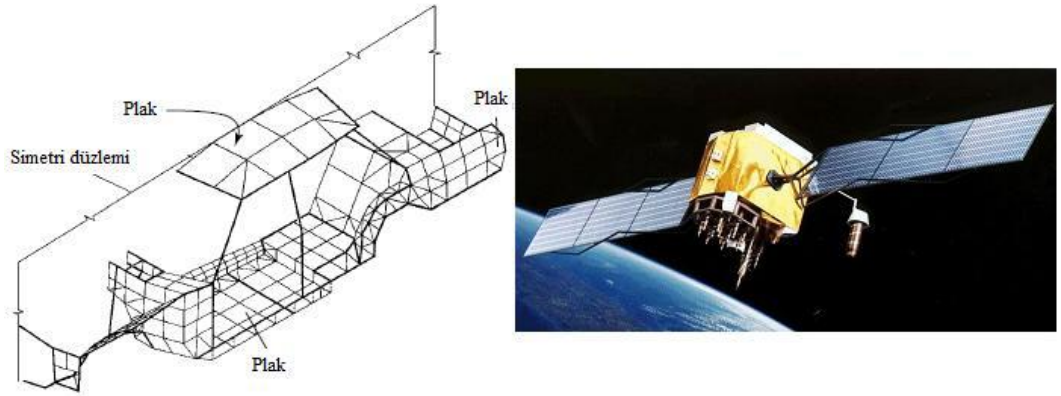
Şekil 3.1: Kanal kapağı ve betonarme döşeme (Dal, 2011)



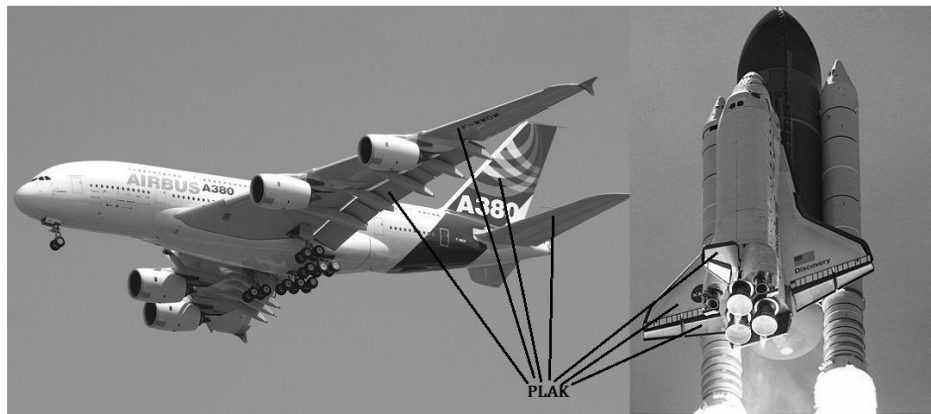
Şekil 3.2: Köprü ve plak elemanı (Dal, 2011)



Şekil 3.3: Tanker ve hızlı tren (Dal, 2011)



Şekil 3.4: Otomobil ve uydu (Dal, 2011)



Şekil 3.5: Yolcu uçağı ve mekik (Amabili, 2008)

Geometrik olarak plaklar, kenarları doğrusal veya eğrisel olabilirken, statik olarak serbest uçlu, çökme ve dönmeye karşı elastik mesnet gibi çeşitli sınır şartları içeren basit mesnetli, ankastre mesnetli veya noktasal mesnetli olabilmektedirler.

Plaklar tıpkı kirişler gibi, üzerlerine etkiyen yükleri her iki doğrultudaki serbest açıklıkların oranına bağlı olarak tek ya da iki doğrultuda aktarmaktadırlar. Yükleri bir doğrultuda aktaran plaklara tek doğrultuda çalışan plaklar denir ve bu plaklar yükleri tamamen uzun kenar doğrultusuna aktarırlar. Yükleri iki doğrultuda aktaran plaklara ise iki doğrultuda çalışan plaklar denilmektedir ve bu plaklarda yükleri her iki doğrultuya aktarmaktadırlar.

Plaklar kalınlığının (t), kısa kenar uzunluğuna (b), oranına göre ince ve kalın olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. $t/b \leq 1/20$ olan plaklar ince plak, $t/b > 1/20$ olan plaklar kalın plak olarak adlandırılmaktadırlar. İnce plaklar kendi içinde büyük ve küçük yer değiştirmeler yapan plaklar olarak ikiye ayrılmakta olmalarına karşın kalın plaklar küçük yer değiştirmeler ile sınırlandırılmaktadırlar (Özdemir, 2007).

3.1.1 Kirchhoff Plak Teorisi

İzotropik, homojen, elastik ince plakların teorileri oluşan deformasyonun geometrisine dayanmaktadır. Kirchhoff plak teorisi olarak bilinen bu teoride yapılan geometrik kabuller özetlenecek olursa;

1. Plağın kalınlığı ile karşılaştırıldığında orta düzlemin dönmesi küçüktür. Bu nedenle dönen yüzeyin eğimi çok küçüktür ve eğimin karesi ihmal edilebilir bir seviyededir.

2. Başlangıçta orta düzlemine dik olan kesitler eğilmeden sonra da orta düzleme dik kalır. Bunun anlamı düşey kayma şekil değiştirmeleri γ_{xz} ve γ_{yz} ihmal edilebilirdir.

3. Enine yüklemekten doğan normal ε_z şekil değiştirmesi ihmal edilebilir düzeydedir.

4. Orta düzleme dik olan σ_z gerilmesi diğer gerilme bileşenleri ile karşılaştırıldığında çok küçüktür ve ihmal edilebilmektedir. Bu varsayım şiddeti büyük yükler söz konusu olduğunda geçersiz olmaktadır.

Yukarıda verilen Kirchoff hipotezinin varsayımları kirişlerin basit eğilme teorisi ile benzerdir. Dönmeler küçük olmadığında orta düzlemdeki şekil değiştirmeler plağın eğilmesine eşlik etmektedir ve böylece 1. ve 2. varsayımlar uygulanamamaktadır. Kalın plaklarda kayma gerilmeleri kısa ve yüksek kirişlerde olduğu gibi önemlidir. Bu plaklarda 3. ve 4. varsayımlar uygun değildir.

Kirchoff-Love plaka teorisi, kuvvet ve momentlere maruz kalan ince plaklardaki gerilmeleri ve deformasyonları belirlemek için kullanılan iki boyutlu bir matematiksel modeldir. Bu teori, Euler-Bernoulli kiriş teorisinin bir uzantısıdır ve 1888'de Love tarafından Kirchoff tarafından önerilen varsayımlar kullanılarak geliştirilmiştir. Teori, üç boyutlu bir levhayı iki boyutlu biçimde temsil etmek için bir orta yüzey düzleminin kullanılabilmesini varsayar. Bu teoride yapılan kinematik varsayımlar:

- Orta yüzeye dik düz çizgiler deformasyondan sonra düz kalır,
- Deformasyondan sonra orta yüzeye normal düz çizgiler orta yüzeye normal kalır,
- Plakanın kalınlığı deformasyon sırasında değişmez.

3.1.2 Mindlin Plak Teorisi

Kirchoff plak teorisine göre şekil değiştirmeden önce düzlem ve orta yüzeye dik olan kesitler şekil değiştirmeden sonra da orta yüzeye düzlem ve dik kalırlar. Bu varsayım neticesinde düzleme dik kayma şekil değiştirmelerinin etkisi göz ardı edilmiş olmaktadır. Ancak plak kalınlığı arttıkça söz konusu şekil değiştirmelerin etkisi büyümekte ve Kirchoff plak teorisi doğru olmayan sonuçlara götürebilmektedir. Bu nedenle özellikle kalın plak problemlerinde düzleme dik kayma şekil değiştirmelerinin etkisini de dikkate almak gerekmektedir. Mindlin plak elemanlarla düzleme dik kayma

şekil değiştirmelerinin etkisi kolayca dikkate alınabilmektedir (Özgan ve Daloğlu, 2011).

Mindlin plak teorisinde yapılan kabuller ise;

1. Malzeme, homojen ve lineer elastiktir.
2. Eğilme esnasında plağın orta yüzeyinde şekil değiştirme meydana gelmemektedir.
3. Düşey doğrultudaki gerilmeler diğer gerilmeler ile kıyaslandığında çok küçük kalmaktadır. Bu nedenle σ_z gerilmeleri Mindlin Teorisi'nde ihmal edilmektedir.
4. Lagrange'ın klasik plak denklemlerinden farklı olarak τ_{xz} ve τ_{yz} gerilmeleri ihmal edilmemektedir.
5. Denge denklemlerinde hacim kuvvetleri ihmal edilmektedir.
6. Şekil değiştirmeden önce düzlem ve orta yüzeye dik olan kesitler şekil değiştirmeden sonra da düzlem kalırlar ancak orta yüzeye dik olmazlar.

Bu kabullerden ilk ikisi aynı zamanda Kirchoff plak teorisinde de kullanılan kabullerdir. Mindlin plak teorisi son kabul ile Kirchoff plak teorisinden ayrışmaktadır. Bu kabul düzleme dik kayma şekil değiştirmelerinin etkisini hesaba katmaktadır. Kalınlık arttıkça söz konusu etkinin hesaba katılması zorunlu olmaktadır.

1921'de önerilen Mindlin Plak Teorisi (MPT), birinci dereceden bir kayma deformasyon plak teorisidir. Bu teorinin formülasyonu, 1921'de önerilen Timoshenko Kiriş Teorisi'nin (TBT) formülasyonuna benzemekle birlikte farkı TBT'nin tek boyutlu teori, MPT ise iki boyutlu teori olmasıdır.

3.2 Kiriş Teorileri

Kirişler, uygulanan enine yüklere eğilme gerilmeleri geliştirerek dayanacak şekilde tasarlanmış yapı elemanlarıdır. Pratikte kirişler 3 boyutlu elemanlardır. Ancak analitik modelleme amacıyla kirişler, küçük kesit boyutlarına kıyasla büyük olan boyuna doğrultu dikkate alınarak tek boyutlu elemanlar olarak kabul edilebilir. Kiriş teorisi denklemlerinin çoğu, kirişleri tek boyutlu elemanlar olarak kabul ederek türetilir. Kiriş teorilerini kullanan kirişlerin teorik çalışması, enine yüklere maruz kalan kirişlerin davranışını incelemenin yaklaşık, ancak kolay ve etkili bir yoludur.

3.2.1 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi

Euler-Bernoulli kiriş teorisi veya diğer adıyla sadece kiriş teorisi, düzgün izotropik bir kirişin elastikliğinin basitleştirilmiş bir ifadesidir. Bu teori ile kirişlerin yük taşıma ve şekil değiştirme karakteristikleri hesaplanır. İlk kez 1750’de tanımlanmış olmasına karşın 19. yüzyıldaki Eiffel Tower ve Ferris Wheel yapılarına kadar geçen sürede büyük ölçekte kabul görmemiştir. Bu başarılı örneklerden sonra ise, hızlıca önemi artmış ve mühendisliğin yapıtaşlarından biri haline gelmiştir. Aynı zamanda ikinci endüstriyel devrimin de tetikleyicilerinden biridir.

Zamanla düzlem teorisi ve sonlu elemanlar analizi gibi ilave analiz araçları geliştirilmiştir fakat basit kiriş teorisi bilimin ihtiyaç duyduğu en önemli araç olmaya devam etmiştir. Özellikle sivil ve mekanik mühendislik alanlarında büyük önem taşımıştır. Kirişler için Euler-Bernoulli varsayımları aşağıda verilmiştir.

1. Kesit, kendi düzleminde sonsuz rijittir.
2. Kirişin kesiti deformasyondan sonra düzlem kalır.
3. Kesit, kirişin deforme olan eksenine normal kalır.

3.2.2 Timoshenko Kiriş Teorisi

Timoshenko kiriş teorisi kirişteki kayma ve dönmenin oluşturduğu eylemsizlik momenti faktörlerinin Euler-Bernoulli teorisine ilave edilmesi şeklinde ortaya çıkmıştır, bir başka ifade ile geliştirilmiştir. Kirişteki kayma gerilmeleri eğilme esnasında nesnenin içyapısındaki deformasyonlar sebebiyle titreşimi sonucunda ortaya çıkar. Bu enine titreşimler, kirişe uygulanan dış kuvvetlere yani bunun oluşturduğu torka ve kirişin malzeme özelliklerine bağlıdır.

Timoshenko teorisinde hesaplamalar yapılırken kayma ve eylemsizlik momenti de göz önüne alındığından sonuç Euler-Bernoulli teorisine göre her zaman daha büyük çıkar. Timoshenko teorisi gerçeğe daha yakın sonuçlar veren bir teoridir. Özellikle büyük kesitlerde çok daha isabetli sonuçlar verdiğiinden bu teori, kalın kiriş teorisi olarak bilinirken Euler-Bernoulli teorisi ince kiriş teorisi olarak bilinmektedir. Bu iki teoriyle çözülen kiriş problemlerinde kiriş uzunluğu (L)'nin kesit yüksekliği (h)'a oranı büyüdükçe sonuçlar birbirine yaklaşır. Yani kesin olarak denilebilir ki, L/h oranı küçük olan problemlerde Timoshenko çok daha doğru sonuçlar vermektedir.

Euler-Bernoulli kiriş teorisinin aksine eğilmeden önce tarafsız eksene dik ve düzlem olan kesitler, eğilmeden sonra düzlem kalsalar da dik kalmazlar. Yani kayma gerilmelerinin kiriş eğilmesinde rol oynadığını kabul eder. Kirişte sabit bir kayma şekil değiştirmesi olduğunu varsaymakta olmasına karşın gerçekte kayma gerilmesi dağılımının sabit olmaması nedeniyle bir düzeltme faktörü kullanılması gerekli kılmaktadır.

Timoshenko ve Euler-Bernoulli teorileri genel olarak kirişlerdeki sehim ve gerilmelerin hesaplandığı denklemlerden oluşur. İki teori de aynı amaca hizmet ederler. Temelde her iki teori de aynı amacı hizmet ediyor olsa da aralarında belli başlı farklılıklar bulunmaktadır.

Bu teorileri tek taraftan mesnetli basit bir kiriş düzeneğinde düşünülürse, kirişin serbest ucundan uygulanan tekil bir yük için Euler-Bernoulli teorisinde sadece bu kuvvetin oluşturduğu momentten kaynaklanan eğilme hesap edilir. Timoshenko teorisinde ise, bu kuvvetin oluşturduğu momentin yanı sıra kirişte malzemedan kaynaklanan deformasyonlar ve dikey kuvvetler sebebiyle oluşan kayma gerilmeleri

ve eğilme sonucunda dönme etkisiyle ortaya çıkan eylemsizlik momenti de hesaba katılır. Bu nedenle Timoshenko teorisiyle bulunan bir problem çözümünün mutlaka Euler-Bernoulli teorisine göre daha doğru sonuçlar vermesi beklenir. Burada başka birçok önemli nokta vardır ki o da Timoshenko teorisinin kalın kirişlerde 6 kata kadar daha büyük ve doğru sonuç vermesidir. Bu nedenle Timoshenko teorisi “kalın kiriş teorisi” olarak anılmaktadır. Kiriş incelendiğinde ise, iki teori arasındaki sonuç farkı azalmaktadır ve ince kirişlerde her iki teori ile nispeten çok yakın sonuçlar elde edilmektedir.

Kirişlere benzer şekilde plaklar da uygulanan enine yüklere eğilme gerilmeleri geliştirerek direnmek için tasarlanmış olan yapı elemanlarıdır. Kiriş ve plak elemanları arasındaki temel fark, teorik çalışma amacıyla kirişlerin tek boyutlu elemanlar olarak, plakların ise iki boyutlu elemanlar olarak ele alınması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu basitleştirme, plaklarda düzlem içi boyutların plak kalınlığına kıyasla büyük olması nedeniyle mümkündür. Dolayısıyla, bir levha teorisi formüle edilirken bu faktör dikkate alınabilir ve levha iki boyutlu bir eleman olarak sadeleştirilerek levha denklemleri elde edilebilir. Plak teorilerini kullanan plakların teorik olarak incelenmesi, plakların statik ve dinamik davranışını araştırmak için yaklaşık bir yoldur.

3.3 Plak ve Kirişler için Çözüm Yaklaşımı

Yukarıda verilen bilgiler ışığında plak ve kiriş elemanları arasındaki temel fark, teorik çalışma amacıyla kirişlerin tek boyutlu elemanlar olarak kabul edilirken, plakların iki boyutlu elemanlar olarak ele alınmasıdır. Bunun dışında benzer varsayımlara sahiptirler. Kiriş teorisi plak elemanlarda kullanılabilir. Fakat bunun için bir düzeltme katsayısına ihtiyaç duyulmaktadır.

Basit kiriş teorisi veya plak teorisi ile ilgili formüller, yapısal tasarımda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapısal elemanlara uygulanan basit kiriş teorisi elastisite modülünü belirlemek için kullanılmıştır. Elastik kiriş teorisi ayrıca, kırılma mukavemetini belirlemek için yaygın olarak kullanılır.

Yapısal bir elemanın bir kiriş olması için uygun b/d oranı nedir? Kiriş değil ise basit kiriş formülü ile kullanılacak olan düzeltme faktörü nedir? Sorularına cevap aranmaktadır.

Gerilmenin nötr eksenenden uzaklıkla orantılı olduğu şeklinde basit kiriş varsayımının geçerliliği, b/d oranına bağlıdır. Dikdörtgen kirişler veya büyük b/d oranlarına sahip plaklar, antiklastik eğrilige neden olur ve bu da basit kiriş teorisi kullanıldığında hatalı sonuçlara yol açabilir. Eğer eğilmiş bir yapı elemanı, bir plak gibi, derinliği ile karşılaştırıldığında genişliğinin sonsuz olduğu kabul edilebilirse, o zaman plak merkezindeki eğilme gerilmesinin düzeltme terimi ϕ basitçe $1/(1 - \nu^2)$ 'dir. Burada ν , malzemenin Poisson oranıdır. Eğer eğilmiş dikdörtgen yapı elemanı gerçekten dar bir kesite sahip kiriş ise, o zaman eşitlik (3.1)'de ϕ , 1'e eşit olur.

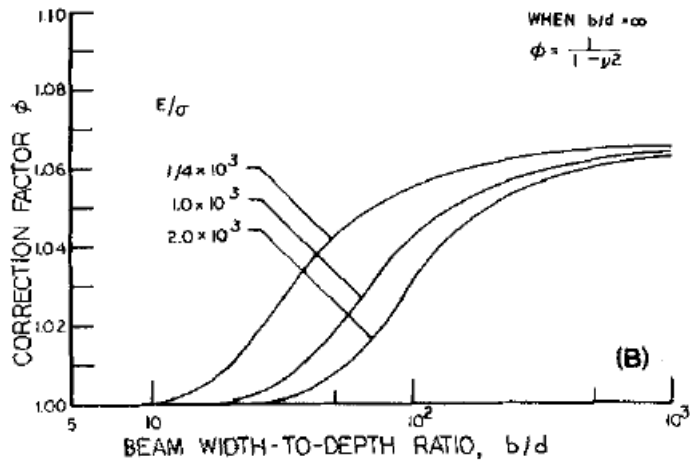
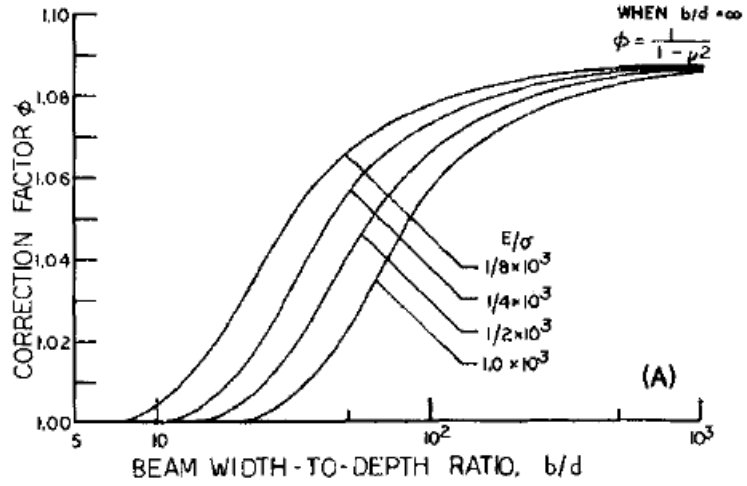
$$\sigma = \phi \left(\frac{M \cdot c}{I} \right) \quad (3.1)$$

Timoshenko dolaylı olarak antiklastik eğrilik sorununa ve elastiklik modülü, ince şeritlerin eğilmesinden deneysel olarak belirlendiğinde ortaya çıkabilecek hatalara değinmiştir ve bu durum için eşitlik (3.2)'yi önermiştir.

$$M_c = \frac{EI}{\rho} \left(\frac{1/\nu^2 - k}{1/\nu^2 - 1} \right) = \left(\frac{EI}{\rho} \right) \phi \quad (3.2)$$

Burada M_c ; antiklastik eğrilğin etkilerini içeren moment, E ; elastisite modülü, ρ ; eğilme elemanının eğrilik yarıçapı, parantez içindeki terim düzeltme faktörü, k ; antiklastik eğrilik sabitidir.

Antiklastik eğrilik parametresi ϕ , b/d metalik malzemelerin ve kırılğan metalik olmayan malzemelerin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir (Şekil 3.6). Gösterilen eğriler arasındaki farklar, E/σ ve ν için seçilen değerlerdir. Ayrıca bu şekillerden E/σ oranı ne kadar büyük olursa antiklastik eğrilğin etkisinin o kadar küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca, Poisson oranı küçüldükçe, antiklastik eğrilik nedeniyle eğilme gerilmesi üzerinde bir azalma etkisi vardır.

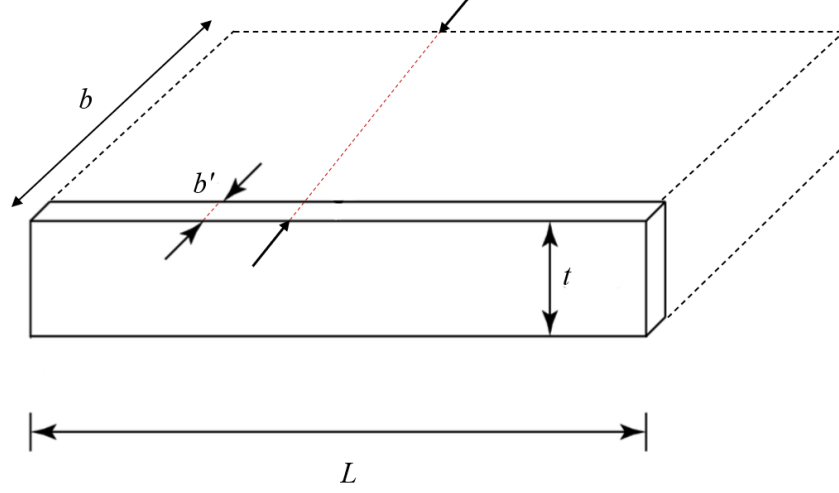


Şekil 3.6: Kiriş genişliğinin derinliğine oranının (b/d) bir fonksiyonu olarak antiklastik eğrilik parametresi ϕ (A) metalik malzemeler için ($\nu=0.285$) ve (B) kırılğan metalik olmayan malzemeler için ($\nu=0.250$) (Baratta, 1981)

Şekil 3.6A'da $b/d \leq 12$ olan metalik malzemeler için basit kiriş teorisi gerilme denkleminin kullanılmasında hatanın %1 veya daha küçük olacağı görülmektedir. $b/d > 12$ olduğunda ise, Şekil 3.6A'dan elde edilen ϕ parametresi, eğilme gerilmesini doğru bir şekilde belirlemek için eşitlik (3.1)'de kullanılmalıdır.

Benzer şekilde, Şekil 3.6B'de $b/d \leq 20$ olan metalik olmayan kırılğan malzemeler için basit kiriş teorisi gerilme denkleminin kullanılmasındaki hatanın %1 veya daha az olacağını göstermektedir. $b/d > 20$ olduğunda ise Şekil 3.6B'den elde edilen ϕ parametresi eşitlik (3.1)'de kullanılmalıdır (Baratta, 1981).

Bu çalışma ışığında, kiriş için geçerli denklemlerin, uygun b/d oranlarındaki plaklar içinde (düzeltme katsayısı ihmal edilerek) kullanılabilceği sonucuna varılmaktadır.

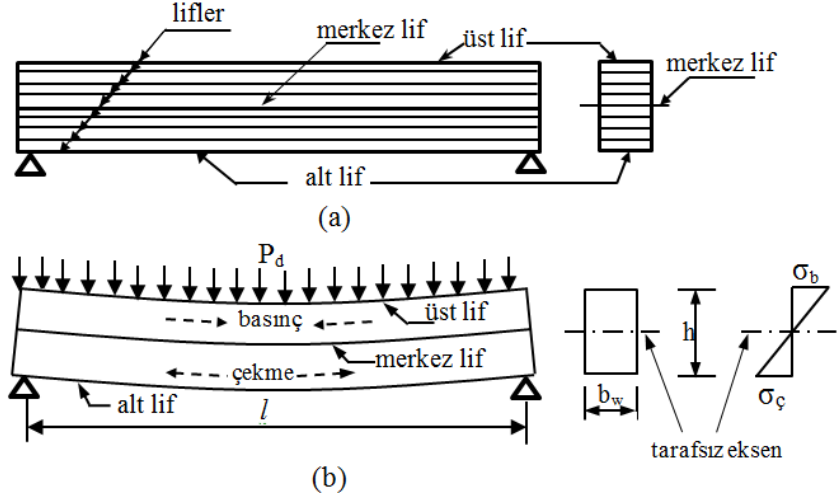


Şekil 3.7: Kiriş ve plak eleman

Şekil 3.7'de, L kiriş ve plak eleman için uzunluğu, b plak genişliğini, b' kiriş genişliğini ve t plak kalınlığı ve kiriş yüksekliğini ifade etmektedir.

3.4 Elastik Kiriş Teorisi

Eksenine dik olarak yüklenmiş, $b_w \times h$ enkesit boyutunda, l açıklığında basit mesnetli bir açıklıklı kiriş dikkate alınsın. Bu kirişin görünmeyen ve uzunluğu boyunca uzanan liflerden oluştuğu kabul edilsin (Şekil 3.8a). Bu kiriş, P_d düzgün yayılı yükle yüklendiğinde, yükün etkisiyle eğilmeye başlayacaktır (Şekil 3.8b).



Şekil 3.8: Basit eğilme etkisindeki kiriş ve enkesiti

Şekilden de görüldüğü gibi, kirişin dış yükten dolayı oluşan eğilme nedeniyle alt lifler uzamaya, üst lifler de kısalmaya başlar. Dolayısıyla da bu liflerin boyları değişir. Kirişin ortasından geçen merkezi lifte ise uzama ve kısalma olmaz. Diğer bir deyişle lifin boyu aynı kalır. Liflerin boylarındaki uzama ve kısalmalardan dolayı gerilmeler oluşur. Kirişin alt bölgesindeki liflerin boyu uzadığından çekme gerilmesi, üst liflerin boyu kısaldığından, basınç gerilmesi meydana gelir. Kesitin ortasında bulunan ve boyunda herhangi bir değişiklik olmayan merkezi lif boyunca (yükün şiddeti ve donatı oranına bağlı olarak yeri değişebilir) herhangi bir gerilme oluşmaz. Dolayısıyla da basınç gerilmesi ile çekme gerilmesi arasındaki sınırı oluşturur. Bu nedenle de buna tarafsız eksen adı verilir. Şekilden görüldüğü gibi, en fazla uzama ve kısalma en dış liflerde oluşur. Bu da en büyük gerilmelerin en dış liflerde oluşmasına neden olur.

Betonun basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşüktür. Buna göre, yukarıda verilen kirişin, donatı kullanılmadan yalnızca beton ile üretildiği kabul edilsin. Yükleme ile birlikte kirişin altındaki lifler uzamaya, üstündeki lifler ise kısalmaya başlar. Kirişin alt liflerinde oluşan birim uzama değeri, betonun çekmede birim uzama değerine ulaştığında, ilk çatlak olur ve kiriş ilk çatlakla birlikte taşıma gücünü ani ve gevrek bir şekilde kırılabilmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Beton bir kirişin eğilme etkisinde kırılması

Donatısız bir kirişte, ilk çatlama olur olmaz taşıma gücünü kaybetmesinden dolayı, bu çatlak oluşturulan moment değeri, kesitin kırılma momenti olarak kabul edilir. Eğilme momenti etkisindeki bir kesitte oluşan gerilme değeri,

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (3.3)$$

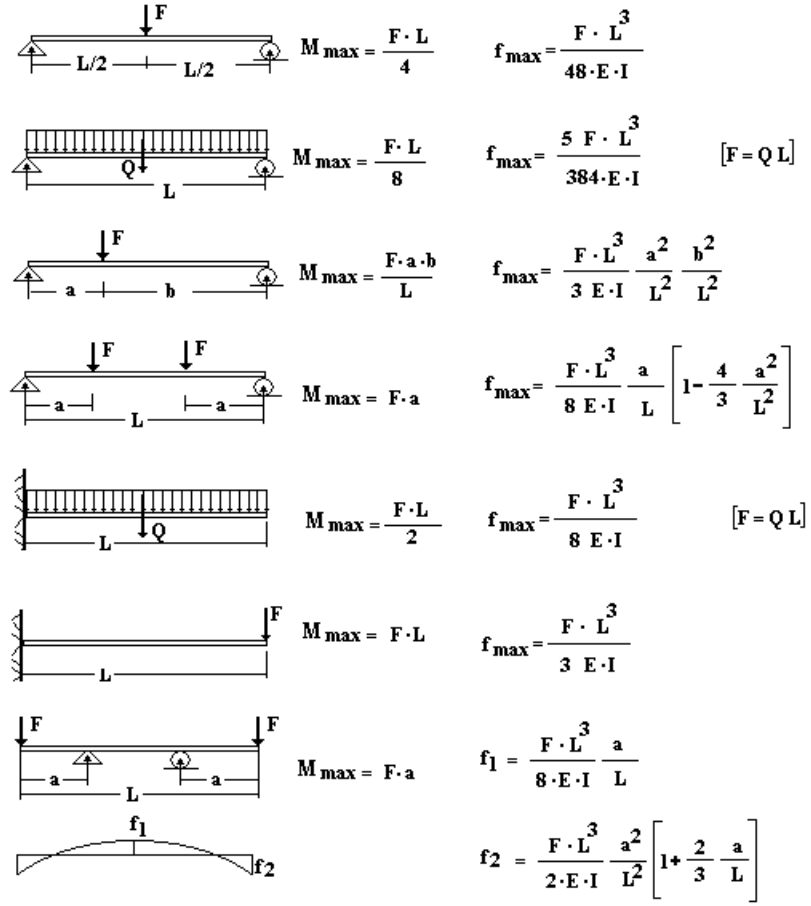
bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda, W mukavemet momentini, M eğilme momentini, σ ise kesitin en alt lifinde oluşan çekme gerilmesini göstermektedir. Burada, kesitin en alt lifinde oluşan çekme gerilmesi (σ), **eğilmede çekme dayanımı**, f_{ctf} olarak yerine konursa, kesitin çatlama momenti, M_{cr} ;

$$M_{cr} = f_{ctf} \cdot W \quad (3.4)$$

$$M_{cr} = \frac{f_{ctf} \cdot I}{y} \quad (3.5)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu bağıntıda I , kesitin atalet momentini, y ise kesitin tarafsız ekseninden çekme bölgesindeki en dış life olan uzaklığını göstermektedir.

Düşey yüklü çubuklara etki eden eğilme momentlerinin ve çökmenin hesaplanmasında birçok yol kullanılmaktadır. Bunlar, kesit yöntemi, eşlenik çubuk metodu, grafik yöntemdir. Bunların yanında bilinen yükleme şekillerini örnek olarak eşitliklerin hazır olarak verildiği çizelgelerde hızlı çözümler için kullanılmaktadır. Bu çizelgeden bir örnek aşağıda Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10: Düşey yüklü kirişlerde eğme momenti ve çökme (sehim) eşitlikleri

Şekil 3.10’da verilen durumlardan, düzgün yayılı yüklerle yüklenen ikinci durum tez kapsamında incelenen duruma benzemektedir. Burada kiriş ortasında oluşacak maksimum moment ifadesi şu şekildedir:

$$M_{\max} = \frac{QL^2}{8} \quad (3.6)$$

Burada sözü edilen elastik kiriş yaklaşımı ilerleyen bölümlerde matematiksel model önerirken kullanılacaktır.

4. ÇELİK LİFLİ BETON MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE PARAMETRİK ÇALIŞMA

4.1 Çelik Lifli Beton Malzeme Modelinin Oluşturulması

Lif hacmi, lif uzunluğu, lif çapı, lifin kanca sayısı (3D ise 1, 4D ise 2 ve 5D ise 3 olacak şekilde), kullanılacak normal betonun silindir basınç dayanımı ve elastisite modülü bilindiği takdirde, çelik lifli beton malzemenin basınç ve çekme altında gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde edecek prosedür aşağıda verilmiştir.

Öncelikle basınç altındaki davranışı elde etmek adına, normal betona ait basınç dayanımı değeri $f_{c,RC}$ 'nin bilindiği durumda, bu değere bağlı olarak basınç altındaki birim şekil değiştirme değeri $\varepsilon_{c,RC}$, eşitlik (4.1)'de verildiği gibi hesaplanır (Popovics, 1974).

$$\varepsilon_{c,RC} = 2.7 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{f_{c,RC}}{0.006894757} \right)^{1/4} \quad (4.1)$$

Lif takviyeli betonun basınç dayanımı $f_{c,SFRC}$ ve buna karşılık gelen birim şekil değiştirme $\varepsilon_{c,SFRC}$ arasındaki ilişkiyi elde etmek için, düz betonun karşılık gelen parametrelerinden yararlanılmıştır (Abbass ve diğ., 2018).

$$f_{c,SFRC} = f_{c,RC} + 5.59 \cdot RI \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{c,SFRC} = \varepsilon_{c,RC} + 0.000261 \cdot RI \quad (4.3)$$

Burada, $f_{c,RC}$ normal betonun basınç dayanımını, RI ise takviye indeksini göstermektedir ve eşitlik (4.4) ile hesap edilmektedir.

$$RI = \left(\frac{V_f}{100} \right) \cdot \left(\frac{L_f}{\varphi_f} \right) \quad (4.4)$$

Burada, V_f beton içinde bulunan lifin hacim fraksiyonunu, L_f lif uzunluğunu ve φ_f lif çapını göstermektedir.

Lifli betona ait basınç ve çekme altında gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek amacıyla çıkılan yolda yukarıda verilen ifadeler yardımıyla adım adım basınç ve çekme altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir (Salehian ve diğ., 2014).

$$f_{c,RC1} = f_{c,RC} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,RC1}}{\varepsilon_{c,RC}} \right) \cdot \left(\frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_{c,RC1}}{\varepsilon_{c,RC}} \right)^n} \right) \quad (4.5)$$

$$f_{c,SFRC1} = \varepsilon_{c,SFRC} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,RC1}}{\varepsilon_{c,SFRC}} \right) \cdot \left(\frac{1}{(1-p-q) + q \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,RC1}}{\varepsilon_{c,SFRC}} \right) + p \cdot \left(\frac{\varepsilon_{c,RC1}}{\varepsilon_{c,SFRC}} \right)^{\frac{1-q}{p}}} \right) \quad (4.6)$$

Bu denklemlerde verilen p ve q parametreleri 0 ile 1 arasında değişen parametreler olup aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanır (Salehian ve diğ., 2014).

$$p = 1 - (0.919e^{-0.324 \cdot RI}) \quad (4.7)$$

$$q = 1 - p - \frac{E_{c,sec}}{10} \quad (4.8)$$

Burada verilen $E_{c,sec}$ betonun sekant modülü olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E_{c,sec} = \frac{f_{c,SFRC}}{\varepsilon_{c,SFRC}} \quad (4.9)$$

Çelik lifli betonun çekme altındaki davranışını elde etmek için, öncelikle normal betonun çekme dayanımı $f_{t,RC}$, Model Kod 2010'un tavsiyeleri izlenerek, eşitlik (4.10) uygulanarak belirlenmiştir.

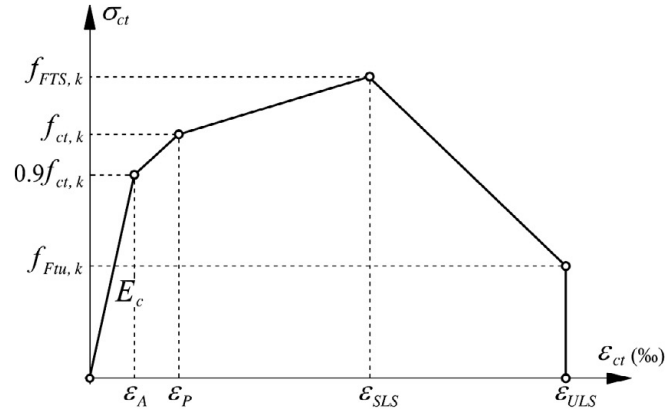
$$f_{t,RC} = \begin{cases} f_{c,RC} > 50 \text{ MPa}; & 2.12 \cdot \ln \left(1 + \frac{f_{c,SFRC}}{10} \right) \\ f_{c,RC} > 50 \text{ MPa}; & 0.3 \cdot (f_c)^{2/3} \end{cases} \quad (4.10)$$

Lifli betonun çekme dayanımı, Model Kod 2010'da bahsedilen orantılılık sınırı kullanılarak elde edilir. Orantılılık sınırı f_L için verilen formül (Venkateshwaran ve diğ., 2018),

$$f_L = 0.637(f_{c,RC})^{0.5} + 1.295(RI) \quad (4.11)$$

şeklindedir. Burada f_L değeri lifli betonun çekme dayanımı olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.1'de, nihai sınır durum koşullarında FRC için Model Kod 2010 tarafından önerilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı şematize edilmiştir. Bu diyagramda $f_{Fts,k}$ ve $f_{Ftu,k}$ sırasıyla hizmet ve nihai koşullarda kalan eğilme gerilme mukavemetinin aşağıdaki denklemler uygulanarak belirlenen karakteristik değerleridir:



(a)

Şekil 4.1: Model Kodu 2010 (fib)'nin tavsiyelerine göre FRC için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı (Venkateshwaran ve diğ., 2018)

$$f_{Fts-FRC} = 0.45f_{R,1} \quad (4.12)$$

$$f_{Ftu-FRC} = \left((0.45f_{R,1}) - \frac{w_u}{CMOD_3} \right) \cdot (0.45f_{R,1} - 0.5f_{R,3} + 0.2f_{R,1}) \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{SLS} = CMOD_1/l_{cs} \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_{ULS} = w_u/l_{cs} = \min(\varepsilon_{Fu}, 2.5/l_{cs} = 2.5/y) \quad (4.15)$$

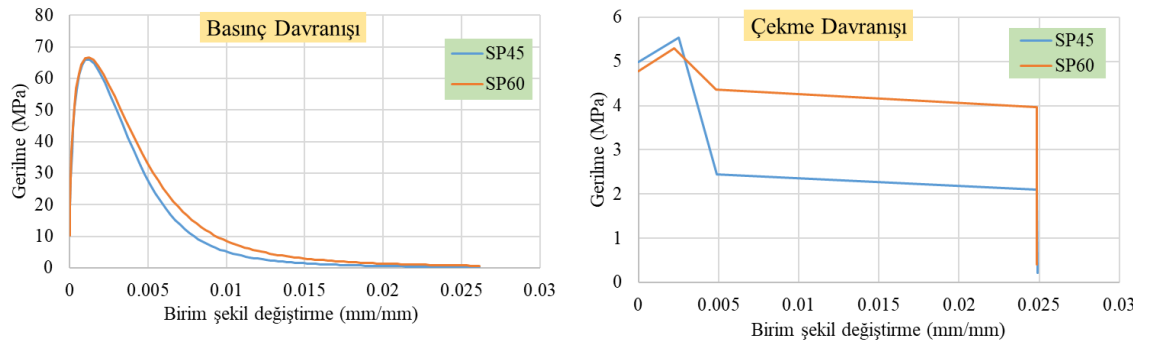
Eşitlik (4.12) ve (4.13)'te yer alan ifadeler ($f_{r,1}$ ve $f_{r,3}$), Venkateshwaran ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada verilen aşağıdaki eşitlikler yardımı ile elde edilir.

$$f_{r,1} = \varphi[0.320(f_c')^{0.5} + 6.214(RI) + 0.034N^2] \quad (4.16)$$

$$f_{r,3} = \varphi[0.300(f_c')^{0.5} + 7.629(RI) + 0.373N^2] \quad (4.17)$$

Burada N , çelik liflerin kanca uç sayısıdır.

Yukarıda verilen formüllerden yararlanarak tez çalışmasında kullanılacak olan çelik lifli beton malzeme modeli oluşturulmuştur. Elde edilen modele ait basınç ve çekme gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.2’de ve bu malzemelere ait hesaplanan verilerde Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.2: Tezde kullanılan iki tip malzeme davranışı

Tablo 4.1: Malzemeler için hesaplanan veriler

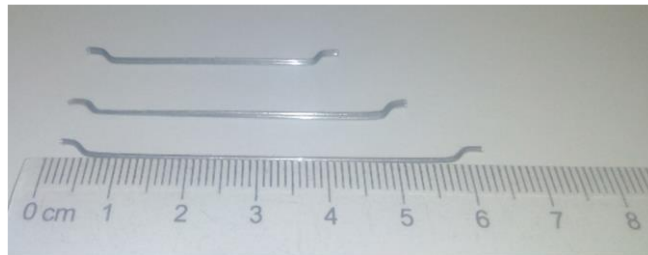
Parametreler	SP45	SP60
f_L	5.538113	5.302593
f_{R1}	5.438133	9.708583
f_{R2}	6.491509	11.58575
f_{R3}	6.201682	11.60656
f_{R4}	5.778904	10.73836
f_{ts}	2.44716	4.368862
f_{tu}	2.067227	3.868854
ε_{sls}	0.005	0.005
ε_{slu}	0.025	0.025
f_c	64	64
ε_0	0.00265	0.00265
f_{sfrc}	65.90843	66.54569
$\varepsilon_{0,sfrc}$	0.002739	0.002769

4.2 Malzeme Modelinin Literatür ile Karşılaştırılması

Elde edilen malzeme modeli kullanılarak oluşturulan sonlu eleman analiz sonuçları ile literatürden ele alınan 2 farklı deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar alt başlıklar halinde sunulmuştur.

4.2.1 Birinci Karşılaştırma

Abbass ve diğ.(2018) yaptığı çalışmada beton mukavemetinin üç değeri için farklı uzunluk ve çaplarda çelik liflerin eklenmesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Bu çalışmada, üç farklı su-çimento oranı (0.25, 0.35 ve 0.45) ile üç farklı uzunluk (40, 50 ve 60 mm-Şekil 4.3) ve iki farklı çap değerine sahip olan (0.62 ve 0.75 mm) kanca uçlu lifler kullanılmıştır. Çelik lifler, %0.5, %1.0 ve %1.5 olmak üzere üç hacim fraksiyonu ile ilave edilmiştir. Beton karışım oranları Tablo 4.2'de verilmiştir. Otuz beton karışımı hazırlanmış ve incelenmiştir. Sonuçlar, artan su-çimento oranlarıyla farklı içerik ve uzunluklarda çelik liflerin eklenmesinin, betonun mekanik özelliklerinde önemli bir değişikliğe neden olduğunu, basınç dayanımında yaklaşık %10-25 ve doğrudan çekme dayanımında yaklaşık %31-47 artışa neden olduğunu göstermiştir. Elyaf içeriğindeki %0,5'ten %1,5'e artış, daha küçük en-boy oranı 65 olan elyaf için eğilme mukavemetini %3'ten %124'e yükseltirken, 80'lik daha yüksek en boy oranı için eğilme mukavemetinde %140'lık bir artış (lifsiz betona) göre gözlenmiştir. Farklı uzunluk ve çaplardaki çelik liflerin dikkate alınmasıyla, basınç altında lifle güçlendirilmiş betonun gerilme şekil değiştirme ilişkisi için analitik bir model önerilmiştir.



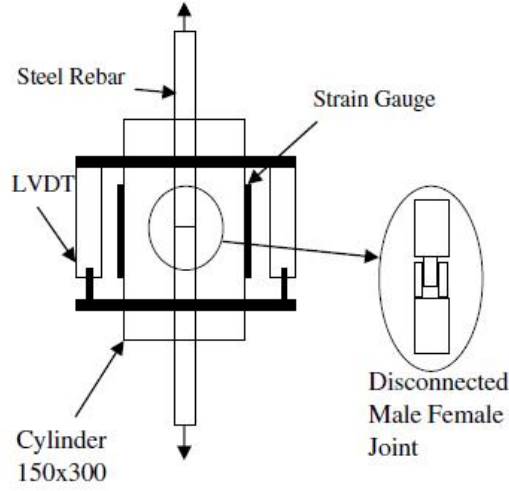
Şekil 4.3: Kullanılan kanca uçlu çelik liflerin görünümü

Tablo 4.2: Beton karışım oranları

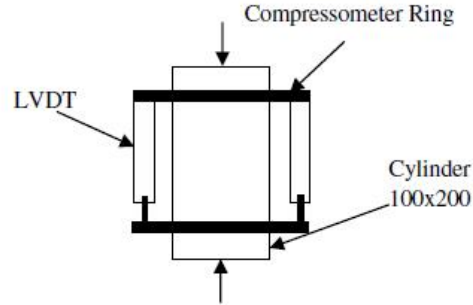
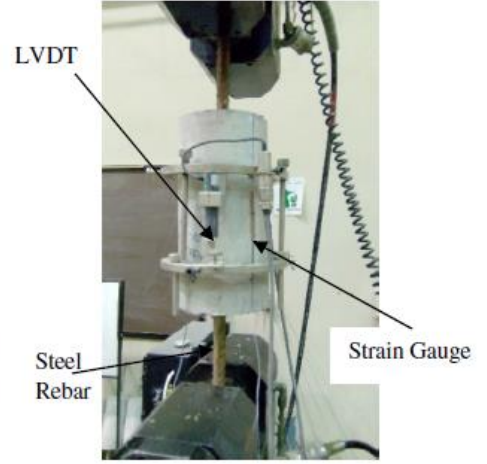
Çimento içeriği (kg/m ³)	550	450	350
Su/çimento oranı	0.25	0.35	0.45
Çimento oranı	1	1	1
İnce agrega oranı	1.24	1.59	2.28
İri agrega oranı	1.91	2.34	3.08
Süper akışkanlaştırıcı dozajı (% çimento ağırlığına göre.)	0.25	0.15	0.12
Hacme göre lif içeriği (%)	0.5	0.5	0.5
Hacme göre lif içeriği (%)	1.0	1.0	1.0
Hacme göre lif içeriği (%)	1.5	1.5	1.5

Standart basınç dayanımı testi için 100x200 mm boyutlarındaki beton silindir numuneleri sert plastik kalıplarda dökülmüştür. Fiber donatılı betonun eğilme dayanımı testleri için 150x150x600 mm boyutlarında eğilme numuneleri, direkt çekme testleri için ise 150x300 boyutlarında silindirik numuneleri hazırlanmıştır. Deney düzenekleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

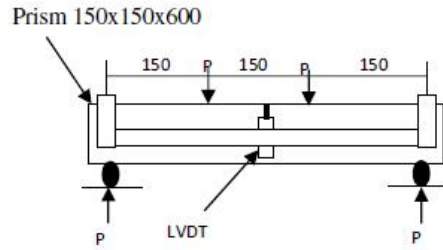
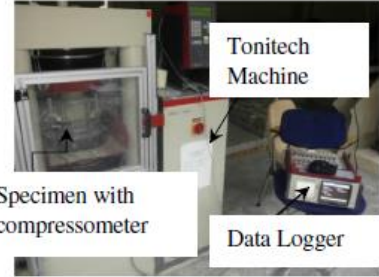
Bu çalışmadaki 150x150x600 mm'lik kirişler üzerinde yapılan eğilme testine ait deneysel sonuçlar ile literatür ve yönetmelikler aracılığı ile elde edilen beton modelimizi referans alınan çalışmadaki numune boyutları kullanarak sonlu elemanlar tabanlı ABAQUS programında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



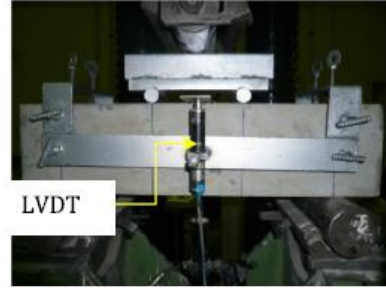
Direct Tension test setup



Compressive strength test



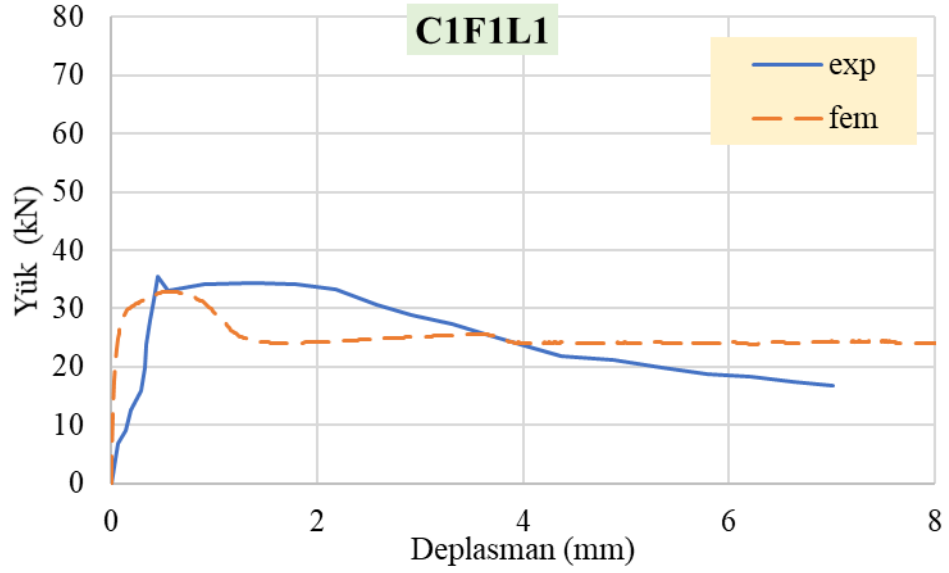
Flexural Strength test set up



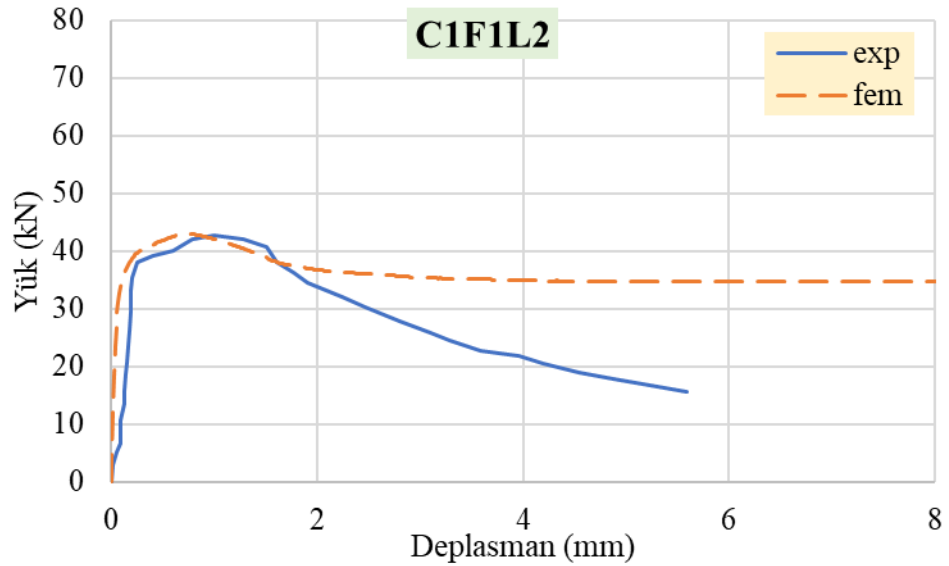
Şekil 4.4: Betonun mekanik özellikleri için test düzeneği

Burada lif uzunlukları (40, 50 ve 60mm), lif çapları (0.62 ve 0.75 mm), su/çimento oranları (0.25, 0.35 ve 0.45) ve çelik lif hacimleri (%0.5, %1.0, %1.5) farklılaşan ve etkisi araştırılan parametrelerdir. Buradaki sembollerden C su/çimento oranını, 1,2 ve 3 sırasıyla 0.45, 0.35 ve 0.25 değerlerini; F lif içeriğini, 1,2 ve 3 sırasıyla %0.5, %1.0 ve %1.5 değerlerini; L lif uzunluğunu, 1,2 ve 3 sırasıyla 40mm, 50mm ve 60mm değerlerini göstermektedir. Aşağıda Şekil 4.5-4.13 arasında dokuz farklı beton karışımı için deneysel ve sonlu elemanlara ait sonuçların karşılaştırmaları verilmiştir. Deneysel sonuçlar sadece su/çimento oranı 0.45 olan karışımlar için alınmıştır. Şekil

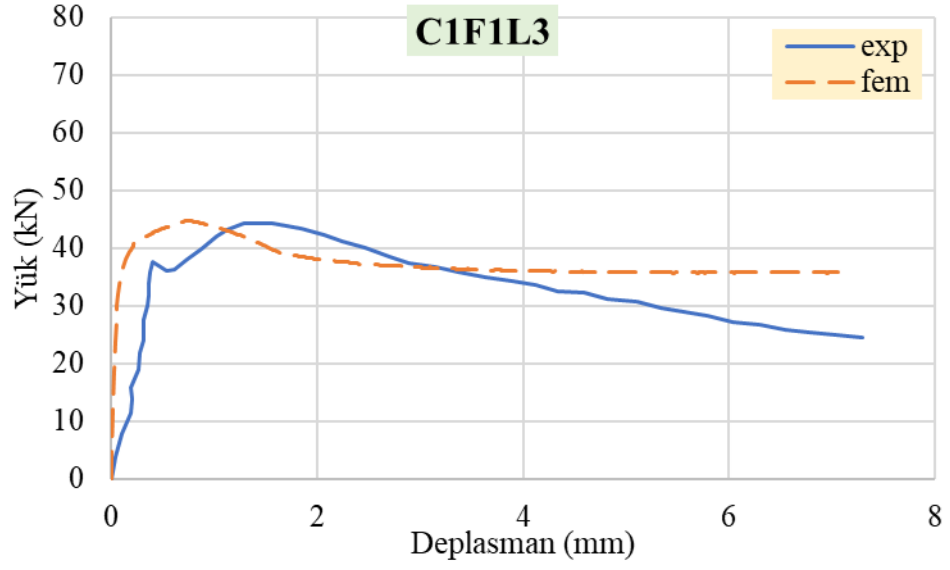
4.14-4.19 arasında da her 3 lif içeriği için farklı lif uzunluklarının etkisinin gösterildiği deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçları sunulmuştur.



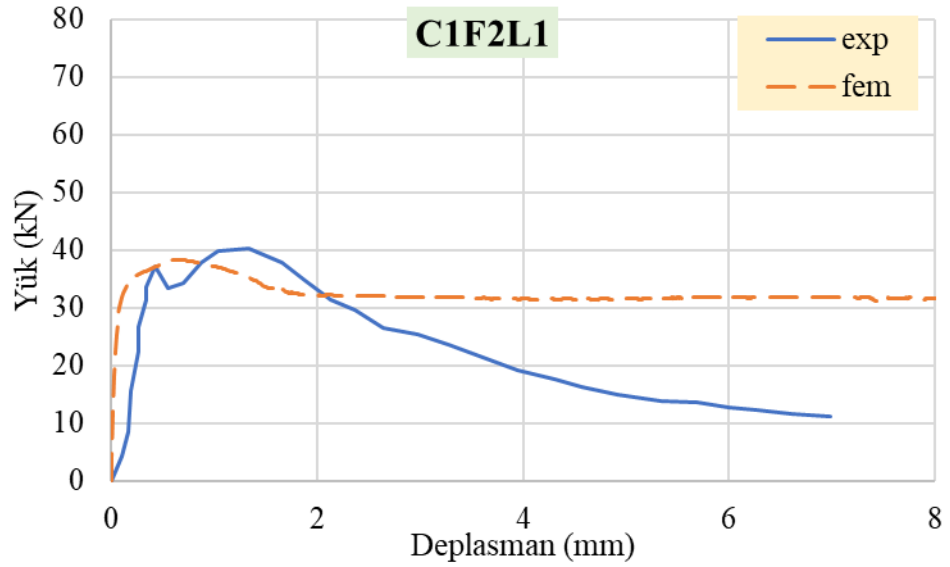
Şekil 4.5: $w/c=0.45$, $V_f=0.5$ ve $L_f=40$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



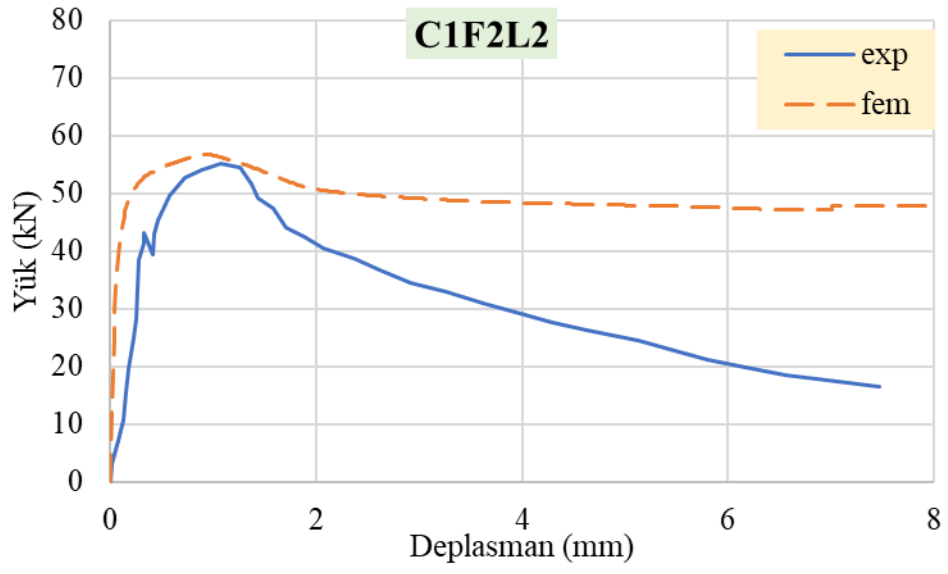
Şekil 4.6: $w/c=0.45$, $V_f=0.5$ ve $L_f=50$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



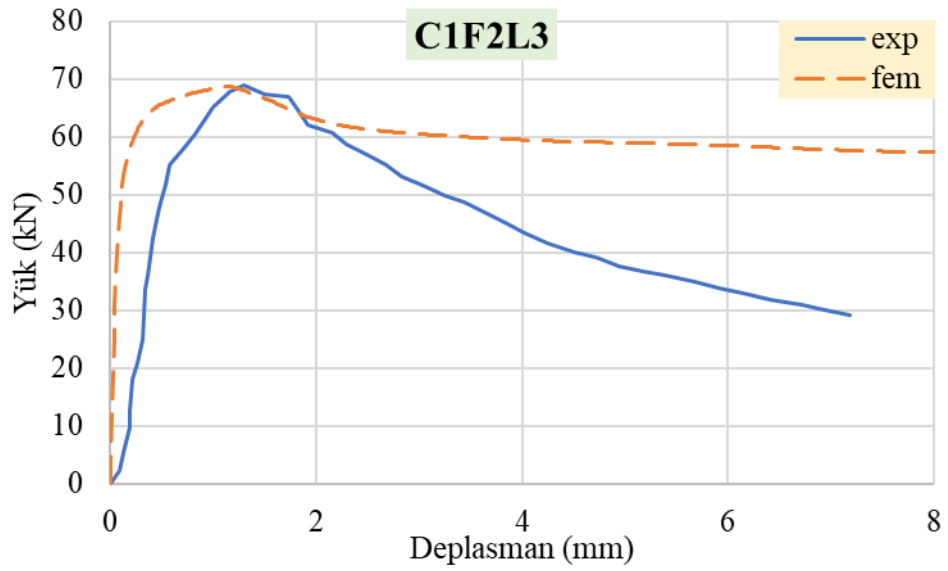
Şekil 4.7: $w/c=0.45$, $V_f=0.5$ ve $L_f=60$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



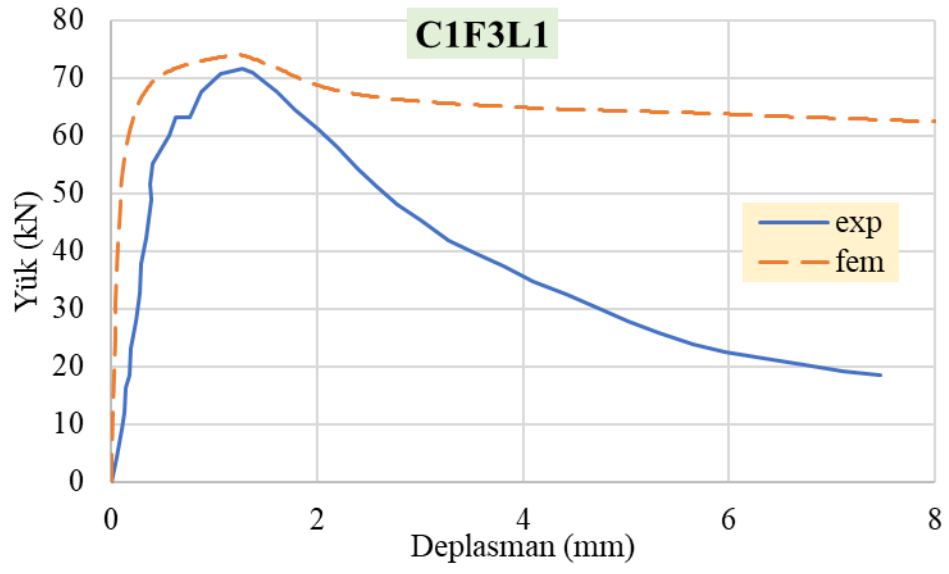
Şekil 4.8: $w/c=0.45$, $V_f=1.0$ ve $L_f=40$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



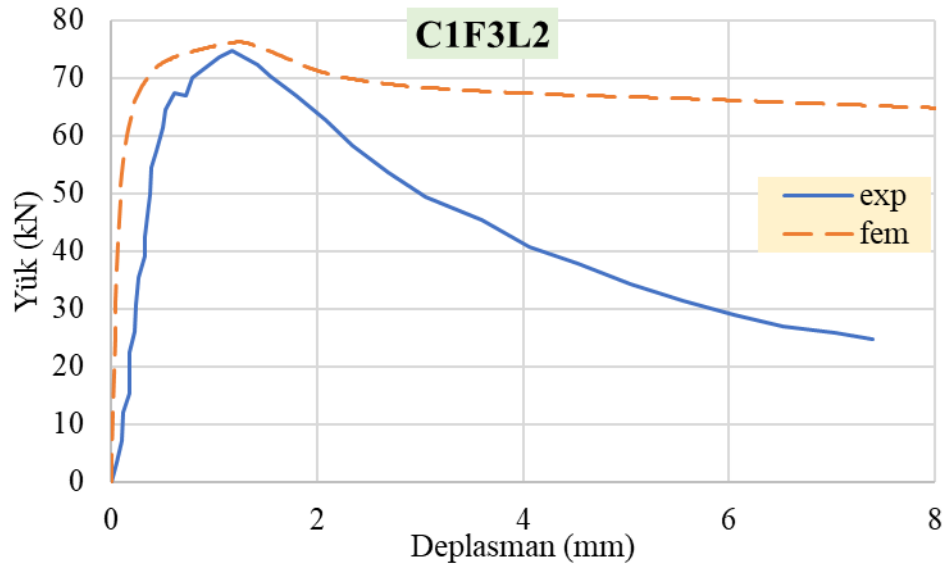
Şekil 4.9: $w/c=0.45$, $V_f=1.0$ ve $L_f=50$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



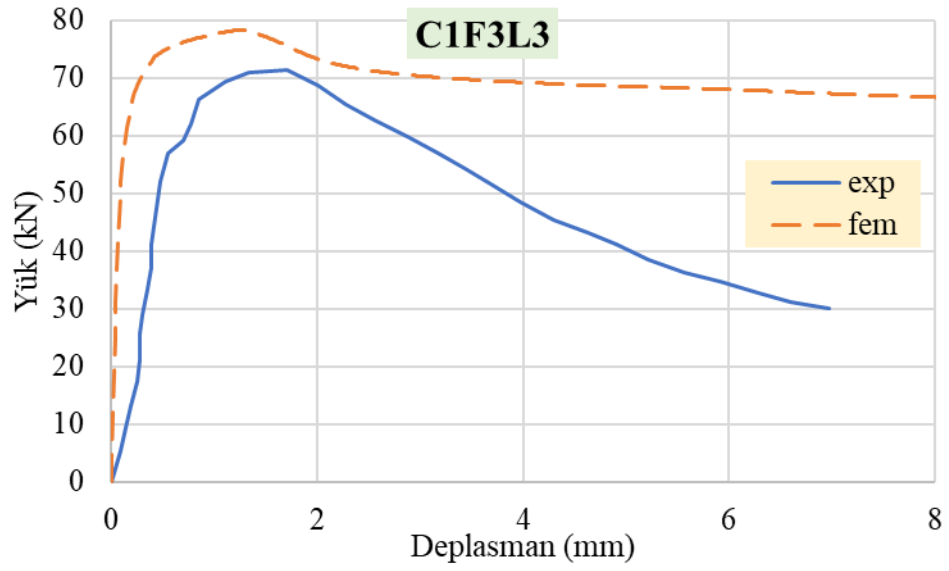
Şekil 4.10: $w/c=0.45$, $V_f=1.0$ ve $L_f=60$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



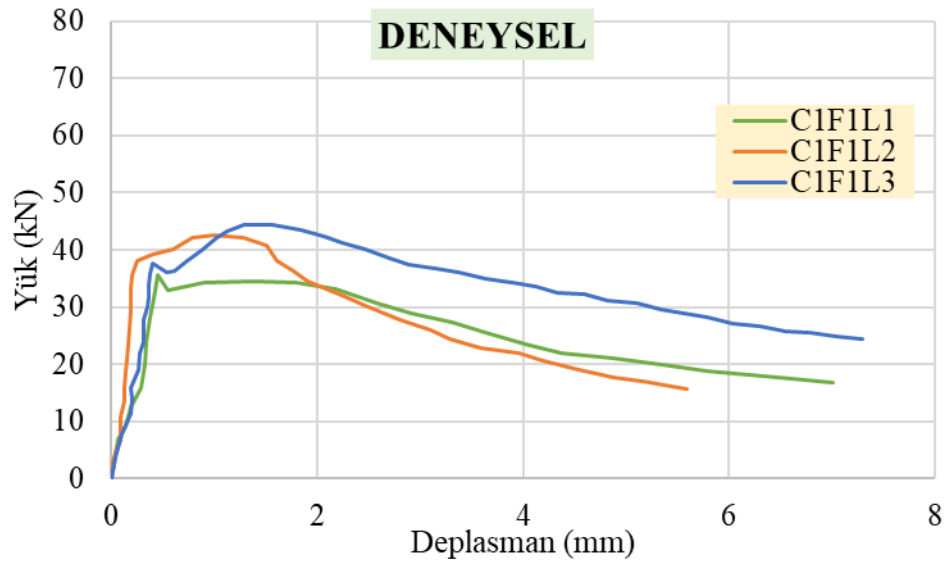
Şekil 4.11: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ ve $L_f=40$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



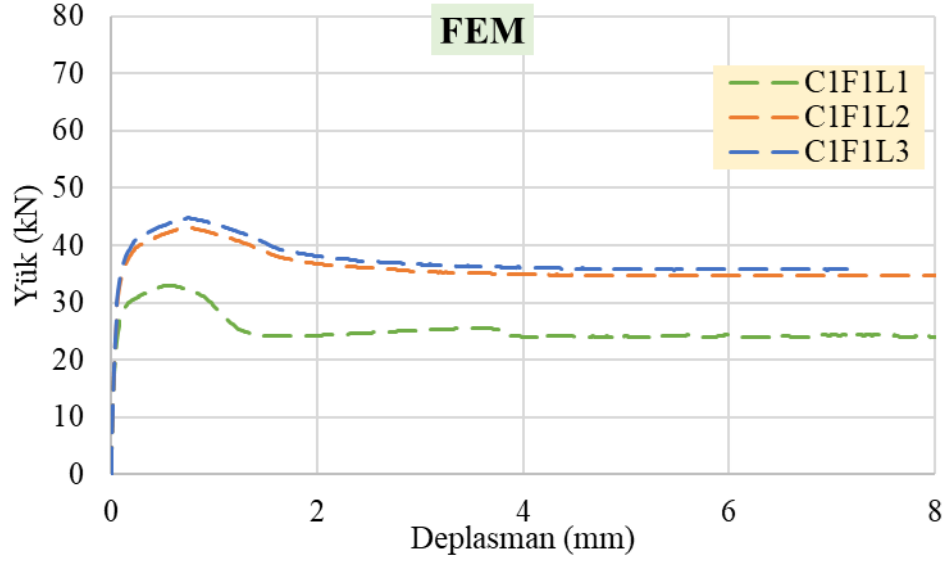
Şekil 4.12: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ ve $L_f=50$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



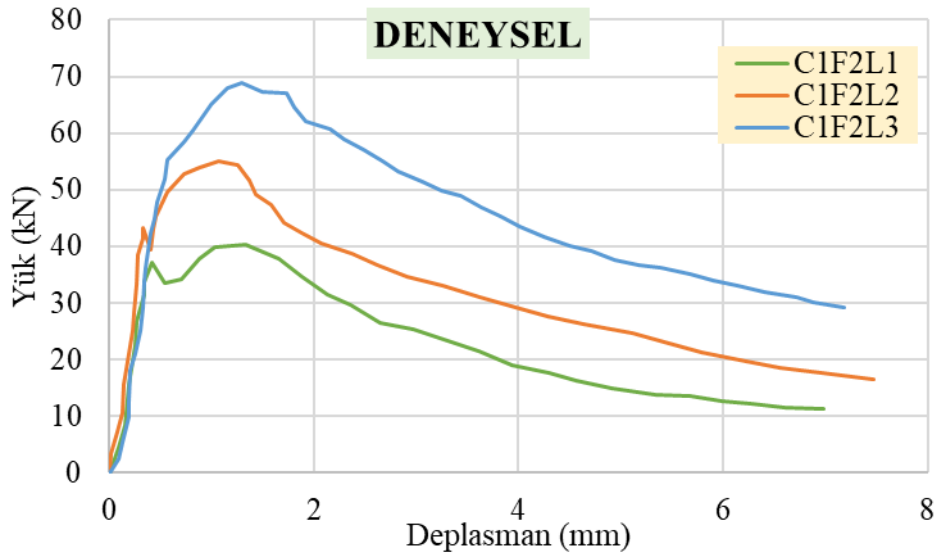
Şekil 4.13: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ ve $L_f=60$ mm için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



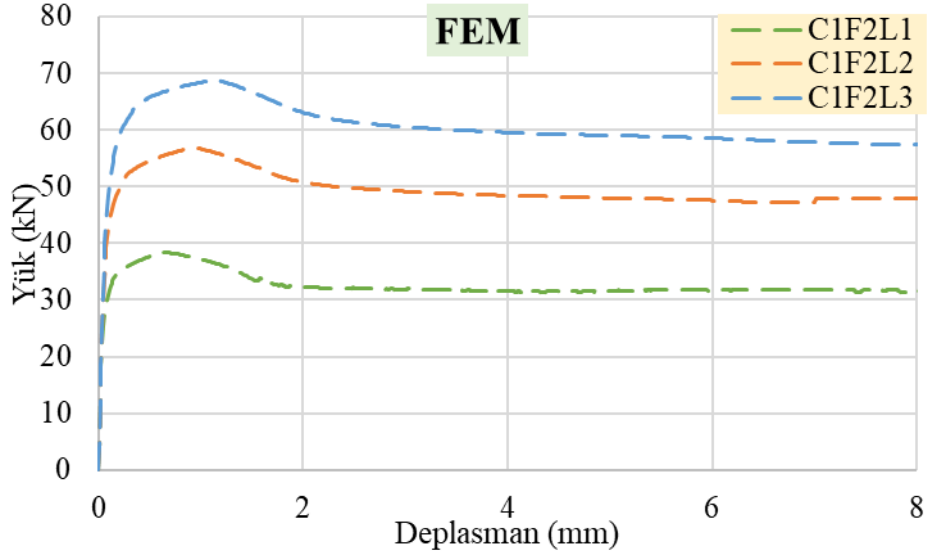
Şekil 4.14: $w/c=0.45$, $V_f=\%0.5$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40$ mm, 50 mm ve 60 mm) için deneysel sonuçlar



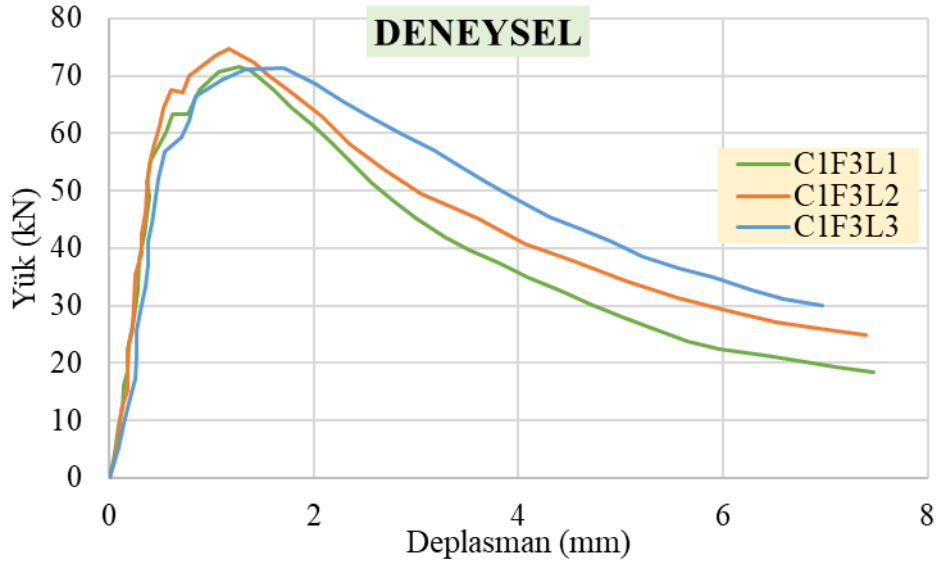
Şekil 4.15: $w/c=0.45$, $V_f=0.5\%$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40\text{mm}$, 50mm ve 60mm) için fem sonuçları



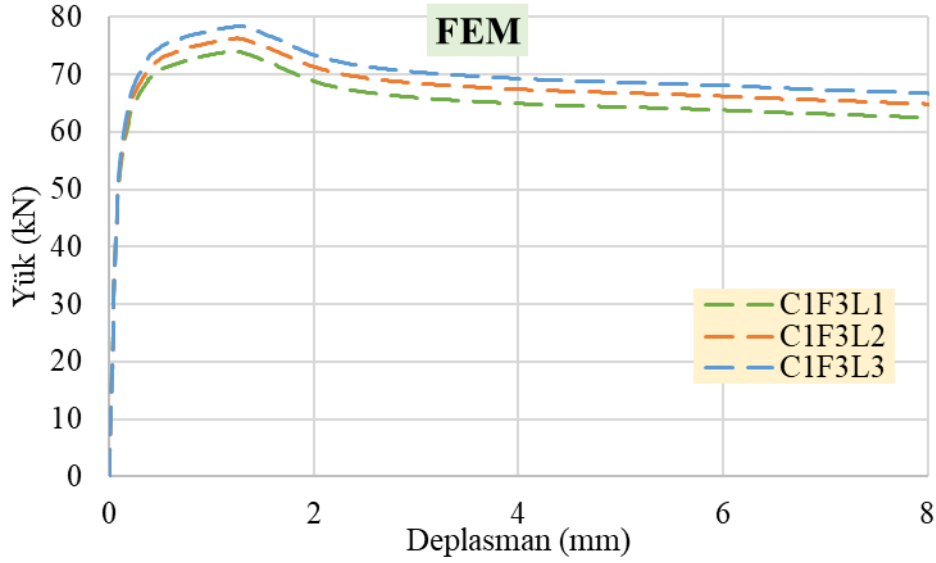
Şekil 4.16: $w/c=0.45$, $V_f=1.0\%$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40\text{mm}$, 50mm ve 60mm) için deneysel sonuçlar



Şekil 4.17: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.0$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40\text{mm}$, 50mm ve 60mm) için fem sonuçları



Şekil 4.18: $w/c=0.45$, $V_f=\%1.5$ çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu ($L=40\text{mm}$, 50mm ve 60mm) için deneysel sonuçlar



Şekil 4.19:

w/c=0.45, Vf=%1.5 çelik lif içeriği ve 3 farklı çelik lif uzunluğu (L=40mm,50mm ve 60mm) için fem sonuçları

Bütün sonuçlar incelendiğinde, deneysel eğri ve sonlu eleman eğrisi arasında tutarlı bir ilişkinin olduğu görülmüştür.

4.2.2 İkinci Karşılaştırma

Salehian ve diğerleri (2014), çelik elyaf takviyeli beton (SFRC) plakların tasarımı için güvenilir bir metodoloji geliştirmek için, SFRC kare panelleri ile kapsamlı bir deneysel program gerçekleştirmişlerdir. 45 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 olmak üzere iki lif içeriği kullanılmıştır. Kancalı uçlu çelik liflerin, uzunluğu 33 mm (L_f), çapı 0.55 mm (d_f), en boy oranı 60 mm (L_f/d_f) ve akma dayanımı 1300 MPa civarındadır. Deneysel çalışmada silindirler için basınç testi, paneller içinde eğilme testi yapılmıştır. Panel boyutları 600x600x100 mm'dir.

SPT-css ile test programı, sırasıyla SP45 ve SP60 olarak adlandırılan FRC45 ve FRC60 karışımları ile imal edilen 600x600x100 mm boyutlarında altı kare panelden oluşturulmuştur. EFNARC şartnamesi izlenerek, kare paneller, Şekil 4.20'de gösterilen test düzeneğinde test edilmiştir. Burada panel, her yönde 500 mm net açıklık

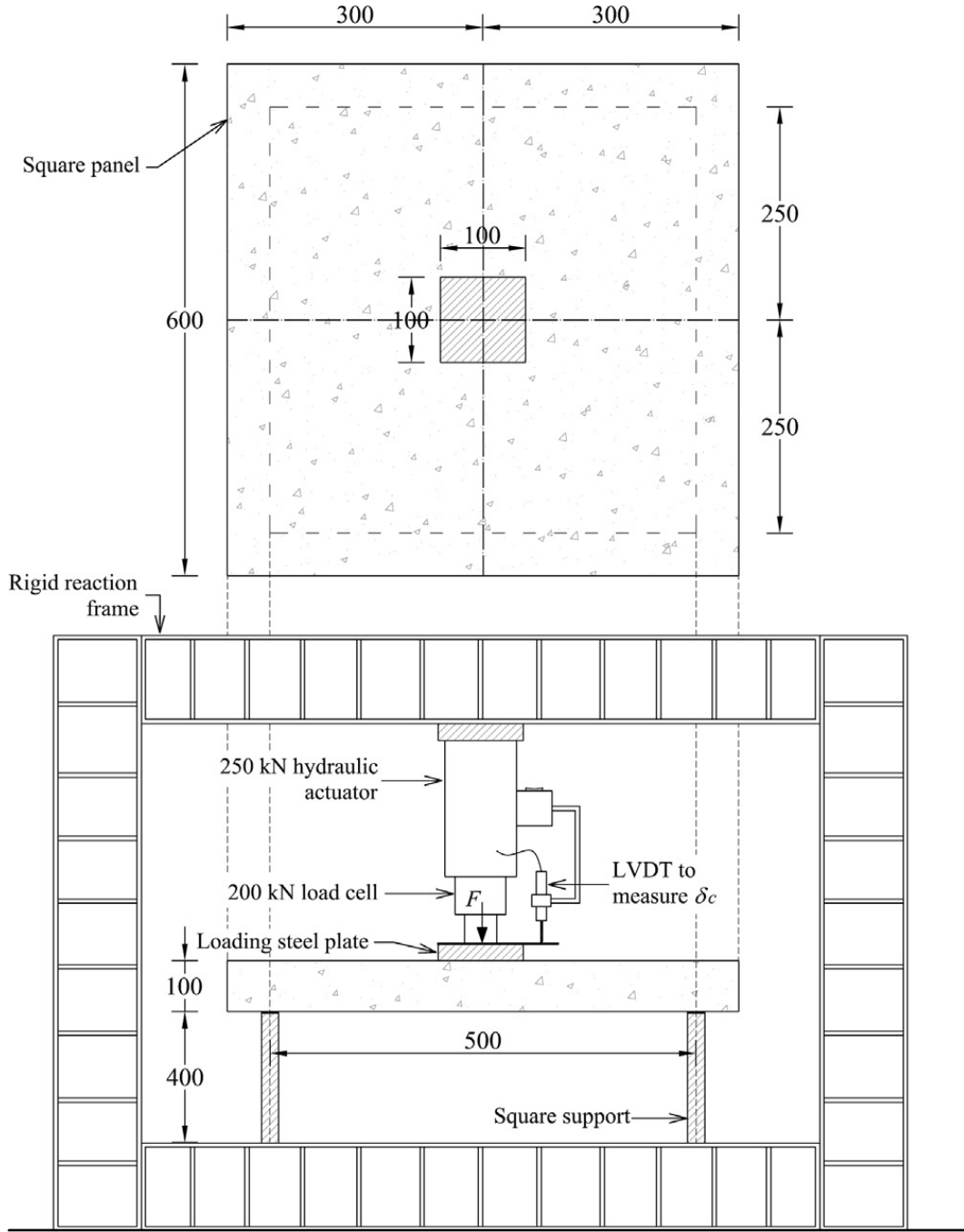
uzunluğu ile kendi konturu üzerinde basit bir şekilde desteklenmiş ve yükleme panelin ortasında 100x100x25 mm³'lük bir çelik plaka yardımıyla yapılmıştır. 250 kN kapasiteli bir hidrolik aktüatör ile uygulanan deformasyona karşı plakaların direnci ve 200 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Test, yükleme plakasının dikey sapmasını ölçen 50 mm ölçü uzunluğunda bir LVDT kullanılarak yer değiştirme kontrollü yapılmıştır. Uygulanan sapma oranı 0,5 mm'ye kadar 0,25 mm/dak ve panelin merkezinde 25 mm sapma elde etmek için 1.0 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Çalışmada kullanılan çelik lifli beton malzemeye ait karışım detayı ve mekanik özellikler sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.3: FRC45 ve FRC60 malzemeye ait karışım detayları

Material	FRC45/SP45 Mass (kg)	FRC60/SP60 Mass (kg)
Cement	401.7	413
Water	117.3	128
Super-plasticizer	7.7	7.83
Limestone filler	344.3	353
Fine river sand	178.3	176.9
Coarse river sand	688.1	644.2

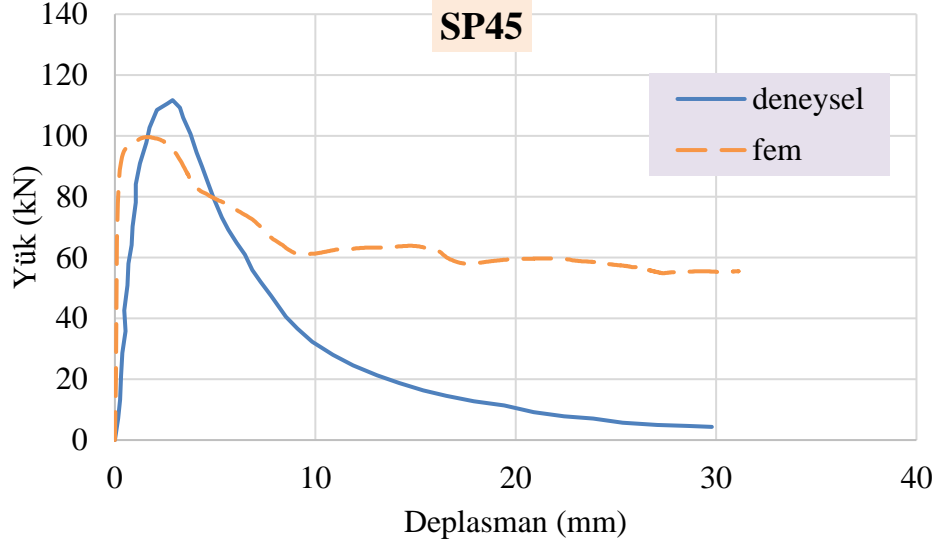
Tablo 4.4: Kullanılan beton malzemelere ait mekanik özellikler

	f_{cc} (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)
SFRSCC			
FRC45	65.2	3.43	40.14
FRC60	61.9	3.27	39.48

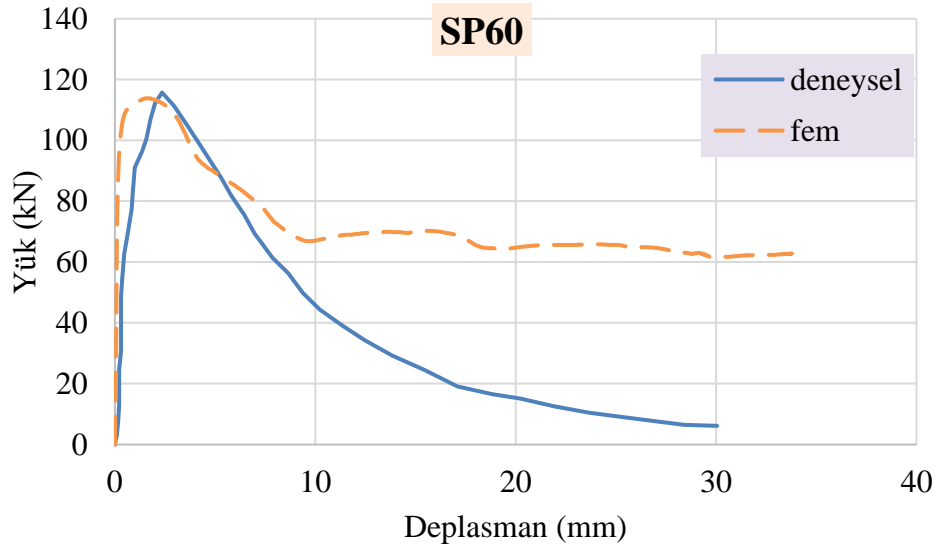


Şekil 4.20: Test düzeneği

Burada 600x600x100 mm kare paneller üzerinde yapılan deney sonuçları ile çelik lifli beton için oluşturduğumuz malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen sonlu eleman sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.21 ve 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.21: SP45 malzeme için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları



Şekil 4.22: SP60 malzeme için deneysel ve fem sonuçlarının karşılaştırmaları

SP45 ve SP60 malzemeden oluşan 600x600x100 mm panel sonuçlarına bakıldığında iki malzeme içinde deneysel ve sonlu elaman sonuçlarının birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Gerek birinci karşılaştırmada gerekse ikinci karşılaştırmada, elde edilen çelik lifli malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen SEA sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

İlgili yönetmelik ve literatür çalışmaları ile oluşturulan çelik lifli beton malzeme modeli esas alınarak çelik lifli beton paneller üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan parametrik çalışma ve detayları bir sonraki başlıkta sunulmuştur.

4.3 Parametrik Çalışma ve Sonuçları

Tezin bu bölümünde, literatürde yer almakta olan 11 farklı çelik lifli beton malzeme ile imal edilmiş kiriş ve plak elemanlara ait deneysel çalışma sonuçları ile yönetmelikler ve literatür yardımı ile elde edilen çelik lifli beton malzeme modeli ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinin uyumlu olduğunun gözlemlenmesi neticesinde parametrik çalışma geliştirilmiştir. Panel kalınlığı, panel boyutları (genişlik x yükseklik), malzeme dayanımı (çelik lif yüzdesi) ve mesnetlenme şartları çalışmada incelenen parametreleri oluşturmaktadır.

4.3.1 Sonlu Elemanlar Analizi Detayları

İncelenen tüm panel elemanlarda panel yüksekliği sabit ve 600 mm, genişliği 600-750-900-1050-1200-1350 ve 1500 mm olmak üzere 7 farklı genişlik seçilmiştir. Referans alınan çalışmadaki (Salehian ve diğ. 2014) panel boyutları 600x600 mm olması nedeniyle tez kapsamında 600x600 mm'lik panellerden yola çıkılarak boyutlar çeşitlendirilmiştir.

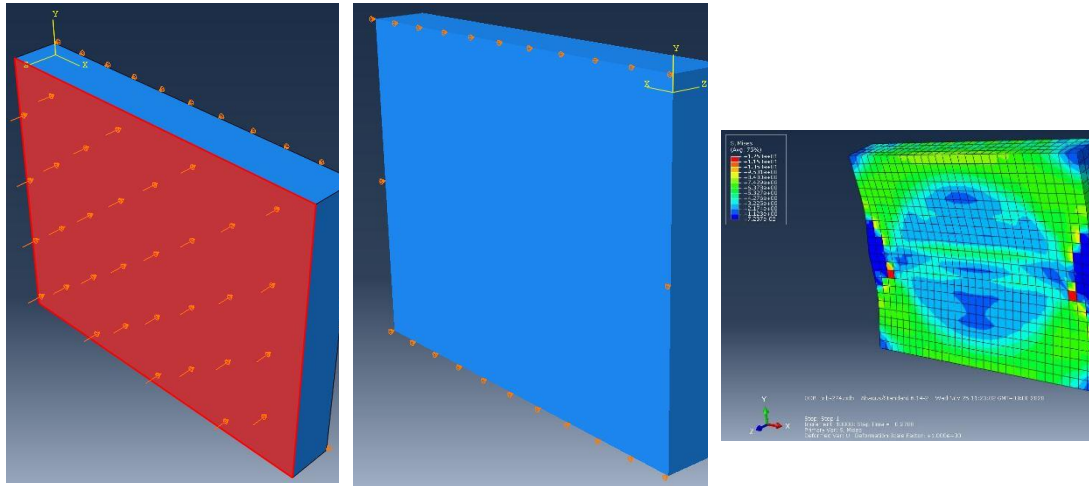
Sonlu elemanlar yöntemine dayalı ABAQUS yazılımı kullanılarak toplam 328 vaka analiz edilmiştir. Tüm SFRC panel elemanları, 8 düğümlü altı yüzlü lineer tuğla yapısal elemanları (8 noded hexahedral linear brick element) kullanılarak sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Her bir ağ (mesh) boyutu 25 mm'dir. Sonlu eleman modellemesinde, betonun elastik olmayan davranışı, beton ve diğer yarı gevrek malzemeleri modellemek için genel bir kapasite sağlayan "Concrete Damaged Plasticity Model (CDP)" kullanılarak tanımlanmıştır (Tablo 4.5).

Tablo 4.5: Sonlu eleman analizinde kullanılan beton parametreleri

Elastic		
Young's modulus (MPa)	40000	
Poisson's ratio	0.2	
Concrete Damaged Plasticity		
Plasticity	Dilation Angle	30
	Eccentricity	0.1
	fb0/fc0	1
	K	0.667
	Viscosity Parameter	0
	Dilation Angle	30
	Compressive Behavior*	
	Tensile Behavior*	

* Şekil 4.2'de sunuldu

Yüzey basıncına maruz kalan çelik lifli panellerin doğrusal olmayan davranışları gözlemlenmiştir. Analizlerde panellerin ön yüzeyinden yüzey basıncı uygulanmıştır. Panellerin kenarlarındaki yer değiştirme, arka yüzeyde moment serbest bırakan silindirik destekleri kullanılarak sadece uygulanan yüzey basıncı yönünde sınırlandırılmıştır (Şekil 4.23).



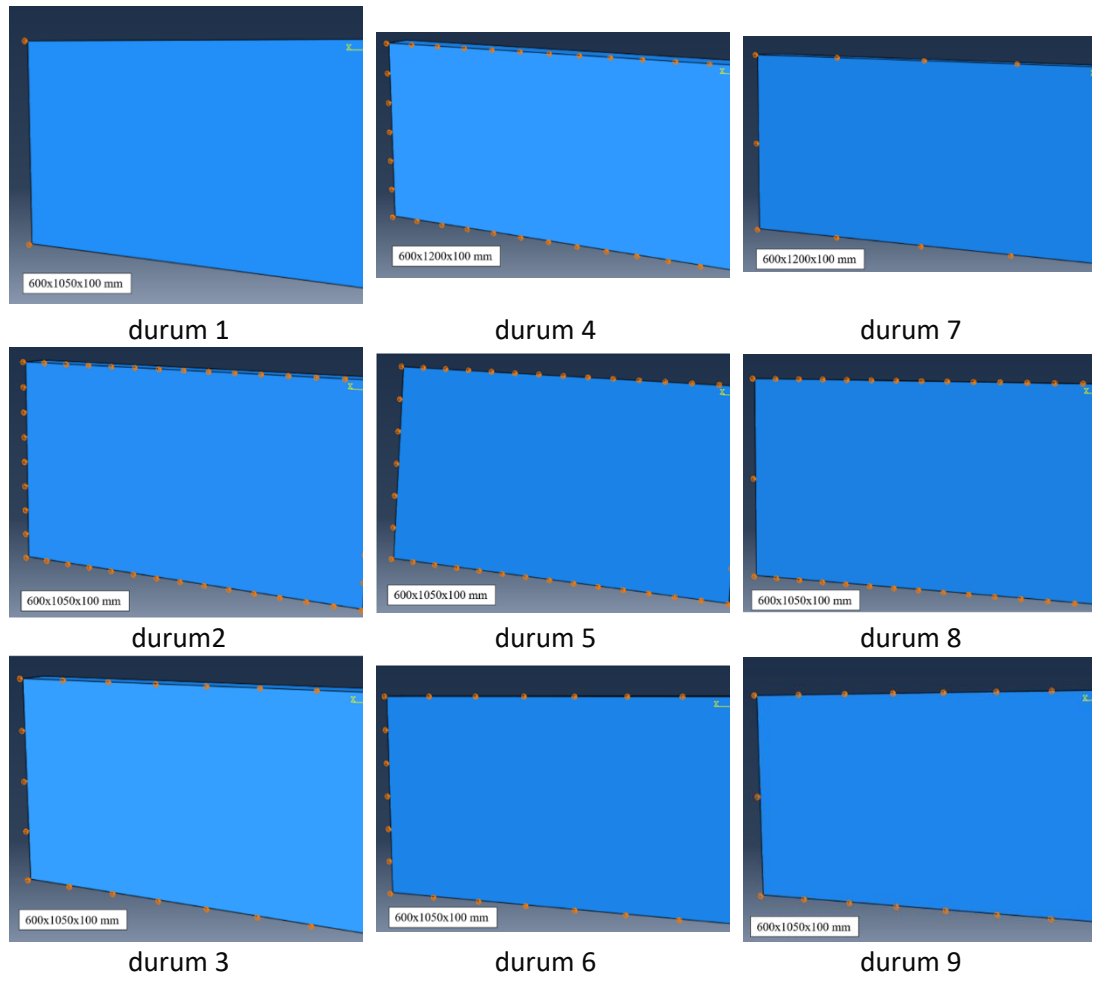
Şekil 4.23: (a) yüzey basıncı uygulanan panel, (b) panelin arka yüzeyindeki mesnet detayları, (c) von-Misses gerilmeleri.

Tablo 4.6'da gösterildiği gibi dört farklı panel kalınlığı (t), yedi farklı panel uzunluğu (L) ve iki farklı malzeme türü (45 kg/m^3 çelik lif içeren beton için SP45, 60 kg/m^3 çelik lif içeren beton için SP60 sembolleri kullanılacaktır) ve 9 farklı sınır şartı bulunmaktadır. 600 mm olarak seçilen panel genişliği, analiz edilen tüm durumlar için sabit olarak seçilmiştir. Analiz edilen dokuz farklı destek durumu (Şekil 4.24) Tablo

4.7'de detaylandırılmıştır. 9 sınır koşulunun ve 7 en-boy oranının 41 farklı kombinasyonunu içeren matrisin tamamı Tablo 4.8'de listelenmiştir.

Tablo 4.6: Parametreler ve detayları

Panel Kalınlığı (mm)	Panel Uzunluğu (mm)	Malzeme Tipi
80	600	SP45
100	750	SP60
120	900	
150	1050	
	1200	
	1350	
	1500	



Şekil 4.24: Panel üzerinde sınır koşullarının gösterimi

Tablo 4.7: Sınır durumları ve açıklamaları

Sınır şartı	Numaralandırma
Sadece köşelerden tututlu	1
Köşeler, yatay ve düşey kenarda her 75 mm'de bir tutulu	2
Köşeler, yatay ve düşey kenarda her 150 mm'de bir tutulu	3
Köşeler, yatay ve düşey kenarda her 100 mm'de bir tutulu	4
Köşeler, düşey kenarda her 100 mm'de bir, yatay kenarda her 75 mm'de bir tutulu	5
Köşeler, düşey kenarda her 100 mm'de bir, yatay kenarda her 150 mm'de bir tutulu	6
Köşeler, yatay ve düşey kenarda her 300 mm'de bir tutulu	7
Köşeler, düşey kenarda her 300 mm'de bir, yatay kenarda her 75 mm'de bir tutulu	8
Köşeler, düşey kenarda her 300 mm'de bir, yatay kenarda her 150 mm'de bir tutulu	9

Tablo 4.8: Test matrisi

Panel boyutları		Sınır şartı: 1		Sınır şartı: 4		Sınır şartı: 7	
		Mesnetler arası uzaklık		Mesnetler arası uzaklık		Mesnetler arası uzaklık	
Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar
600	600	600	600	100	100	300	300
600	750	600	750		N.A.		N.A.
600	900	600	900	100	100	300	300
600	1050	600	1050		N.A.		N.A.
600	1200	600	1200	100	100	300	300
600	1350	600	1350		N.A.		N.A.
Panel boyutları		Sınır şartı: 2		Sınır şartı: 5		Sınır şartı: 8	
		Mesnetler arası uzaklık		Mesnetler arası uzaklık		Mesnetler arası uzaklık	
Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar
600	600	75	75		N.A.		N.A.
600	750	75	75	100	75	300	75
600	900	75	75		N.A.		N.A.
600	1050	75	75	100	75	300	75
600	1200	75	75		N.A.		N.A.
600	1350	75	75	100	75	300	75
Panel boyutları		Sınır şartı: 3		Sınır şartı: 6		Sınır şartı: 9	
		Mesnetler arası uzaklık		Mesnetler arası uzaklık		Mesnetler arası uzaklık	
Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar	Kısa kenar	Uzun kenar
600	600	150	150		N.A.		N.A.
600	750	150	150	100	150	300	150
600	900	150	150		N.A.		N.A.
600	1050	150	150	100	150	300	150
600	1200	150	150		N.A.		N.A.
600	1350	150	150	100	150	300	150

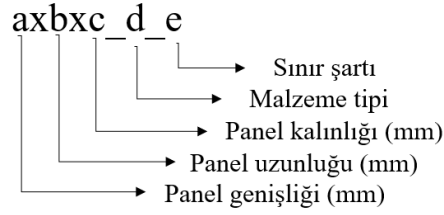
Her bir durum için 4 farklı kalınlık (80, 100, 120, 150 mm) ve 2 farklı malzeme türü (SP45, SP60) analiz edilmiştir.

N.A. - Analiz edilmedi

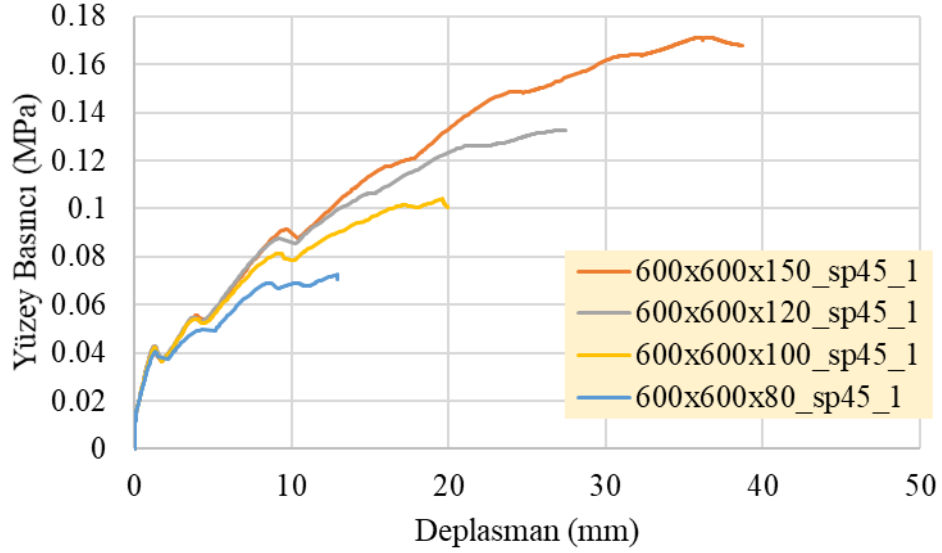
Tüm boyutlar mm cinsindedir.

4.3.2 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

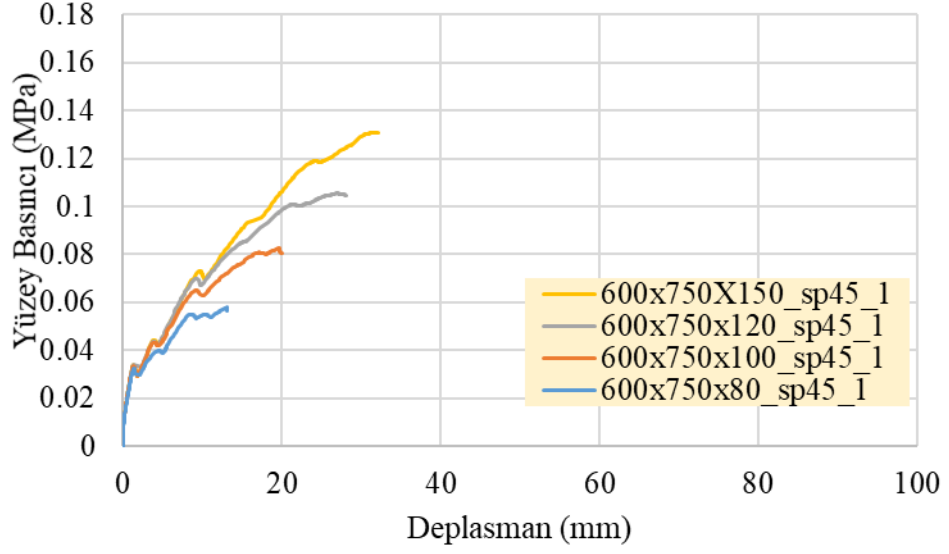
Bu çalışmada, dört parametreye göre değişen 328 panel üzerinde sonlu elemanlar programına dayalı ABAQUS programında analizler yapılmıştır. İncelenen parametreler panel boyutları, panel kalınlığı, malzeme türü ve destekler arasındaki mesafelerdir. Grafiklerde kullanılan kısaltmalar Şekil 4.25'te açıklanmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.26-4.107 arasında verilmiştir.



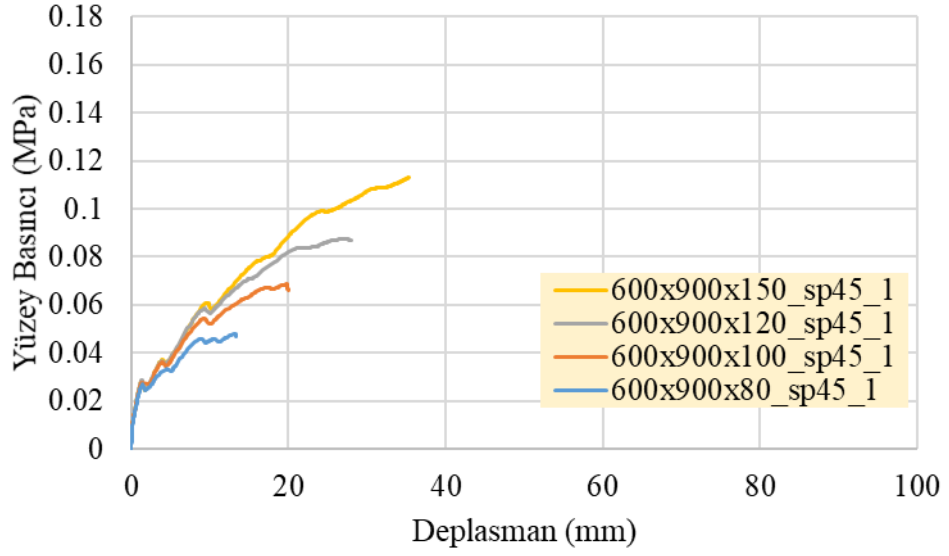
Şekil 4.25: Grafiklerde kullanılan kısaltmaların açıklamaları



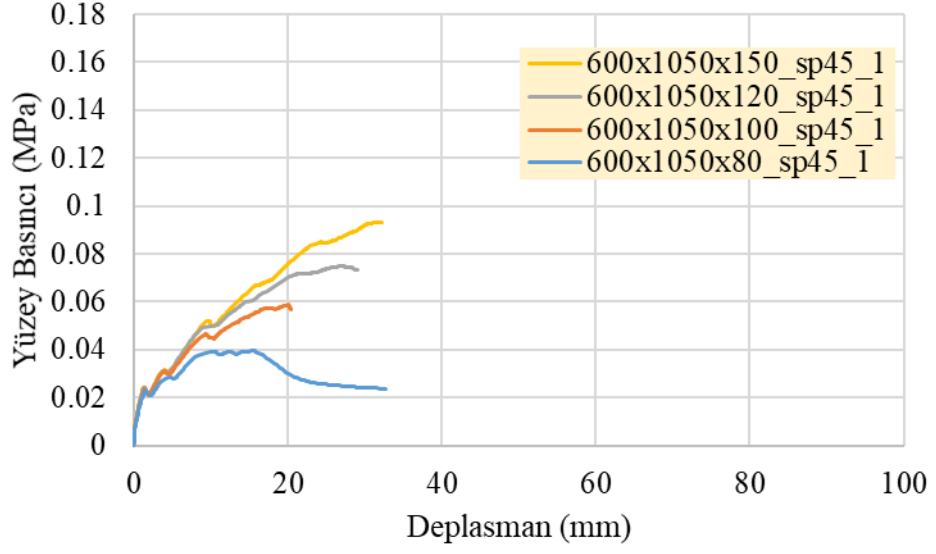
Şekil 4.26: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



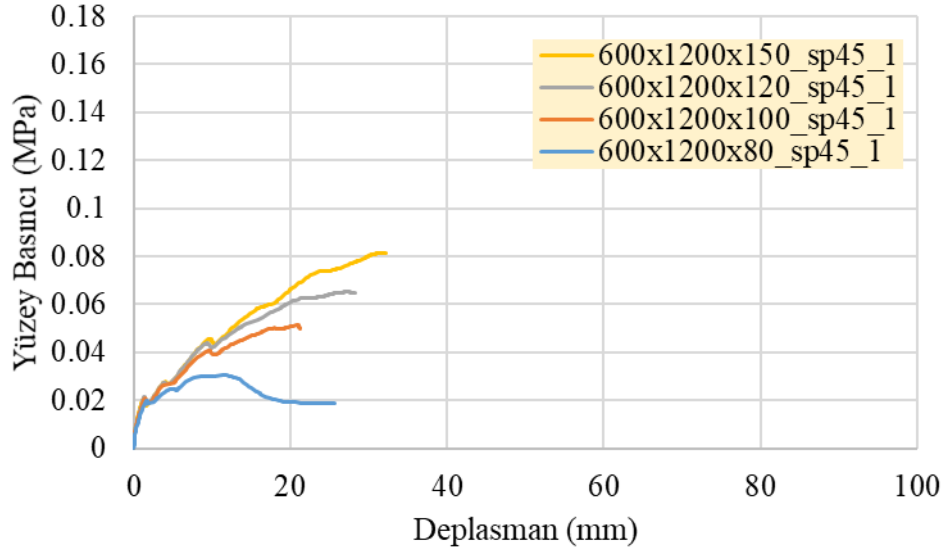
Şekil 4.27: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



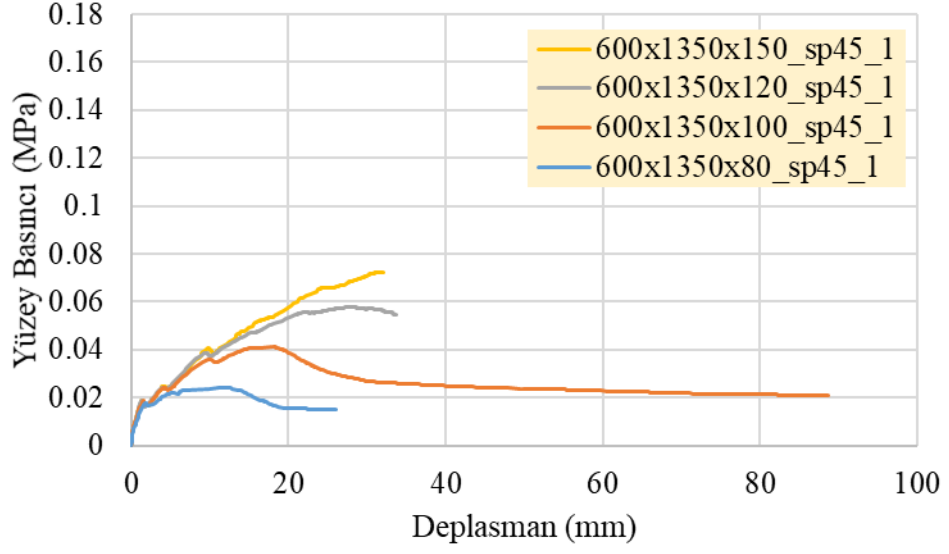
Şekil 4.28: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



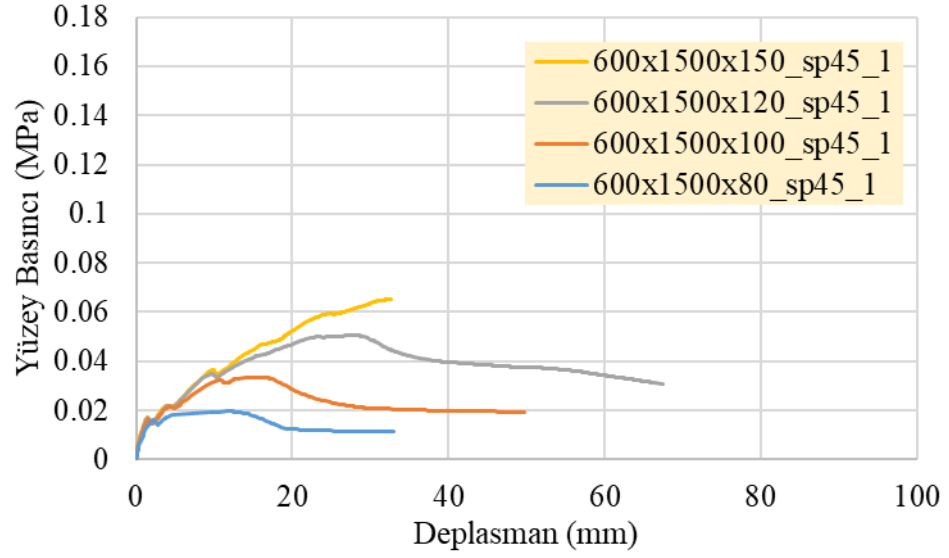
Şekil 4.29: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



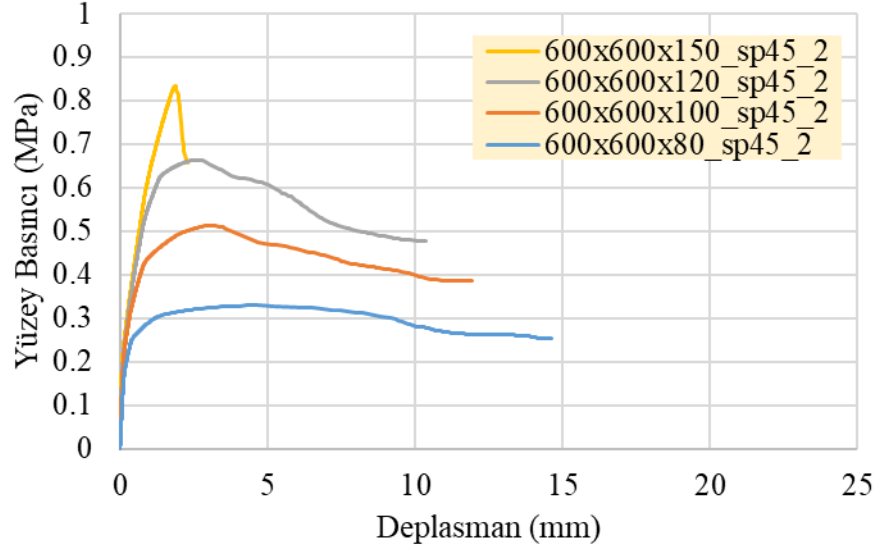
Şekil 4.30: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



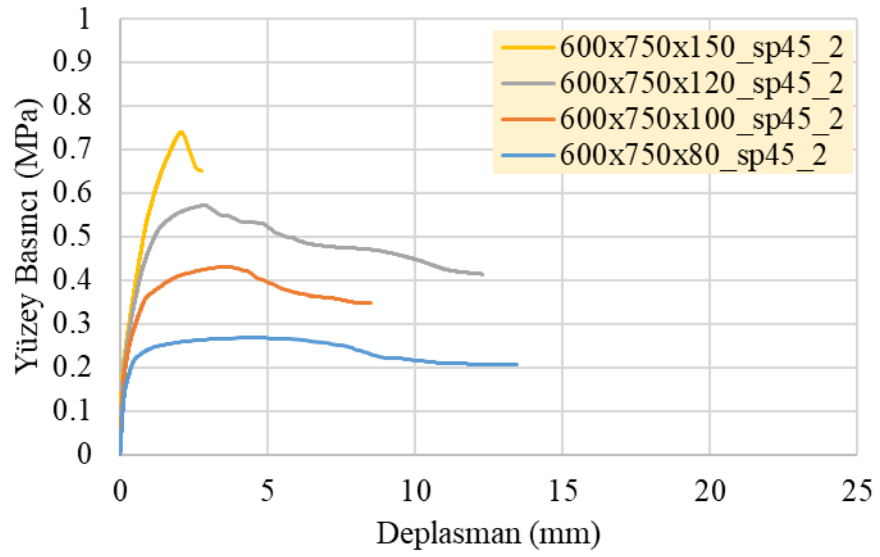
Şekil 4.31: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



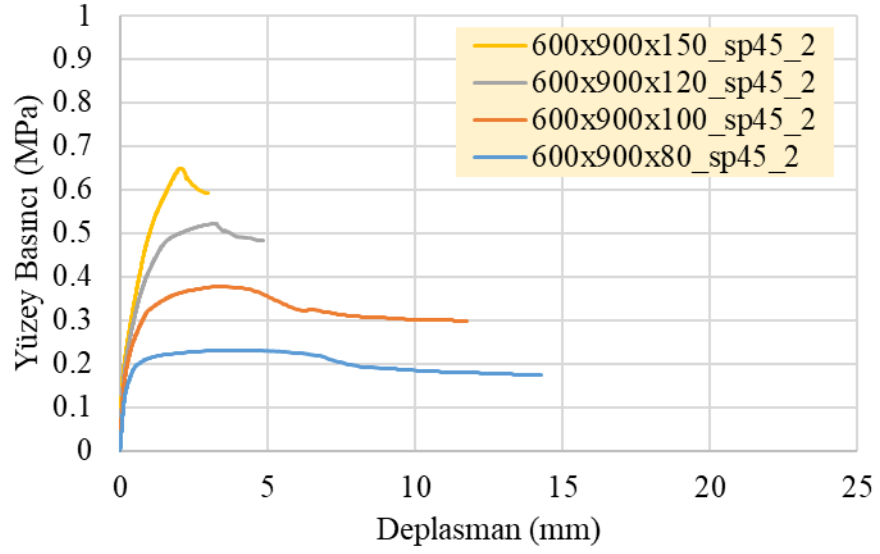
Şekil 4.32: SP45 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



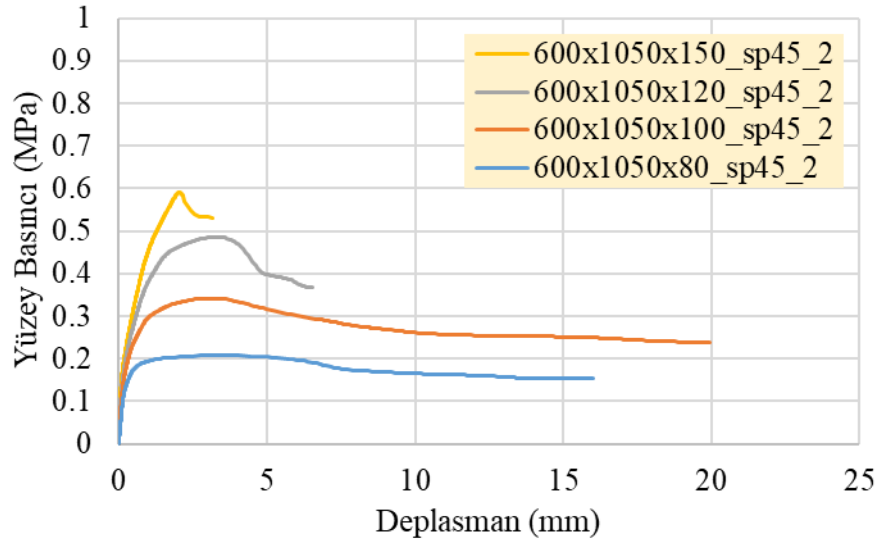
Şekil 4.33: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



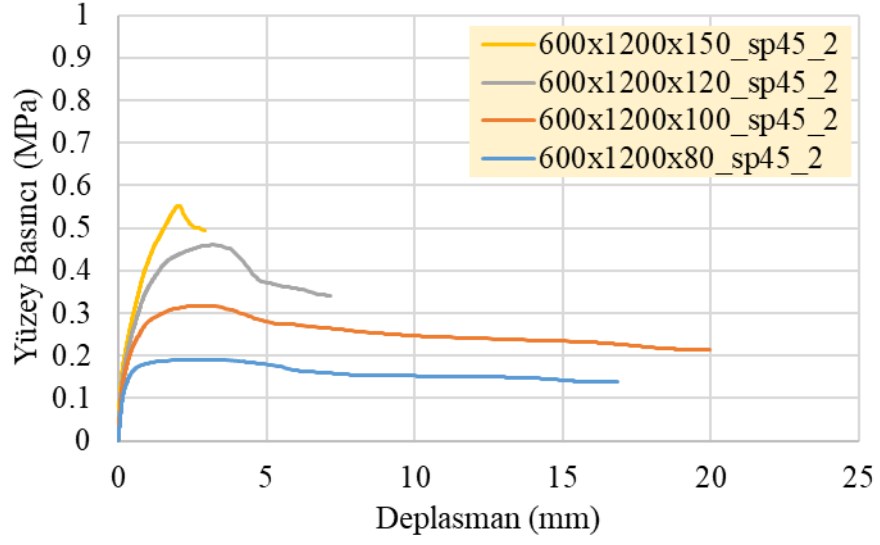
Şekil 4.34: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



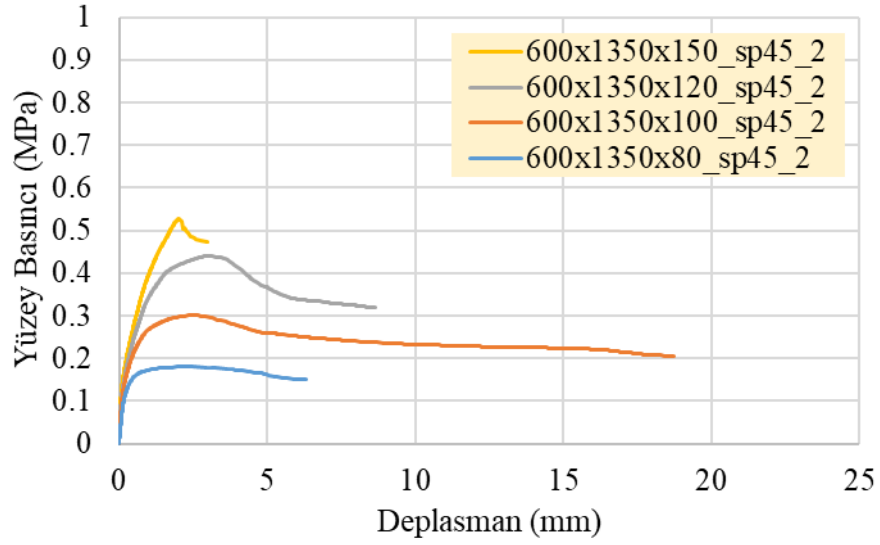
Şekil 4.35: SP45 malzemedan oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



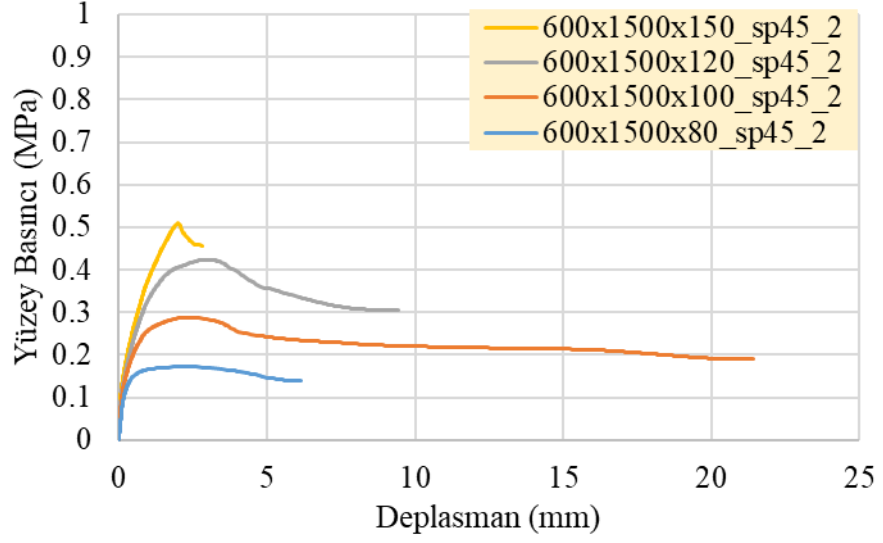
Şekil 4.36: SP45 malzemedan oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



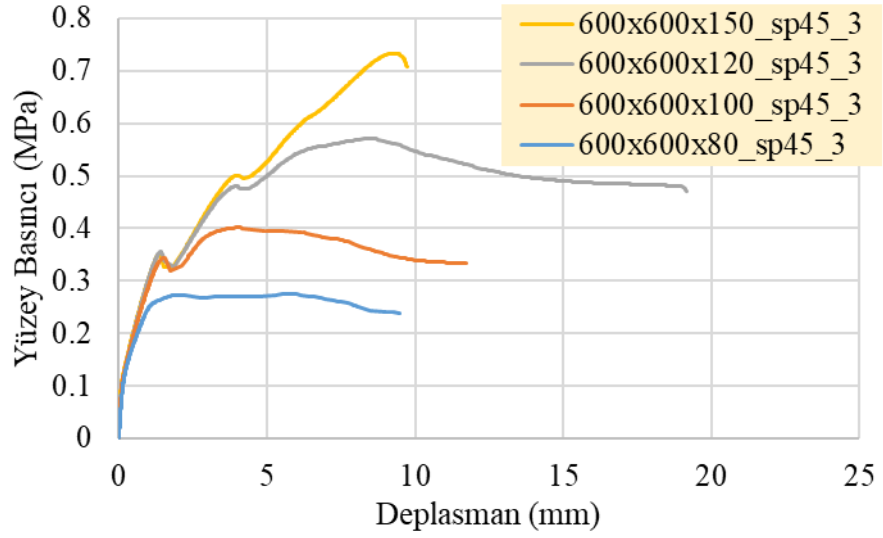
Şekil 4.37: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



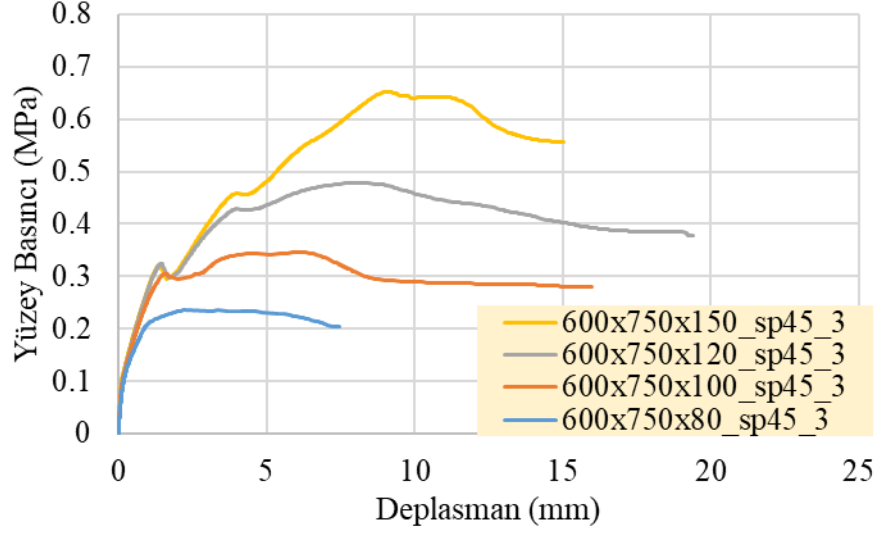
Şekil 4.38: SP45 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



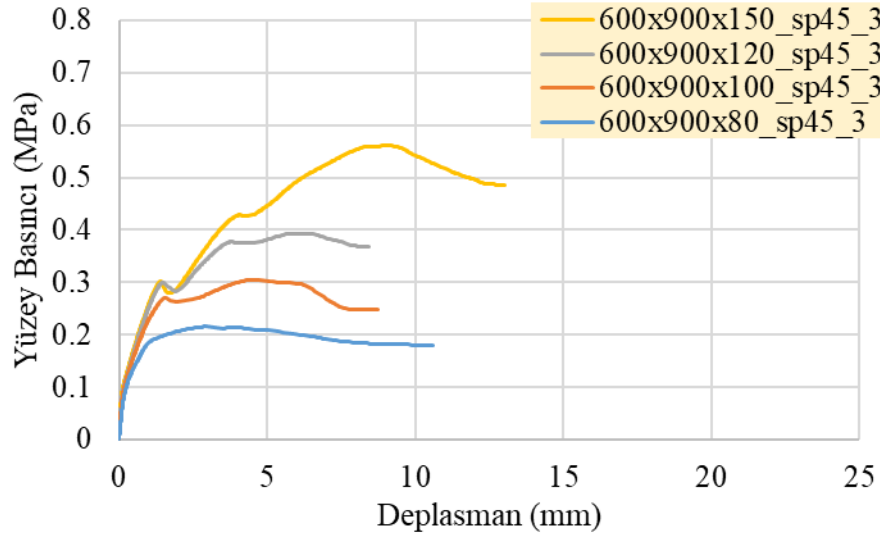
Şekil 4.39: SP45 malzemedan oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



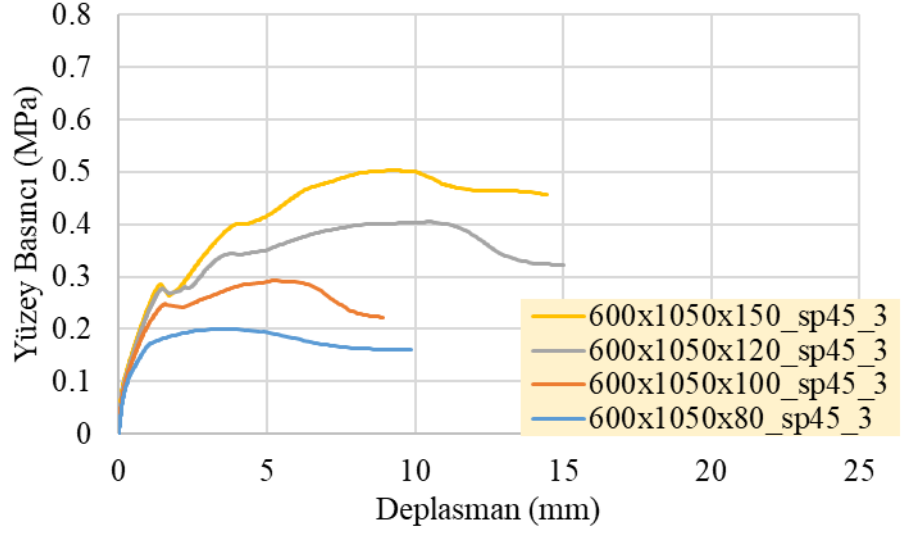
Şekil 4.40: SP45 malzemedan oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



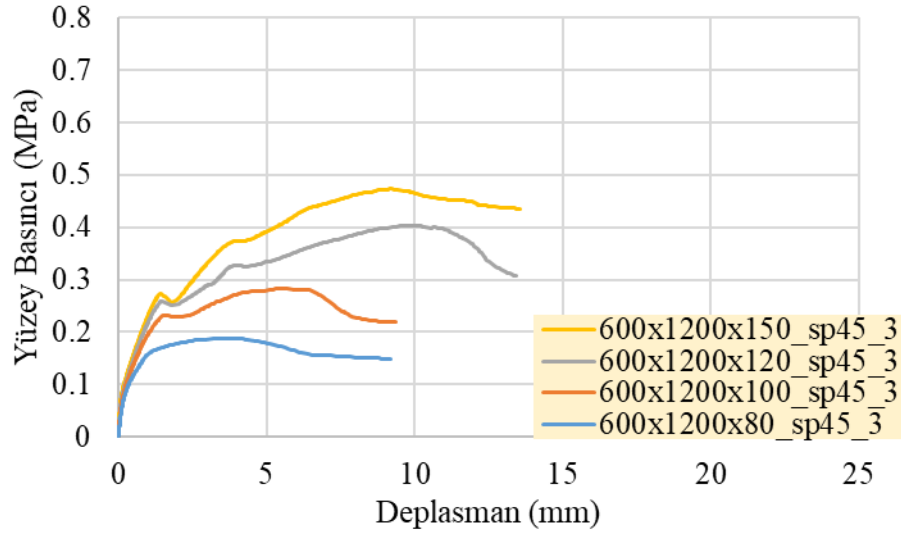
Şekil 4.41: SP45 malzemedeki yüzey basıncı deplasman ilişkisi için 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



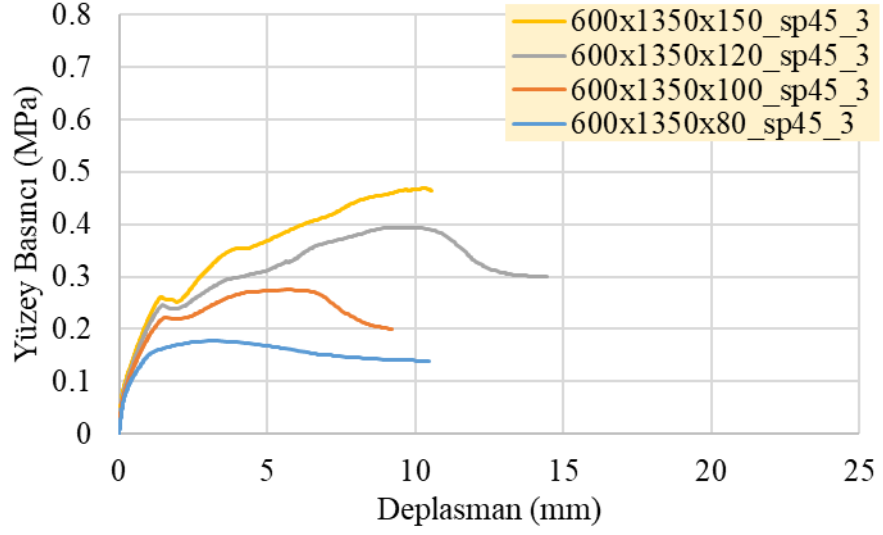
Şekil 4.42: SP45 malzemedeki yüzey basıncı deplasman ilişkisi için 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



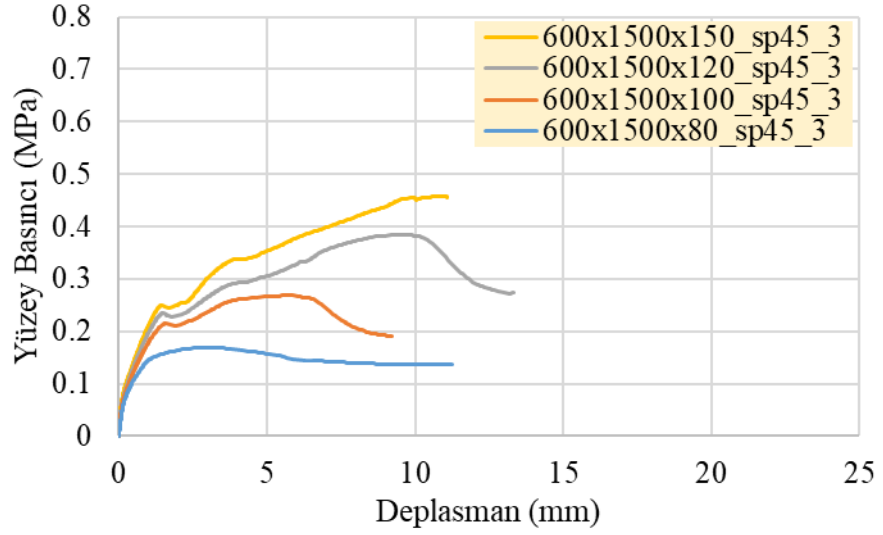
Şekil 4.43: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



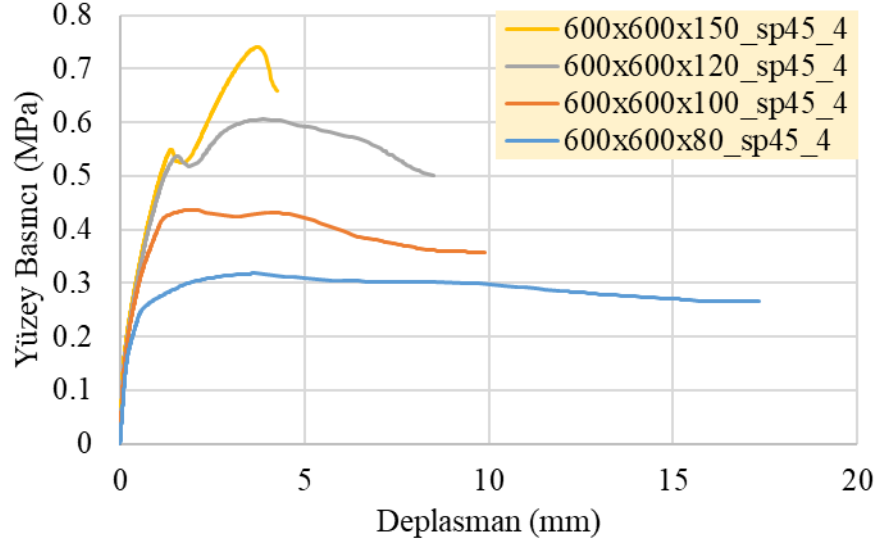
Şekil 4.44: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



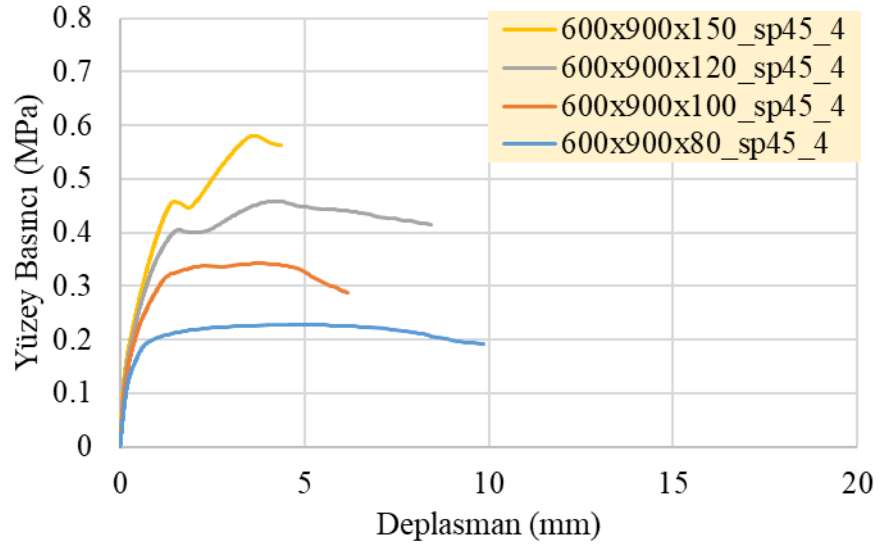
Şekil 4.45: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



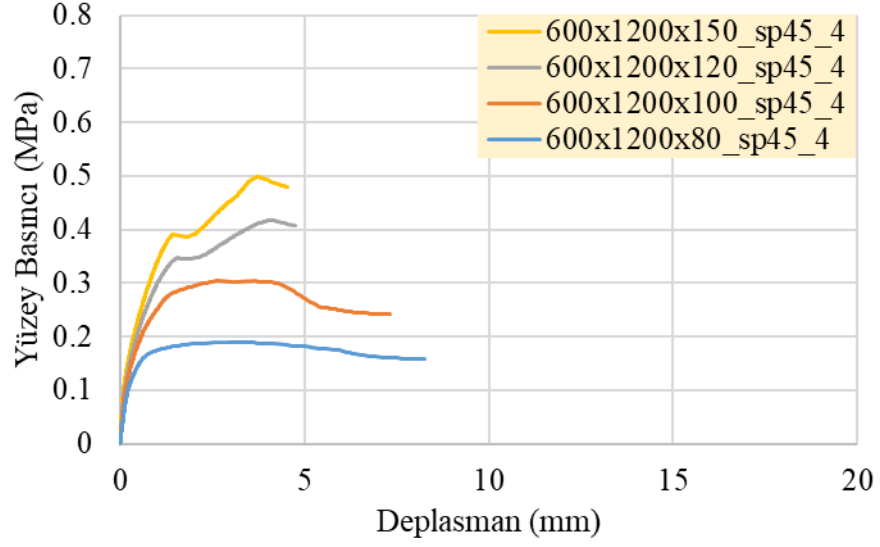
Şekil 4.46: SP45 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



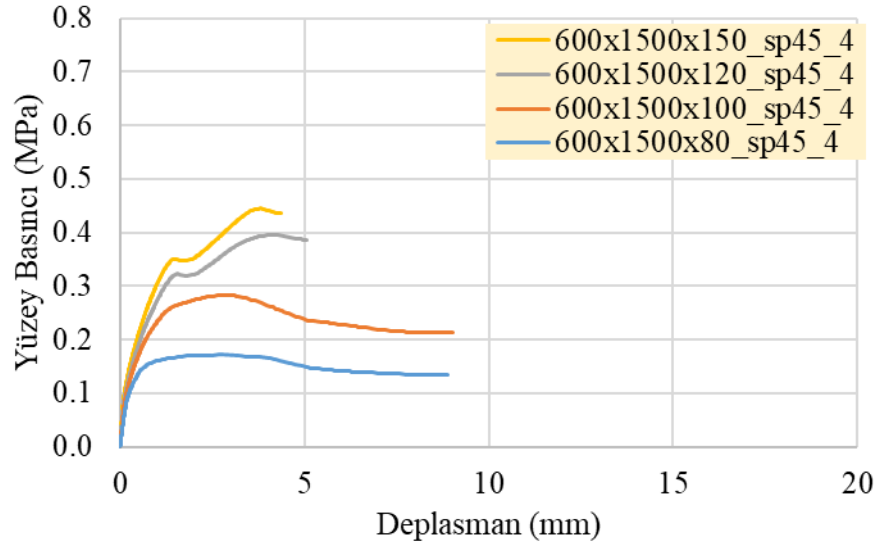
Şekil 4.47: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



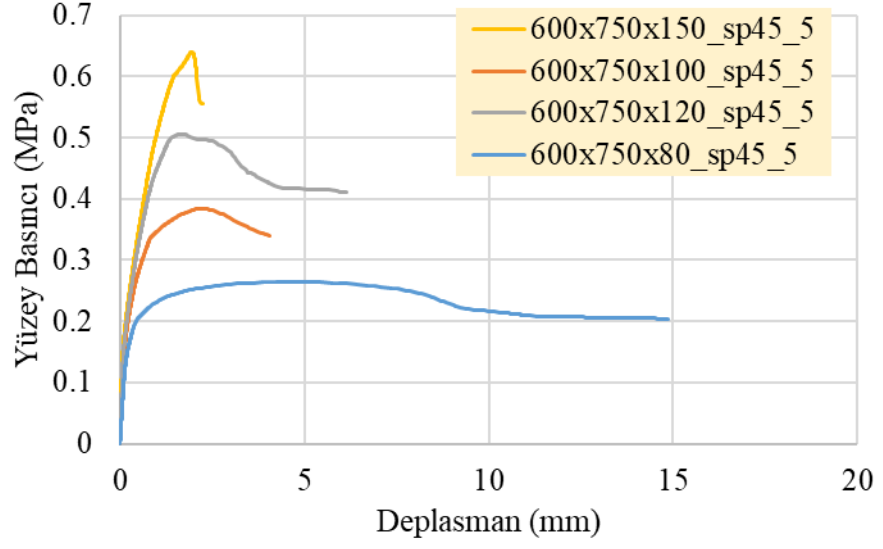
Şekil 4.48: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



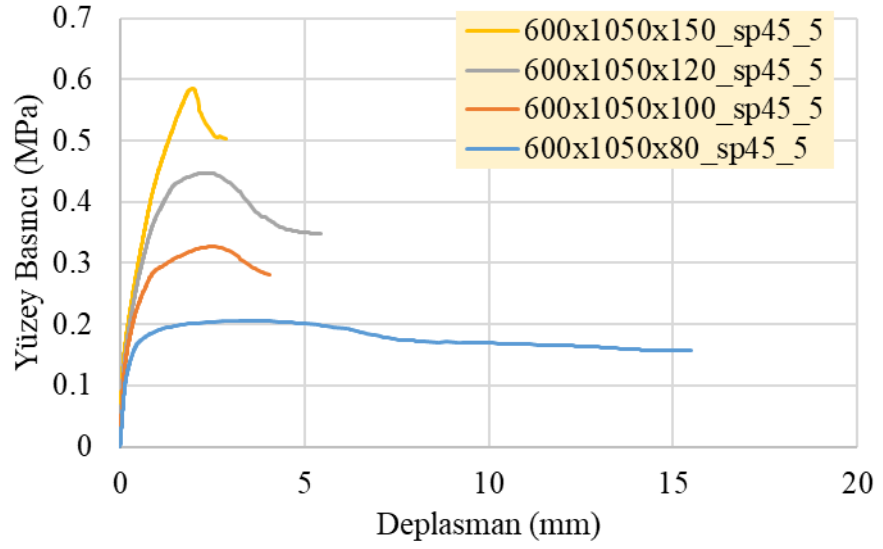
Şekil 4.49: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



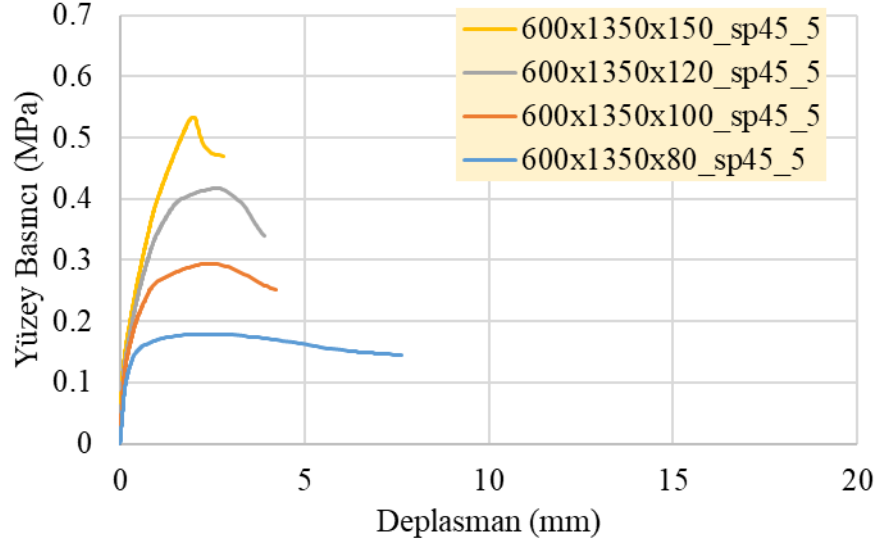
Şekil 4.50: SP45 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



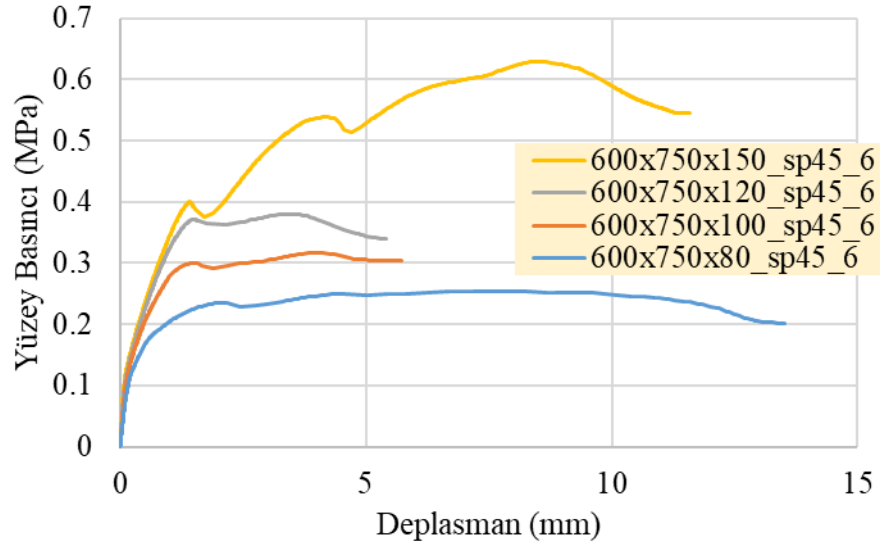
Şekil 4.51: SP45 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



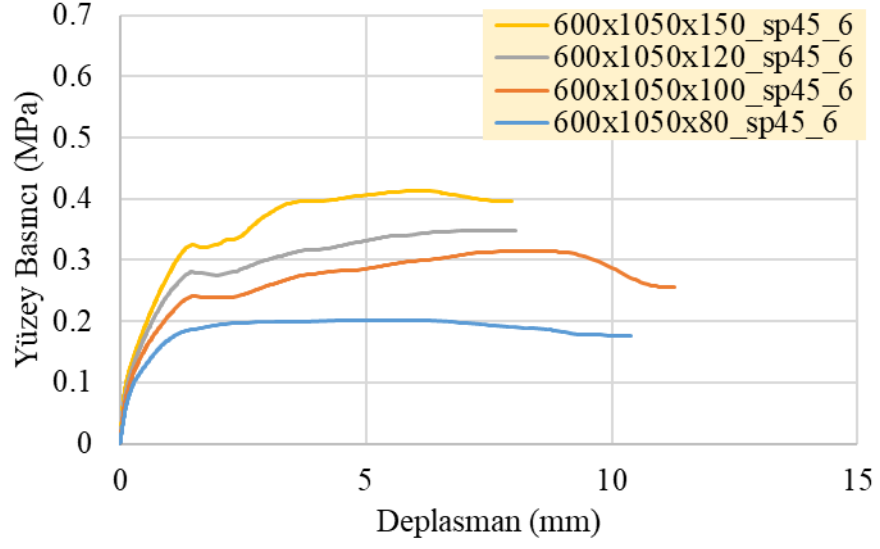
Şekil 4.52: SP45 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



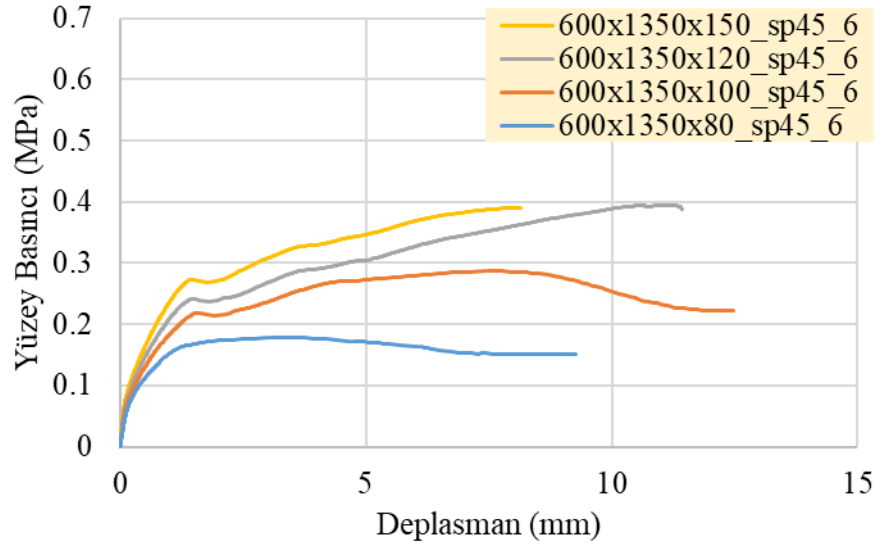
Şekil 4.53: SP45 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



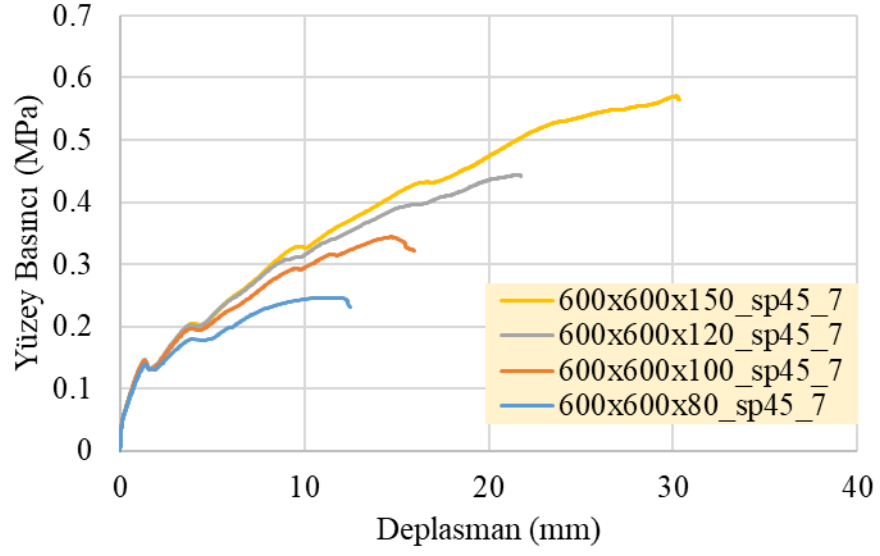
Şekil 4.54: SP45 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



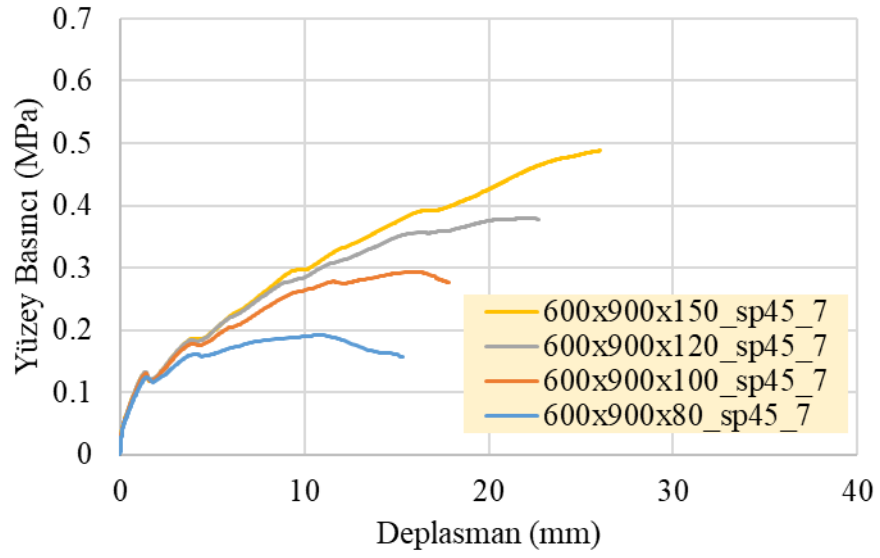
Şekil 4.55: SP45 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



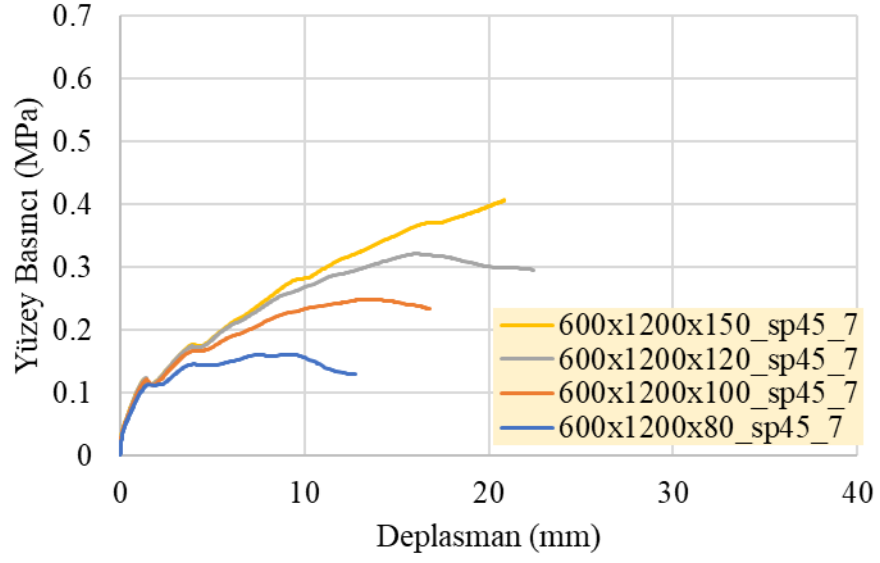
Şekil 4.56: SP45 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



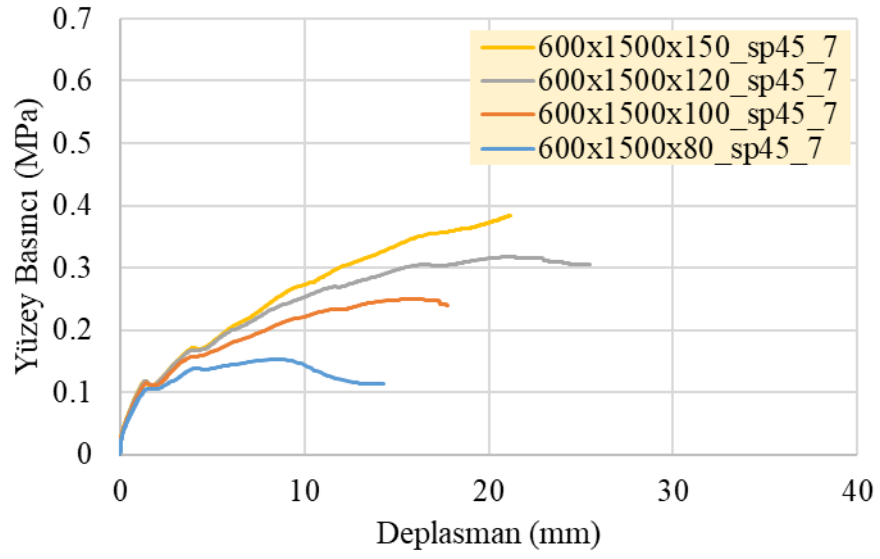
Şekil 4.57: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



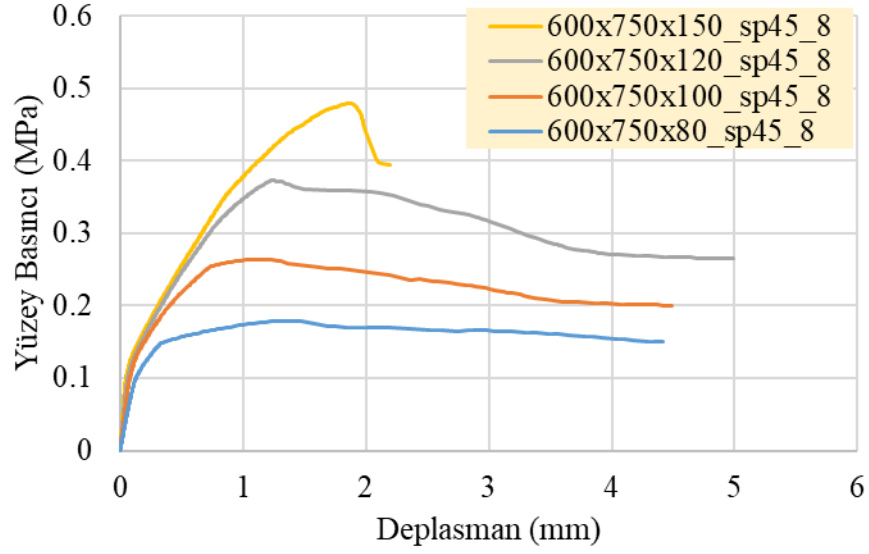
Şekil 4.58: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



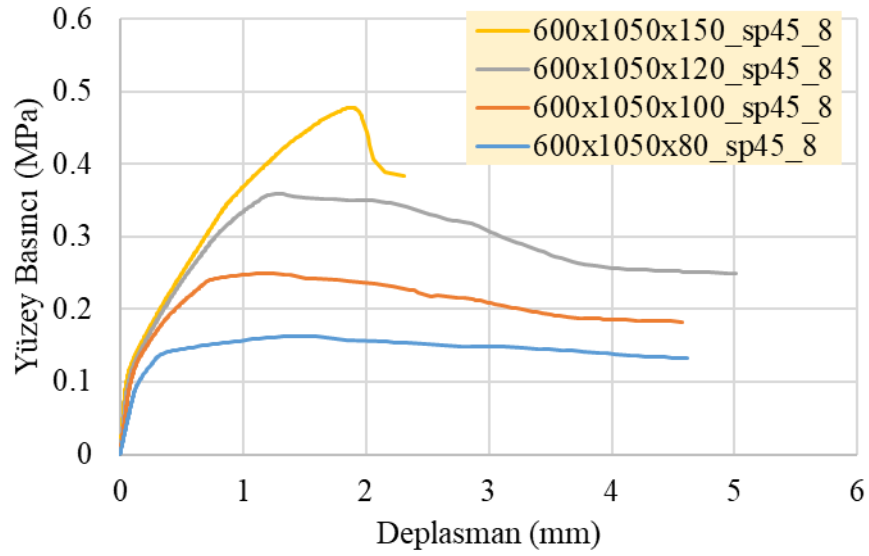
Şekil 4.59: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



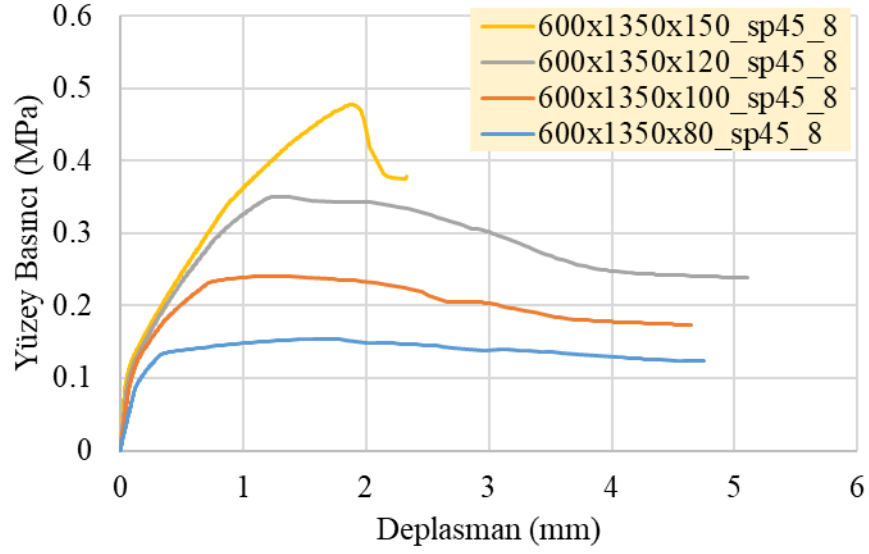
Şekil 4.60: SP45 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



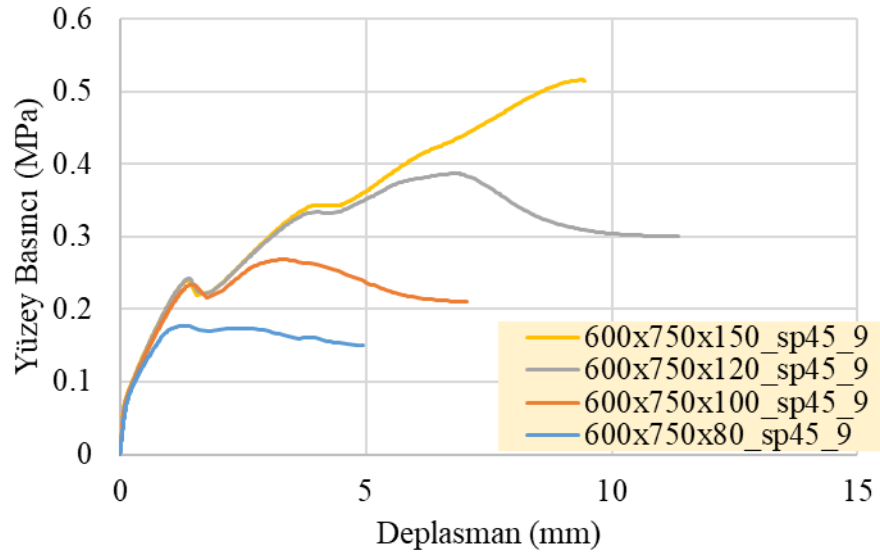
Şekil 4.61: SP45 malzemedan oluşarı ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



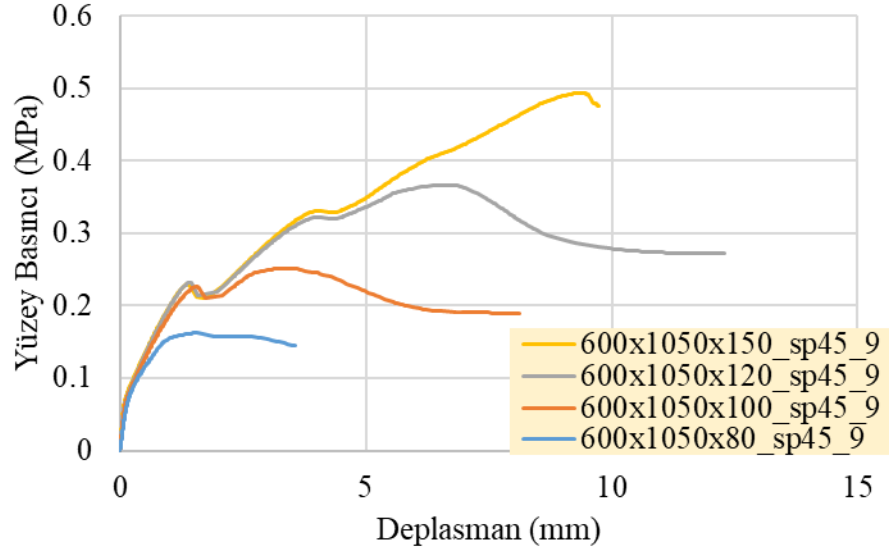
Şekil 4.62: SP45 malzemedan oluşarı ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



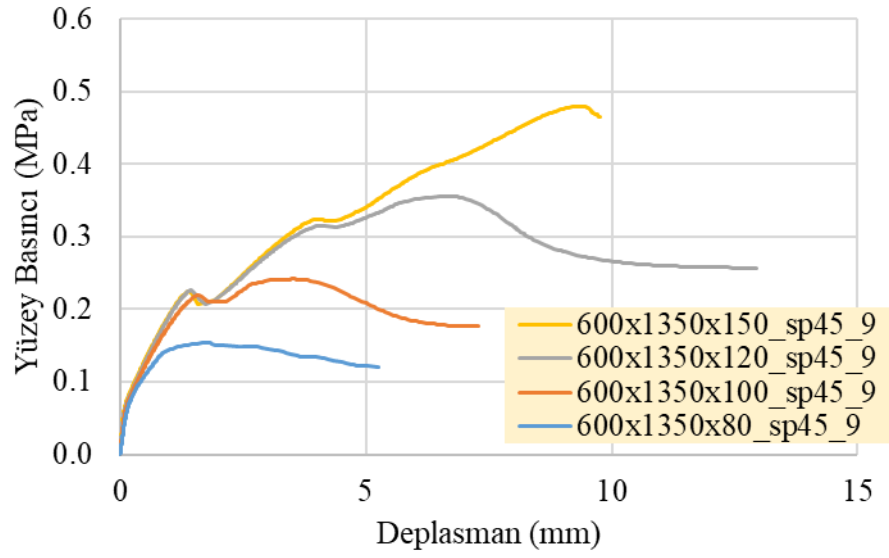
Şekil 4.63: SP45 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



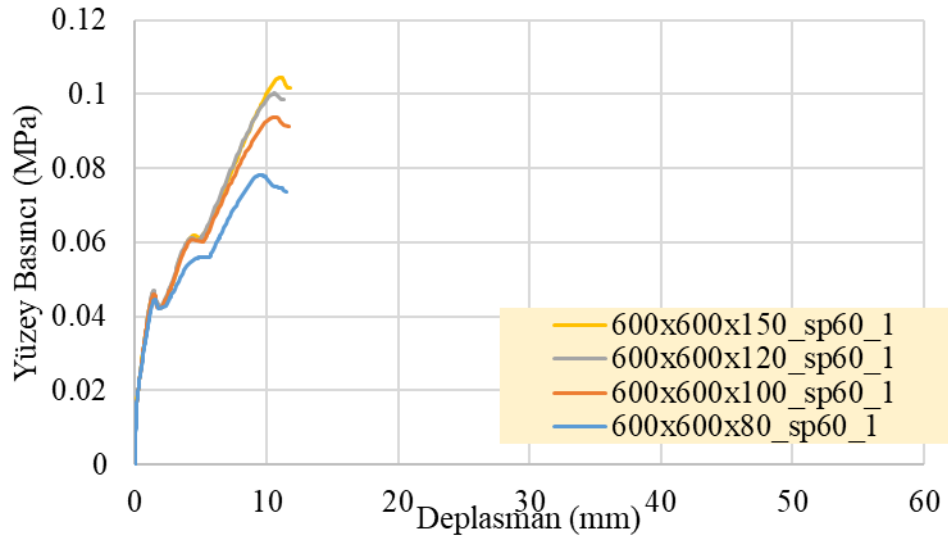
Şekil 4.64: SP45 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



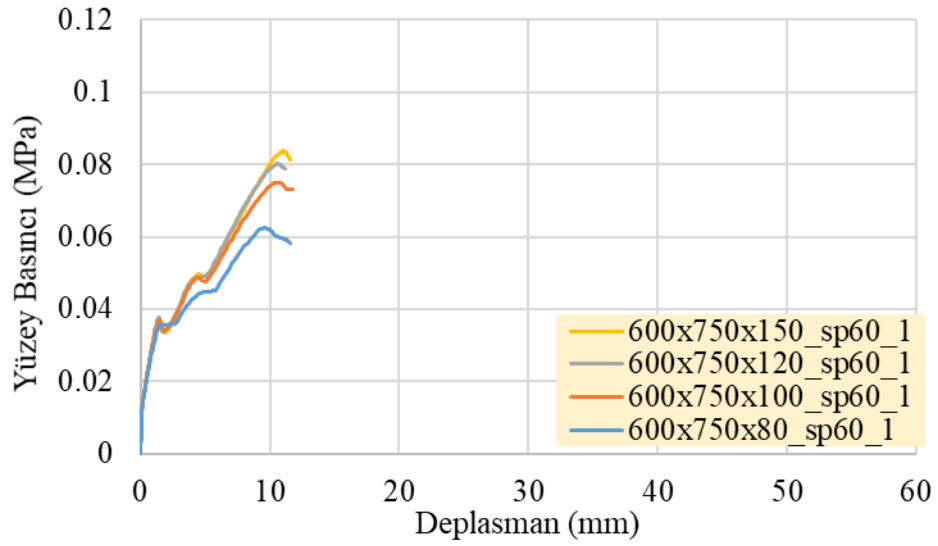
Şekil 4.65: SP45 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



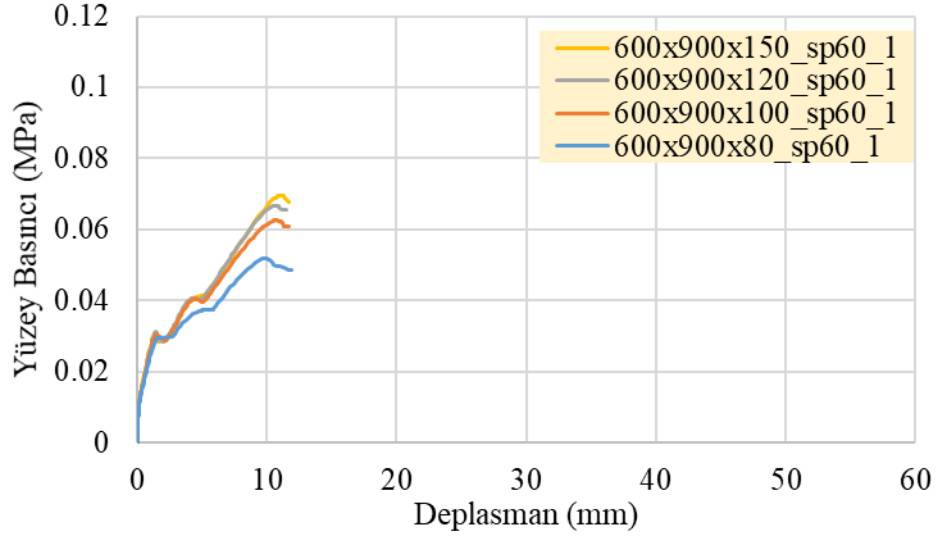
Şekil 4.66: SP45 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



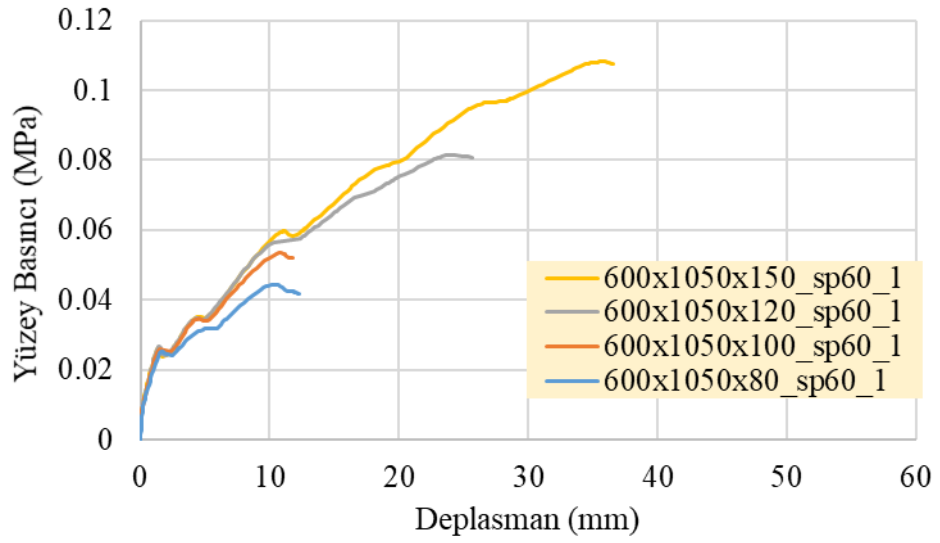
Şekil 4.67: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



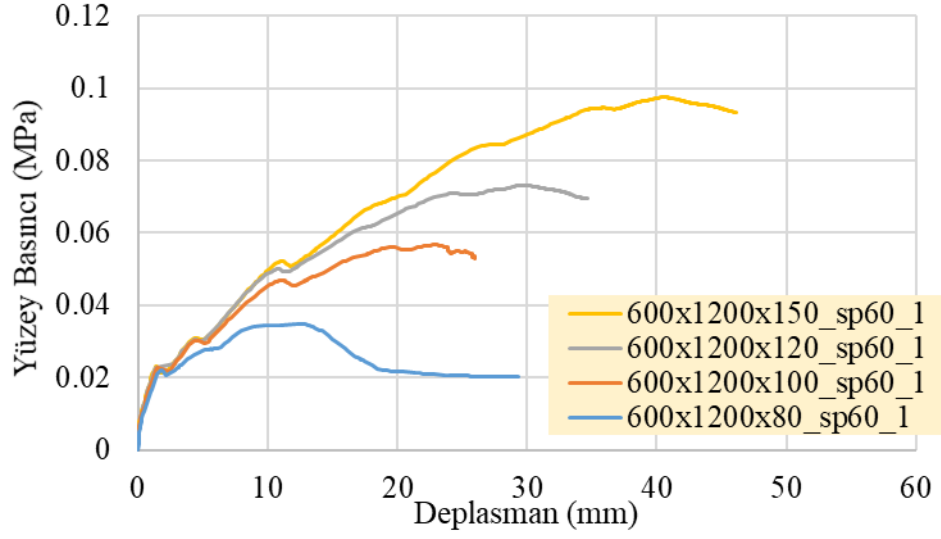
Şekil 4.68: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



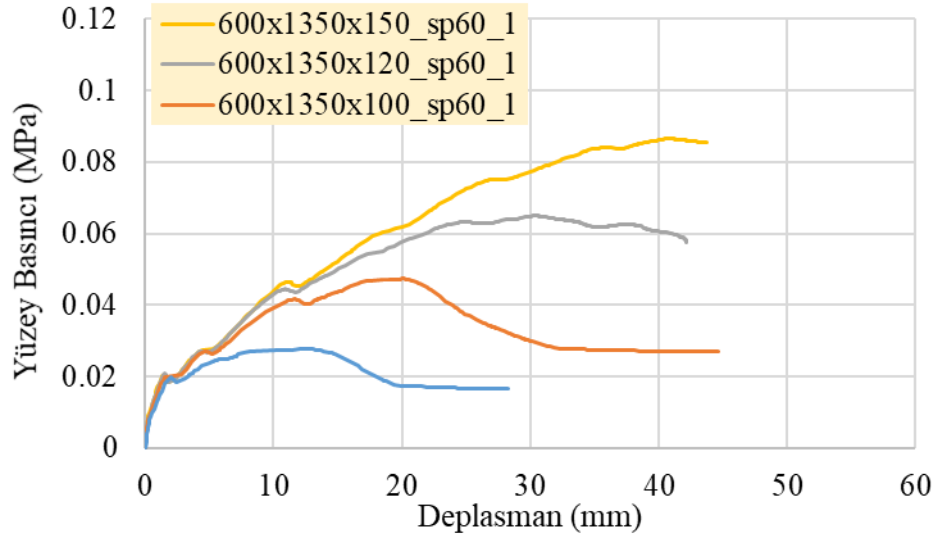
Şekil 4.69: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



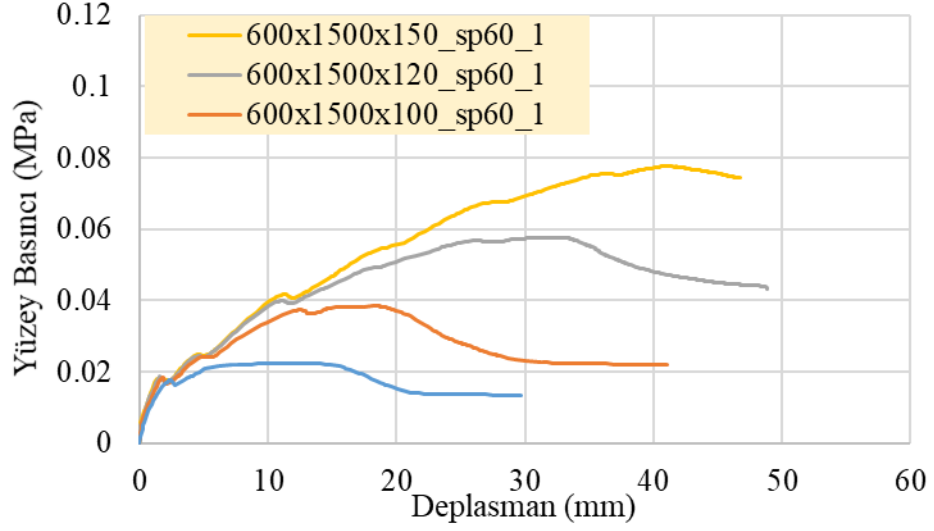
Şekil 4.70: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



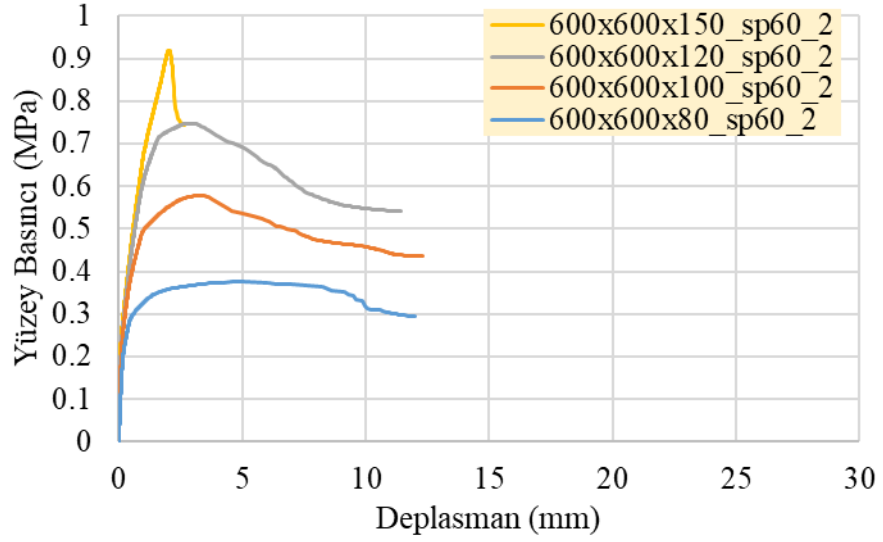
Şekil 4.71: SP60 malzemededen oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



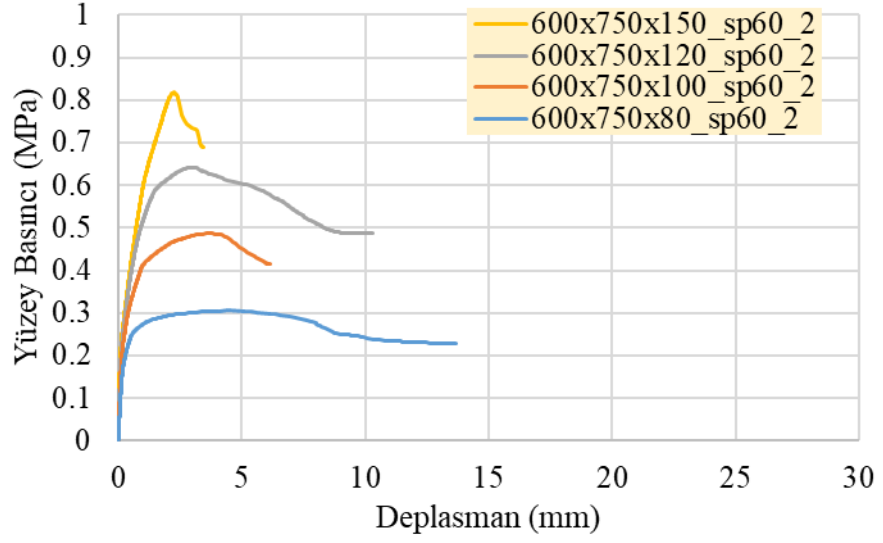
Şekil 4.72: SP60 malzemededen oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



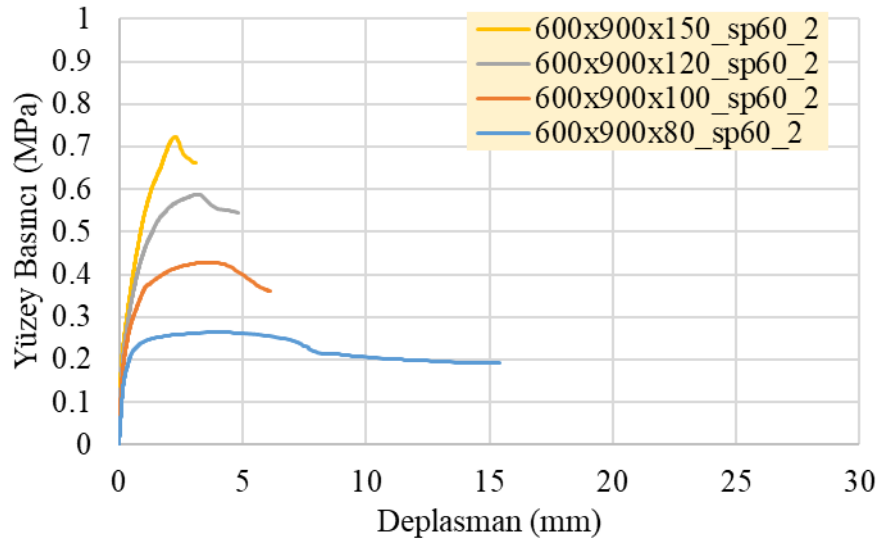
Şekil 4.73: SP60 malzemeden oluşan ve 1 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



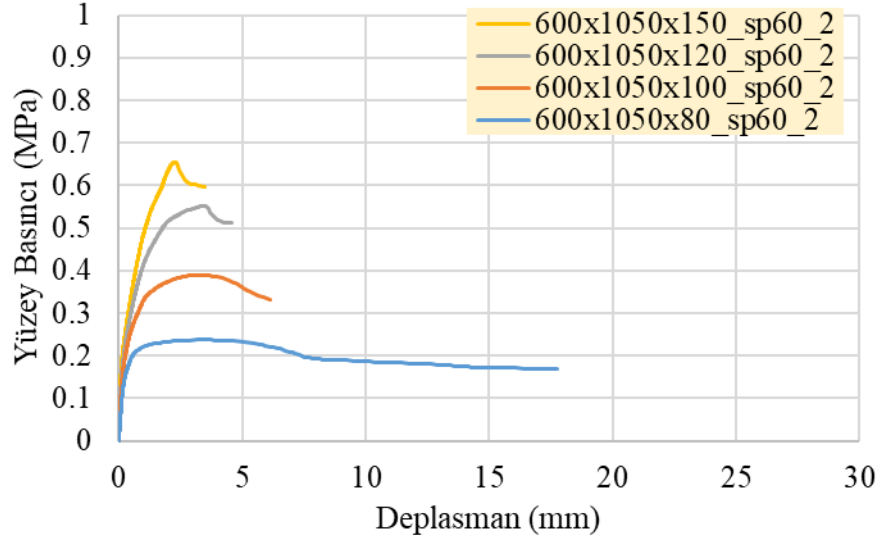
Şekil 4.74: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



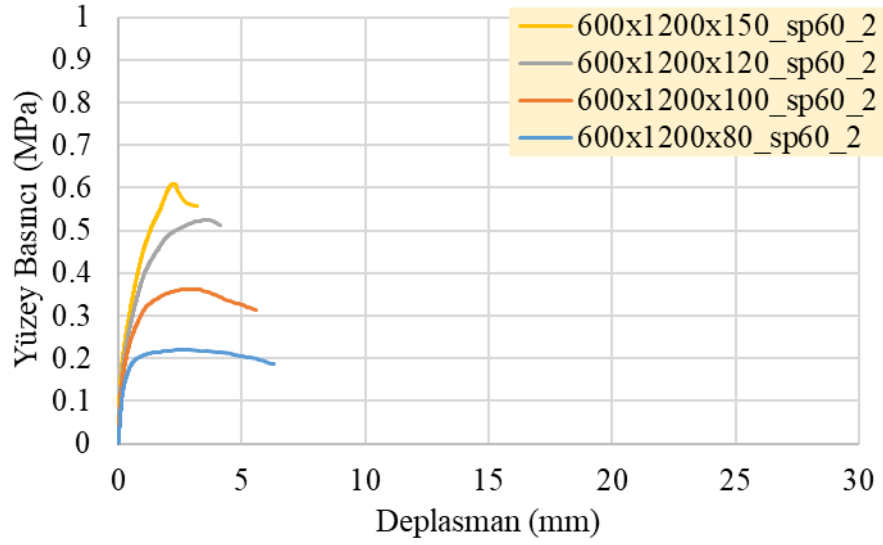
Şekil 4.75: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



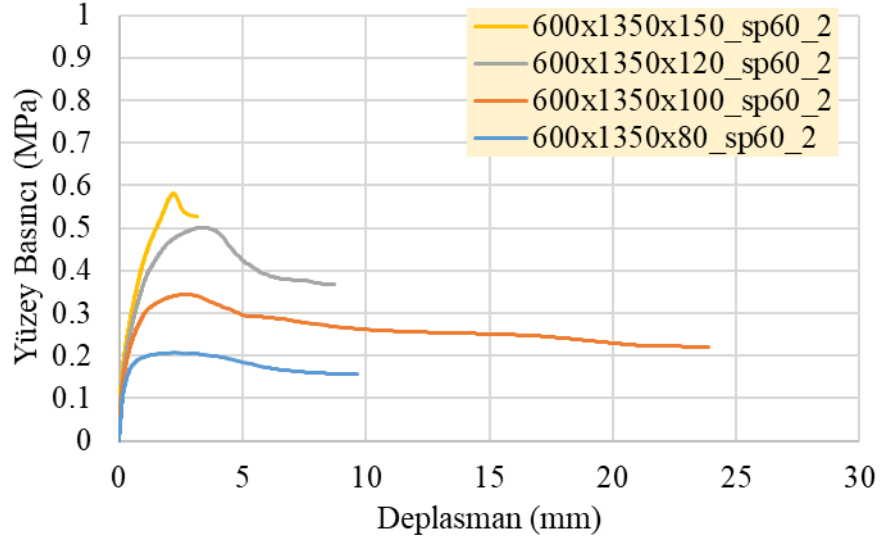
Şekil 4.76: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



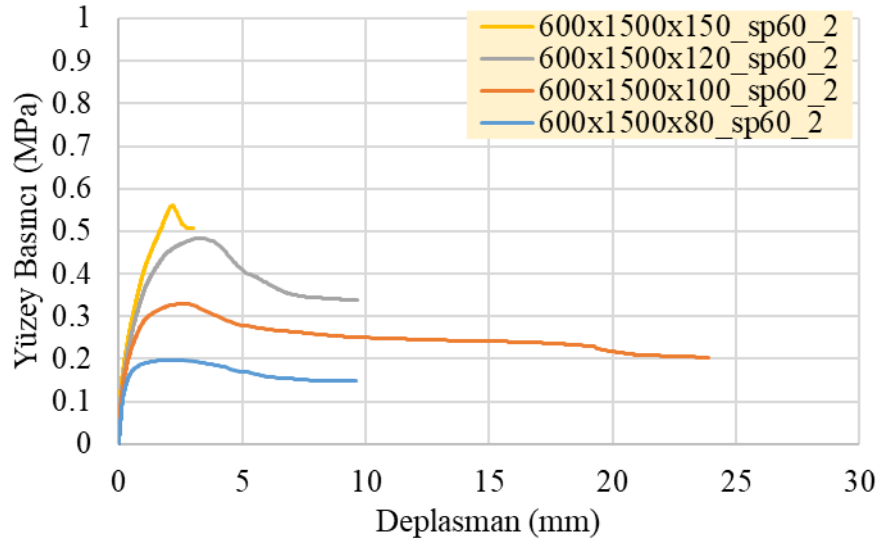
Şekil 4.77: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



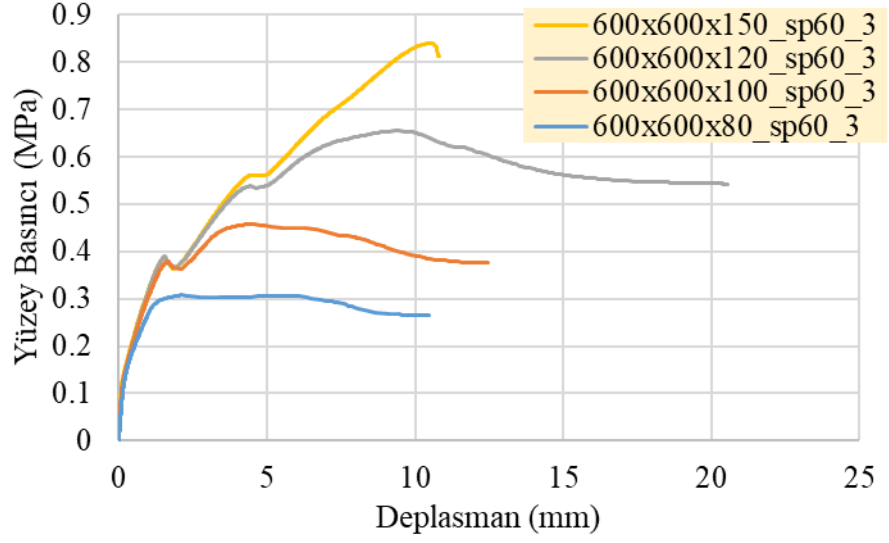
Şekil 4.78: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



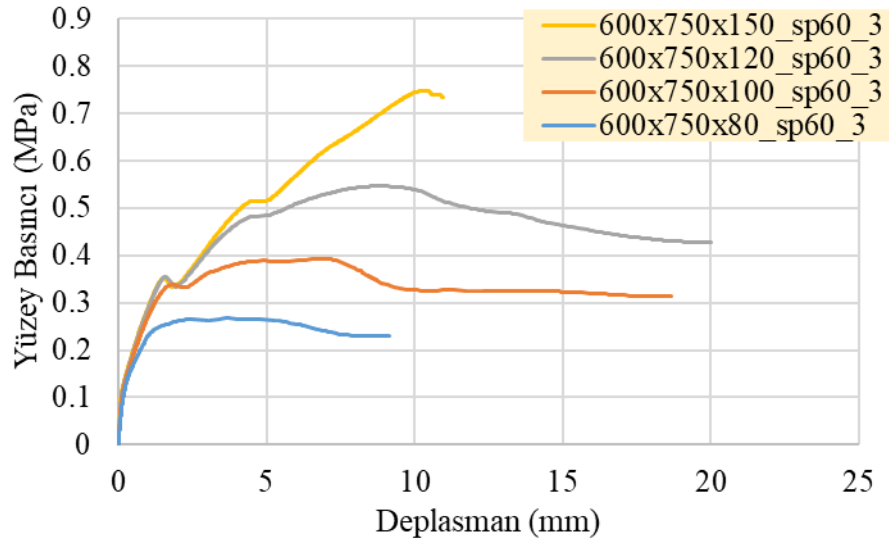
Şekil 4.79: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



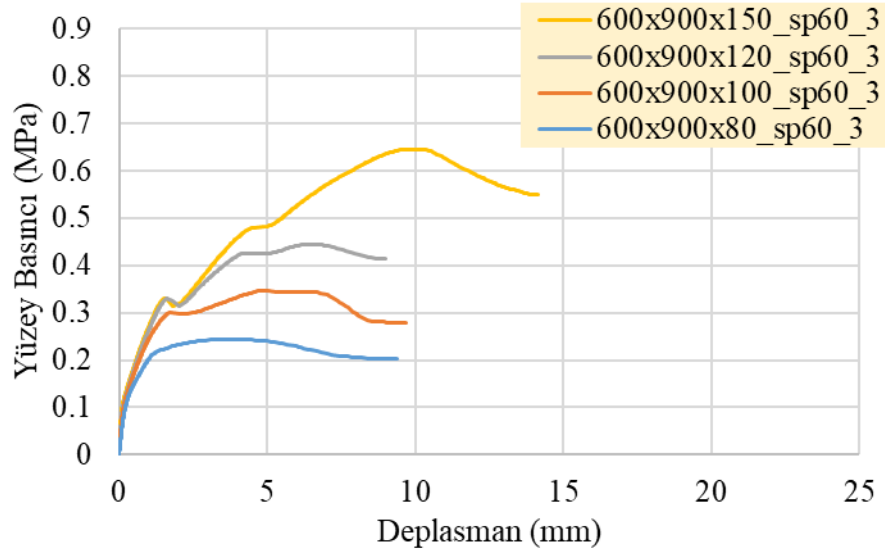
Şekil 4.80: SP60 malzemeden oluşan ve 2 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



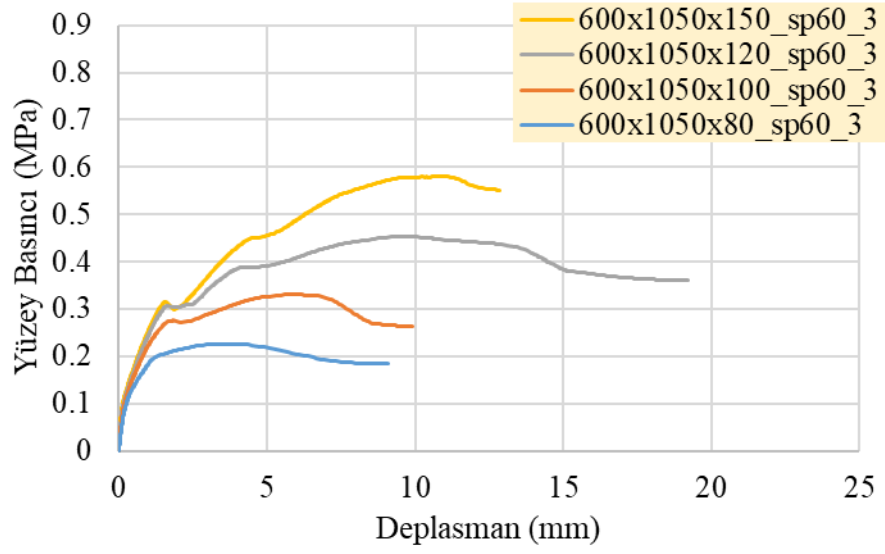
Şekil 4.81: SP60 malzemenen oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



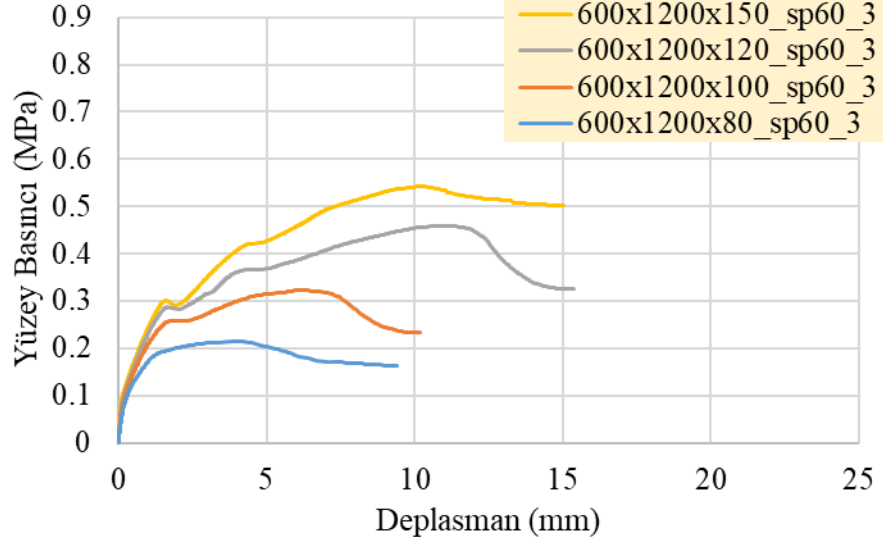
Şekil 4.82: SP60 malzemenen oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



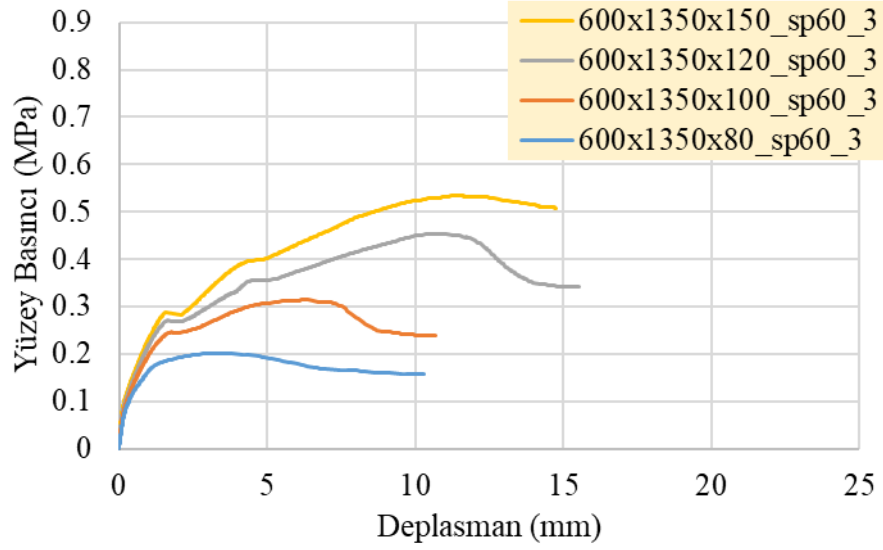
Şekil 4.83: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



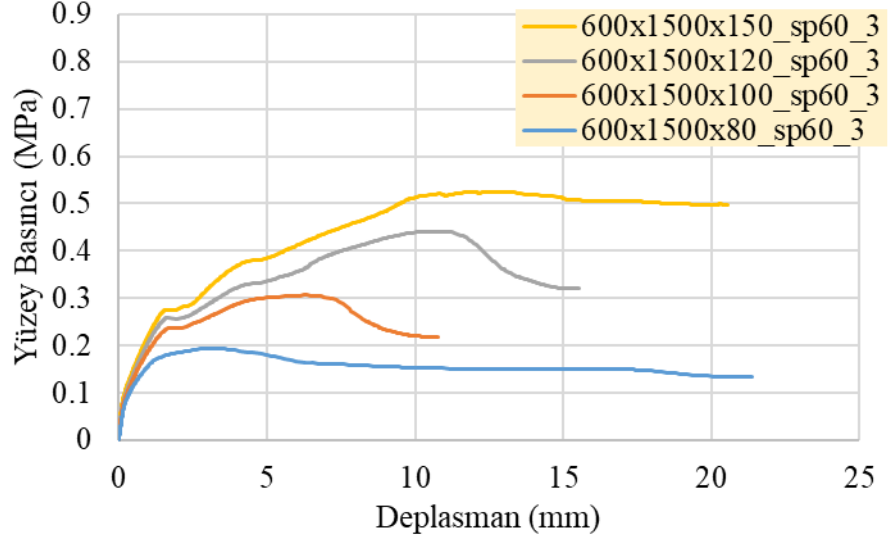
Şekil 4.84: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



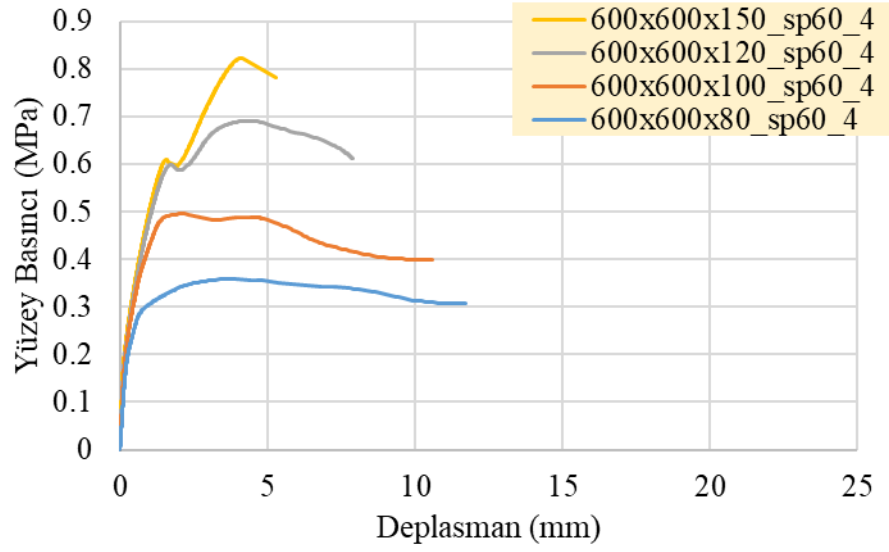
Şekil 4.85: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



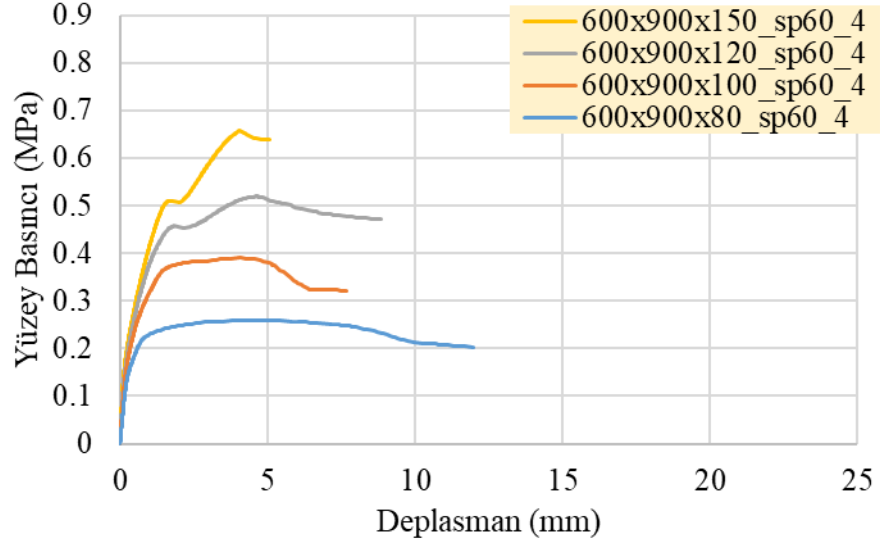
Şekil 4.86: SP60 malzemeden oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



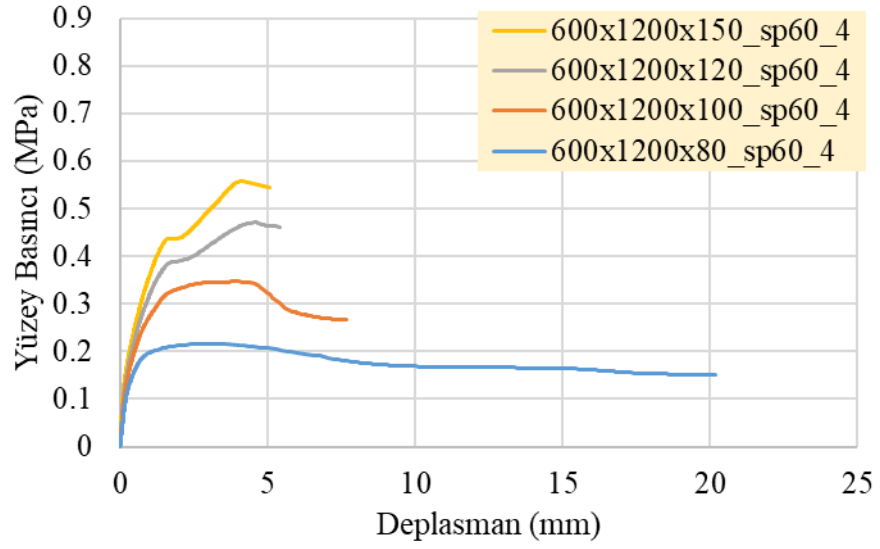
Şekil 4.87: SP60 malzemedan oluşan ve 3 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



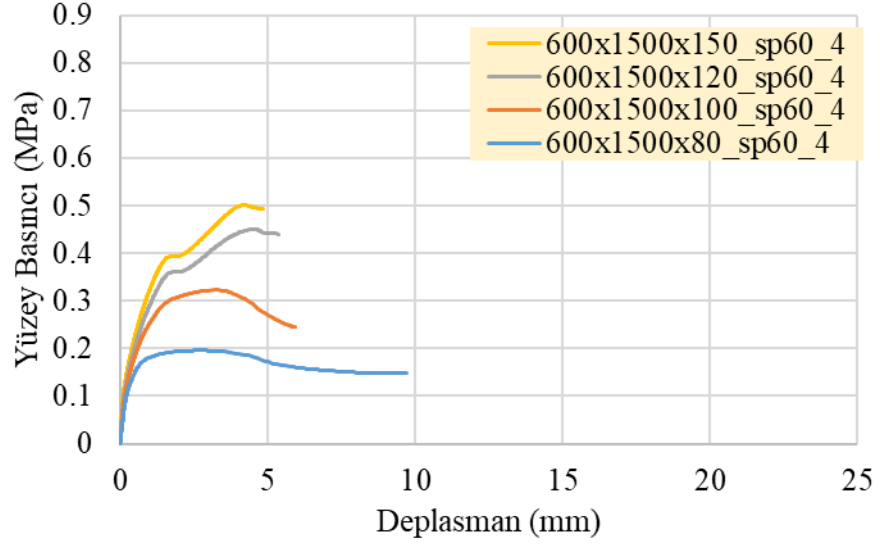
Şekil 4.88: SP60 malzemedan oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



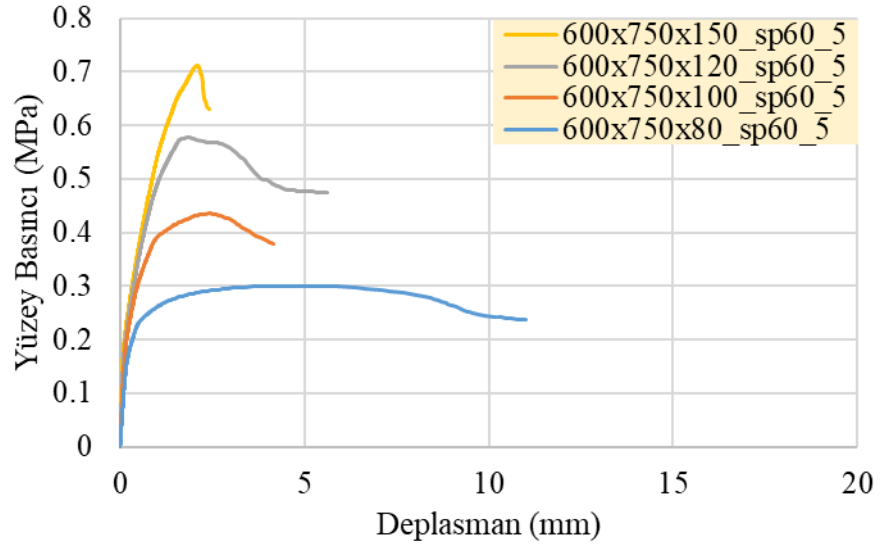
Şekil 4.89: SP60 malzemenen oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



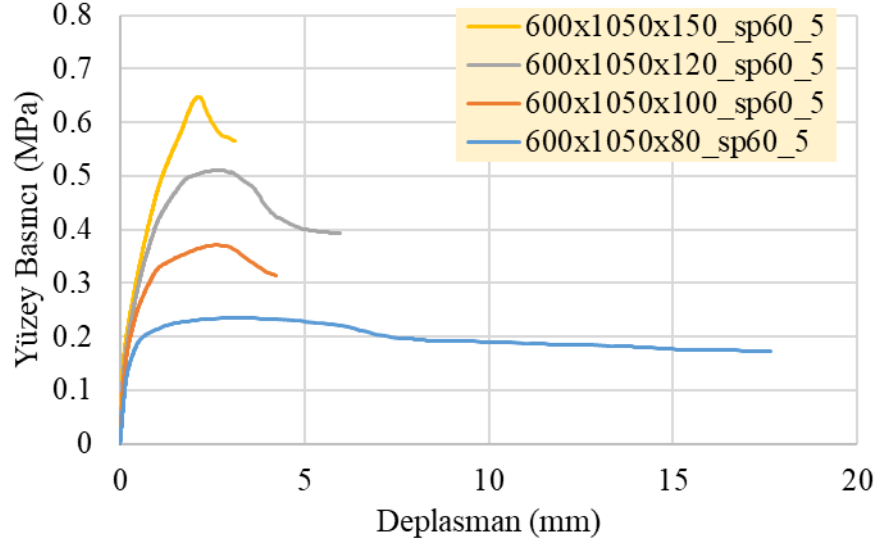
Şekil 4.90: SP60 malzemenen oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



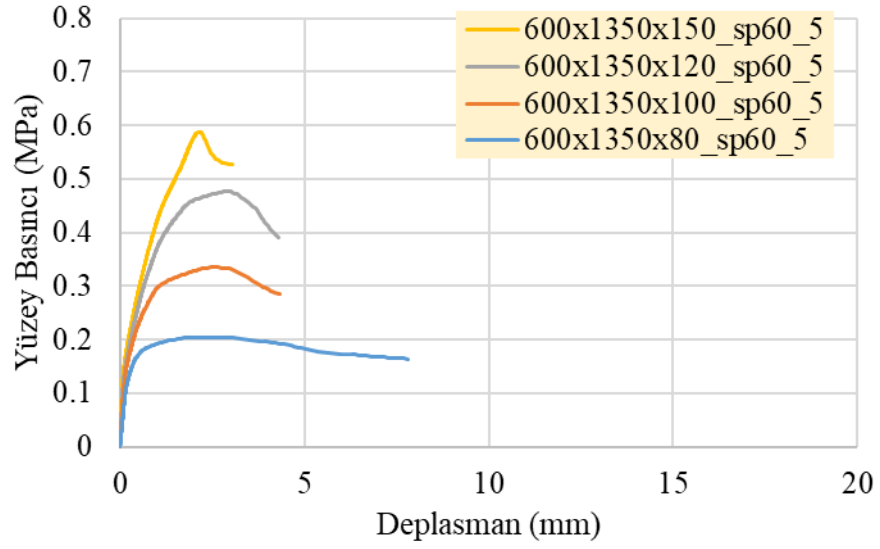
Şekil 4.91: SP60 malzemeden oluşan ve 4 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



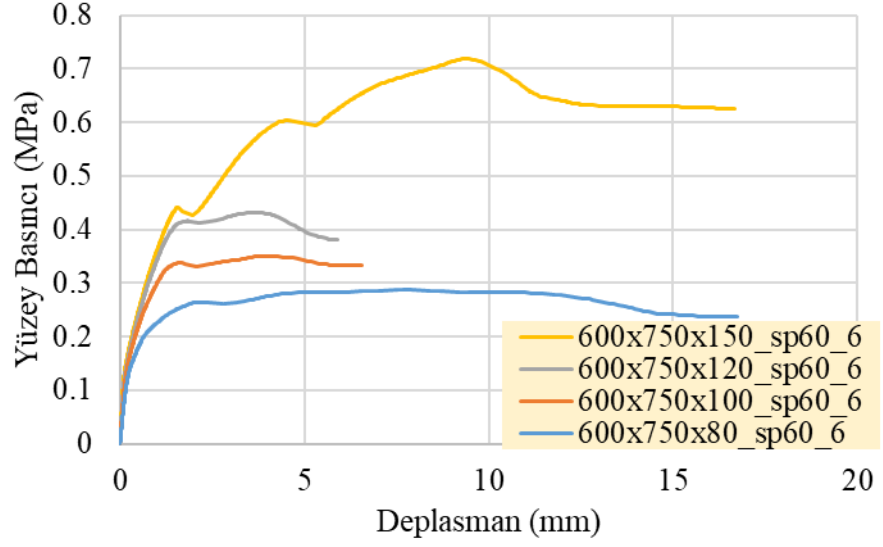
Şekil 4.92: SP60 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



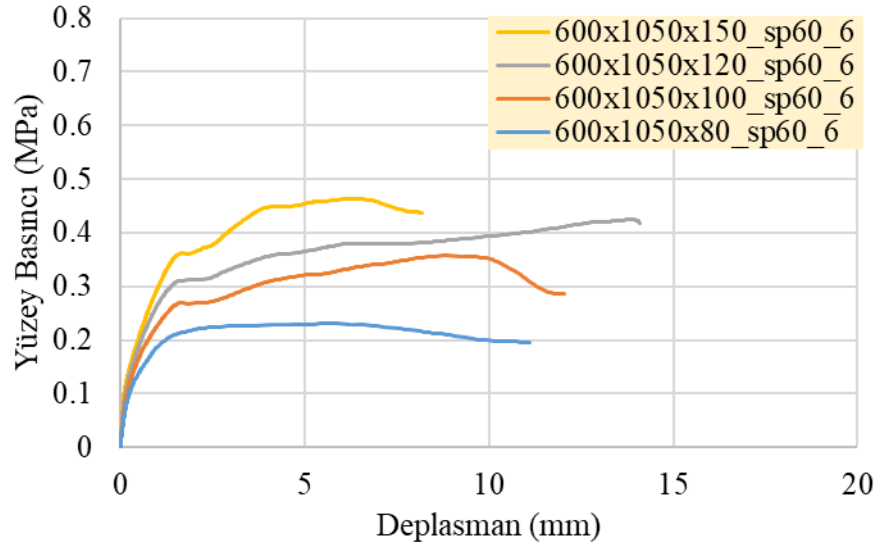
Şekil 4.93: SP60 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



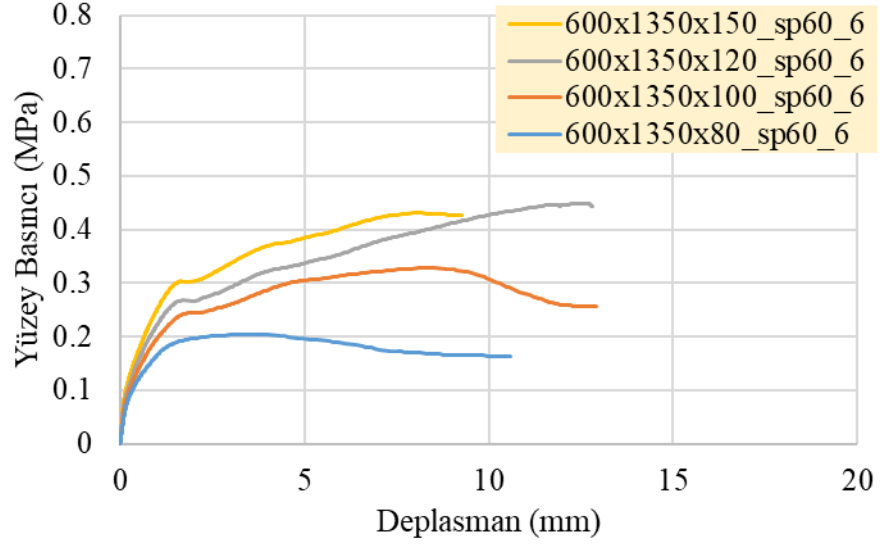
Şekil 4.94: SP60 malzemeden oluşan ve 5 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



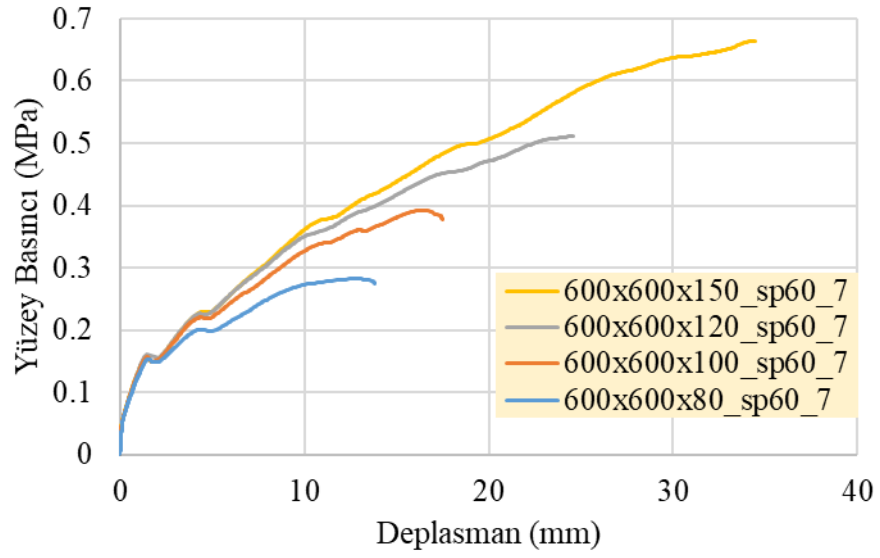
Şekil 4.95: SP60 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



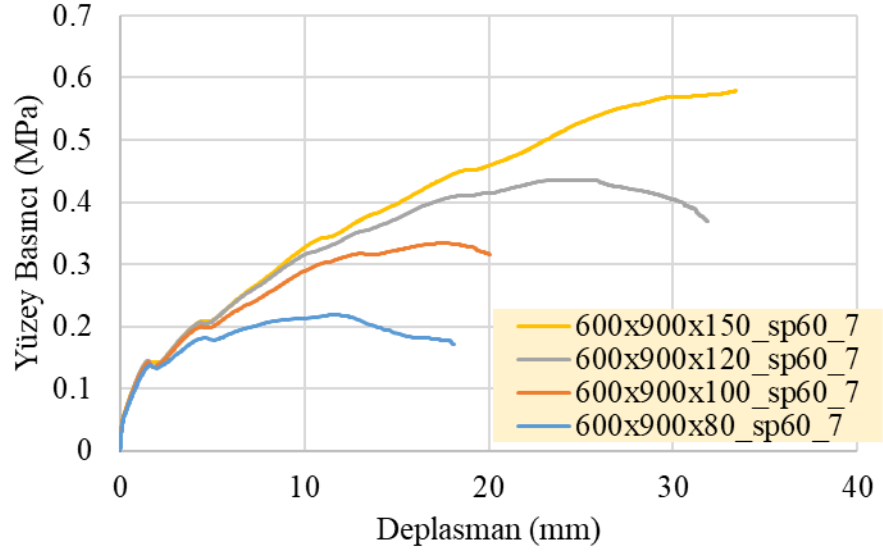
Şekil 4.96: SP60 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



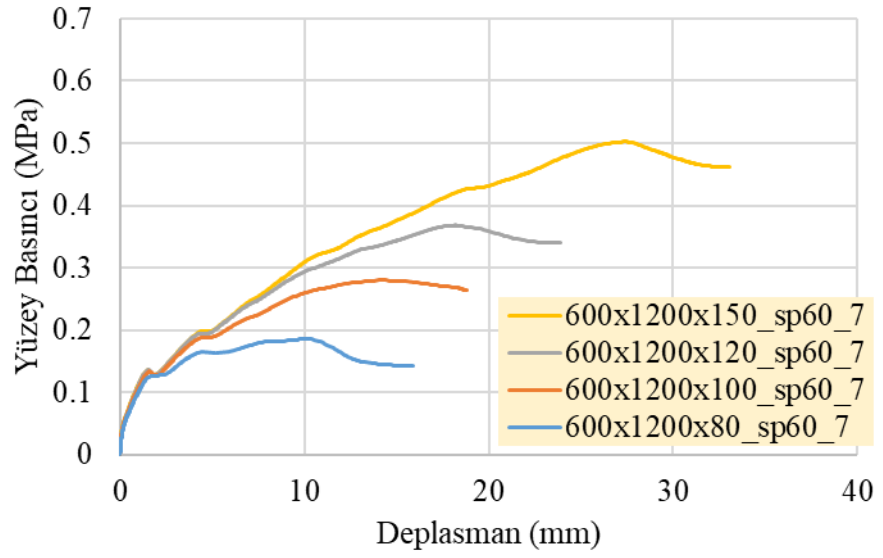
Şekil 4.97: SP60 malzemeden oluşan ve 6 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



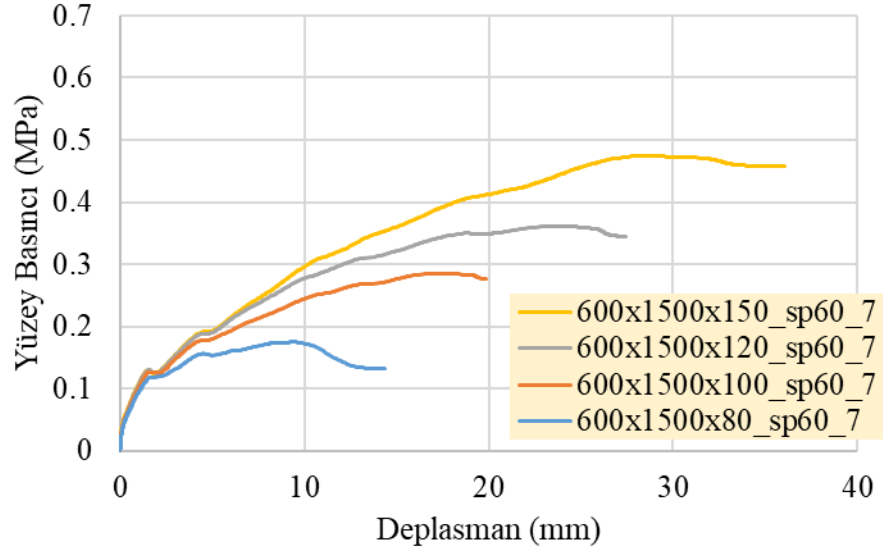
Şekil 4.98: SP60 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x600 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



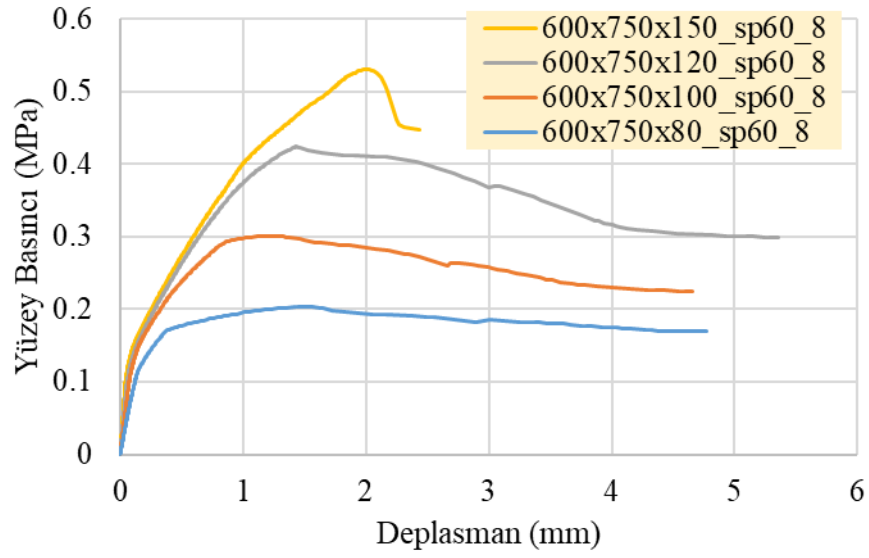
Şekil 4.99: SP60 malzemedan oluşarı ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x900 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



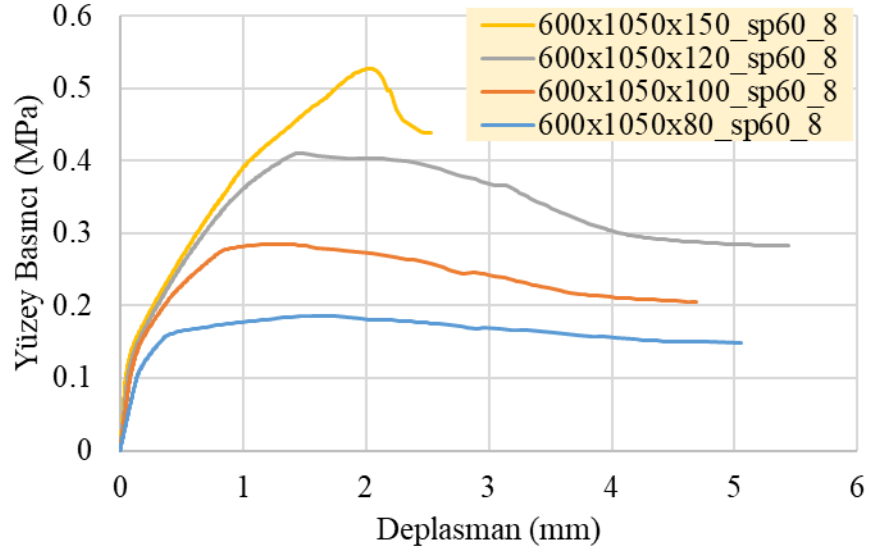
Şekil 4.100: SP60 malzemedan oluşarı ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1200 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



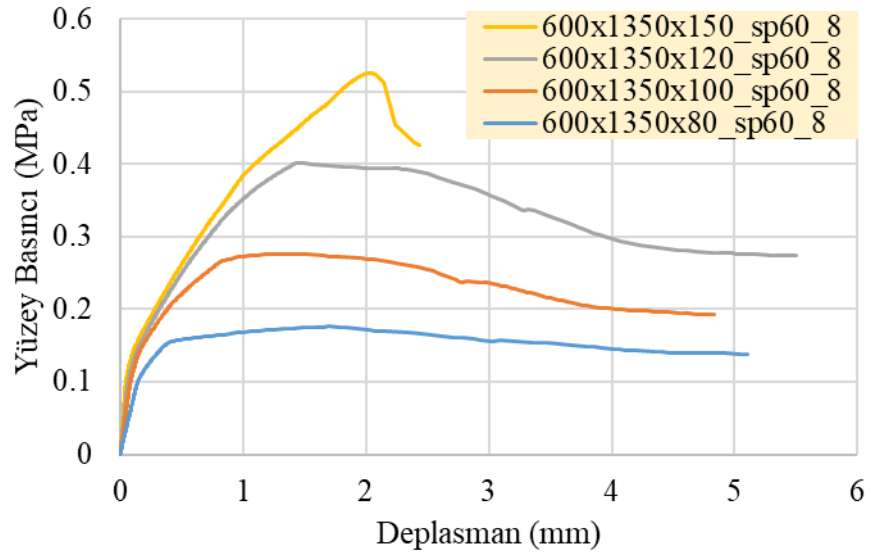
Şekil 4.101: SP60 malzemeden oluşan ve 7 numaralı sınır şartına sahip 600x1500 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



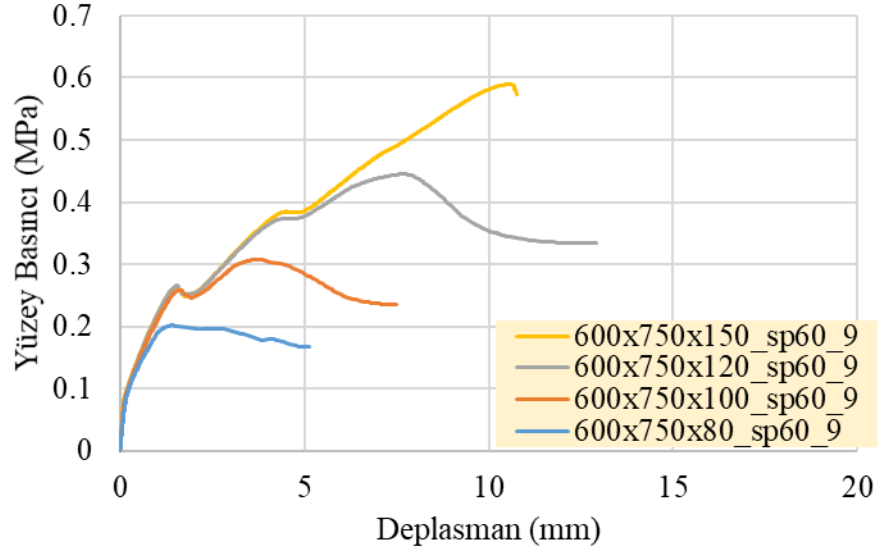
Şekil 4.102: SP60 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



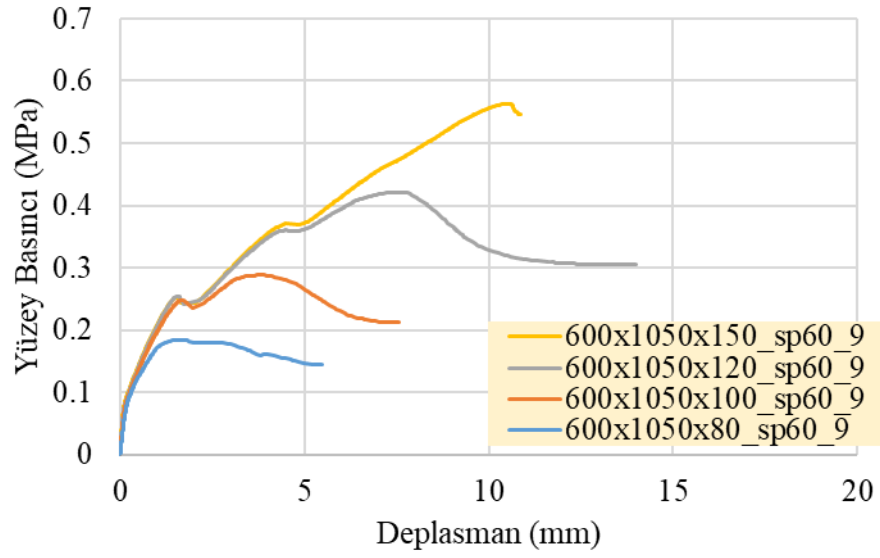
Şekil 4.103: SP60 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



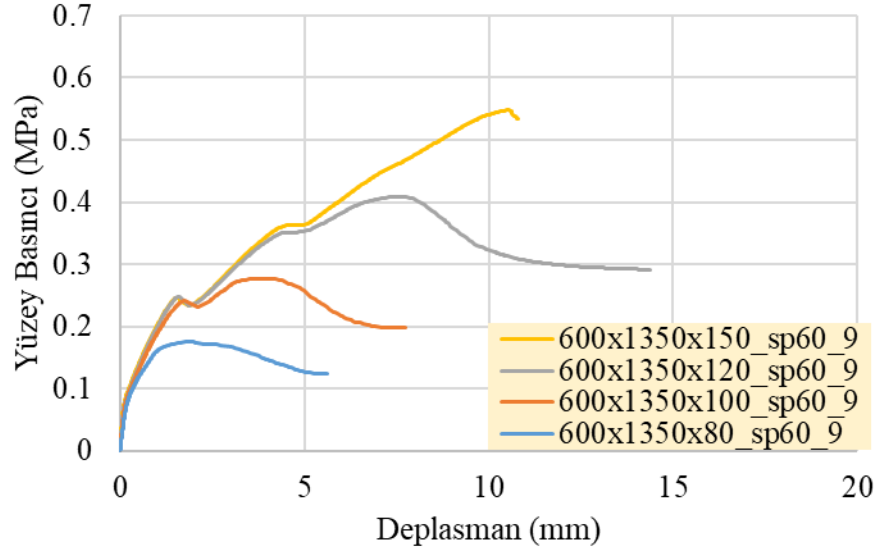
Şekil 4.104: SP60 malzemeden oluşan ve 8 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



Şekil 4.105: SP60 malzemedan oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x750 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



Şekil 4.106: SP60 malzemedan oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1050 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi



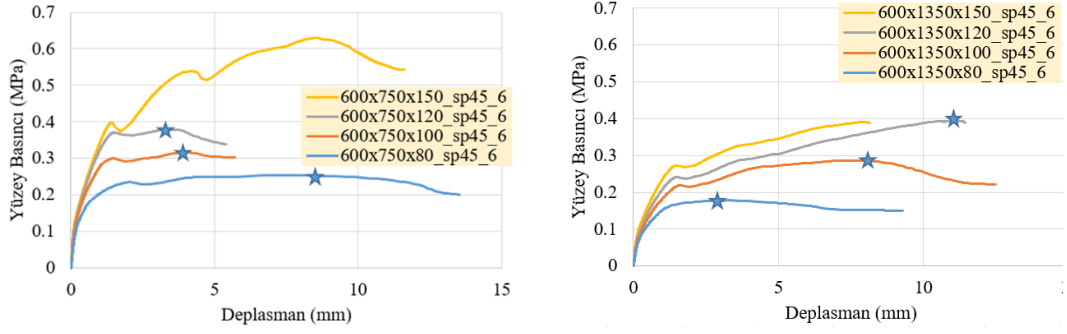
Şekil 4.107: SP60 malzemeden oluşan ve 9 numaralı sınır şartına sahip 600x1350 mm panellerin her bir kalınlık için yüzey basıncı deplasman ilişkisi

4.3.3 Sonuçların Değerlendirilmesi

Analiz sonuçları incelenen parametrelere kalınlık bakımından, en-boy oranı bakımından, sınır şartları (kısa kenar mesnet aralığı ve uzun kenar mesnet aralığı) ve malzeme türü bakımından ayrı ayrı değerlendirilmiş ve alt başlıklar halinde sunulmuştur. SP45 ve SP60 için nihai taşıma kapasitesi ile o andaki orta-açıklık deplasman değerleri Tablo 4.9-Tablo 4.12 arasında verilmiştir.

4.3.3.1 Kalınlık Bakımından Değerlendirme

Beklendiği üzere, sınır koşulu veya en boy oranı ne olursa olsun, panelin kalınlığındaki artış, nihai mukavemette (taşınabilecek yüzey basıncı) bir artışa neden olmuştur. Panelin kalınlığı arttıkça, nihai taşıma kapasitesi, rijitlikteki değişimin beklenen bir sonucu olarak daha küçük orta-açıklık yer değiştirmelerinde gözlenmiştir (Şekil 4.26-4.107). Bununla birlikte, daha büyük en-boy oranları için, panelin kalınlığındaki artışın, nihai taşıma kapasitesinde daha büyük orta açıklık sehimlerine yol açtığı gözlenmiştir (Şekil 4.108).



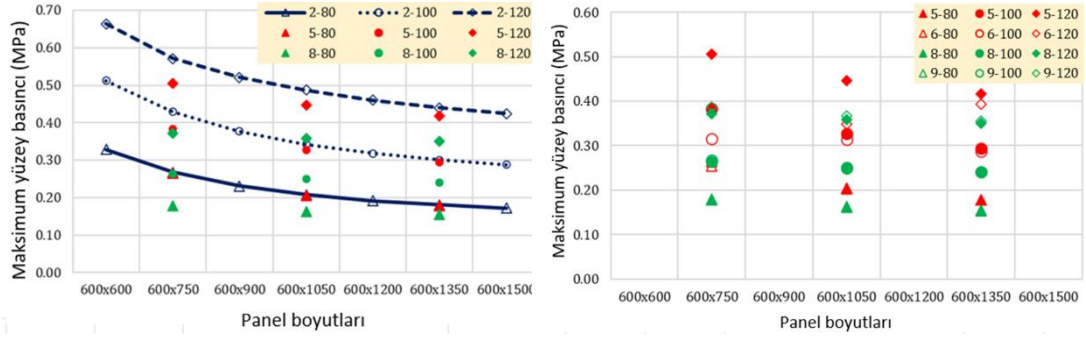
Şekil 4.108: Nihai taşıma kapasitesinde kalınlığın orta-açıklık sehimine etkisi

Sınır şartı 1 ve sınır şartı 7'ye göre modellenen paneller, nihai taşıma kapasitesinde maksimum orta-açıklık sehimini göstermiş ve nihai taşıma kapasitesinden hemen sonra göçmüştür. Etkileri detaylı olarak görmek için sınır koşullarının kenarlardaki etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

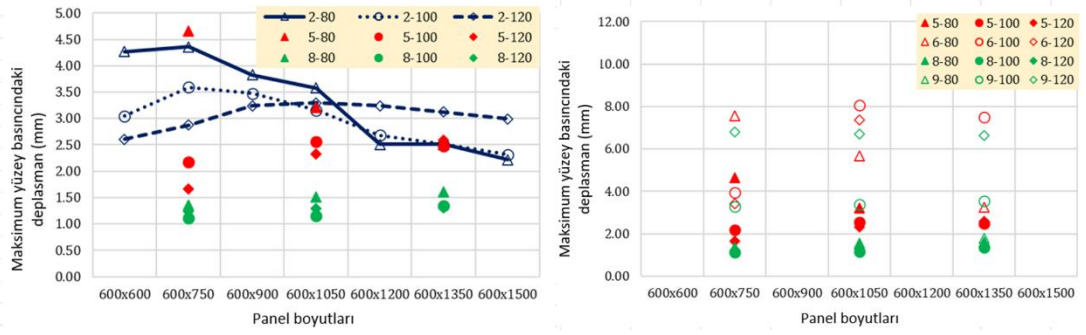
4.3.3.2 En-Boy Oranı (Alan) Bakımında Değerlendirme

Sunulan çalışmada, panellerin en boy (uzunluk/genişlik) oranı, panellerin genişliği sabit tutularak değiştirilmiştir. Dolayısıyla en-boy oranı arttıkça panellerin yüzey alanı da artmıştır. Sonuç olarak, en boy oranındaki artış panelleri daha yumuşak hale getirmiştir. Temel mekanikten öngörülebileceği üzere, benzer koşullar altında (malzeme, kalınlık, sınır koşulları) en-boy oranındaki artış, panelin nihai taşıma kapasitesinde bir azalmaya neden olmuştur (Şekil 4.26-4.107, Şekil 4.109). Mekanikğin temel prensipleri sebebiyle, en-boy oranındaki azalma panelleri daha rijit hale getirmiş; bu nedenle, genel olarak, nihai taşıma kapasitesinde orta-açıklık sehimlerinde bir azalma, beklenen bir sonuç olmuştur. Beklendiği gibi, 80 mm kalınlığa sahip ve sınır şartı 5 ve 6 ile desteklenen paneller dışında, analiz edilen durumların çoğunluğunda en-boy oranı arttıkça artan bir eğilim ile sonuçlanmıştır (Şekil 4.110). Bununla birlikte, sınır koşulları hayati bir rol oynadığından, en-boy oranının (alan) panellerin nihai taşıma kapasitesindeki orta-açıklık sehim ve nihai orta-açıklık sehim, en-boy oranı ile değişen bir ilişkiye sahip olabilir. Analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde sınır koşulu, en-boy oranı ve kalınlığın etkisinin

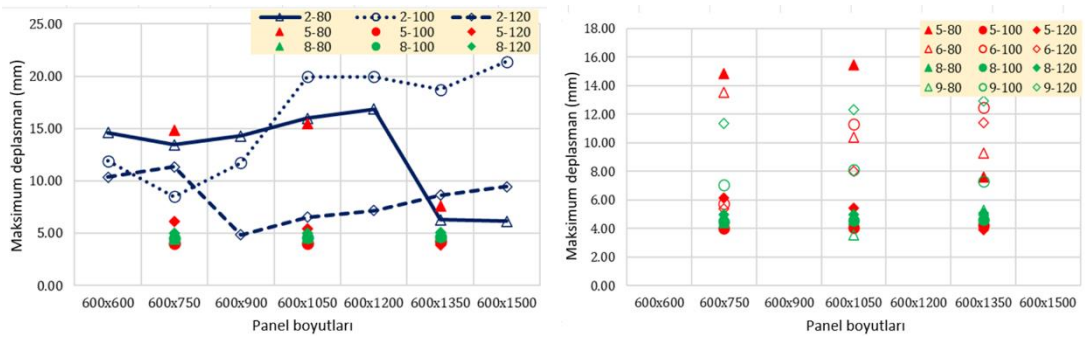
birbirleriyle etkileşiminin ön plana çıktığı gözlemlenmektedir, bu nedenle birleşik etkiler hakkında daha ayrıntılı bir araştırma Şekil 4.110 ve 4.111’de tartışılmıştır.



Şekil 4.109: Gözlenen nihai taşıma kapasitesindeki değişim



Şekil 4.110: Nihai taşıma kapasitesinde gözlenen orta açıklık sehmindeki değişim



Şekil 4.111: Gözlenen nihai orta açıklık sehmindeki değişim

Şekil 4.109-4.111'de panel boyutlarına göre maksimum yüzey basıncı, maksimum yüzey basıncında orta açıklık sehmi ve maksimum orta açıklık sehmi dağılımını gösteren grafikler bulunmaktadır. Tüm panellerin nihai taşıma kapasitesi ve o andaki orta açıklık sehimleri Tablo 4.9-4.12 arasında verilmiştir. 4.109-4.111’de sırasıyla gözlemlenen nihai taşıma kapasitesi (maksimum yüzey basıncı), nihai taşıma kapasitesinde açıklık ortası sehmi ve nihai açıklık ortası sehimleri sırasıyla çizilmiştir.

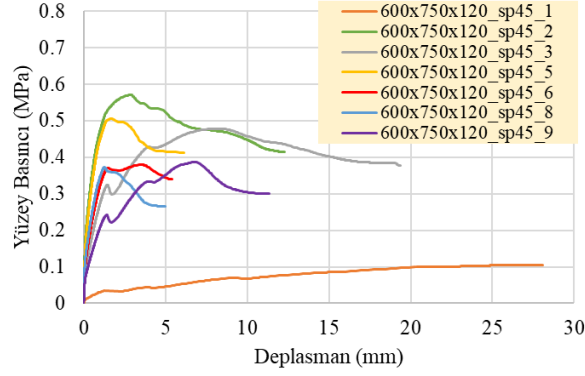
Her şekil için veriler iki gruba ayrılmış ve veriler sınır koşullarına göre de gruplandırılmıştır. Hem birinci hem de ikinci grup verileri ayrıca her kalınlık (80, 100 ve 120 mm) ve her panel boyutu (en-boy oranı) için alt gruplara ayrılmıştır. Birinci grupta, sınır koşulları 2, 5 ve 8 çizilmiştir. Bu veri grubunda, sınır koşulları 2, 5 ve 8 için uzun kenarlar her 75 mm'de bir, kısa kenarlar ise her 75, 100 ve 300 mm'de desteklenmiştir. İkinci grupta, sınır koşulları 5, 6, 8 ve 9 birlikte çizilmiştir. Bu verilerde kısa kenarlar her 100 mm'de (sınır koşulu 5 ve 6) ve 300 mm'de (sınır koşulu 8 ve 9) desteklenirken, uzun kenarlar her 75 mm'de (sınır koşulu 5 ve 8) ve 150 mm'de desteklenmiştir. (sınır koşulu 6 ve 9).

Panellerin gözlemlenen nihai orta açıklık sehimleri Şekil 4.111'de gösterilmektedir. Genel olarak, sınır koşulu 5, 100 mm kalınlığa sahip paneller için en küçük nihai açıklık ortası sehimleri ile sonuçlanmıştır. Şekil 4.111'den görülebileceği gibi, nihai orta açıklık sehim ile ve araştırılan parametreler (sınır koşulları, panel kalınlığı, en-boy oranı) arasındaki yüksek korelasyonlu bir ilişki vurgulanamamaktadır. 100 ve 120 mm kalınlığa sahip paneller için, uzun kenarlarda destekler arasındaki mesafenin arttırılması, gözlenen nihai orta açıklık sehimini arttırmıştır.

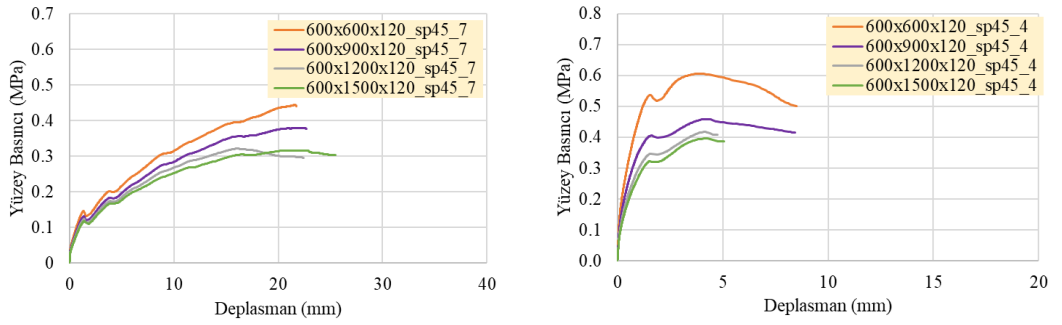
4.3.3.3 Kısa Kenar Mesnet Aralığı Bakımından Değerlendirme

Şekil 4.112'de gösterildiği gibi, yüzey basıncına karşı en yüksek direnç, paneller minimum mesafelerde tutulduğunda (sınır şartı 2) gözlemlenmiştir. Temel mekanik davranıştan beklenebileceği gibi, en büyük orta açıklık sehimini, paneller sadece köşelerden desteklendiğinde (sınır şartı 1) gözlenmiştir. Sınır şartı 1 ve 2, bu çalışma kapsamındaki panellerin mukavemeti için alt ve üst sınır durumları olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, orta-açıklık sehim değerleri çeşitlilik göstermiştir(Şekil 4.113).

Maksimum yüzey basıncının önemli ölçüde etkilenmemesine rağmen, panelin kısa kenarlarında (sınır şartı 6 ve 9) desteklenen uzunluğun azaltılması, daha düşük sehimlerde gözlemlenmek üzere panelin mukavemetini arttırmıştır. Ek olarak, kısa kenarda desteklenen uzunluğun azaltılması, panelin maksimum orta açıklık sehim değerlerindeki sapmayı da sınırlandırmıştır.



Şekil 4.112: 600 × 750 × 120 boyutlu SP45 panelin farklı sınır koşullarına göre karşılaştırılması.



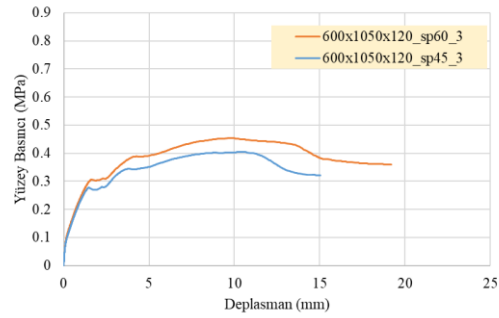
Şekil 4.113: En boy oranının 2 farklı sınır koşuluna etkisi

4.3.3.4 Uzun Kenar Mesnet Aralığı Bakımından Değerlendirme

Uzun kenarda desteklenen uzunluğun azaltılması, panellerin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır (Şekil 4.112'deki sınır şartı 6 ve 5). Bununla birlikte, nihai orta açıklık sehim kabiliyetinde herhangi bir önemli değişiklik gözlenmemiştir. Ayrıca uzun kenar mesnet aralığı sabit tutularak kısa kenar mesnet aralığının etkisi incelendiğinde, panel kalınlığı arttıkça kısa kenar mesnet aralığının azalması, boyut artışının neden olduğu yer değiştirme miktarını azaltmaktadır. Örneğin sınır şartı 5 ve 6 için 100 mm kalınlığındaki paneller incelendiğinde, sınır şartı 6'da panel boyutu arttıkça yer değiştirmenin arttığı fark edilmiştir. Yukarıda belirtilen sonuçlar ilk üç kalınlık değeri (80, 100 ve 120 mm) için geçerli olmakla birlikte 150 mm kalınlığındaki panel için tam tersi davranış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, kalınlık artışına bağılı olarak panelin davranışının kiriş davranışına dönüşmesi olabilir.

4.3.3.5 Malzeme Tipi Bakımından Değerlendirme

Bu çalışmada ele alınan karışım tasarımları, basınç dayanımı açısından birbirinden önemli ölçüde farklı olmamakla birlikte çelik lif miktarında birbirlerinden farklılık göstermektedirler. Çelik lif miktarındaki artış, beklendiği gibi daha yüksek süneklik ve daha yüksek çekme mukavemeti ile sonuçlanmıştır. Çelik lif oranındaki artışın (basınç mukavemetini belirgin düzeyde değiştirmeden) nihai kapasitede hafif bir artışla nihai orta açıklık sehim kabiliyetini arttırdığı gözlenmiştir (Şekil 4.114).



Şekil 4.114: Farklı çelik lif içeriğine sahip (benzer sınır koşullarına ve boyuta sahip) panellerin davranışlarının karşılaştırılması.

Tablo 4.9: Nihai taşıma kapasitesi (SP45 için)

Kalınlık (mm)	Boyut (mm)	Sınır şartları									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
80	600 × 600	0.07253	0.32874	0.27420	0.31766	-	-	0.24633	-	-	
	600 × 750	0.05779	0.26762	0.23627	-	0.26468	0.25382	-	0.17937	0.17748	
	600 × 900	0.04803	0.23094	0.21513	0.22786	-	-	0.19106	-	-	
	600 × 1050	0.03949	0.20741	0.19969	-	0.20518	0.20234	-	0.16350	0.16202	
	600 × 1200	0.03041	0.19143	0.18758	0.18921	-	-	0.16131	-	-	
	600 × 1350	0.02406	0.18058	0.17710	-	0.17907	0.17802	-	0.15467	0.15349	
	600 × 1500	0.01959	0.17251	0.16933	0.17154	-	-	0.15292	-	-	
100	Sınır şartları										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	600 × 600	0.10406	0.51242	0.40131	0.43663	-	-	0.31618	-	-	
	600 × 750	0.08283	0.42952	0.34566	-	0.38412	0.31623	-	0.26394	0.26808	
	600 × 900	0.06875	0.37668	0.30373	0.34172	-	-	0.29325	-	-	
	600 × 1050	0.05888	0.34181	0.29285	-	0.32655	0.31475	-	0.24917	0.25092	
	600 × 1200	0.04994	0.31776	0.28368	0.30401	-	-	0.24871	-	-	
600 × 1350	0.04116	0.30080	0.27522	-	0.29426	0.28683	-	0.24121	0.24130		
600 × 1500	0.03341	0.28800	0.26822	0.28265	-	-	0.24884	-	-		
120	Sınır şartları										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	600 × 600	0.13277	0.66375	0.57072	0.60517	-	-	0.44387	-	-	
	600 × 750	0.10548	0.57133	0.47868	-	0.50586	0.37945	-	0.37221	0.38651	
	600 × 900	0.08757	0.52088	0.39359	0.45882	-	-	0.37900	-	-	
	600 × 1050	0.07491	0.48676	0.40453	-	0.44693	0.34863	-	0.35854	0.36627	
	600 × 1200	0.06524	0.46019	0.40380	0.42214	-	-	0.32166	-	-	
600 × 1350	0.05788	0.43960	0.39437	-	0.41727	0.39423	-	0.35053	0.35524		
600 × 1500	0.05050	0.42378	0.38357	0.39813	-	-	0.31681	-	-		
150	Sınır şartları										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	600 × 600	0.17128	0.83321	0.73361	0.74019	-	-	0.57018	-	-	
	600 × 750	0.13101	0.73959	0.65260	-	0.64021	0.62937	-	0.47890	0.51539	
	600 × 900	0.11309	0.64893	0.56074	0.58087	-	-	0.48797	-	-	
	600 × 1050	0.09328	0.59041	0.50379	-	0.58510	0.41330	-	0.47766	0.49321	
	600 × 1200	0.08155	0.55186	0.47278	0.49752	-	-	0.40727	-	-	
600 × 1350	0.07241	0.52611	0.46814	-	0.53314	0.39028	-	0.47711	0.47976		
600 × 1500	0.06515	0.50897	0.45859	0.44456	-	-	0.38442	-	-		

Tablo 4.10: Nihai taşıma kapasitesindeki orta açıklık deplasmanı (SP45 için)

Kalınlık (mm)	Boyut (mm)	Sınır şartları									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
80	600 × 600	12.9115	14.6056	9.49163	17.3274	-	-	12.4798	-	-	
	600 × 750	13.0807	13.4655	7.482	-	14.8488	13.5287	-	4.4157	4.93346	
	600 × 900	13.3745	14.288	10.5881	9.86791	-	-	15.3179	-	-	
	600 × 1050	32.6399	15.9893	9.84735	-	15.4715	10.3811	-	4.61343	3.57038	
	600 × 1200	25.7261	16.8629	9.21086	8.2418	-	-	12.7707	-	-	
	600 × 1350	26.0267	6.30843	10.4836	-	7.63406	9.27586	-	4.75553	5.26666	
	600 × 1500	33.0161	6.14519	11.238	8.87702	-	-	14.3139	-	-	
100	Sınır şartları										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	600 × 600	19.9526	11.9277	11.7339	9.89674	-	-	15.9611	-	-	
	600 × 750	19.9875	8.5157	15.9838	-	4.03732	5.72087	-	4.49402	7.04968	
	600 × 900	19.9816	11.7375	8.71603	6.18919	-	-	17.8297	-	-	
	600 × 1050	20.4368	19.9492	8.91479	-	4.04857	11.2884	-	4.57837	8.12949	
	600 × 1200	21.2976	19.9637	9.37885	7.33391	-	-	16.8023	-	-	
600 × 1350	88.7395	18.7159	9.23104	-	4.23832	12.4873	-	4.64193	7.29243		
600 × 1500	32.5804	21.4097	9.21861	9.02847	-	-	17.7593	-	-		
120	Sınır şartları										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	600 × 600	27.4793	10.3615	19.172	8.48535	-	-	21.7452	-	-	
	600 × 750	28.0543	11.3353	19.3954	-	6.14179	5.40568	-	4.9857	11.3457	
	600 × 900	28.0347	4.86202	8.44269	8.43198	-	-	22.6803	-	-	
	600 × 1050	29.0748	6.54937	15.0341	-	5.45129	8.03219	-	5.00699	12.3047	
	600 × 1200	28.2153	7.1524	13.3613	11.4847	-	-	22.4359	-	-	
600 × 1350	33.6747	8.64669	14.4583	-	3.91119	11.4328	-	5.10899	12.9379		
600 × 1500	67.4681	9.43518	13.3267	10.4921	-	-	25.5155	-	-		
150	Sınır şartları										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	600 × 600	38.7092	2.2756	9.72403	4.27386	-	-	30.344	-	-	
	600 × 750	32.2169	2.75543	15.0296	-	2.24337	11.593	-	2.19978	9.44288	
	600 × 900	35.4002	2.97247	13.0058	4.36278	-	-	26.0382	-	-	
	600 × 1050	32.1576	3.18162	9.31729	-	2.87895	7.96021	-	2.31397	9.73859	
	600 × 1200	32.2312	2.90542	13.5813	4.53668	-	-	20.861	-	-	
600 × 1350	32.0301	2.97242	10.5497	-	2.80214	8.14878	-	2.33286	9.75593		
600 × 1500	32.6102	2.82279	11.0932	4.37111	-	-	21.1793	-	-		

Tablo 4.11: Nihai taşıma kapasitesi (SP60 için)

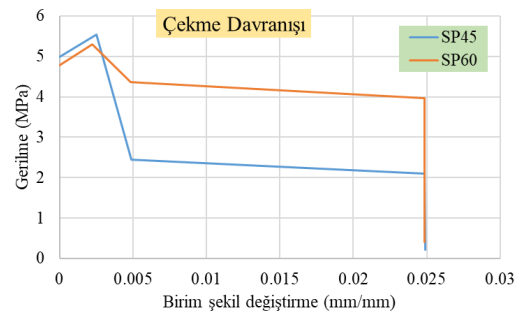
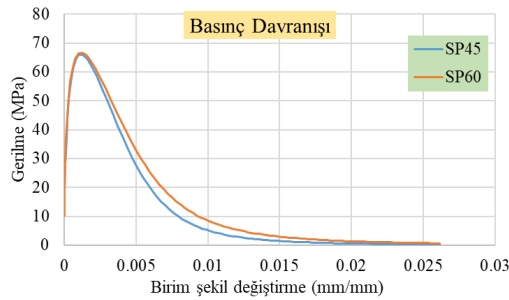
Kalınlık (mm)	Boyut (mm)	Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	600x600	0.07819	0.37514	0.30746	0.35931	-	-	0.28212	-	-
	600x750	0.06243	0.30547	0.23142	-	0.30021	0.28684	-	0.20300	0.20133
	600x900	0.05182	0.26381	0.24381	0.25863	-	-	0.21784	-	-
	600x1050	0.04441	0.23699	0.22636	-	0.23425	0.23059	-	0.18609	0.18414
	600x1200	0.03488	0.21916	0.21368	0.18360	-	-	0.18548	-	-
	600x1350	0.02763	0.20662	0.20217	-	0.20486	0.20370	-	0.17593	0.17489
	600x1500	0.02244	0.19761	0.19347	0.19613	-	-	0.17453	-	-
		Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	600x600	0.09387	0.57769	0.45718	0.49490	-	-	0.39215	-	-
	600x750	0.07507	0.48637	0.39375	-	0.43505	0.35054	-	0.30072	0.30670
	600x900	0.06252	0.42799	0.34716	0.38959	-	-	0.33364	-	-
	600x1050	0.05349	0.38939	0.33173	-	0.37044	0.35712	-	0.28468	0.28786
	600x1200	0.05673	0.36261	0.32269	0.28382	-	-	0.28003	-	-
	600x1350	0.04730	0.34330	0.31376	-	0.33463	0.32810	-	0.27589	0.27727
	600x1500	0.03840	0.32924	0.30624	0.32251	-	-	0.28489	-	-
		Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
120	600x600	0.10022	0.74783	0.65485	0.69101	-	-	0.51191	-	-
	600x750	0.08012	0.64214	0.54649	-	0.57706	0.43168	-	0.42348	0.44471
	600x900	0.06674	0.58832	0.44494	0.51898	-	-	0.43584	-	-
	600x1050	0.08153	0.55171	0.45337	-	0.50988	0.42405	-	0.40973	0.42140
	600x1200	0.07319	0.52383	0.45947	0.38515	-	-	0.36809	-	-
	600x1350	0.06488	0.50127	0.45259	-	0.47638	0.44864	-	0.40169	0.40884
	600x1500	0.05774	0.48365	0.44133	0.45617	-	-	0.36132	-	-
		Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
150	600x600	0.10452	0.91973	0.83993	0.82287	-	-	0.66484	-	-
	600x750	0.08362	0.81805	0.74898	-	0.71144	0.71835	-	0.53019	0.58936
	600x900	0.06963	0.72247	0.64478	0.65646	-	-	0.57870	-	-
	600x1050	0.10813	0.65488	0.58066	-	0.64781	0.46273	-	0.52710	0.56338
	600x1200	0.09750	0.61013	0.54158	0.55743	-	-	0.50247	-	-
	600x1350	0.08650	0.58043	0.53540	-	0.58753	0.43105	-	0.52547	0.54714
	600x1500	0.07775	0.56016	0.52542	0.50086	-	-	0.47456	-	-

Tablo 4.12: Nihai taşıma kapasitesindeki orta açıklık deplasmanı (SP60 için).

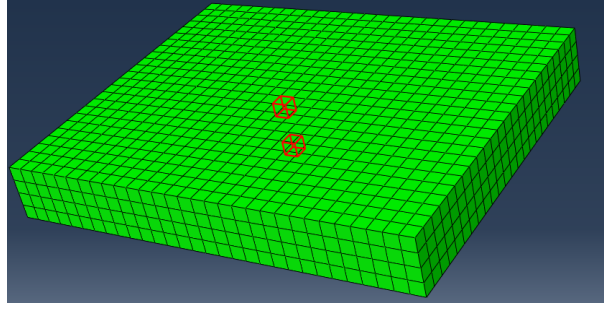
Kalınlık (mm)	Boyut (mm)	Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	600x600	11.47200	11.98930	10.45570	11.73240	-	-	14.28830	-	-
	600x750	11.58390	13.67860	9.13605	-	10.9958	16.7287	-	4.7709	5.12567
	600x900	11.89350	15.42330	9.38030	11.9581	-	-	18.1487	-	-
	600x1050	12.32180	17.75400	9.09855	-	17.64640	11.09160	-	5.05282	5.46728
	600x1200	29.29000	6.29424	9.42928	20.18260	-	-	15.87980	-	-
	600x1350	28.25380	9.64224	10.30090	-	7.80587	10.5717	-	5.1012	5.63403
	600x1500	29.64200	9.58979	21.36690	9.72766	-	-	14.3964	-	-
		Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	600x600	11.71090	12.29950	12.44230	10.59440	-	-	34.73450	-	-
	600x750	11.77170	6.16954	18.67650	-	4.14481	6.56932	-	4.6615	7.50116
	600x900	11.65880	6.12871	9.70863	7.66627	-	-	20.0659	-	-
	600x1050	11.80940	6.13795	9.90546	-	4.21325	12.04790	-	4.69125	7.56197
	600x1200	25.95810	5.58189	10.17170	7.68735	-	-	18.80170	-	-
	600x1350	44.66800	23.90290	10.69880	-	4.34013	12.9216	-	4.8365	7.73694
	600x1500	41.03170	23.88330	10.76350	5.91934	-	-	19.8666	-	-
		Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
120	600x600	11.31710	11.41280	21.31070	13.68740	-	-	34.49080	-	-
	600x750	11.17610	10.30130	20.00590	-	5.61627	5.89469	-	5.3535	12.9087
	600x900	11.47350	4.80968	8.99539	8.8502	-	-	31.8537	-	-
	600x1050	25.71400	4.55369	19.20960	-	5.98076	14.11090	-	5.43548	#####
	600x1200	34.62980	4.12418	15.40020	12.26730	-	-	23.91510	-	-
	600x1350	42.16320	8.69359	15.51860	-	4.28891	12.8008	-	5.505	14.3682
	600x1500	48.79500	9.64342	15.52050	11.6551	-	-	27.4532	-	-
		Sınır şartları								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
150	600x600	11.77640	2.63659	10.81410	5.28203	-	-	37.03480	-	-
	600x750	11.60500	3.45852	10.95790	-	2.43422	16.6538	-	2.4351	10.7745
	600x900	11.69520	3.09013	14.14670	5.08428	-	-	33.3828	-	-
	600x1050	36.55770	3.47727	12.85510	-	3.12663	8.20181	-	2.52772	#####
	600x1200	46.17430	3.20166	15.04380	5.08396	-	-	33.06800	-	-
	600x1350	43.76370	3.18519	14.75170	-	3.05465	9.27632	-	2.4325	10.8015
	600x1500	46.73660	3.02172	20.56740	4.84932	-	-	36.0793	-	-

5. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL VE MATEMATİKSEL MODELİN SONLU ELEMANLAR SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Tezin bu bölümünde, panellerin düzlem dışı yükleme (yüzey basıncı) altındaki yüzey basıncı-deplasman değerlerini elde edecek matematiksel modelin önerilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için Şekil 5.1'de verilen çelik lifli betonun çekme davranışındaki malzeme modelinden yararlanılmıştır. Malzemenin çatlamaya başladığı ilk nokta ve yumuşama kolunun bittiği ikinci noktaya dikkat çekilmiş ve bu noktalara sırasıyla 1. karakteristik nokta ve 2. karakteristik nokta adı verilmiştir. 2. karakteristik nokta, malzemenin artık çekme kapasitesini kaldıramadığı noktadır. Bu noktalara denk gelen yüzey basıncı ve deplasman değerleri esas alınarak nümerik bir çalışma yapılmıştır. İlk olarak panelin alt ve üst yüzeylerinin orta kısmına denk geldiği kabul edilen sonlu eleman parçaları (Şekil 5.2) üzerinden x ve y doğrultularındaki gerilme-zaman grafikleri (Şekil 5.3'te örnek bir grafik verilmiş olup, geri kalanları EK A ve EK B'de sunulmuştur) elde edilmiştir. Elde edilen grafikler sonucunda, panelin genel olarak alt yüzeyinin bir süre sonra çekme gerilmelerini taşıyamaz hale gelip göçtüğü görülmüştür (EK A ve EK B). Bu sebeple panelin alt yüzeyinden alınan sonlu eleman parçası için 1. ve 2. karakteristik noktaların, analizin hangi adımında gerçekleştiği bulunmuş ve bu noktaların yüzey basıncı ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında ele alınan parametrelerle karakteristik noktaların yüzey basıncı ve yer değiştirme değerlerinin değişimi incelenmiş ve matematiksel bir ifade ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde karakteristik noktalarda sırasıyla yüzey basıncı ve yer değiştirmenin ifadesini verecek matematiksel model, bu modeli elde ederken izlenen çözüm yaklaşımı ve elde edilen matematiksel model sonuçları ile sonlu eleman analiz sonuçlarının karşılaştırmaları yer almaktadır.

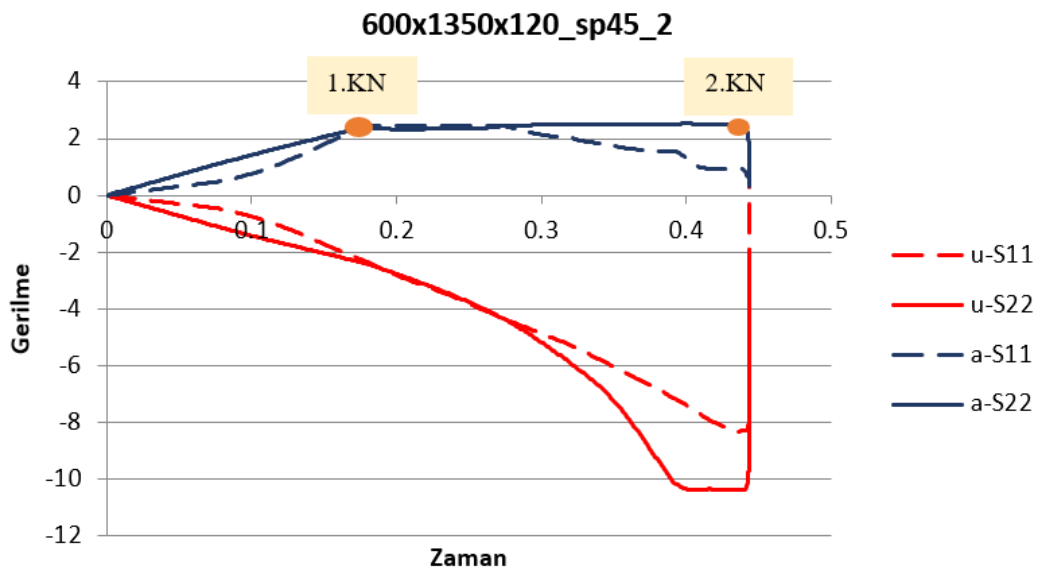


Şekil 5.1: Çelik lifli betonun basınç ve çekme altında davranışı



Şekil 5.2: Panelin üst ve alt yüzeylerinden alınan elemanlar

Şekil 5.3'te örnek bir gerilme-zaman grafiği verilmiştir. 1.karakteristik noktadaki basınç ve deplasman için sırasıyla SP_1 ve Δ_1 , 2.karakteristik noktadaki basınç ve deplasman için sırasıyla SP_2 ve Δ_2 sembolleri kullanılmıştır.

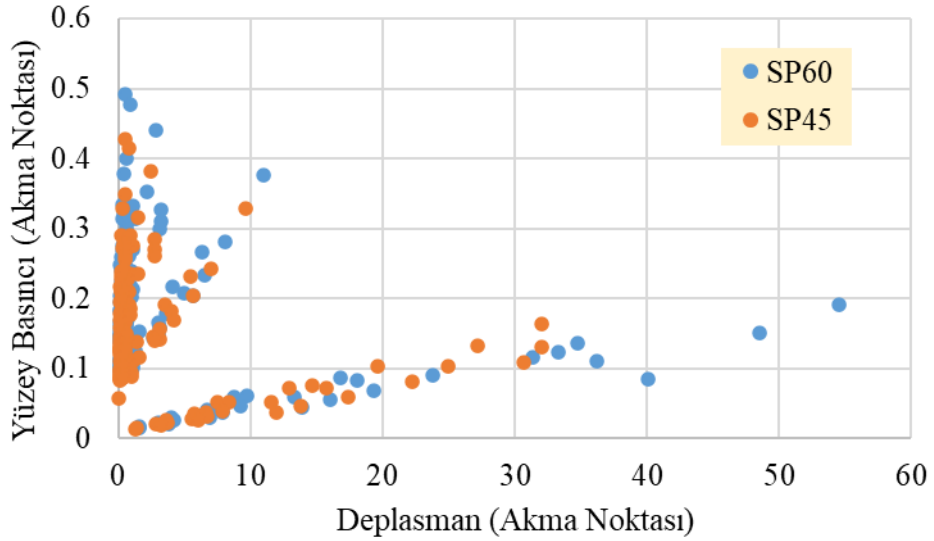


Şekil 5.3: 600x1350x120 boyutundaki SP45 malzemeye ve sınır şartı 2'ye ait panelin gerilme-zaman grafiği

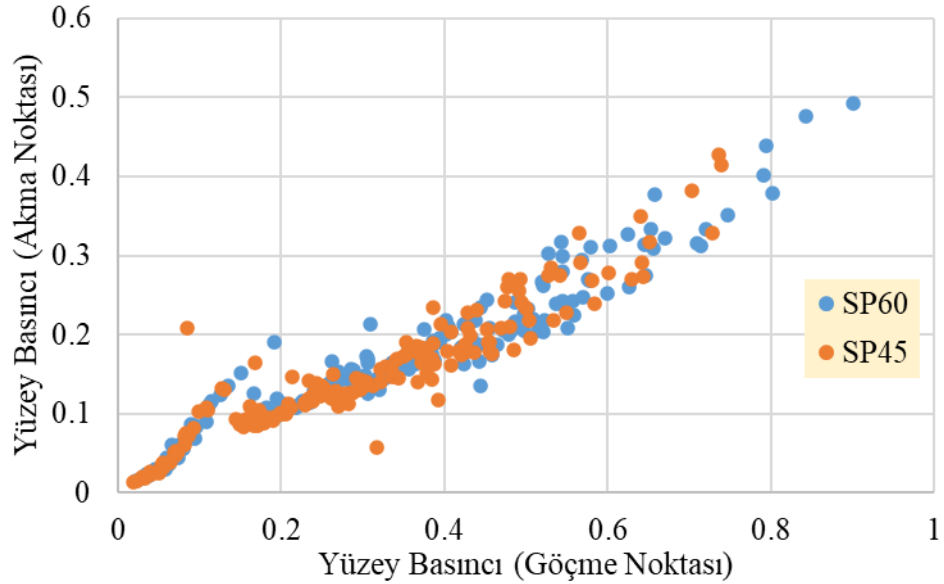
1.ve 2. karakteristlik noktaların yüzey basıncı ve deplasman değerlerini bulmak adına ele alınan çözüm yaklaşımları ve detayları alt başlıklar halinde sunulmuştur.

5.1 1.Karakteristik Nokta Yüzey Basıncı Değeri

Şekil 5.4 ve 5.5'te sırasıyla 1.karakteristik nokta yüzey basıncı-deplasman ve 1.karakteristik nokta yüzey basıncı-2.karakteristik nokta yüzey basıncı ilişkileri verilmiştir. Bu grafiklere bakıldığında, veriler içinde parametrelere göre değişen bir dağılım olduğu görülmüştür.

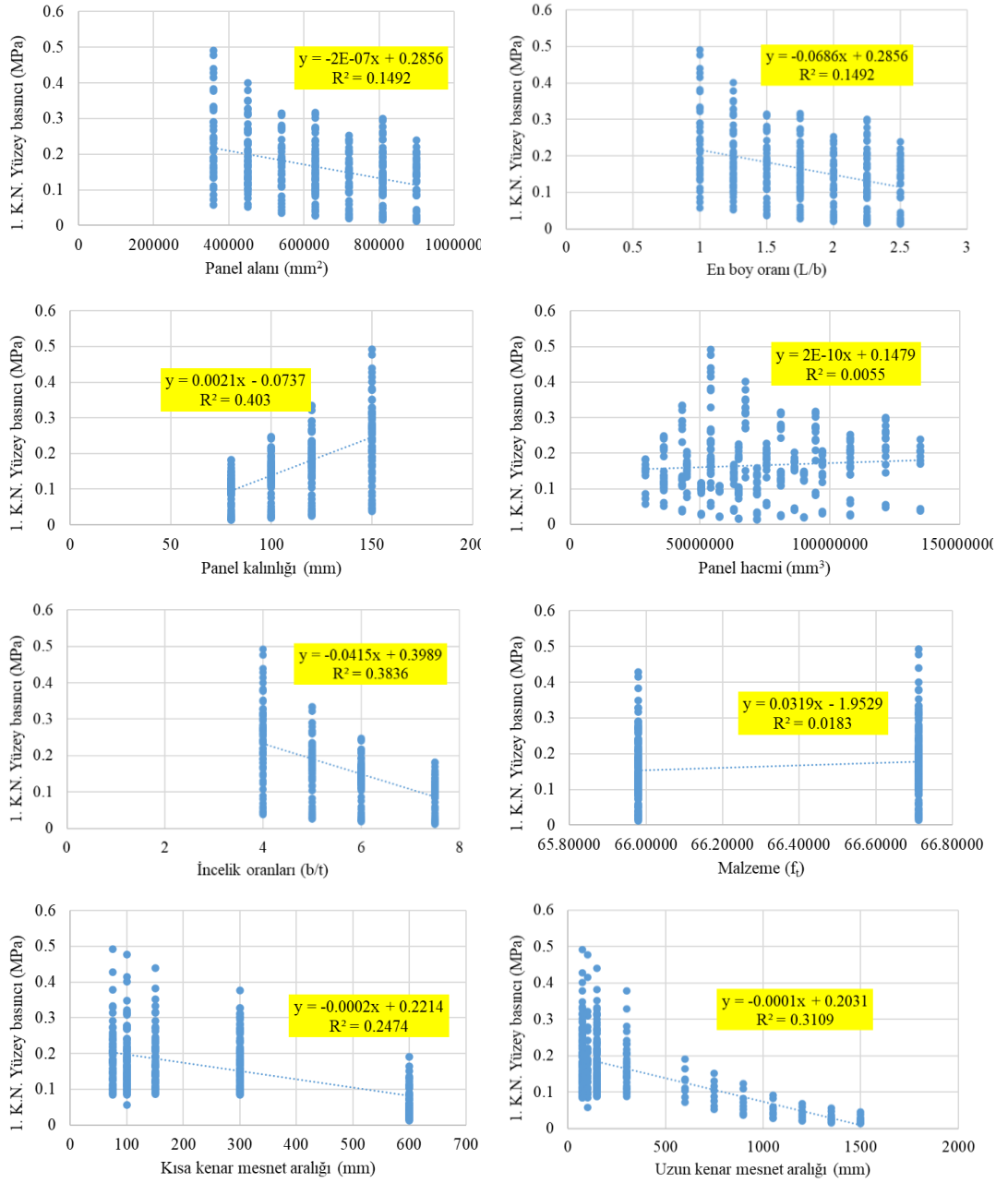


Şekil 5.4: 1.karakteristik noktadaki yüzey basıncı-deplasman ilişkisi



Şekil 5.5: 1. ve 2.karakteristik noktadaki yüzey basıncı ilişkisi

Sonlu eleman analizleri sonucunda 1.karakteristik noktada elde edilen yüzey basıncı değeri ile ayrı ayrı tüm parametrelerin değişimleri incelenmiş fakat incelenen ilişkilerin dağılımlarının R^2 'sinin düşük çıktığı görülmüştür (Şekil 5.6). Bu sebeple elastik teoride kullanılan yaklaşım benimsenerek (3.4 numaralı başlıkta anlatıldığı gibi) 1.karakteristik noktadaki yüzey basıncına ait bir k katsayısı elde edilmiş ve bu katsayının uzun kenar/kısa kenarın karesi olarak tanımlanan α^2 ile değişimleri incelendiğinde dağılımın korelasyonunun yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.6: Yüzey basıncının çeşitli parametrelere göre dağılımı

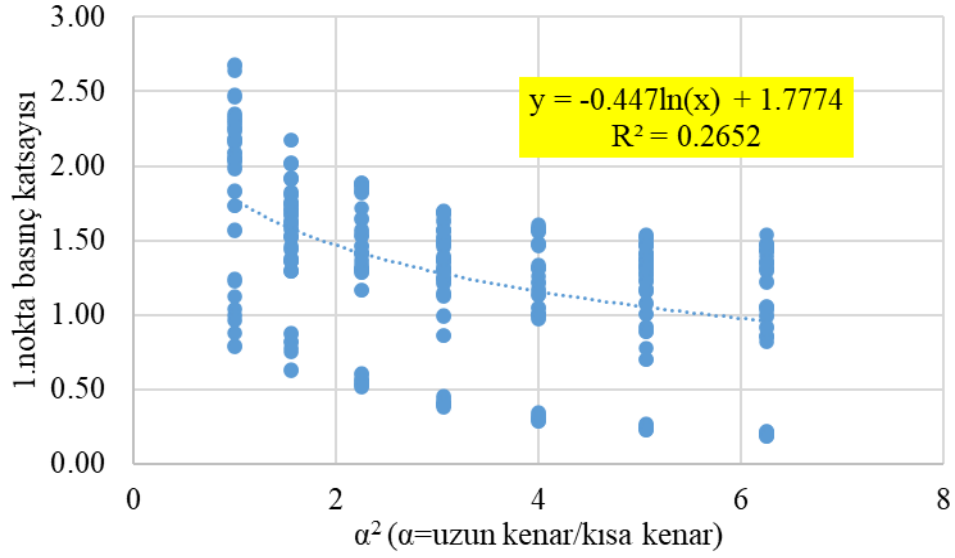
İncelenen 1.karakteristik nokta elastik bölgenin sınırında olduğu için bu yaklaşım kullanılmış olup, kirişlerin basit elastik eğilme altında kullanılan moment ve gerilme denklemlerinden yola çıkılmıştır. Eşitlik (5.2)'de verilen moment ifadesi Eşitlik (5.1)'de verilen gerilme denkleminde yerine yazılmıştır. Burada kesitin tepe noktasının ağırlık merkezine olan uzaklığı olan c parametresi için $t/2$ ve atalet momenti içinde $bt^3/12$ ifadesi kullanılmıştır. Eşitlik (5.2)'de verilen q yayılı yükü panelin L uzunluğuyla çarpılarak kullanılmıştır. Tüm bu işlemler yapıldığında eşitlik (5.3)'te verilen ilgili noktadaki basınç değerini gösteren bir k katsayısı elde edilmiştir. Eşitlik (5.1)'de kullanılan gerilme σ parametresi, panelin alt noktasından alınan sonlu eleman parçasının artık daha fazla çekme dayanımı taşıyamayacağı nokta olduğu için k katsayısını veren ifadede nihai çekme dayanımı f_t olarak kullanılmıştır. Eşitlik (5.3)'ten görüldüğü üzere bu katsayının çalışmada kullanılan tüm parametrelerle bağımlı olduğu görülmüştür ($\alpha^2=L/b$ 'ye t 'ye ve f_t 'ye bağımlı olduğunu görülmüyor). Burada f_t malzeme tipini gösteren bir parametre olarak kullanılmıştır. Sonuçta betona çelik lif eklendiğinde esas olarak değişen davranışı çekme davranışıdır.

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (5.1)$$

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad (5.2)$$

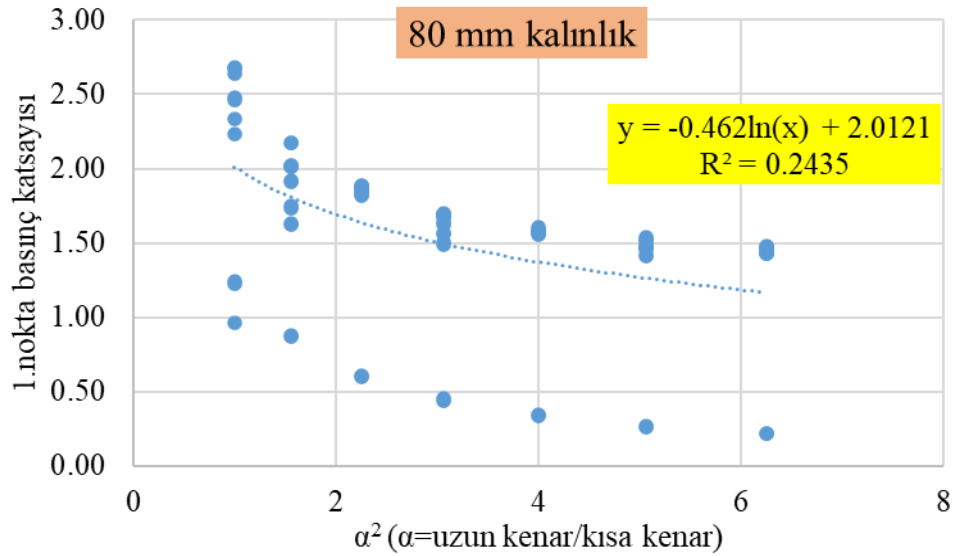
$$k = \frac{4}{3} \frac{t^2}{\alpha^2 b^2} f_t \quad (5.3)$$

Yukarıda bahsedilen çözüm yaklaşımı kullanılarak elde edilen 1.karakteristik noktaya ait basınç katsayısı ile uzun kenarın kısa kenara oranı olan α^2 'ye göre değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak matematiksel bir ifade ortaya konmaya çalışılmıştır.

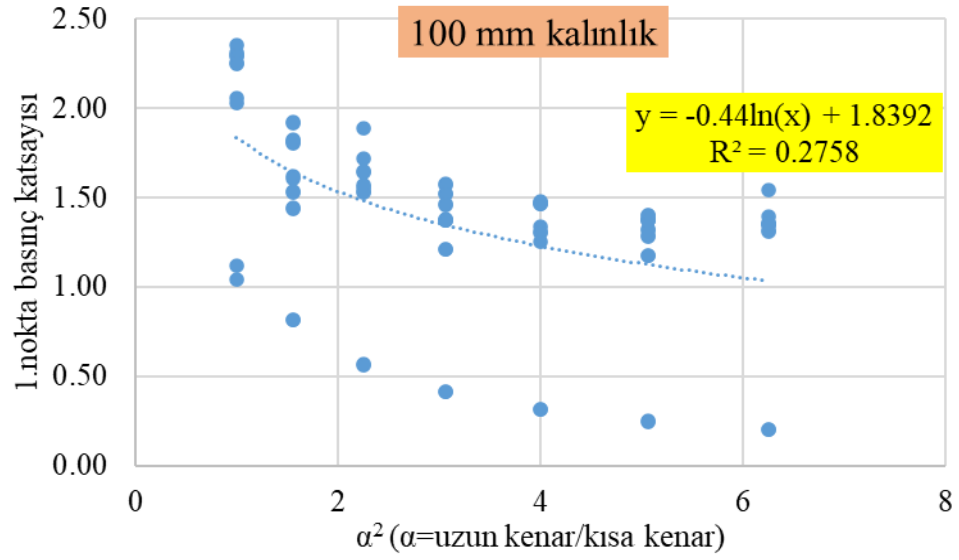


Şekil 5.7: 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi

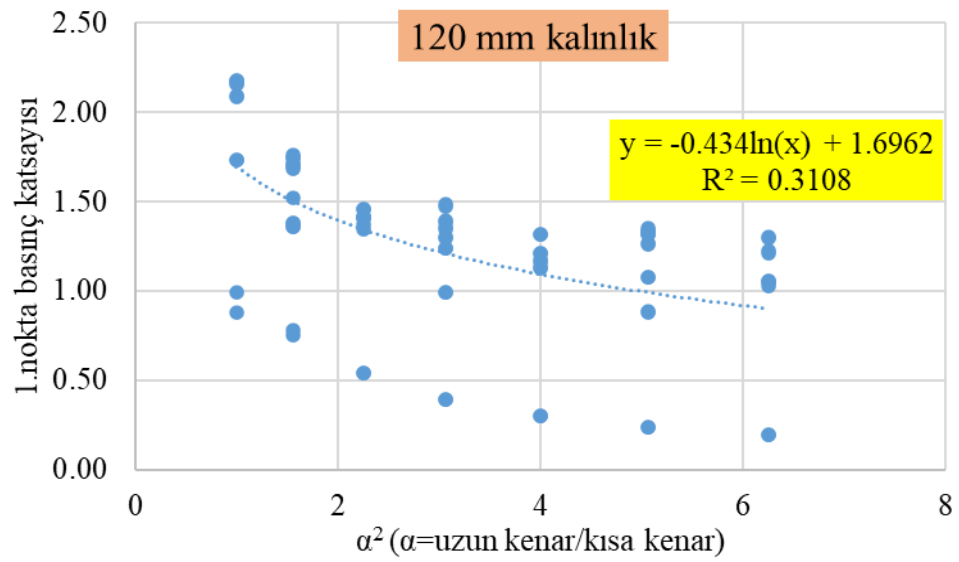
Şekil 5.7'deki grafikten anlaşıldığı üzere, veriler arasında belirli bir düzende dağılımın olduğu görülmüştür. Bu dağılımı öncelikli olarak panel kalınlığı (t) etkilemektedir. Ardından bu dağılım t 'ye göre ayrıştırıldığında elde edilen dağılımda kendi içinde panelin kısa kenar mesnet aralığı (b_e) değerlerinin etkilediği görülmüştür. Aşağıda sırasıyla Şekil 5.7'deki değerlerin önce panel kalınlığına göre değişimleri ardından onun da kendi içinde kısa kenar mesnet aralığına göre değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir (Şekil 5.8-5.31).



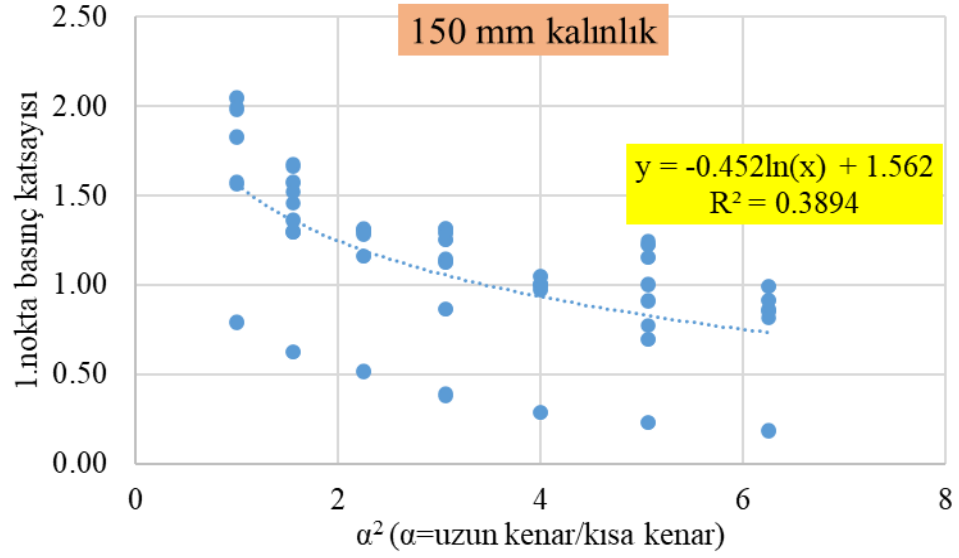
Şekil 5.8: 80 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



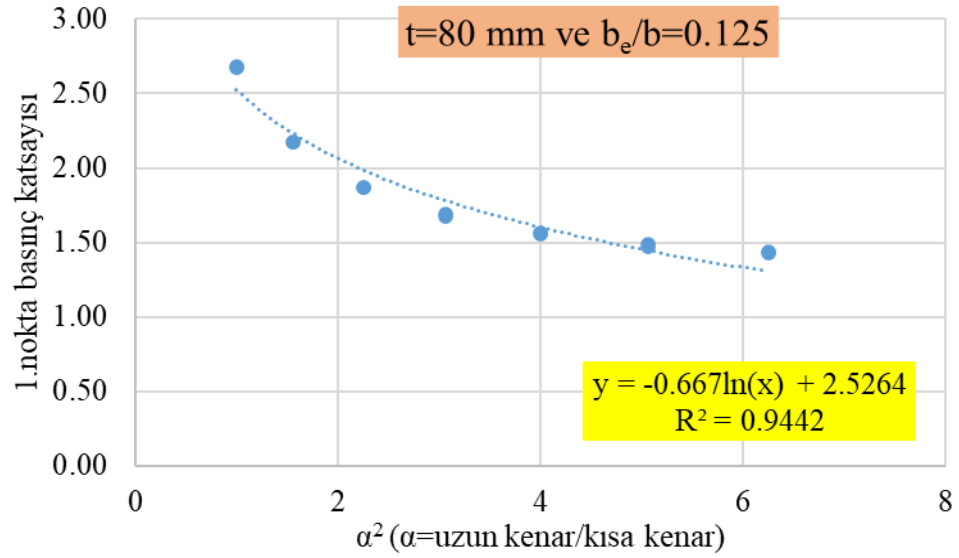
Şekil 5.9: 100 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



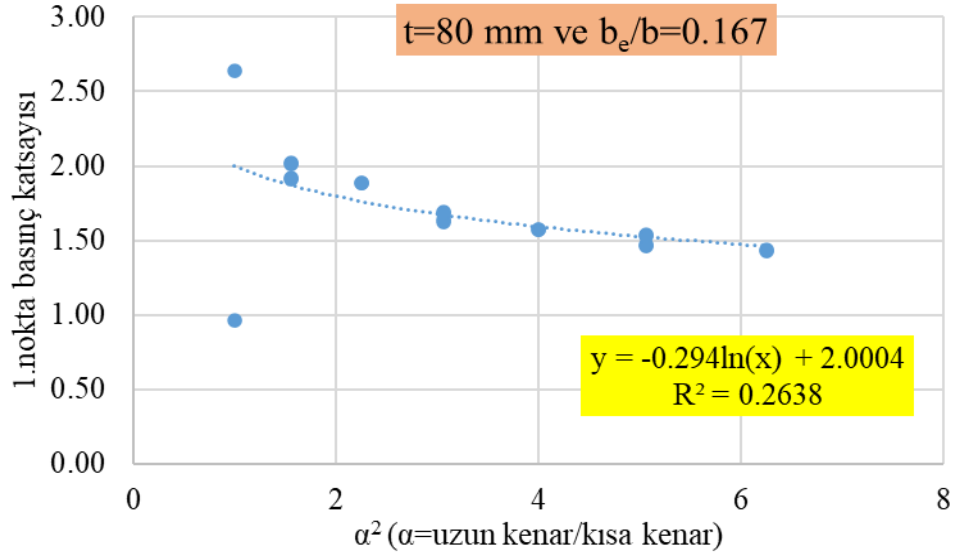
Şekil 5.10: 120 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



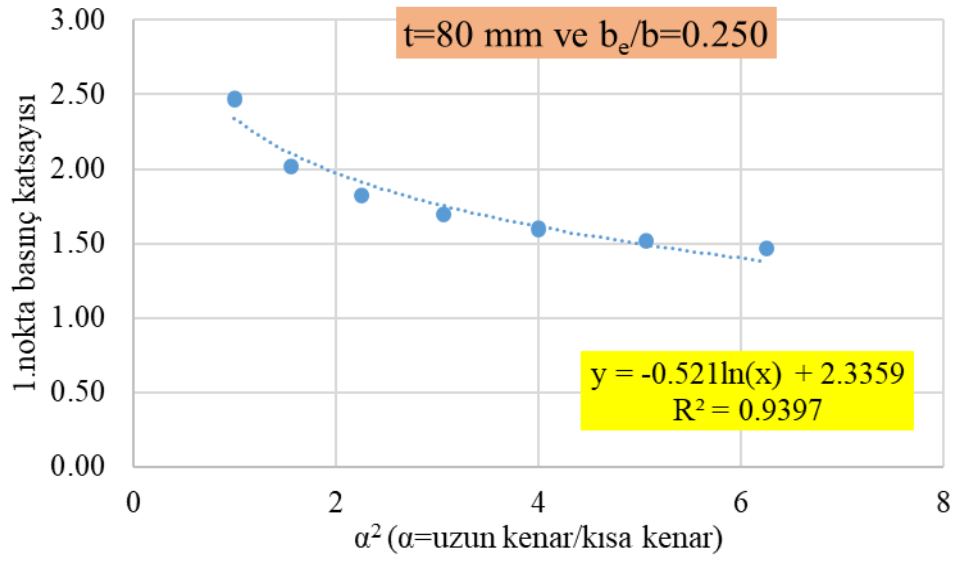
Şekil 5.11: 150 mm paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



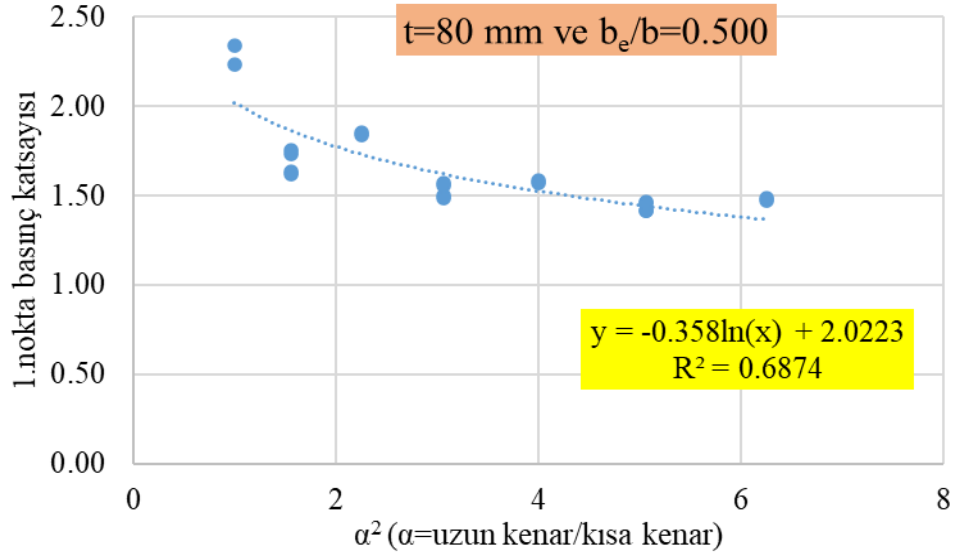
Şekil 5.12: $t=80$ mm ve $b_e/b=0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



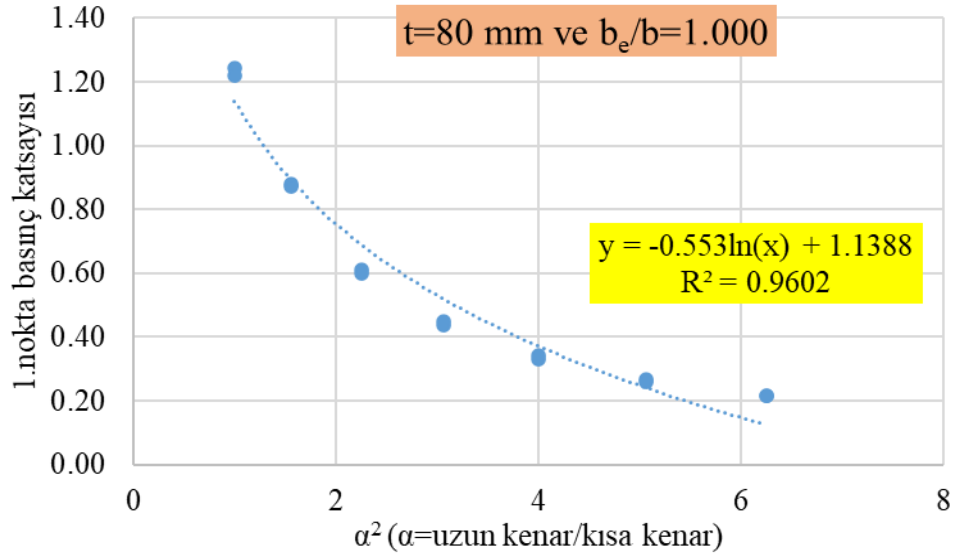
Şekil 5.13: $t=80$ mm ve $b_e/b=0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



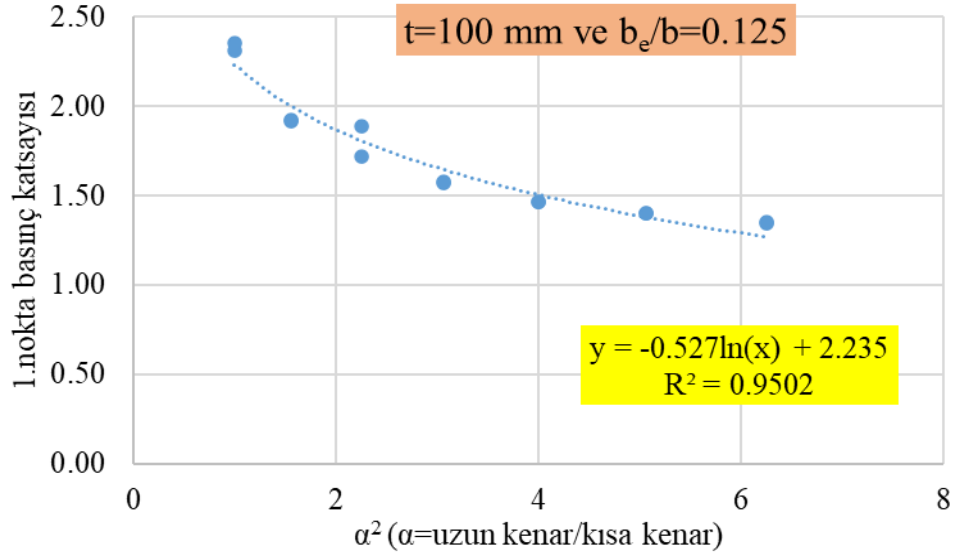
Şekil 5.14: $t=80$ mm ve $b_e/b=0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



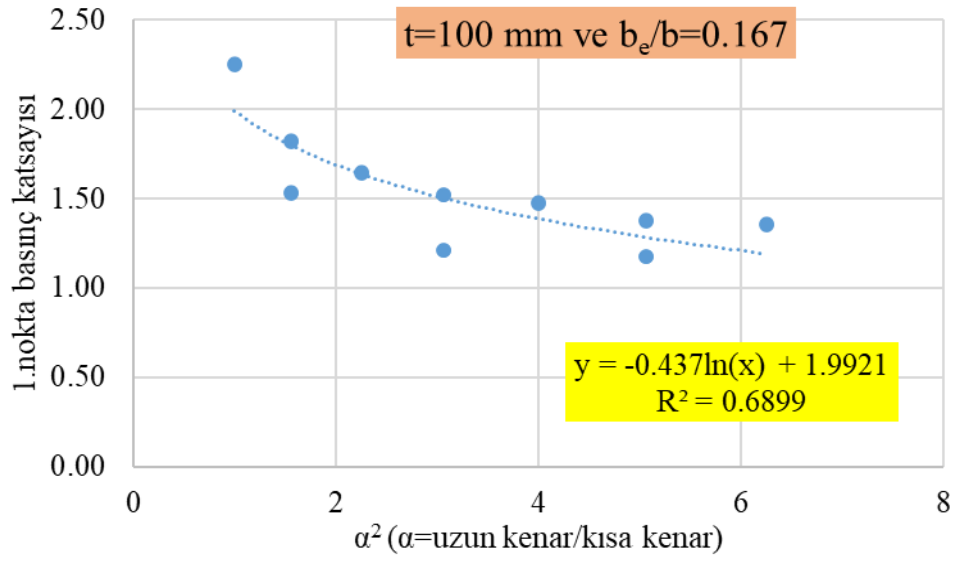
Şekil 5.15: $t=80$ mm ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



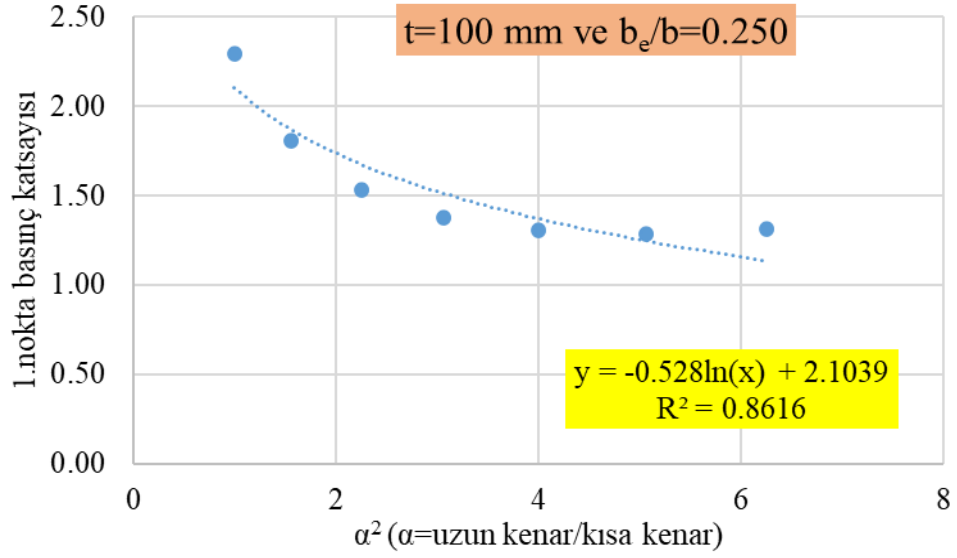
Şekil 5.16: $t=80$ mm ve $b_e/b = 1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



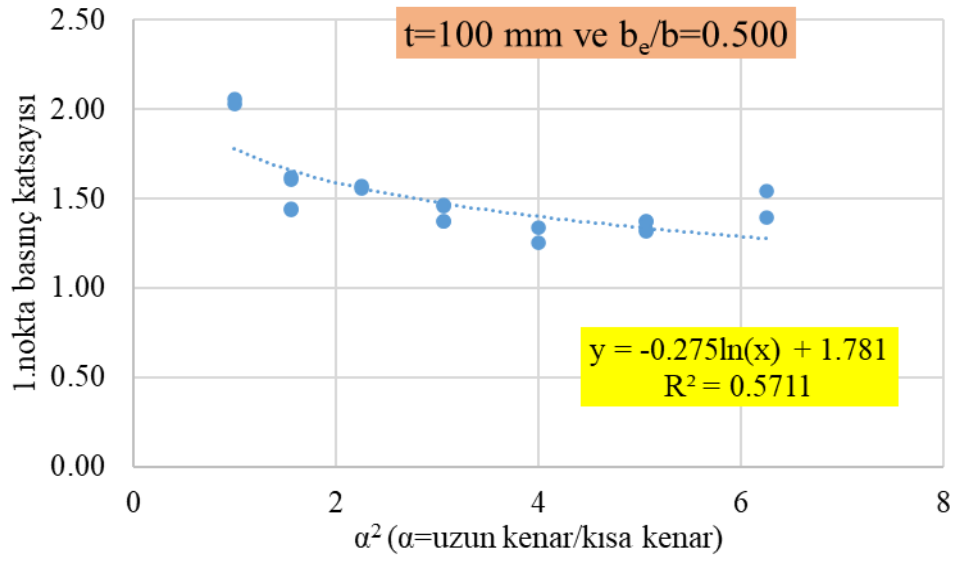
Şekil 5.17: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



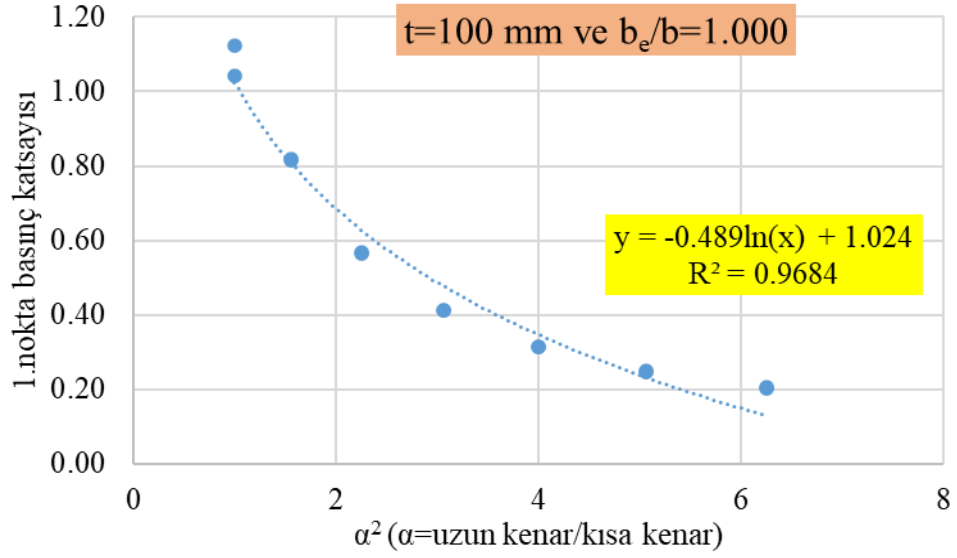
Şekil 5.18: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



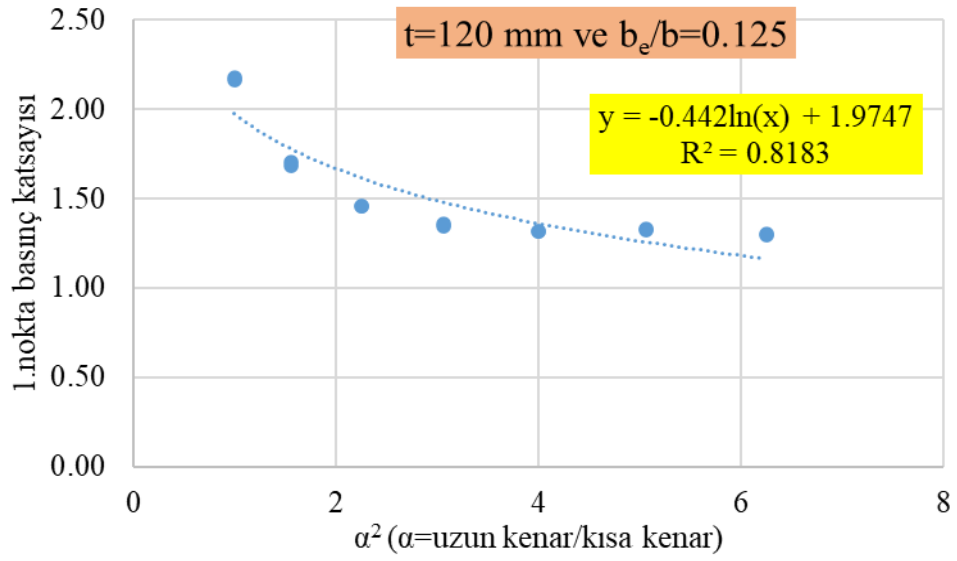
Şekil 5.19: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



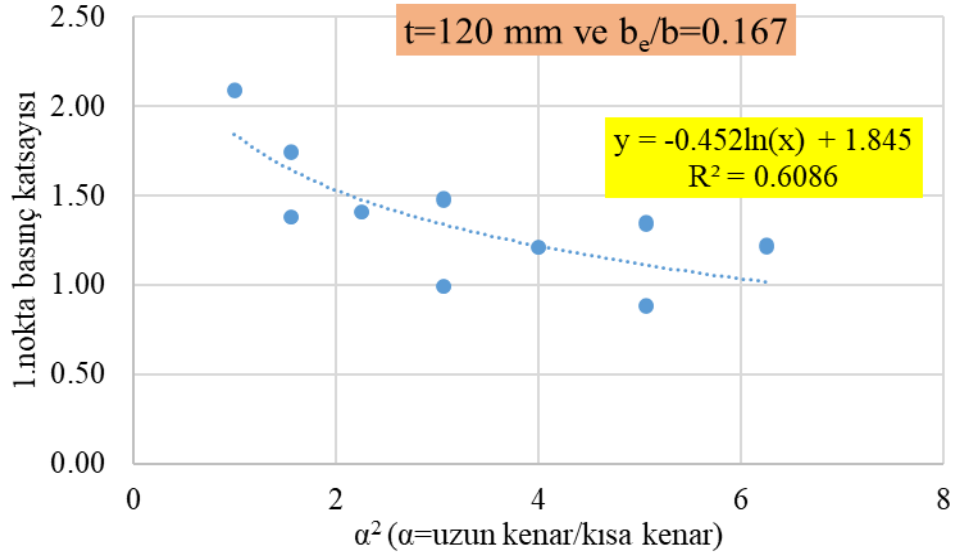
Şekil 5.20: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



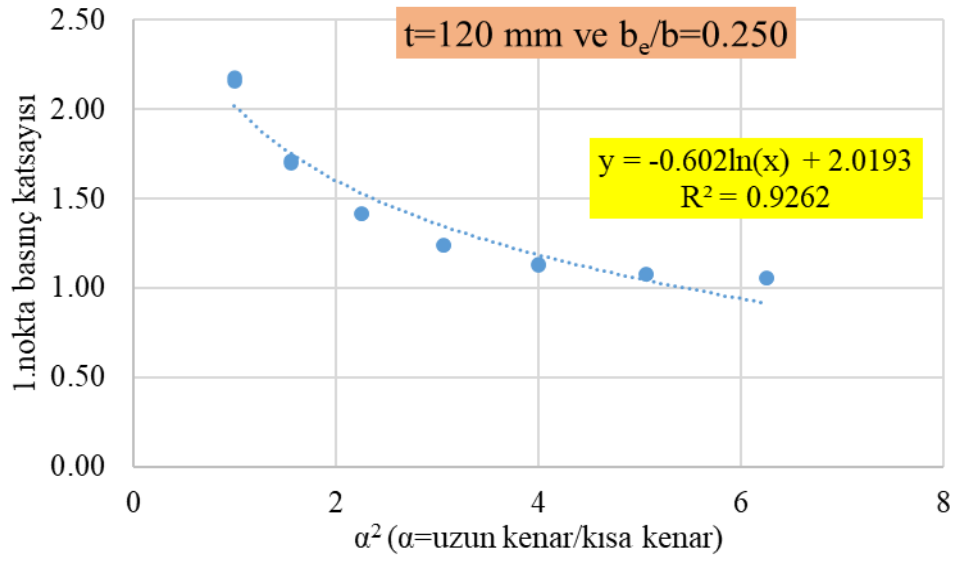
Şekil 5.21: $t=100$ mm ve $b_e/b = 1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



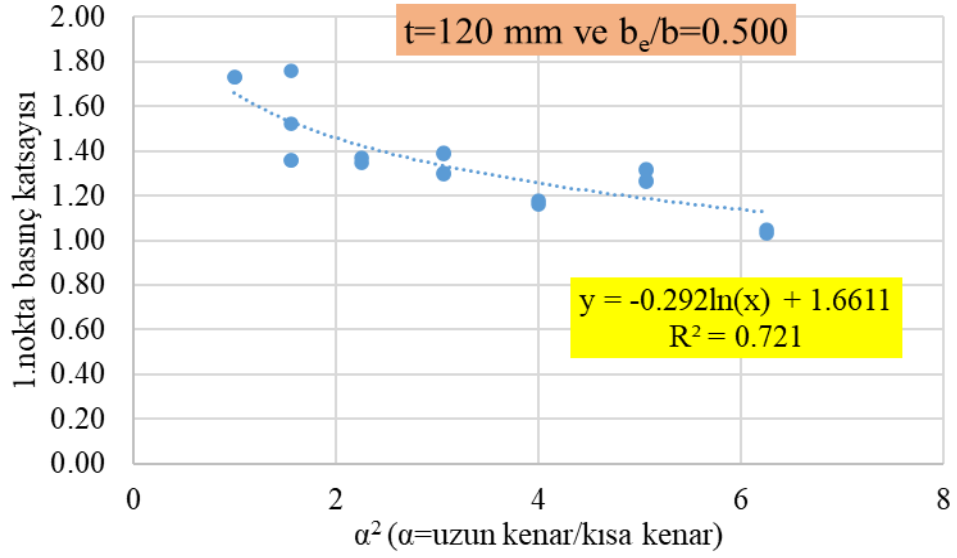
Şekil 5.22: $t=120$ mm ve $b_e/b = 0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



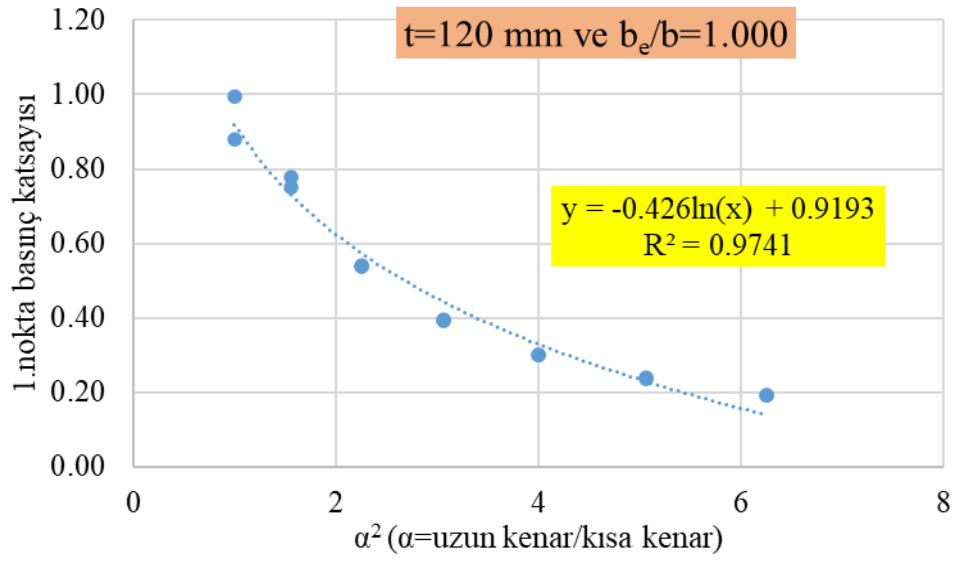
Şekil 5.23: $t=120$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



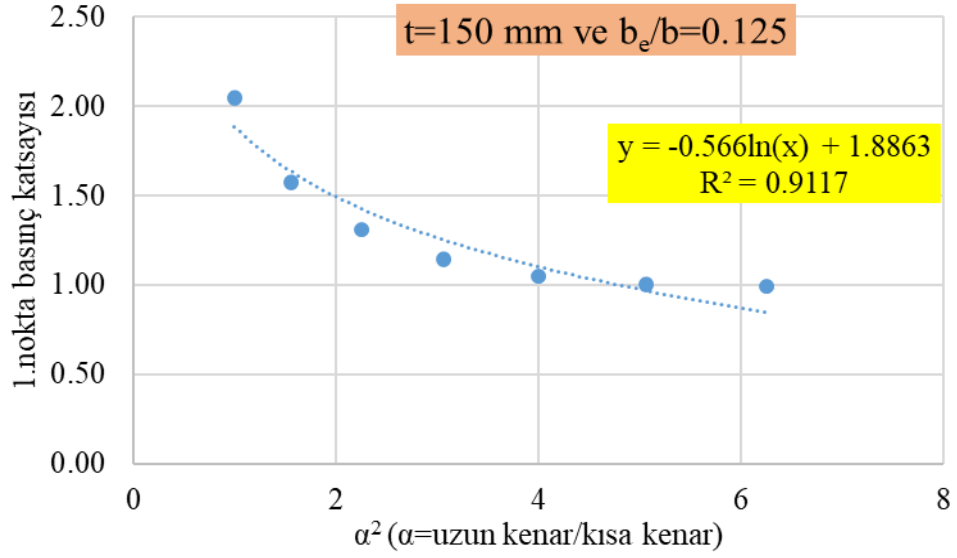
Şekil 5.24: $t=120$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



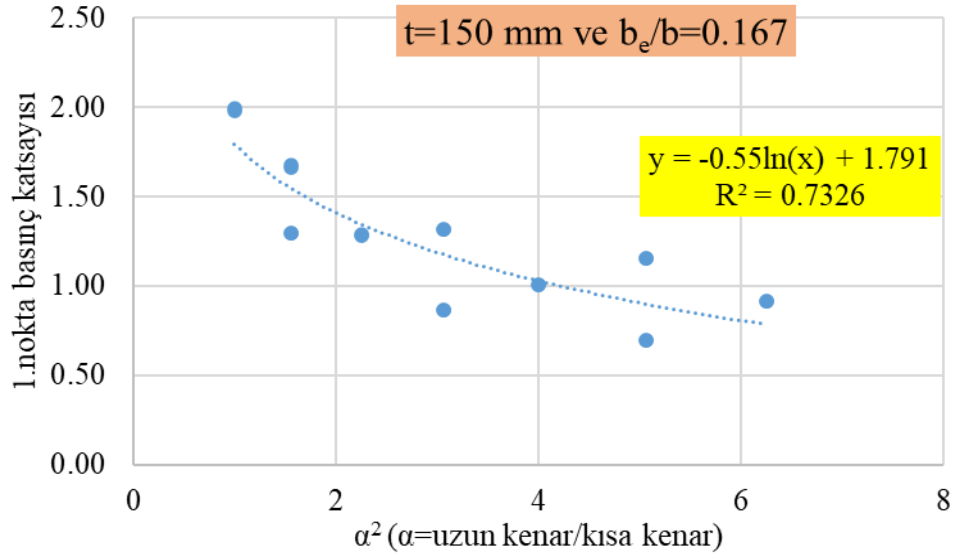
Şekil 5.25: $t=120$ mm ve $b_e/b=0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



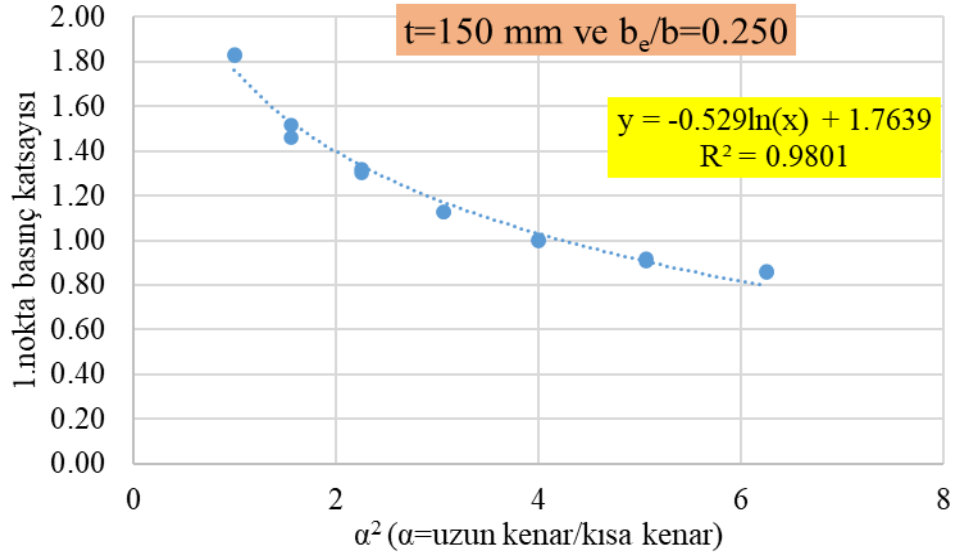
Şekil 5.26: $t=120$ mm ve $b_e/b=1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



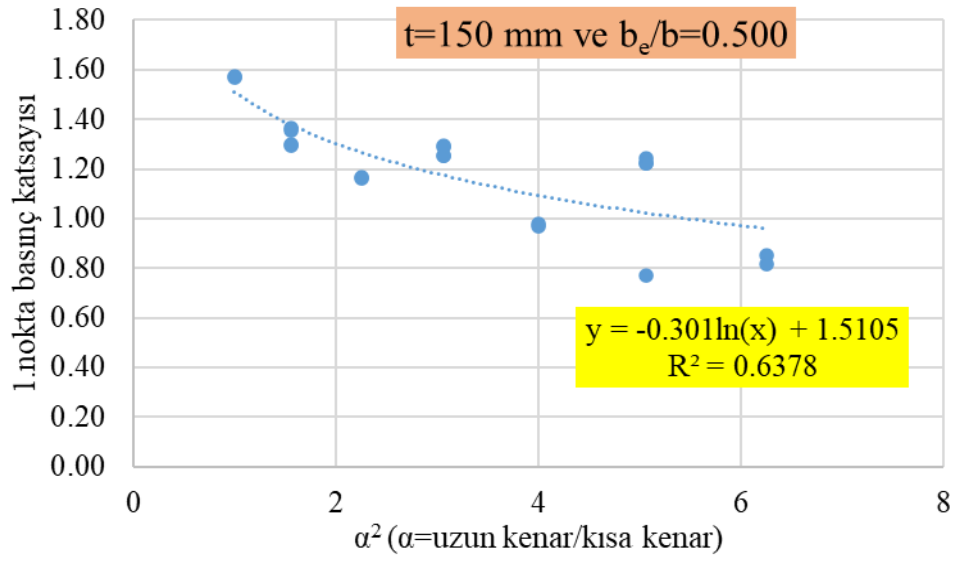
Şekil 5.27: $t=150$ mm $b_e/b = 0.125$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



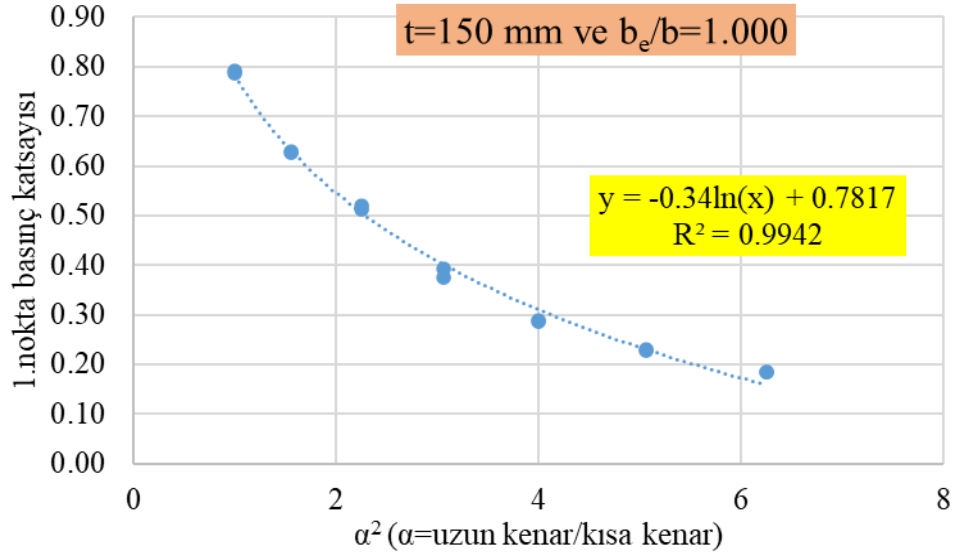
Şekil 5.28: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



Şekil 5.29: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



Şekil 5.30: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi



Şekil 5.31: $t=150$ mm ve $b_e/b= 1.000$ olan paneller için 1.karakteristik nokta basınç katsayısının α^2 ile değişimi

Verilen grafikler incelendiğinde basınç katsayısının alt gruplara ayrılarak verildiği durumlarda, dağılımın R^2 değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Elde edilen bu verilere göre 1.karakteristik noktaya ait basınç değerlerinin öncelikle α^2 'ye logaritmik bir fonksiyon ile bağlı olduğu görülmüştür. Burada α^2 'nin kendi içinde de bir katsayı gerekecektir. Çünkü her bir panelin farklı sınır koşullarına sahip olduğunu bildiğimiz için α^2 ile birlikte panel kalınlığı ve b_e/b oranının da dağılıma etki ettiği görülmüştür. α^2 'nin panel kalınlığı (t) ile doğrusal bir ilişki içinde olduğu ve panel kalınlığının da kendi içinde b_e/b oranı ile doğrusal ilişki içinde olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında 1.nokta için elde edilen matematiksel model,

$$k_1 = \left[\left(k_{11} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{12} \right) \cdot t + \left(k_{13} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{14} \right) \right] \cdot \ln(\alpha^2) \quad (5.4)$$

$$+ \left[\left(k_{15} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{16} \right) \cdot t + \left(k_{17} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{18} \right) \right]$$

$$SP_1 = k_1 \cdot f_t \cdot \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (5.5)$$

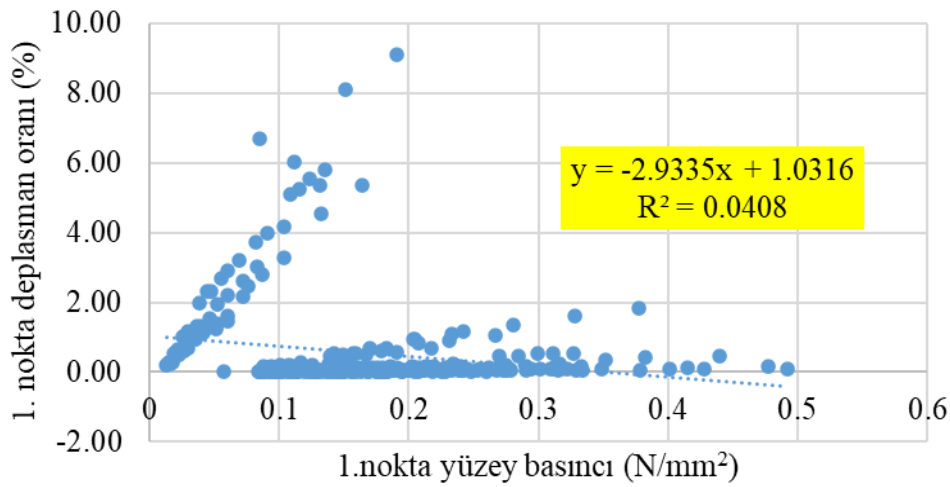
eşitlik (5.5)'teki gibi elde edilmiştir. Burada k_1 1.nokta için basınç katsayısı, SP_1 1.noktadaki yüzey basıncı (N/mm^2), t panel kalınlığı (mm), b panel kısa kenar

uzunluğu (mm) ve b_e kısa kenar mesnet aralığı (mm), α ise uzun kenar/kısa kenar oranı değerlerini sembolize etmektedir. Ayrıca f_t kullanmış olduğumuz malzeme türüne bağlı çekme dayanımını ifade etmektedir. Böylelikle SP45 ve SP60 malzemenin oluşan panel verilerini ayırmadan tek bir formül ortaya çıkmıştır. Denklemde yer alan sabitlerin değerleri de sırasıyla, $k_{11}=0.00472$, $k_{12}=-0.00178$, $k_{13}=-0.42824$, $k_{14}=-0.28935$, $k_{15}=0.00137$, $k_{16}=-0.00692$, $k_{17}=-1.3934$ ve $k_{18}=3.04947$ şeklinde elde edilmiştir.

5.2 1.Karakteristik Nokta Deplasman Değeri

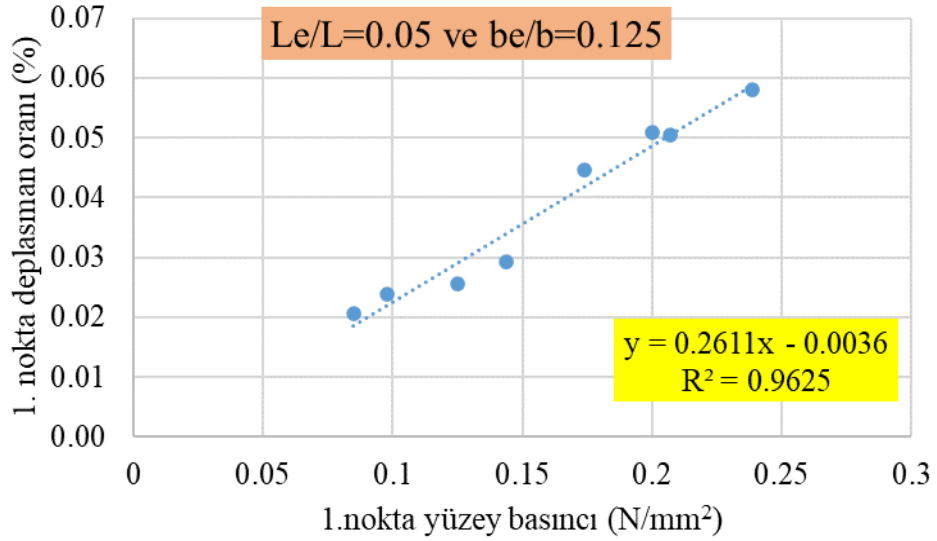
1.karakteristik noktadaki deplasman değerlerinin aynı noktadaki yüzey basıncı değerleri ile ilişkisi incelendiğinde aralarında belirli parametrelerle ifade edilebilecek bir dağılımın olduğu görülmüştür (Şekil 5.32). Bu parametreler incelendiğinde deplasman değerinin yüzey basıncına bağlı doğrusal bir bağıntı ile hesaplanabileceği görülmüştür. Grafikte karşılaştırma yaparken deplasman değerleri için eşitlik (5.6)'da verildiği gibi, kısa kenar uzunluğuna göre normalize edilen deplasman değerleri kullanılmıştır. Burada, DR parametresi deplasman oranını, Δ parametresi ilgili noktadaki deplasman değerini ve b panel genişliğini göstermektedir. Panel genişliği tüm durumlar için sabit olup 600 mm olarak alınmıştır.

$$DR = 100 \cdot \frac{\Delta}{b} \quad (5.6)$$

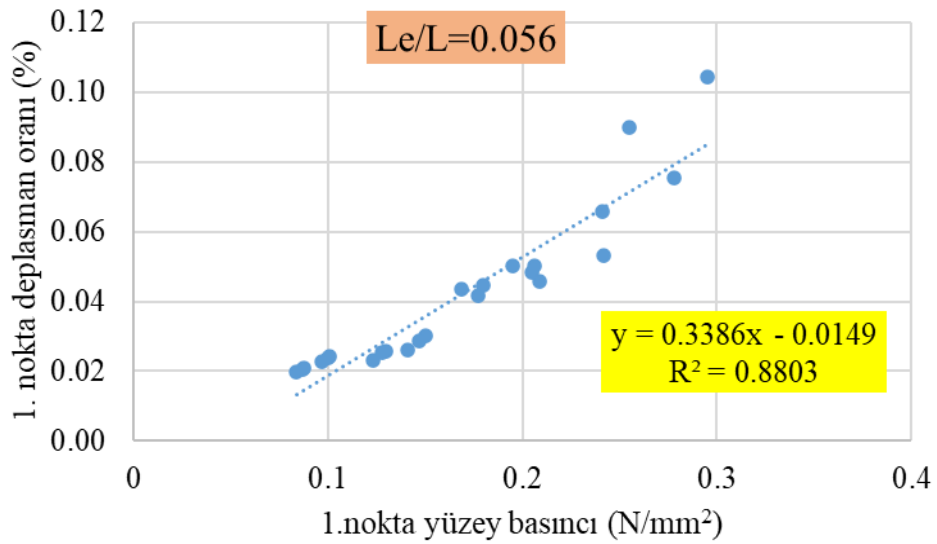


Şekil 5.32: 1 nokta için deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi

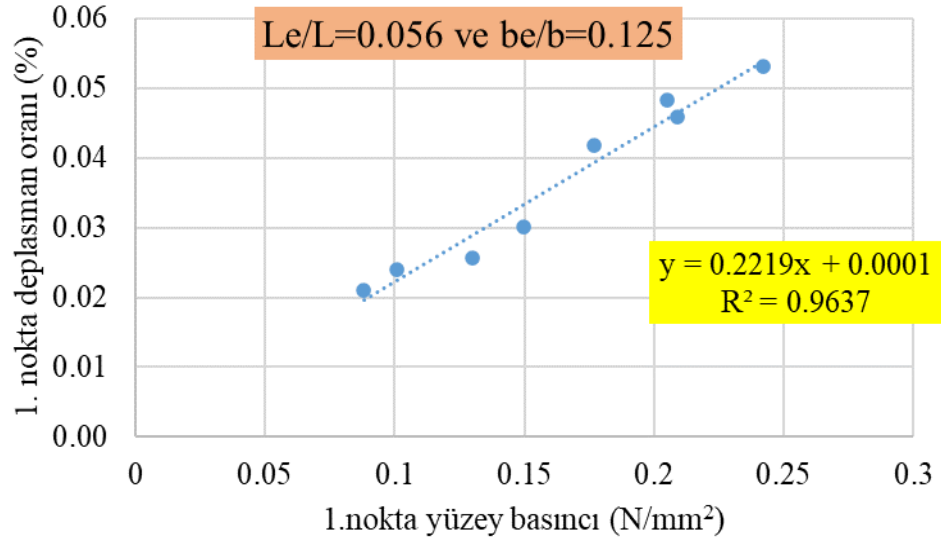
Şekil 5.32’de yüzey basıncı-deplasman ilişkisine bakıldığında, dağılımın kendi içinde önce uzun kenar mesnet aralığı/uzun kenar uzunluğu (L_e/L) ile sonra da kısa kenar aralığı/kısa kenar uzunluğu (b_e/b) ile doğrusal bir denklem ile ifade edilebilecek bir ilişkiye sahip olduğu görülmüştür. Şekil 5.32’deki verilerin L_e/L ve b_e/b ’ye göre kendi içinde alt gruplara ayrıldığı grafikler aşağıda verilmiştir.



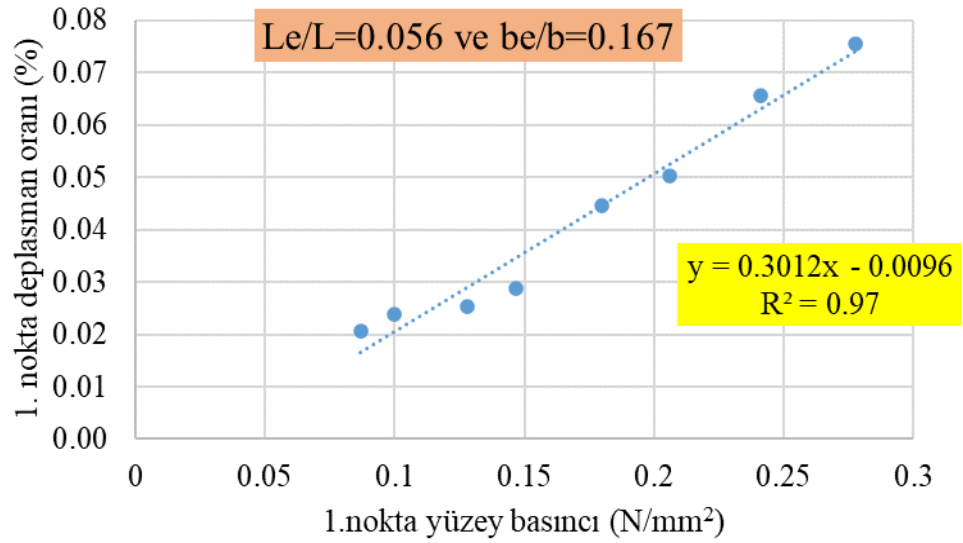
Şekil 5.33: $L_e/L = 0.05$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



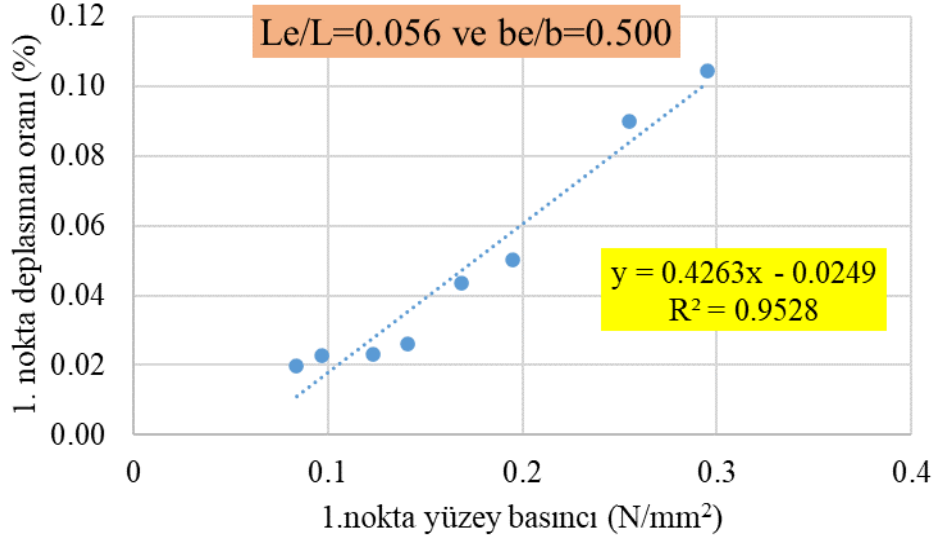
Şekil 5.34: $L_e/L = 0.056$ için 1. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



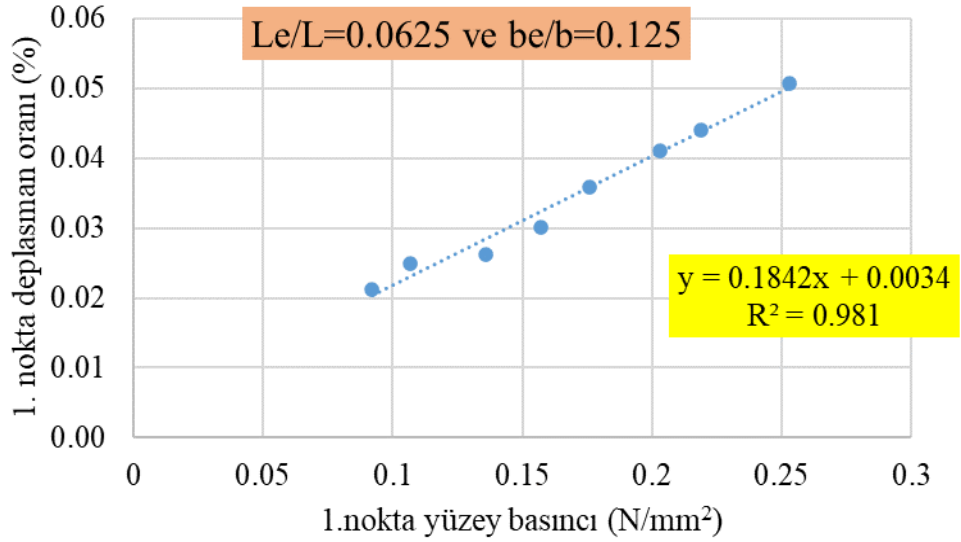
Şekil 5.35: $L_e/L = 0.056$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 29'un alt grupları)



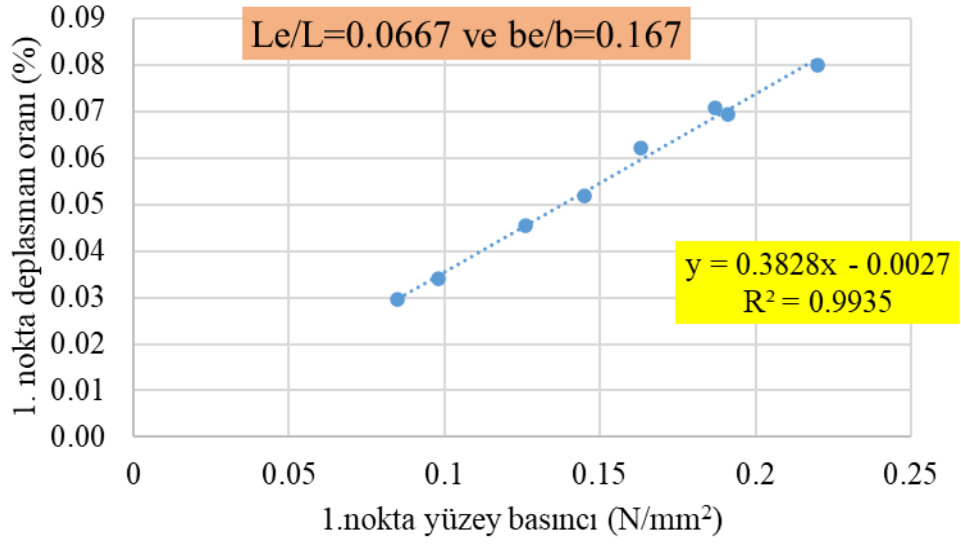
Şekil 5.36: $L_e/L = 0.056$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 29'un alt grupları)



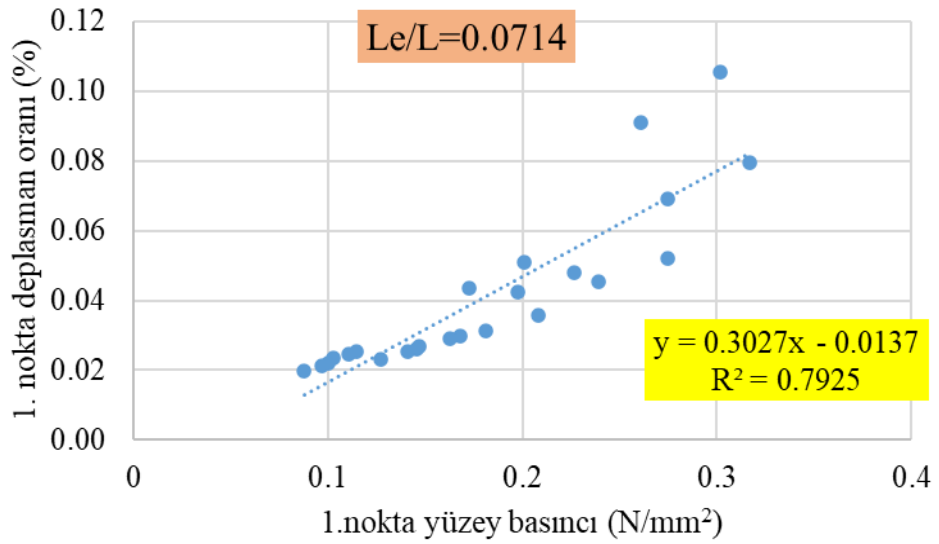
Şekil 5.37: $L_e/L = 0.056$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 29'un alt grupları)



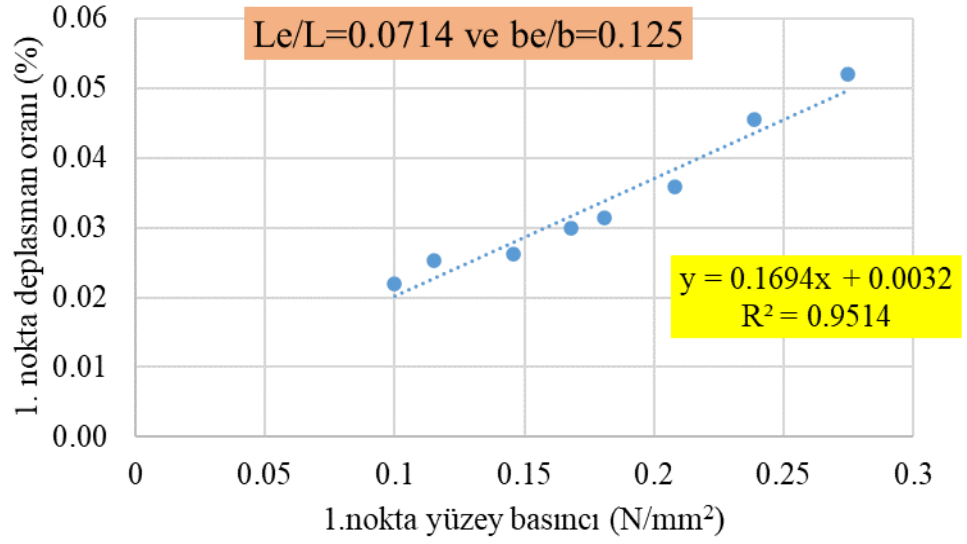
Şekil 5.38: $L_e/L = 0.0625$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



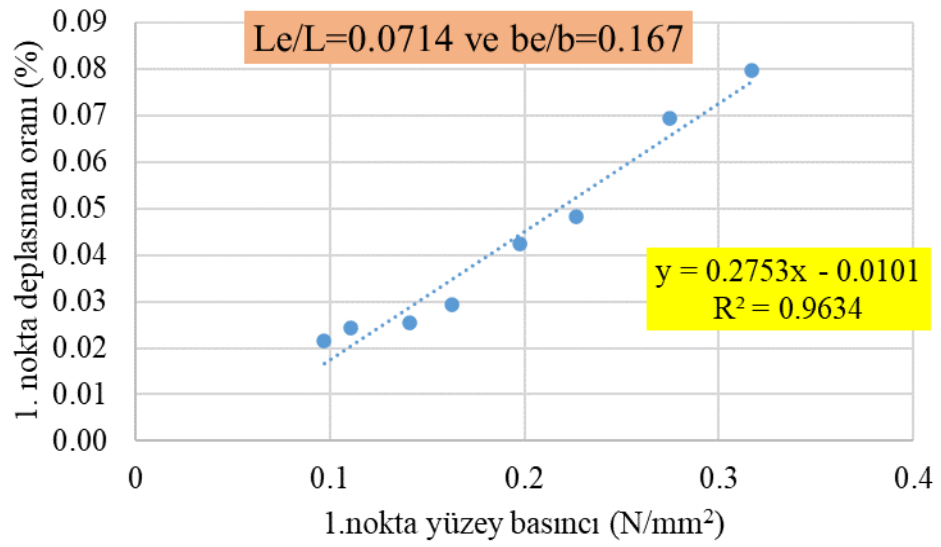
Şekil 5.39: $L_e/L = 0.0667$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



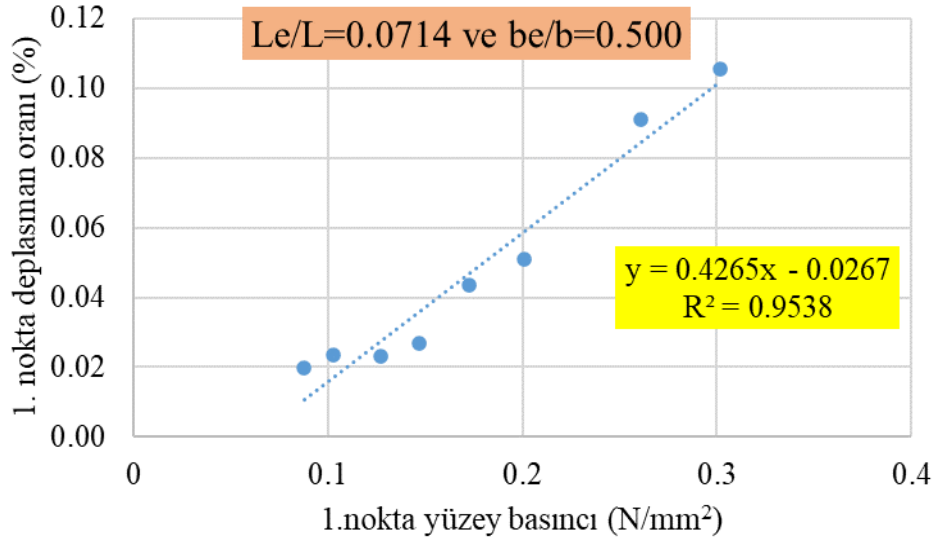
Şekil 5.40: $L_e/L = 0.0714$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



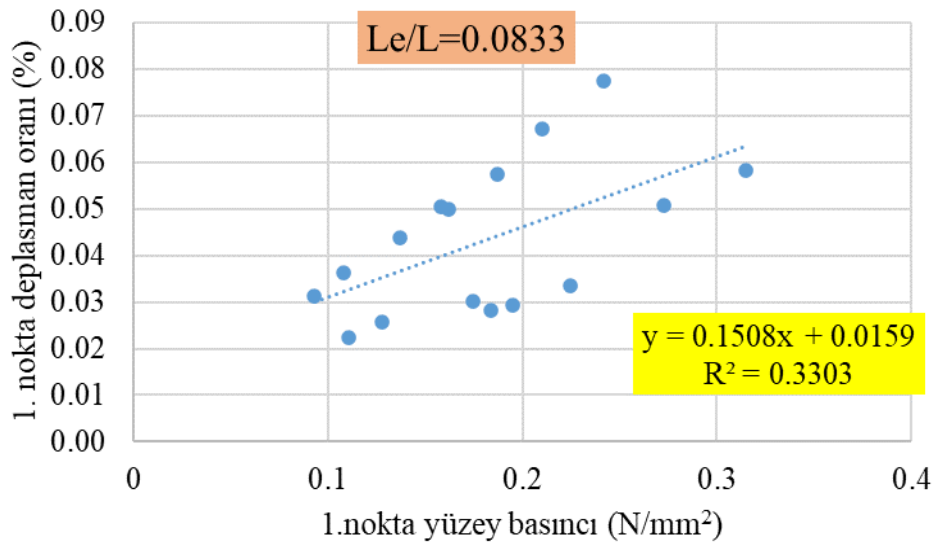
Şekil 5.41: $L_e/L = 0.0714$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 35'in alt grupları)



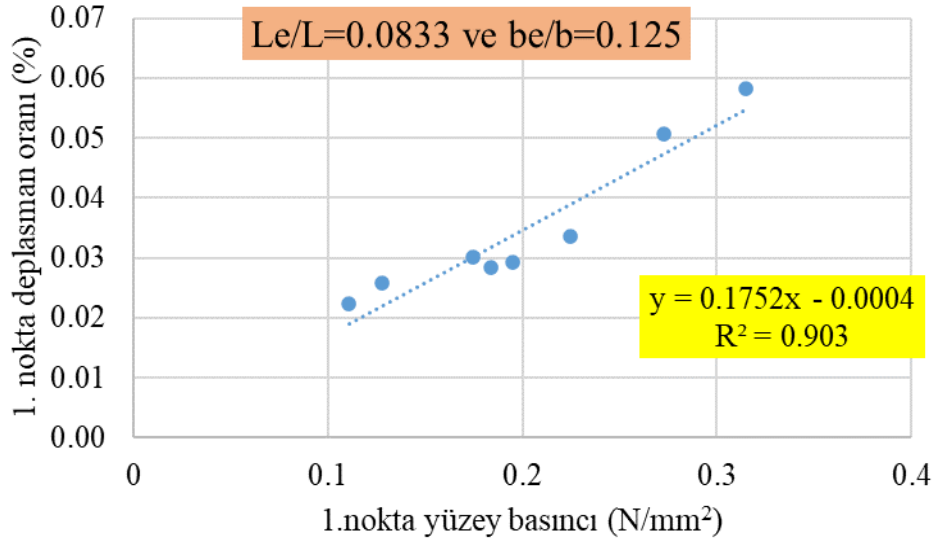
Şekil 5.42: $L_e/L = 0.0714$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 35'in alt grupları)



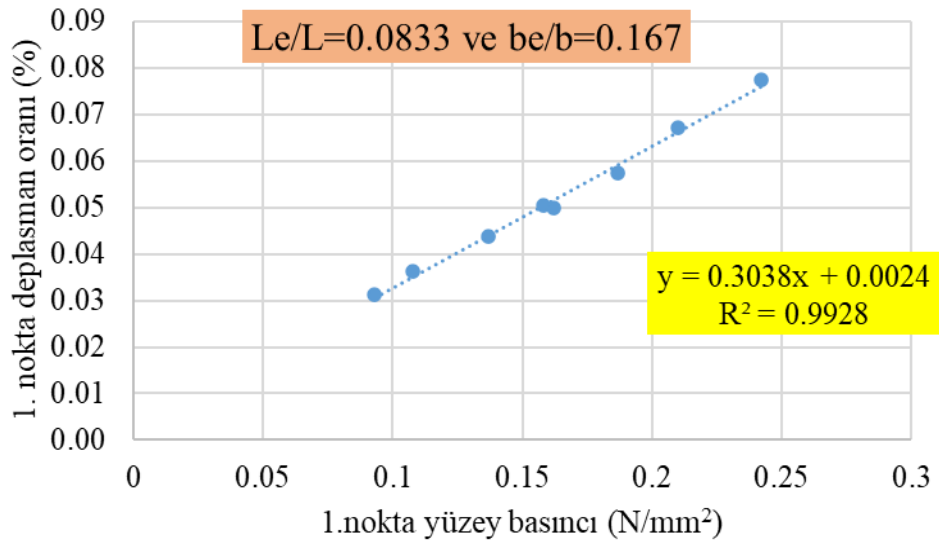
Şekil 5.43: $L_e/L = 0.0714$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 35'in alt grupları)



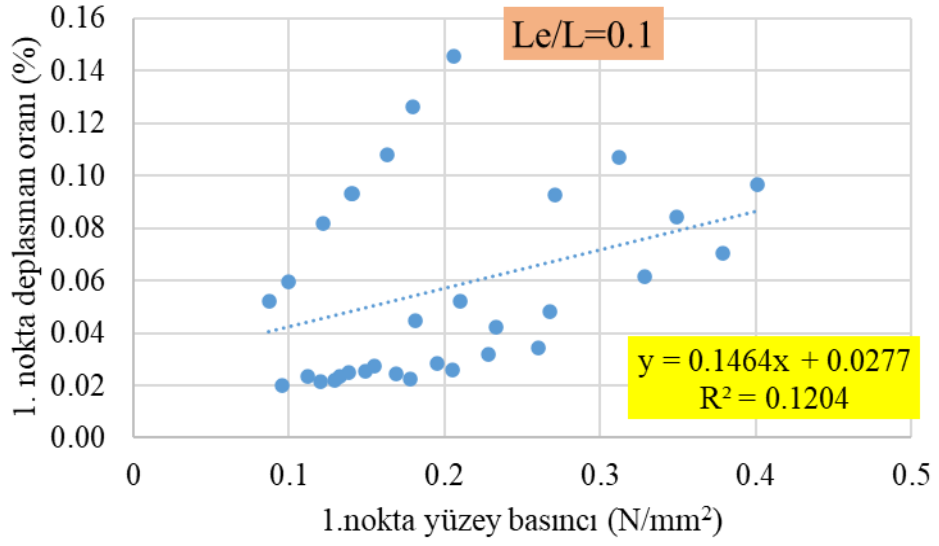
Şekil 5.44: $L_e/L = 0.0833$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



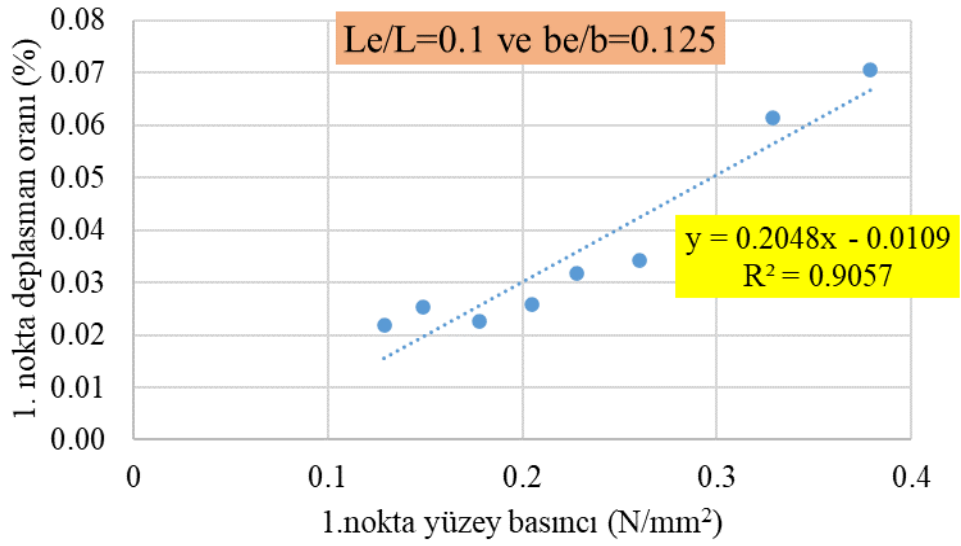
Şekil 5.45: $L_e/L = 0.083$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 39'un alt grupları)



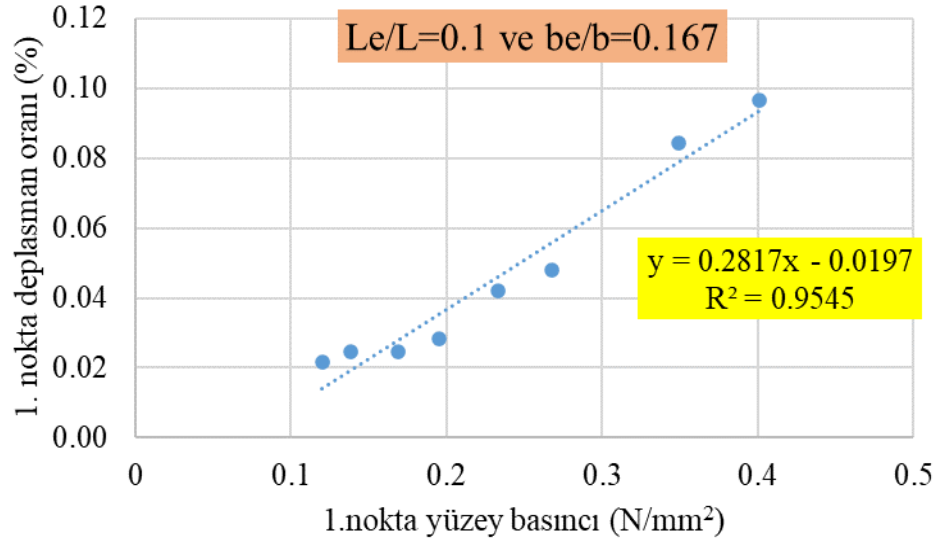
Şekil 5.46: $L_e/L = 0.0833$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 39'un alt grupları)



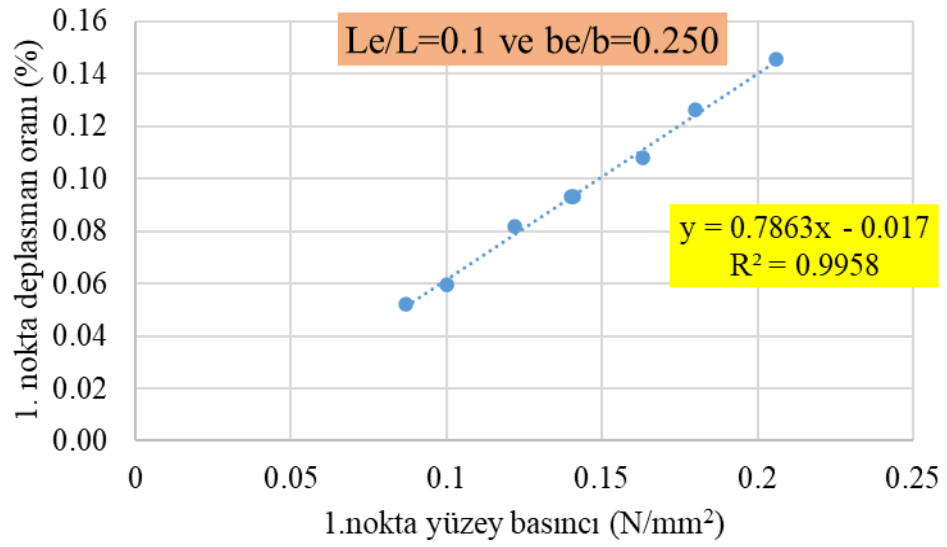
Şekil 5.47: $L_e/L = 0.1$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



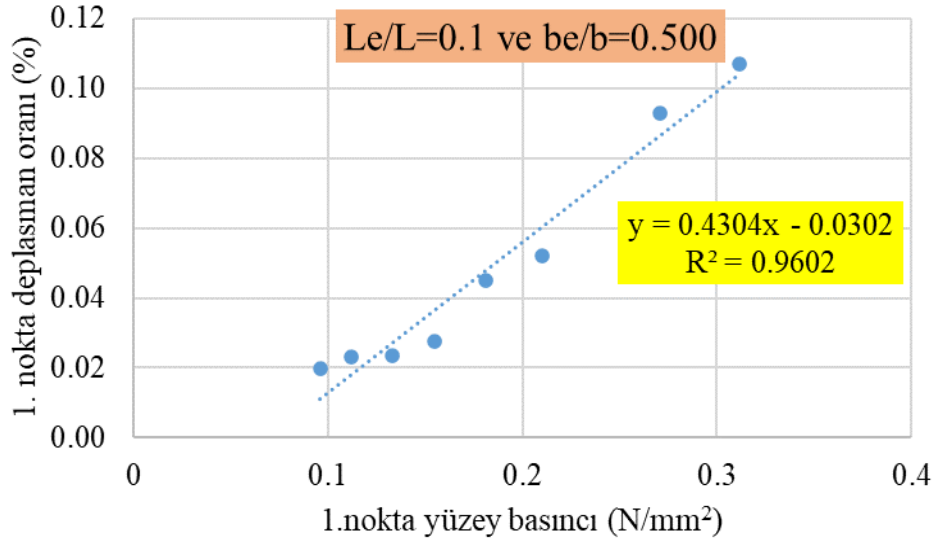
Şekil 5.48: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları)



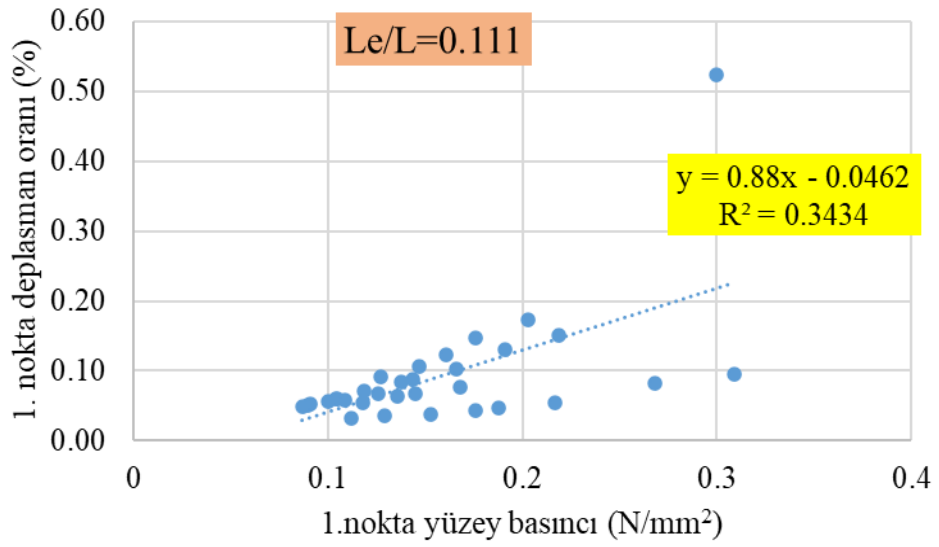
Şekil 5.49: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları)



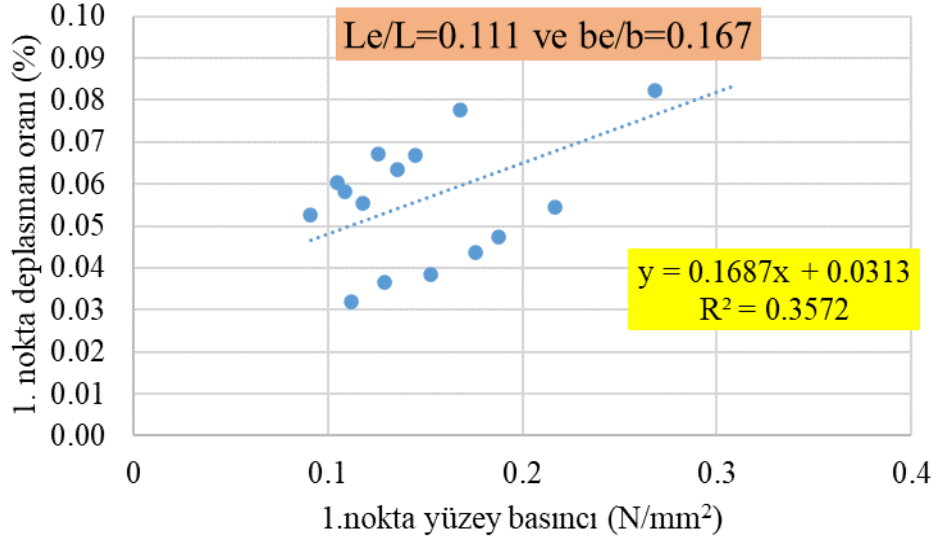
Şekil 5.50: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları)



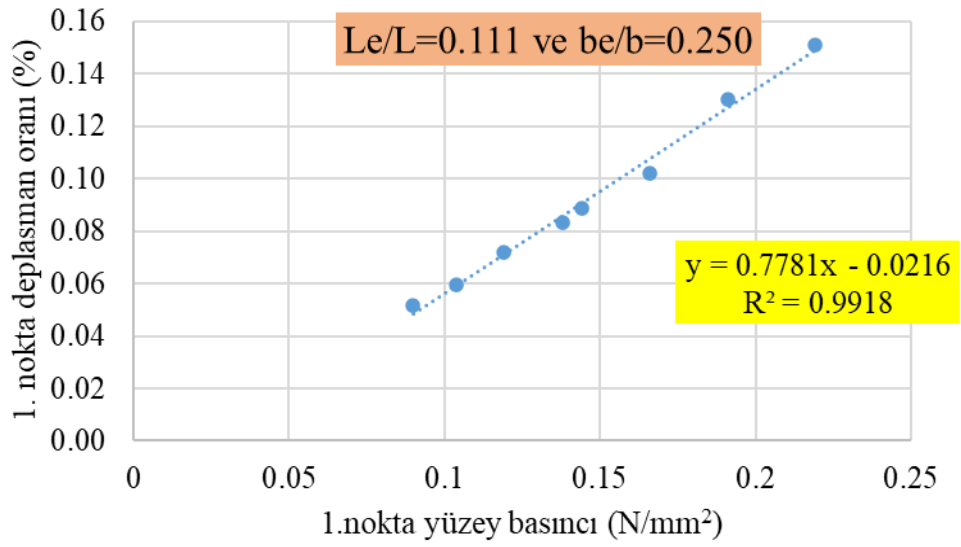
Şekil 5.51: $L_e/L = 0.1$ ve $b_e/b = 0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 42'nin alt grupları)



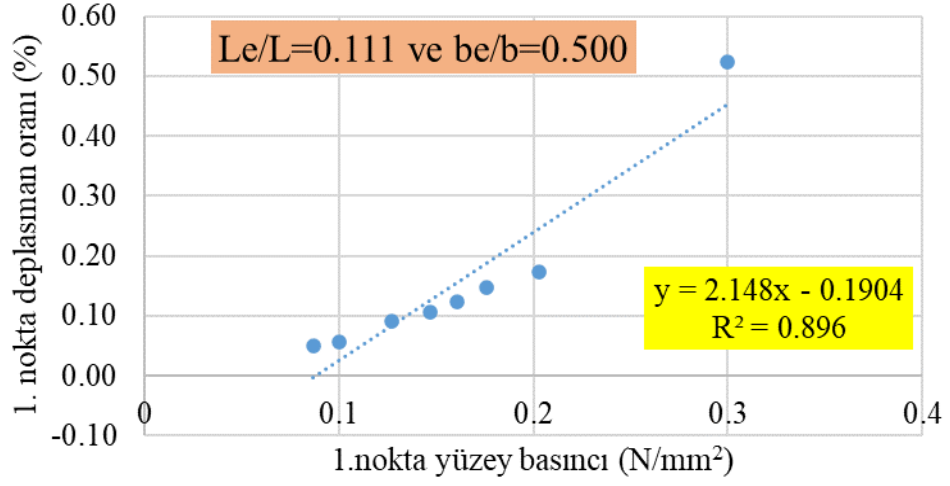
Şekil 5.52: $L_e/L = 0.111$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



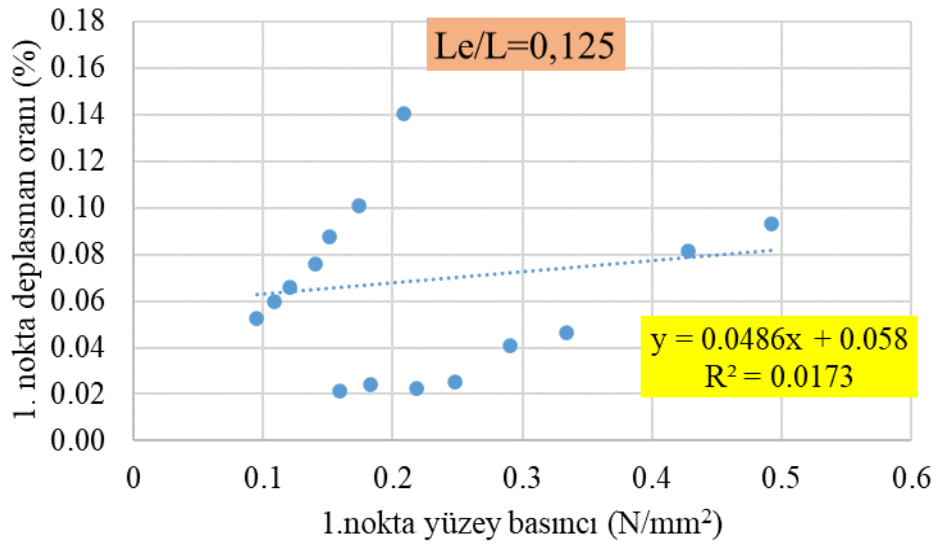
Şekil 5.53: $L_e/L = 0.111$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 47'nin alt grupları)



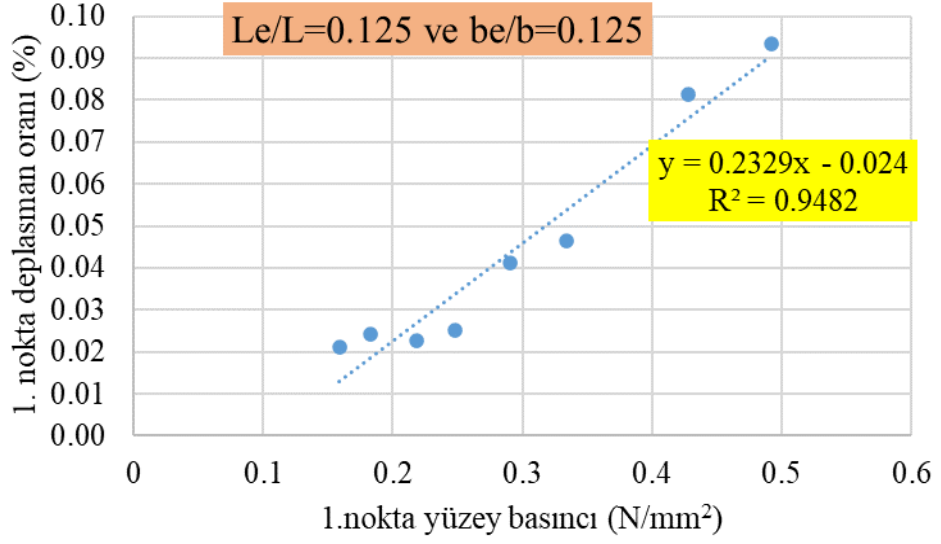
Şekil 5.54: $L_e/L = 0.111$ ve $b_e/b = 0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 47'nin alt grupları)



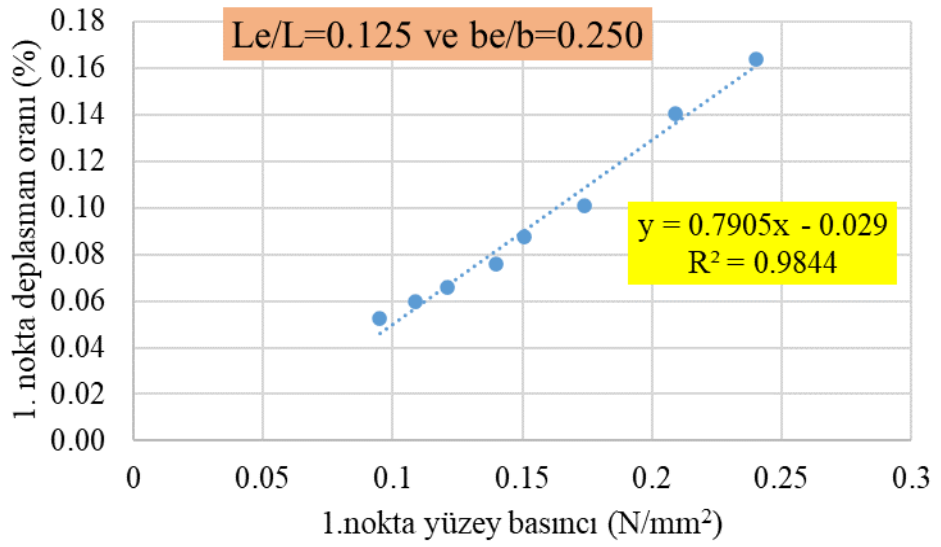
Şekil 5.55: $L_e/L=0.111$ ve $b_e/b=0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 47'nin alt grupları)



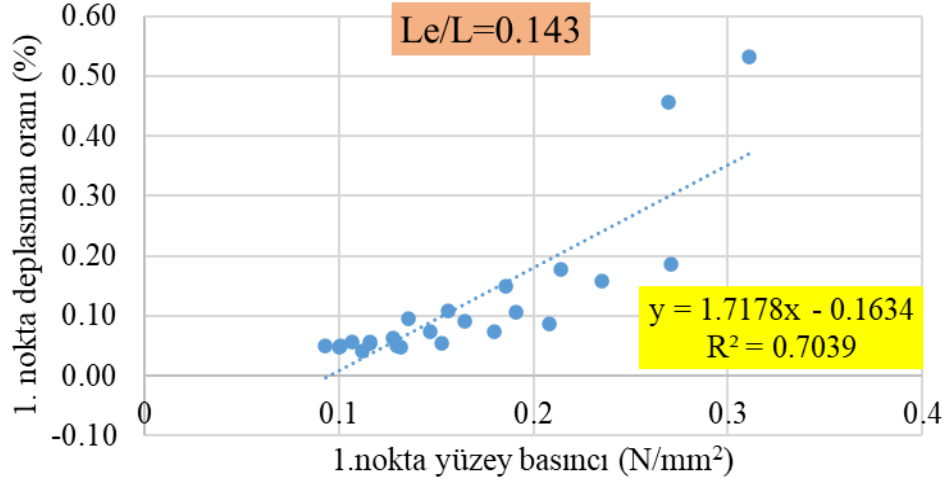
Şekil 5.56: $L_e/L=0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



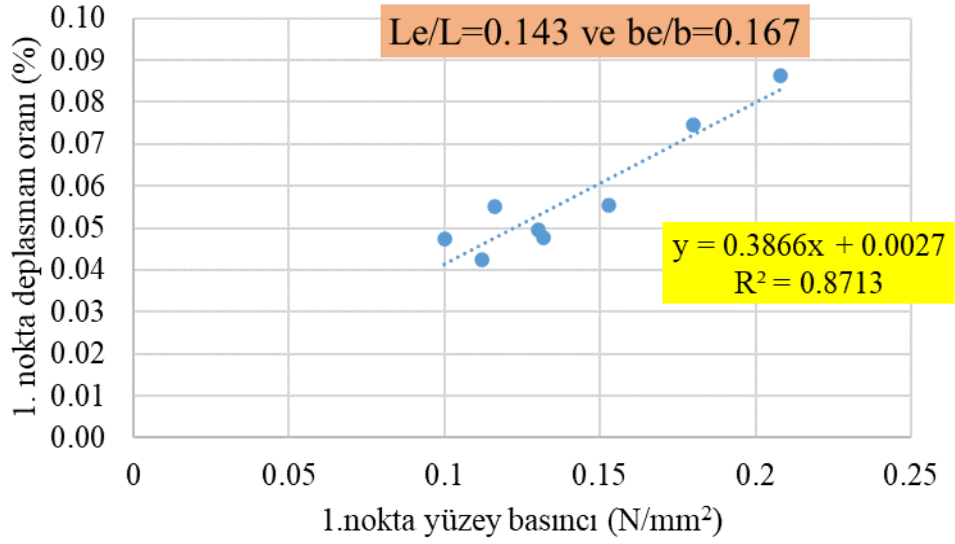
Şekil 5.57: $L_e/L=0.125$ ve $b_e/b=0.125$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 51'in alt grupları)



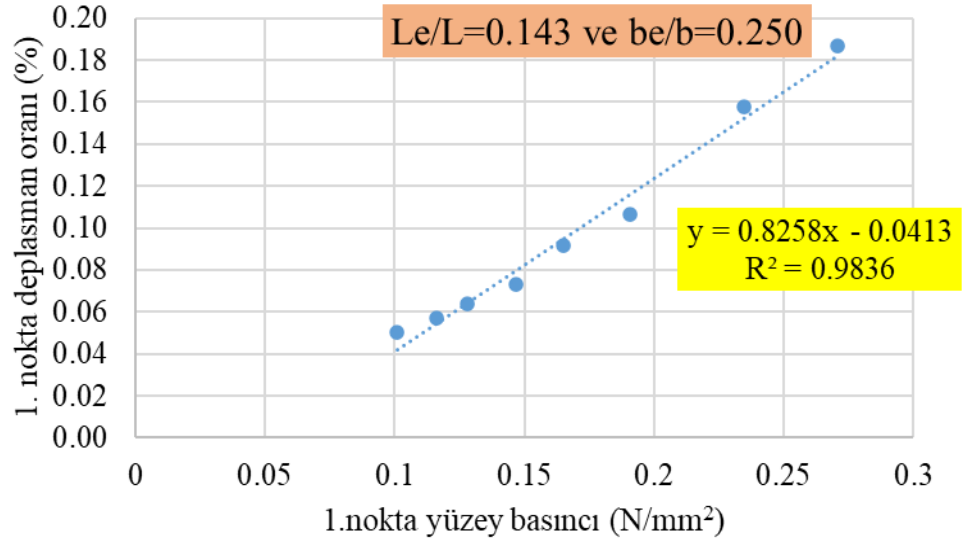
Şekil 5.58: $L_e/L=0.125$ ve $b_e/b=0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 51'in alt grupları)



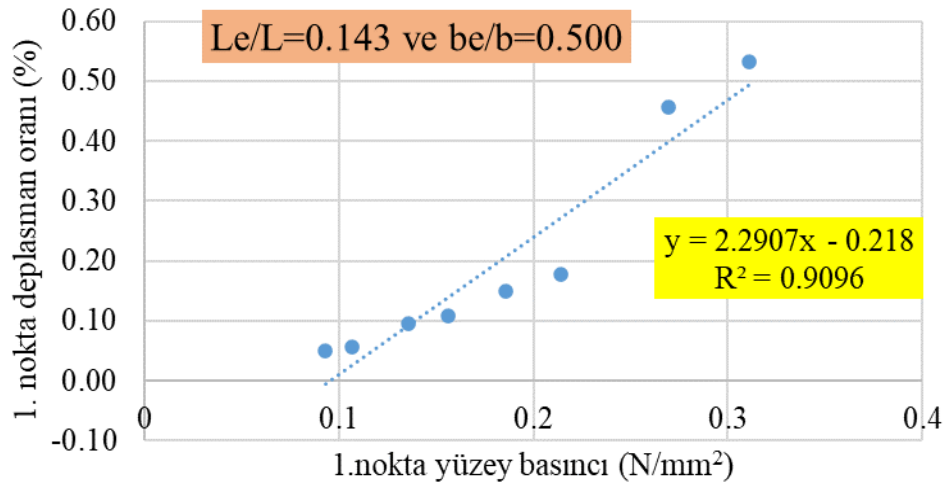
Şekil 5.59: $L_e/L = 0.143$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



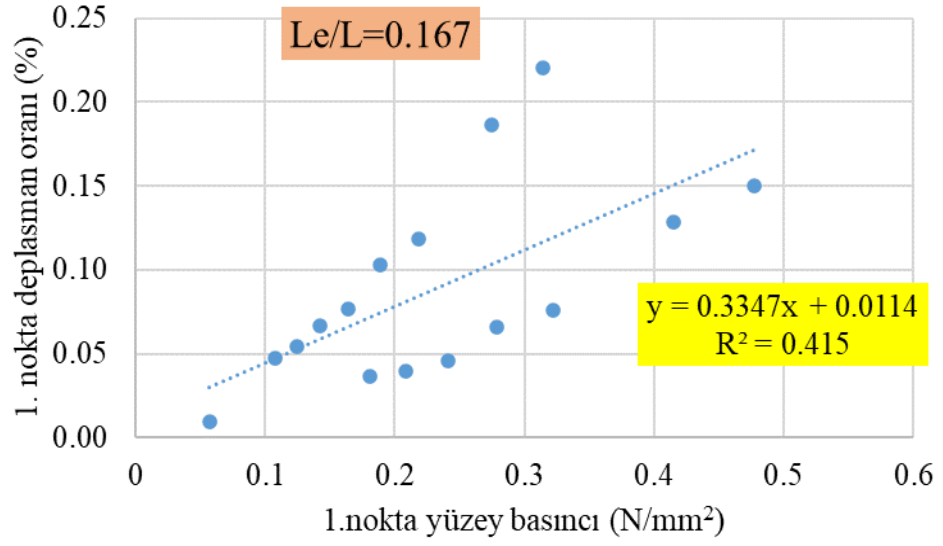
Şekil 5.60: $L_e/L = 0.143$ ve $b_e/b = 0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 54'ün alt grupları)



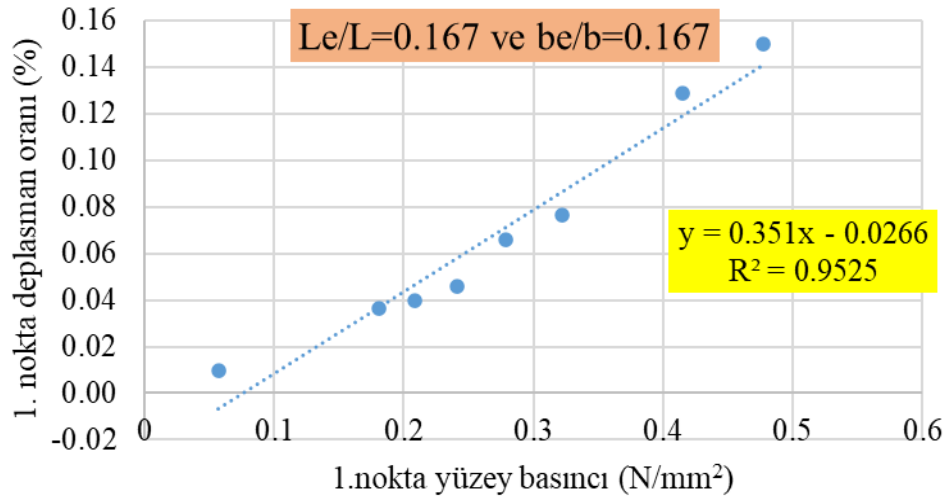
Şekil 5.61: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 54'ün alt grupları)



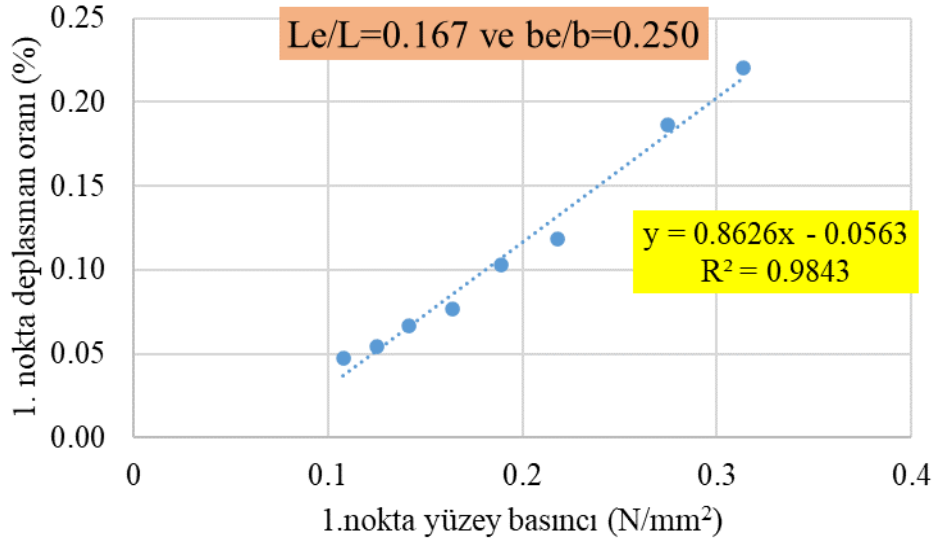
Şekil 5.62: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 54'ün alt grupları)



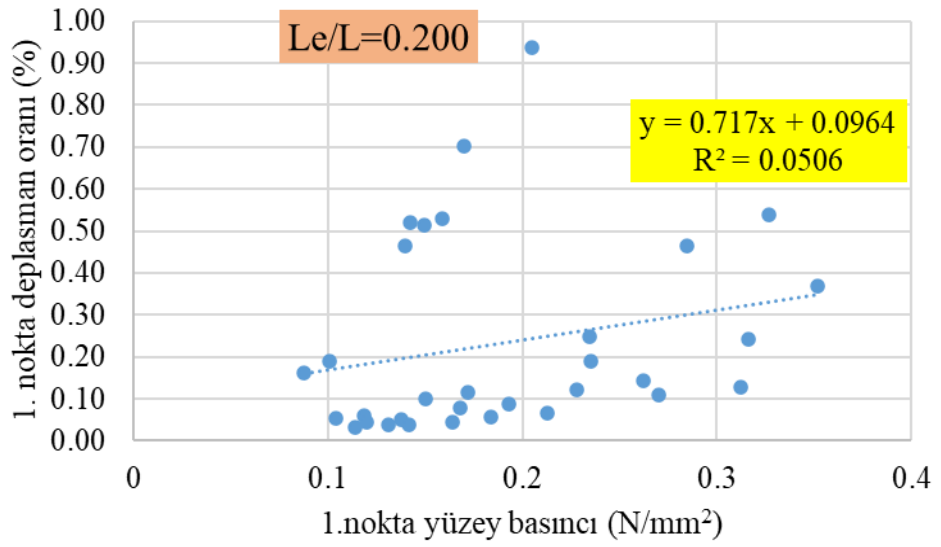
Şekil 5.63: $L_e/L=0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



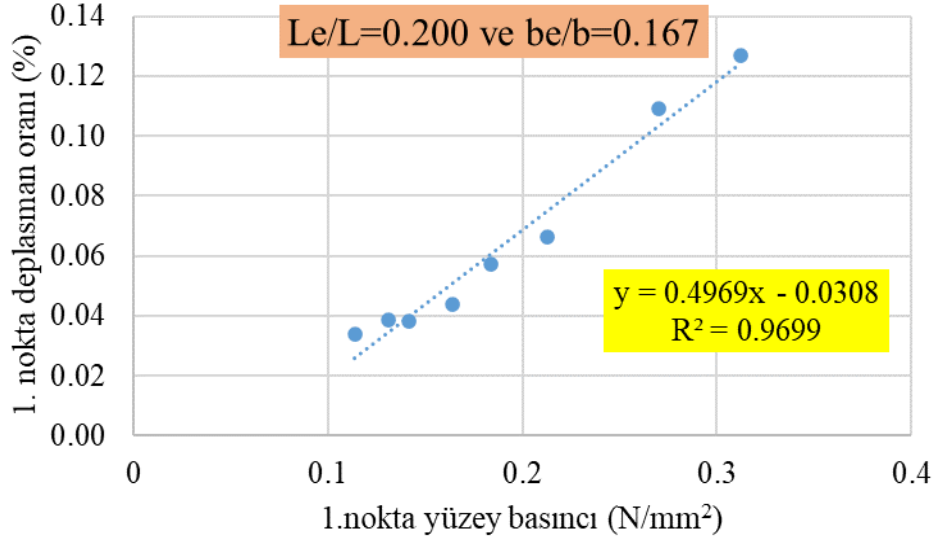
Şekil 5.64: $L_e/L=0.167$ ve $b_e/b=0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 58'in alt grupları)



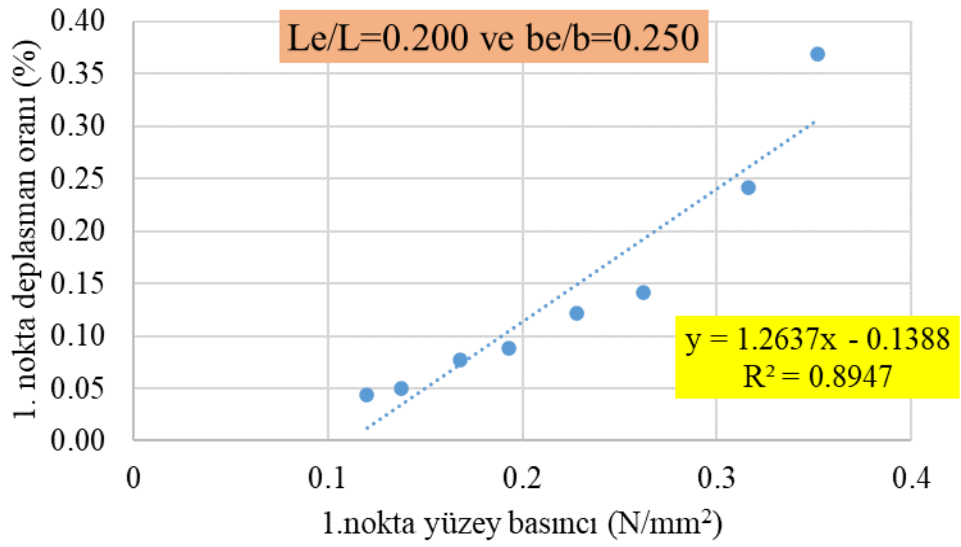
Şekil 5.65: $L_e/L=0.167$ ve $b_e/b=0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 58'in alt grupları)



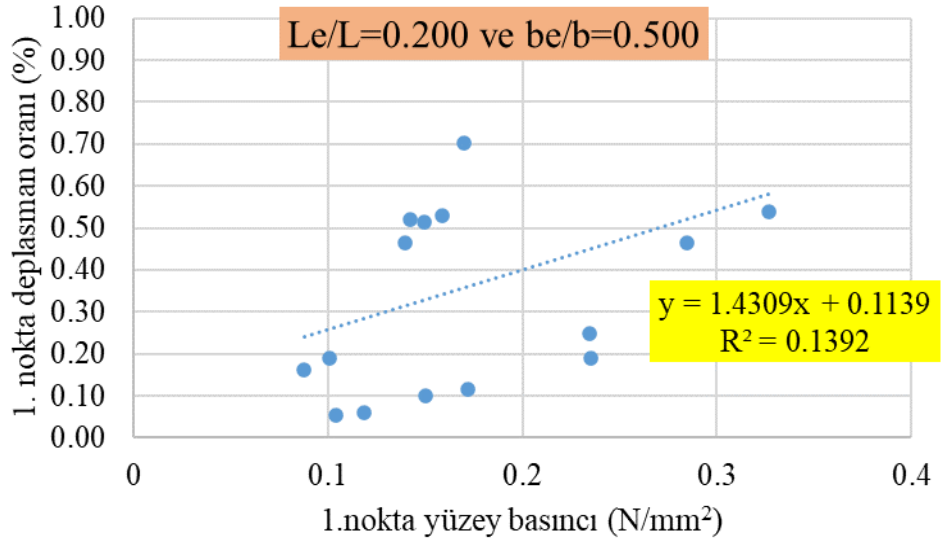
Şekil 5.66: $L_e/L=0.200$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



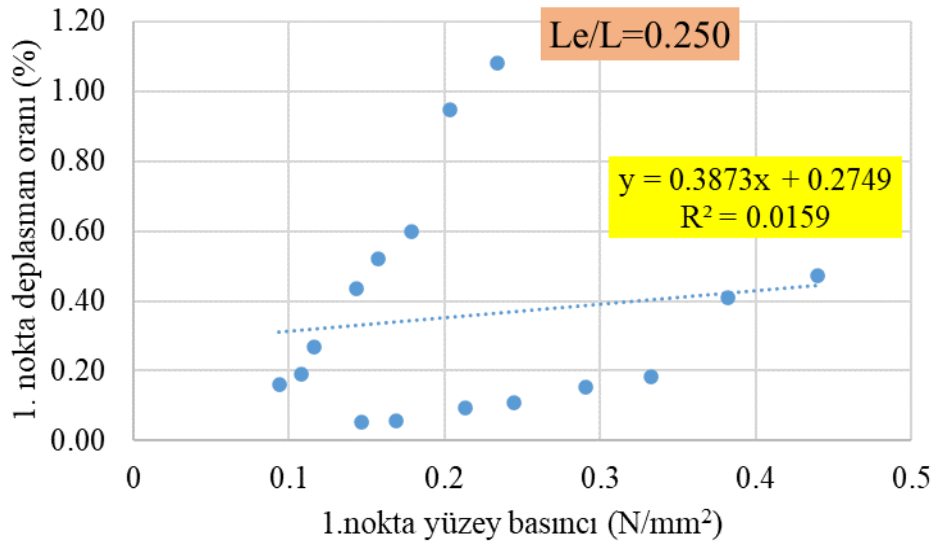
Şekil 5.67: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.167$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 61'in alt grupları)



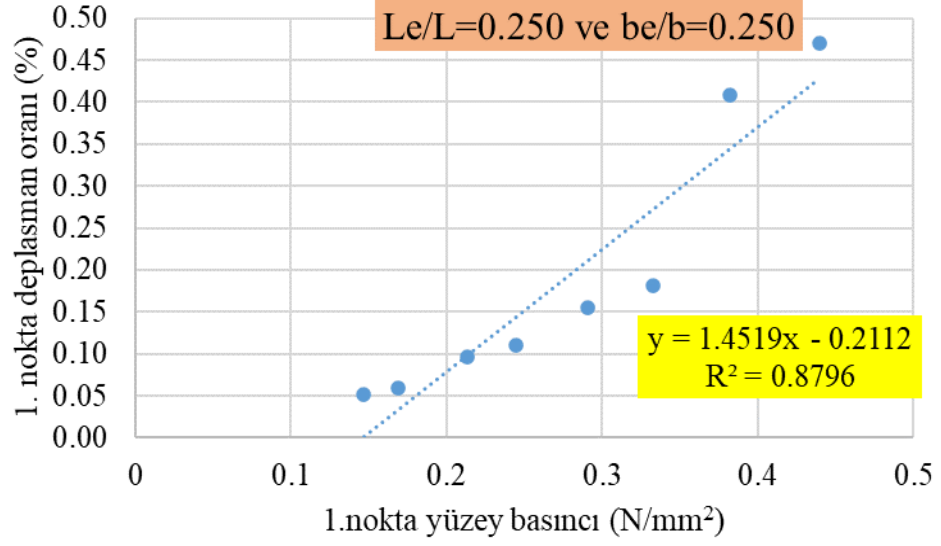
Şekil 5.68: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 61'in alt grupları)



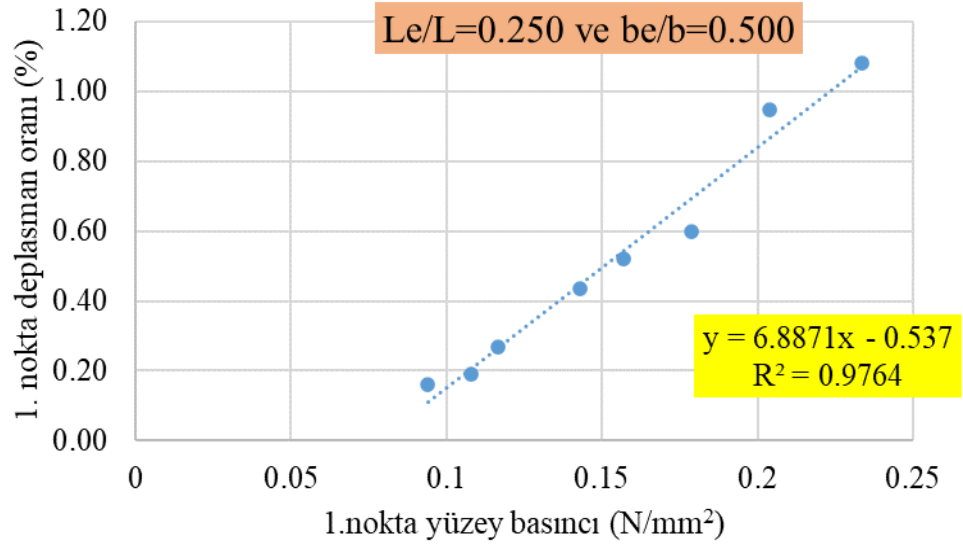
Şekil 5.69: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 61'in alt grupları)



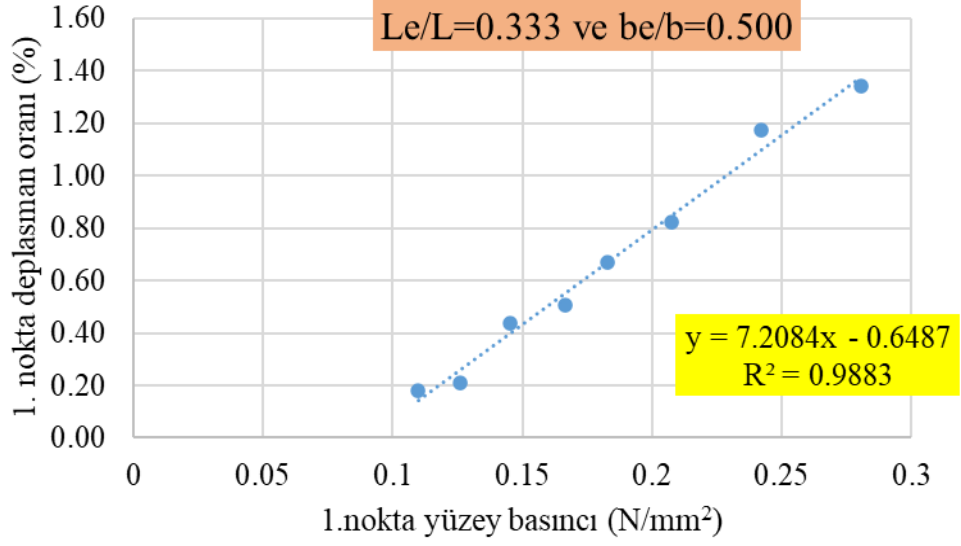
Şekil 5.70: $L_e/L=0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



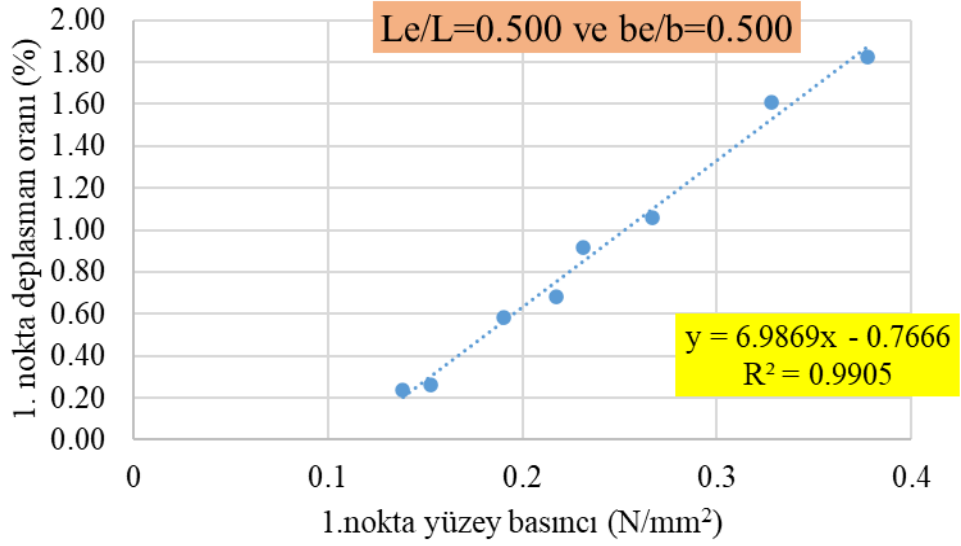
Şekil 5.71: $L_e/L=0.250$ ve $b_e/b=0.250$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 65'in alt grupları)



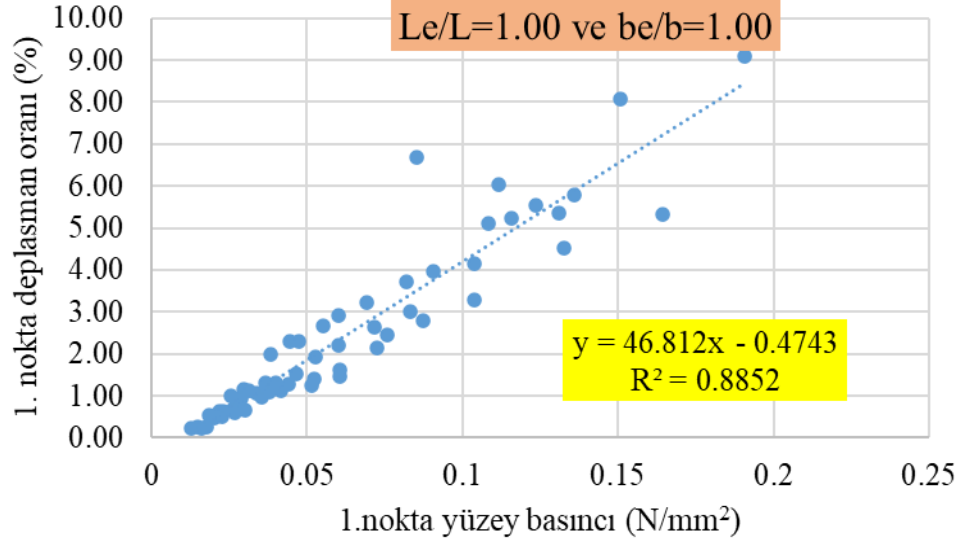
Şekil 5.72: $L_e/L=0.250$ ve $b_e/b=0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 65'in alt grupları)



Şekil 5.73: $L_e/L=0.333$ ve $b_e/b=0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



Şekil 5.74: $L_e/L=0.500$ ve $b_e/b=0.500$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



Şekil 5.75: $L_e/L=1.00$ ve $b_e/b=1.00$ için 1 noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi

İncelenen parametreler ve gözlemlenen durumlar ışığında akma noktasındaki deplasman değerinin öncelikle aynı noktadaki yüzey basıncı değeri ile doğrusal bir ilişki içinde, daha sonra kendi içlerinde sırasıyla L_e/L ve b_e/b ile doğrusal bir denklem ile ifade edilebilecek bir ilişkiye sahip olduğu görülmüştür. Akma noktası deplasman değerleri için matematiksel model eşitlik (5.7) ve (5.8)'de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$DR_1 = \left[\left(d_{11} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{12} \right) \cdot \frac{L_e}{L} + \left(d_{13} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{14} \right) \right] \cdot SP_1 \quad (5.7)$$

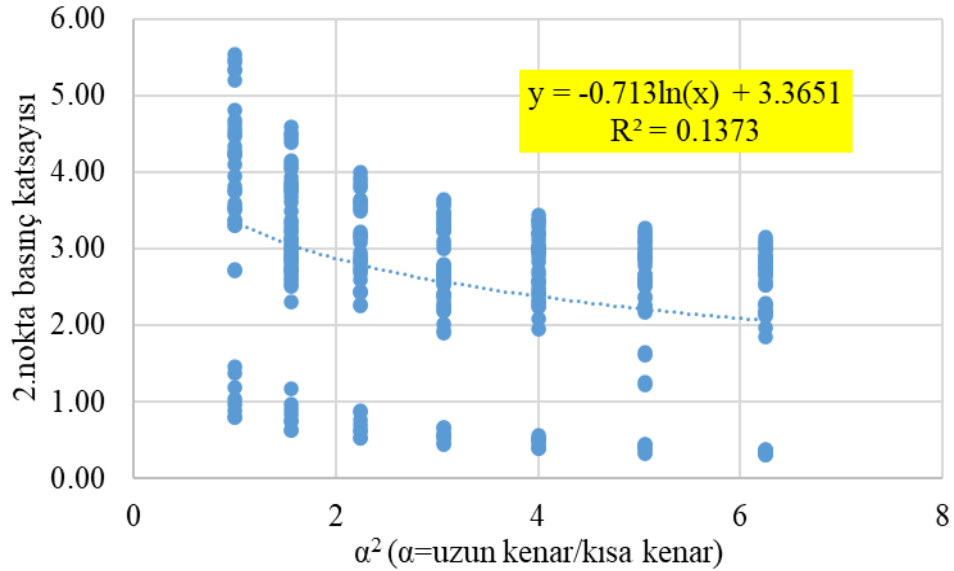
$$+ \left[\left(d_{15} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{16} \right) \cdot \frac{L_e}{L} + \left(d_{17} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{18} \right) \right]$$

$$DR_1 = 100 \cdot \frac{\Delta_1}{b} \quad (5.8)$$

Denklemden verilen DR_1 1.noktaya ait deplasman oranını, Δ_1 1.noktaya ait deplasman değerini (mm), L panelin uzun kenar uzunluğunu (mm) ve L_e uzun kenar mesnet aralığını (mm) ifade etmektedir. Ayrıca denklemden kullanılan katsayılar $d_{11}=68.16527$, $d_{12}=-18.57803$, $d_{13}=-6.28402$, $d_{14}=2.46107$, $d_{15}=0.17364$, $d_{16}=-0.6805$, $d_{17}=0.10727$ ve $d_{18}=-0.01903$ şeklinde elde edilmiştir. 1.karakteristik nokta deplasman değerleri eşitlik (5.8)'den Δ_1 'i çekerek elde edilir.

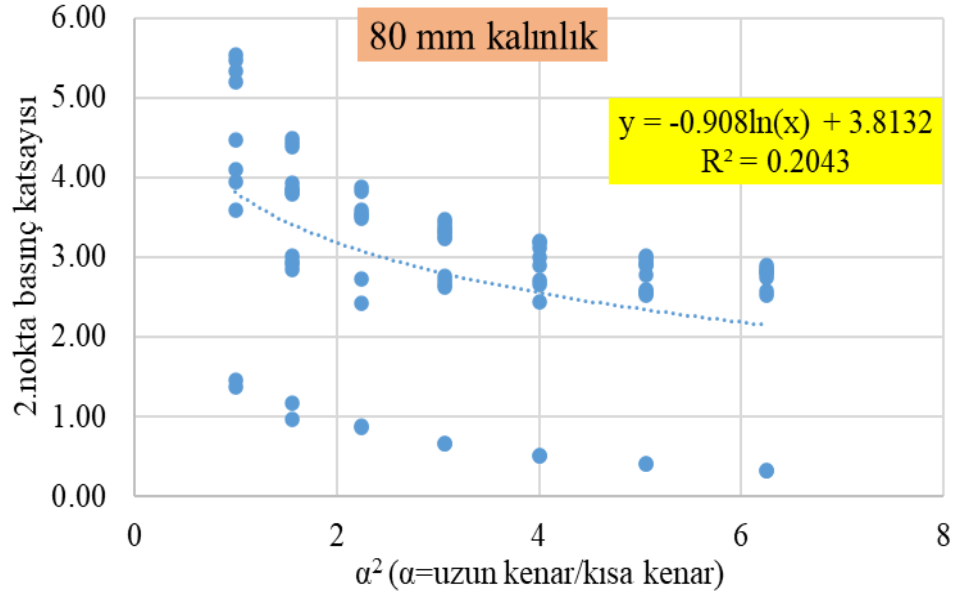
5.3 2.Karakteristik Nokta Yüzey Basıncı Değeri

1.karakteristik nokta basınç değeri için yapılan yaklaşım elastik teoriye dayanıyordu ve elastik teori için geçerli denklemlerden yararlanılmıştı. 2.karakteristik nokta basınç değeri için çözüm yaklaşımı aranırken, Şekil 5.5'te verildiği gibi, 1.karakteristik nokta ile 2.karakteristik nokta yüzey basıncı arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki dikkat çekmiştir. Dolayısıyla burada, 1.karakteristik nokta basınç değerleri için izlenen çözüm prosedürü üzerinden ilerlenerek katsayılar farklılaştırılmıştır. Yine moment ve gerilme denklemleri kullanılarak elde edilen bir “k” basınç katsayısı ile incelenen parametrelerin korelasyonuna bakılmıştır.

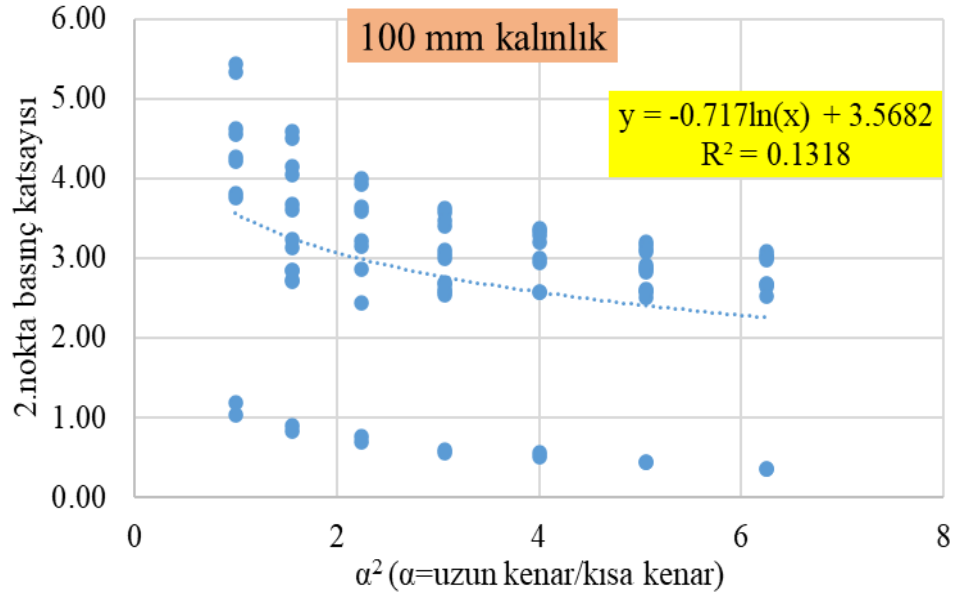


Şekil 5.76: Göçme noktası için basınç katsayısının α^2 ile değişimi

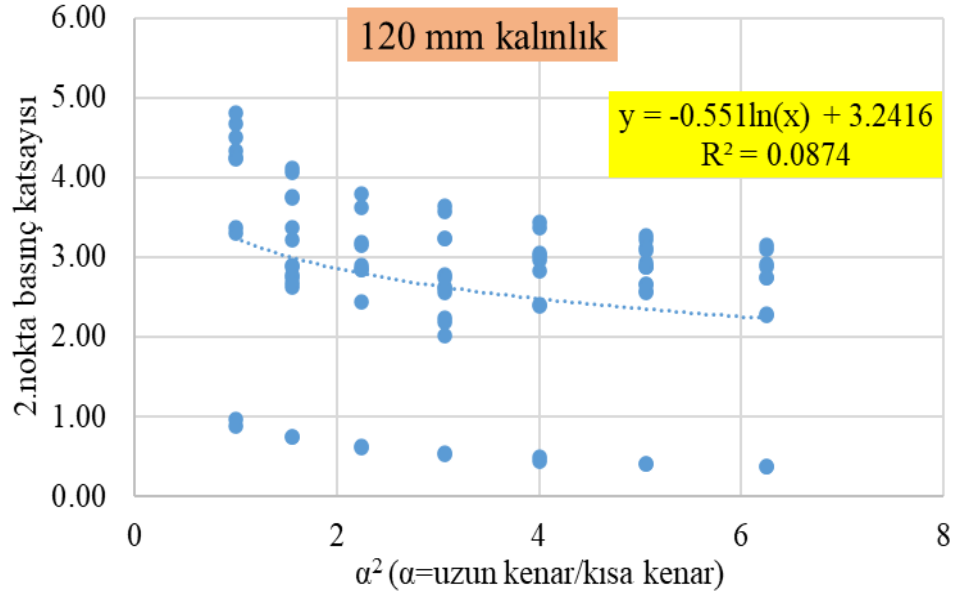
2.karakteristik noktadaki basınç katsayısının α^2 ile logaritmik bir denklemle ifade edilebilecek bir ilişkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca bu verilerin kendi içlerinde, 1.noktada olduğu gibi önce t ile daha sonra da b_e/b ile doğrusal bir denklem ile ifade edilebilecek bir ilişkiye sahip oldukları görülmüştür. Verilerin alt gruplara ayrıldığı grafikler aşağıda verilmiştir.



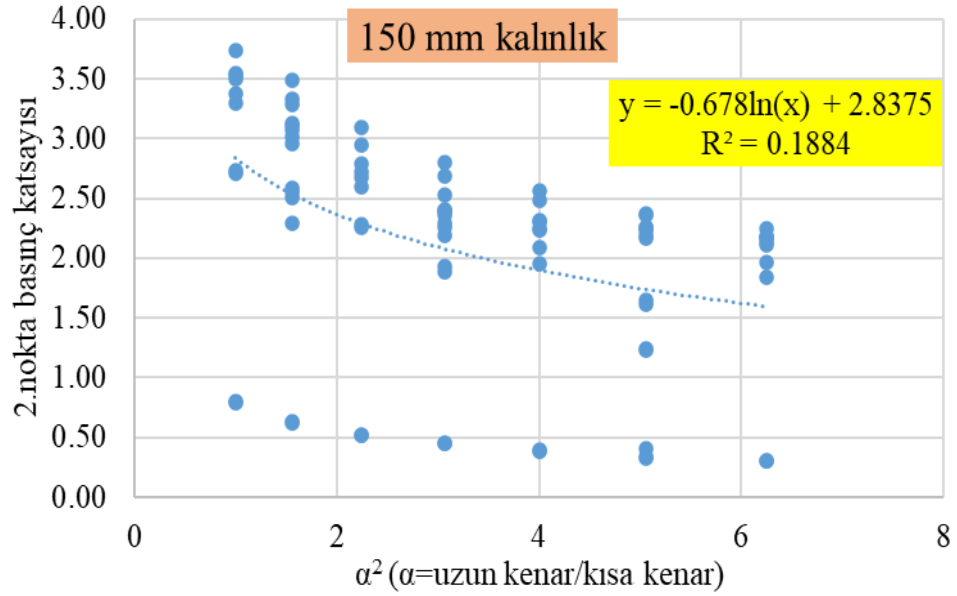
Şekil 5.77: 80 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



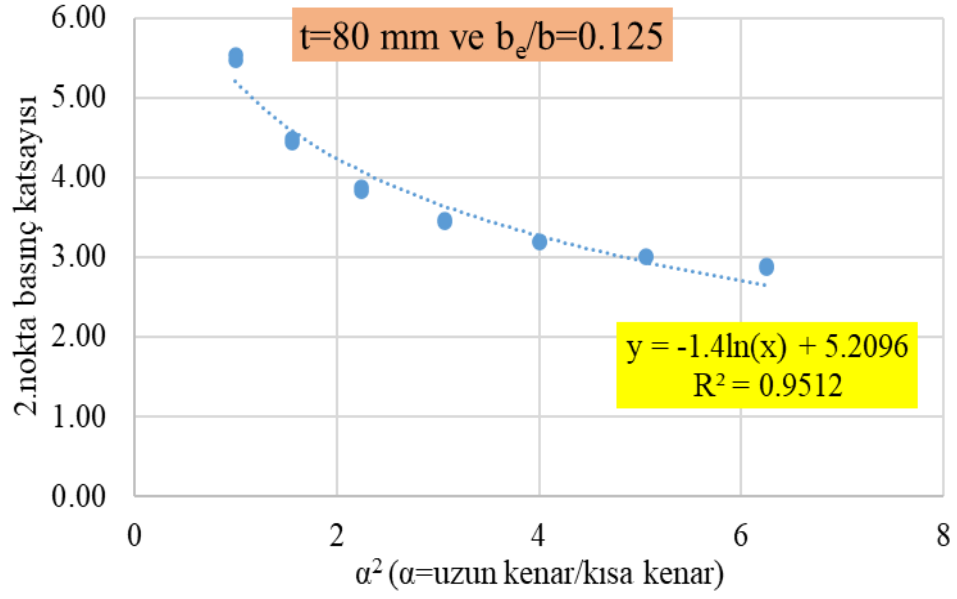
Şekil 5.78: 100 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



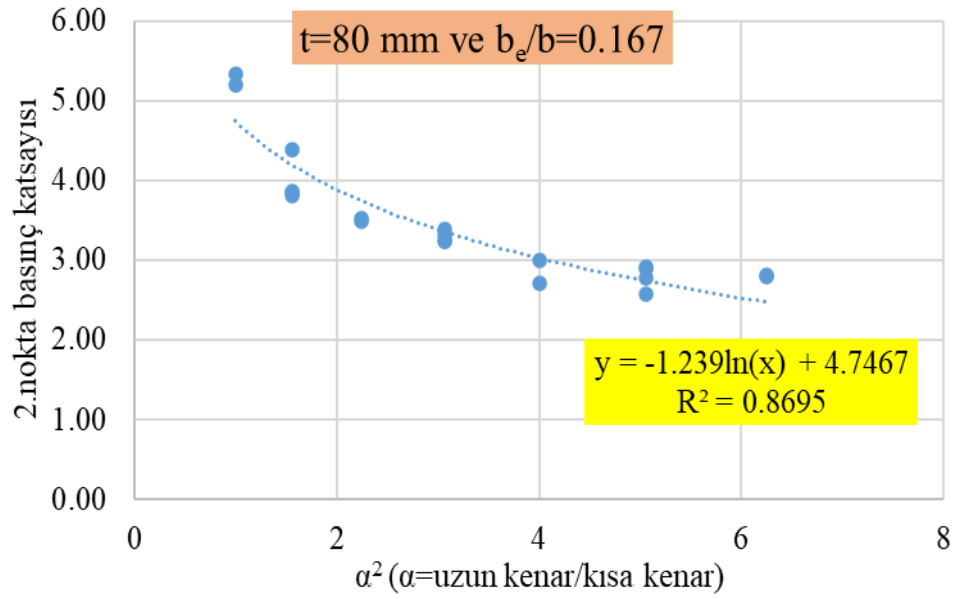
Şekil 5.79: 120 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



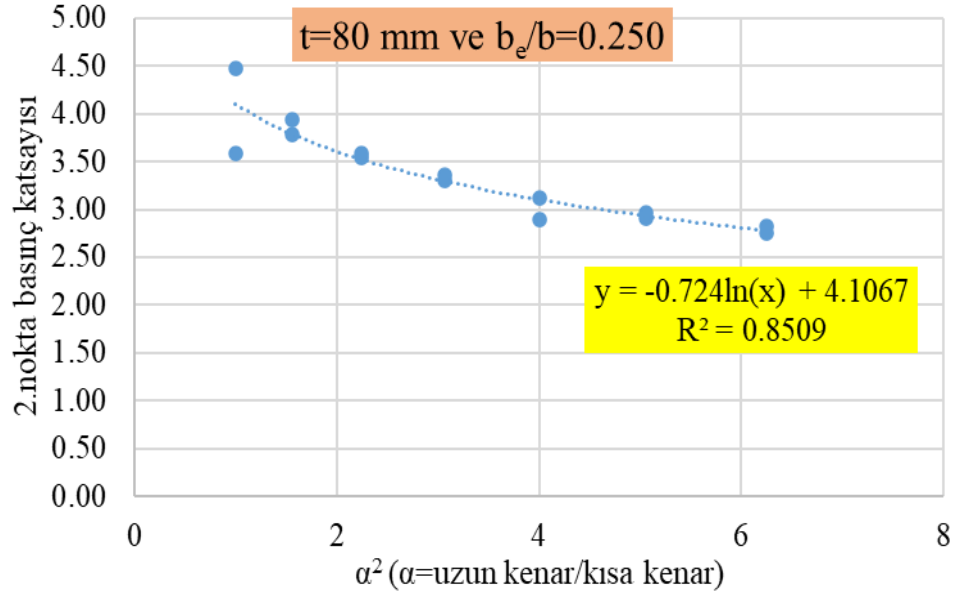
Şekil 5.80: 150 mm paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



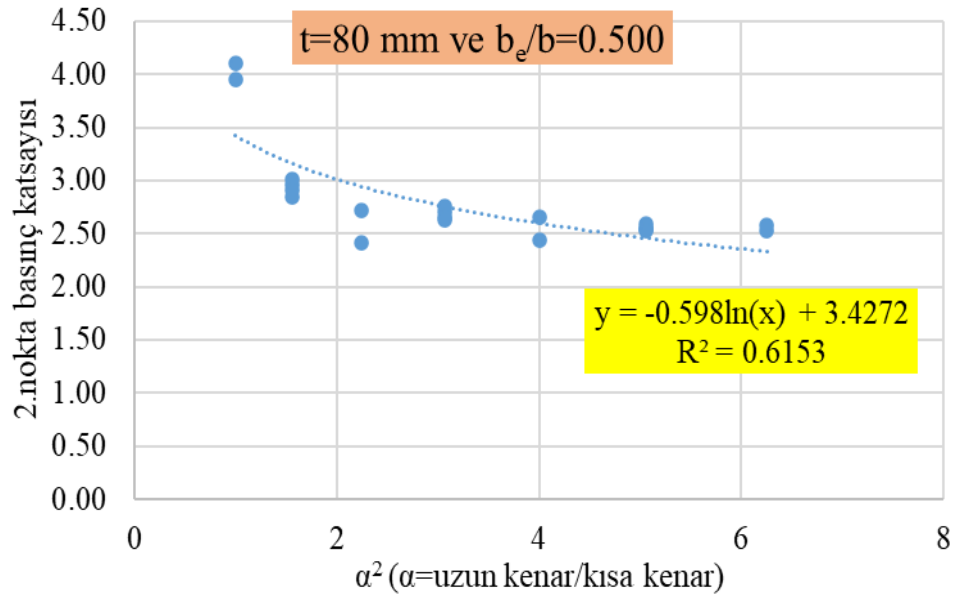
Şekil 5.81: $t=80$ mm ve $b_e/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



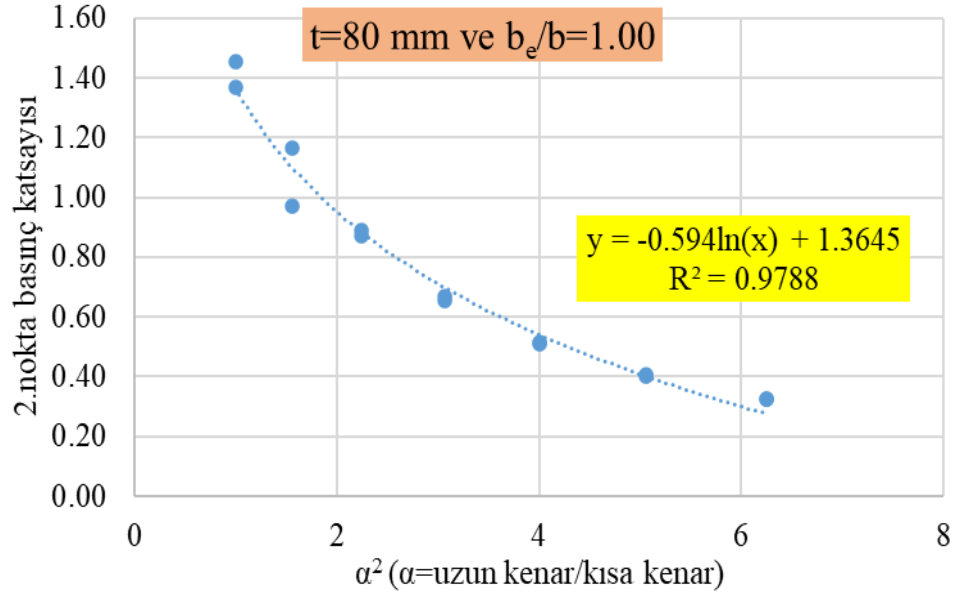
Şekil 5.82: $t=80$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



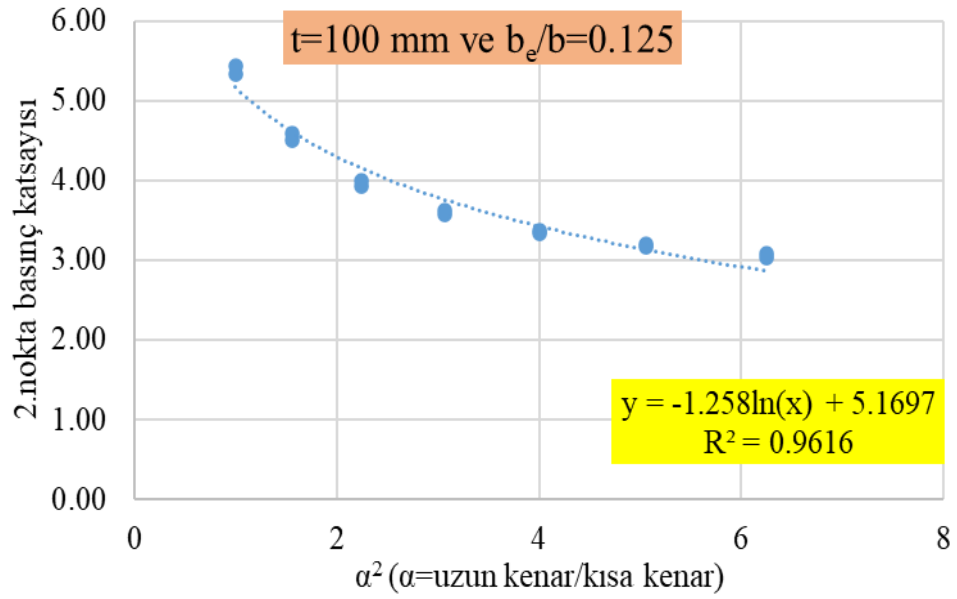
Şekil 5.83: $t=80$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



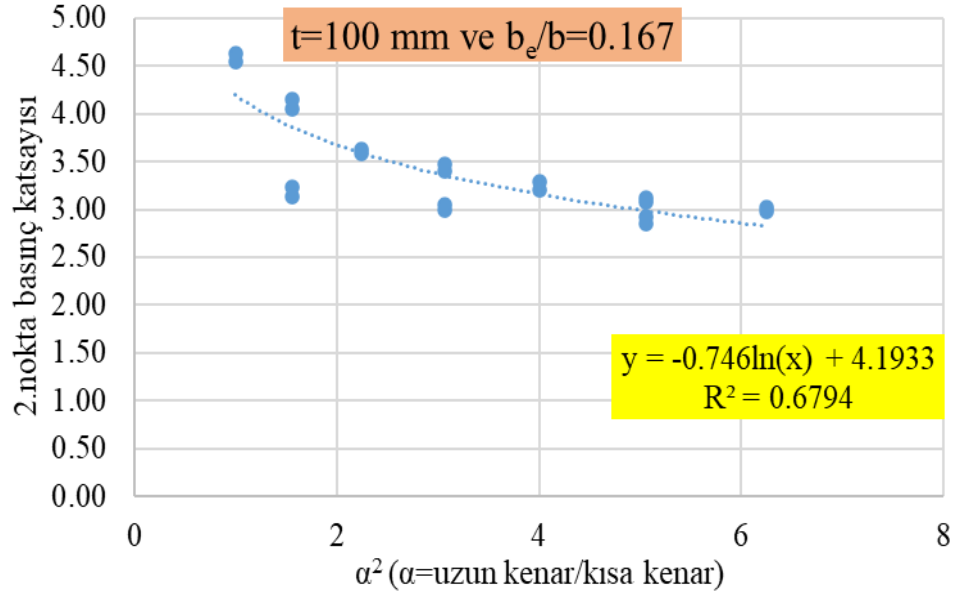
Şekil 5.84: $t=80$ mm ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



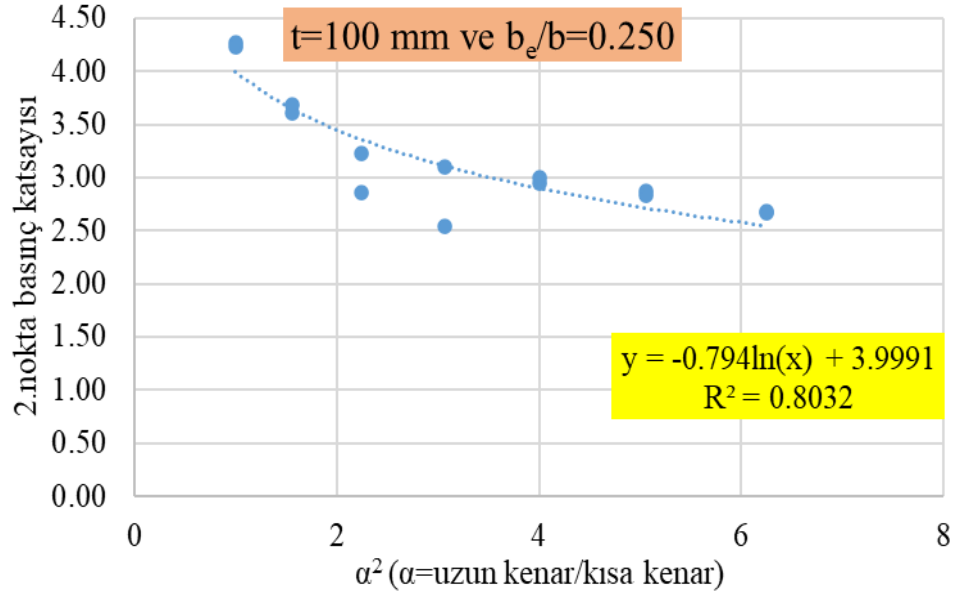
Şekil 5.85: $t=80$ mm ve $b_e/b = 1.00$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



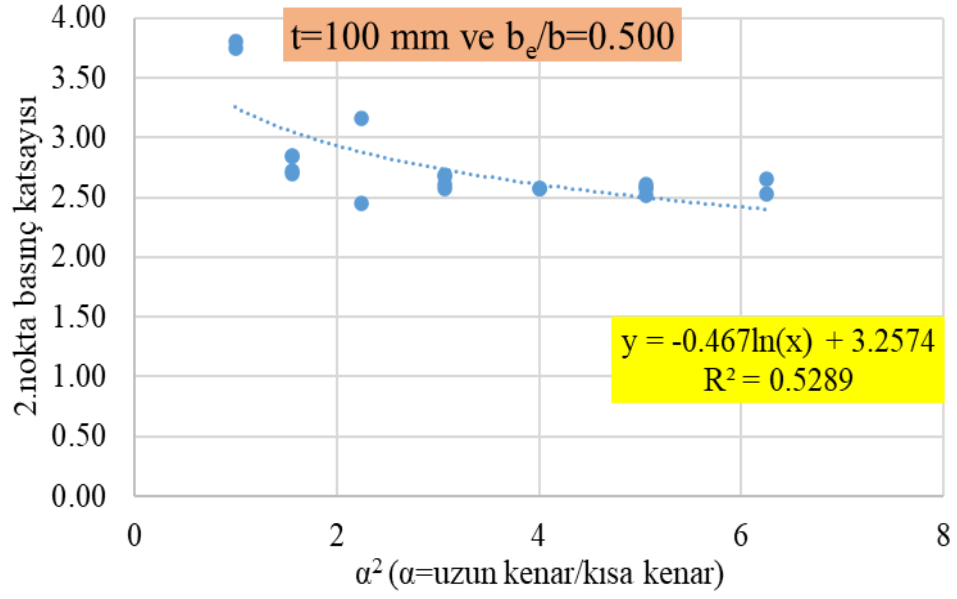
Şekil 5.86: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



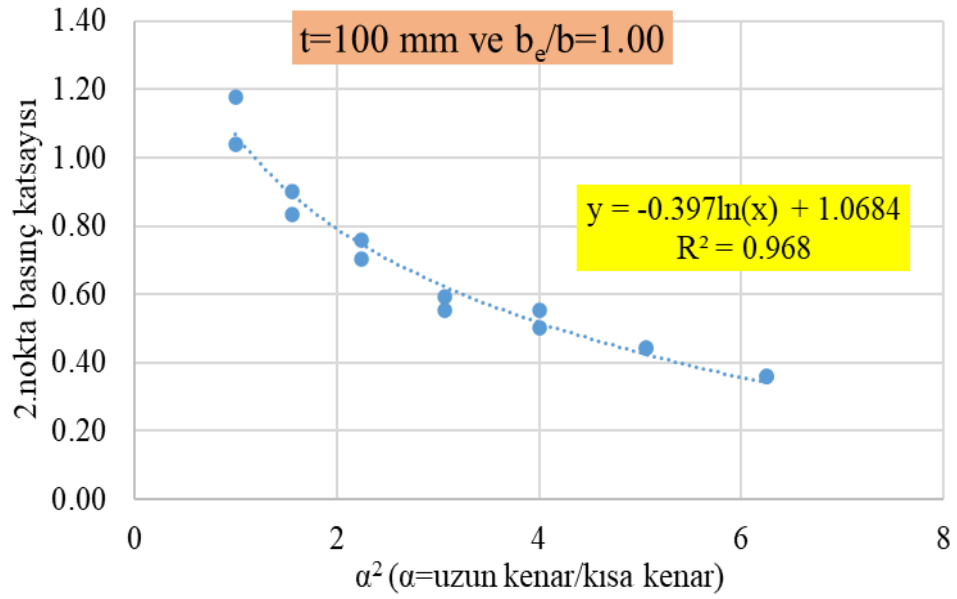
Şekil 5.87: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



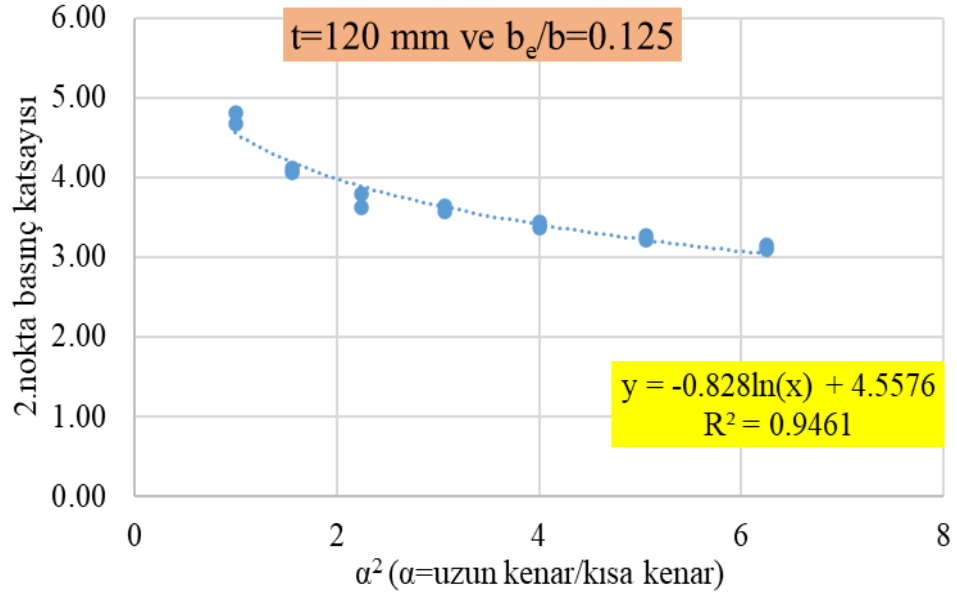
Şekil 5.88: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



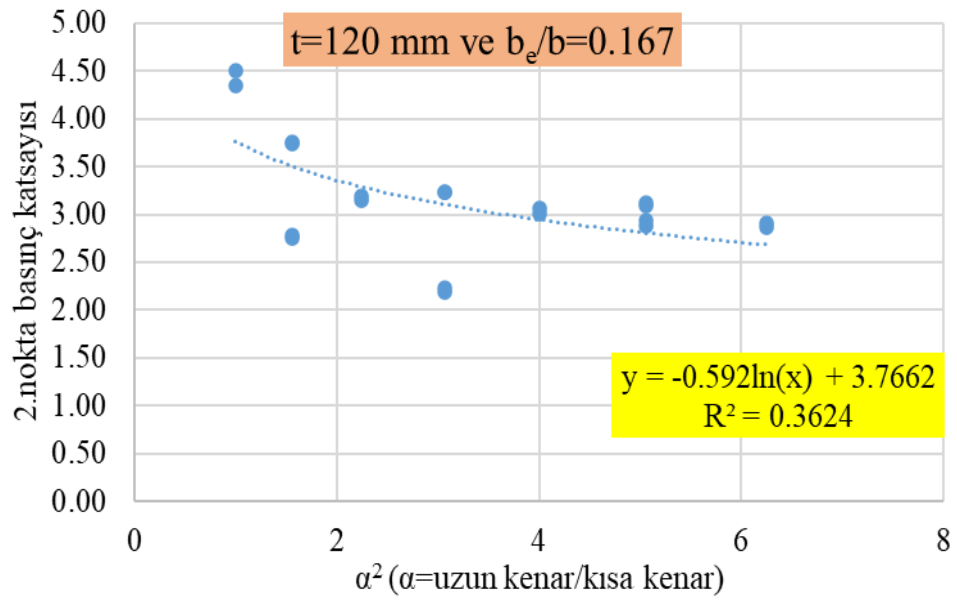
Şekil 5.89: $t=100$ mm ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



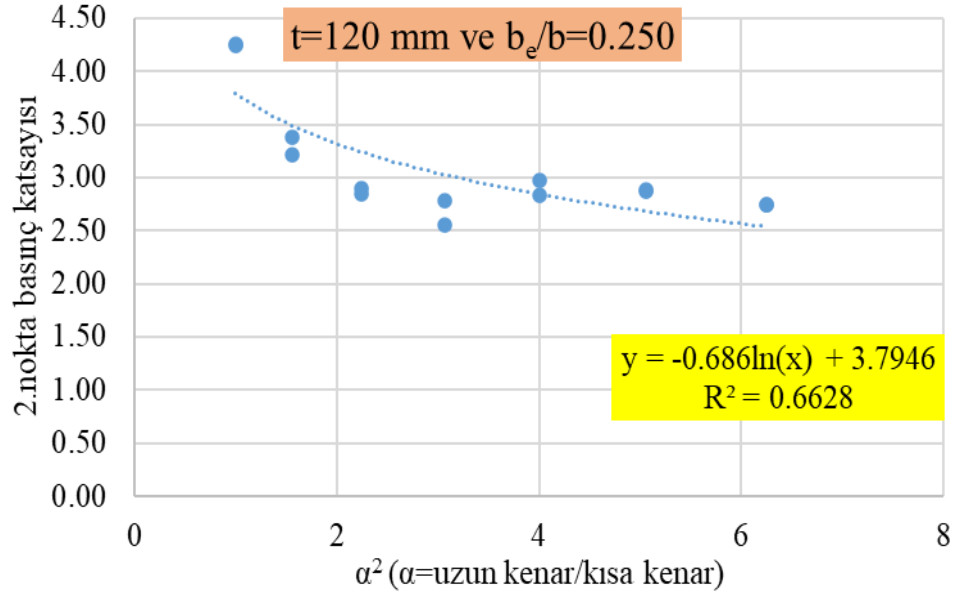
Şekil 5.90: $t=100$ mm ve $b_e/b = 1.000$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



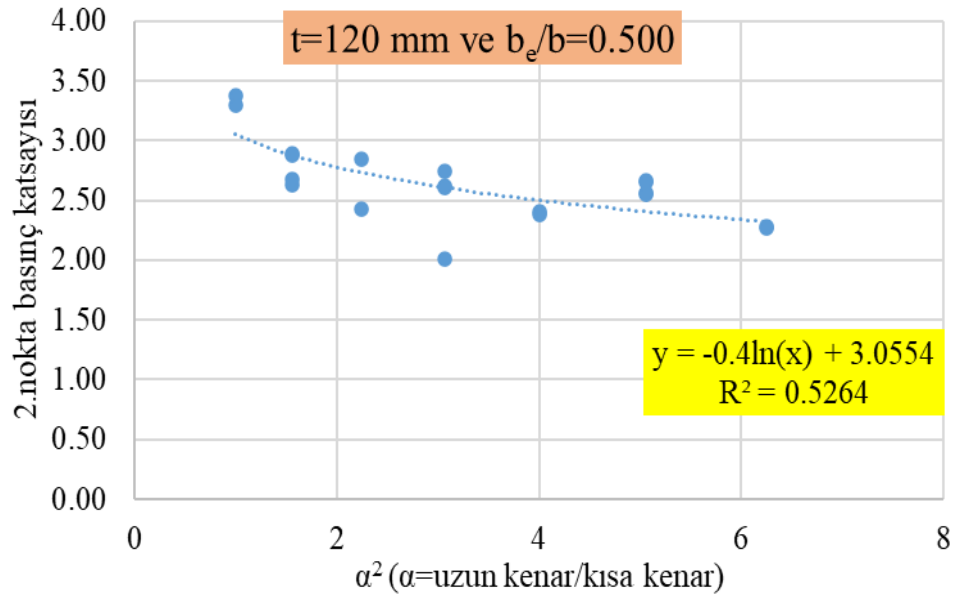
Şekil 5.91: $t=120$ mm ve $b_e/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



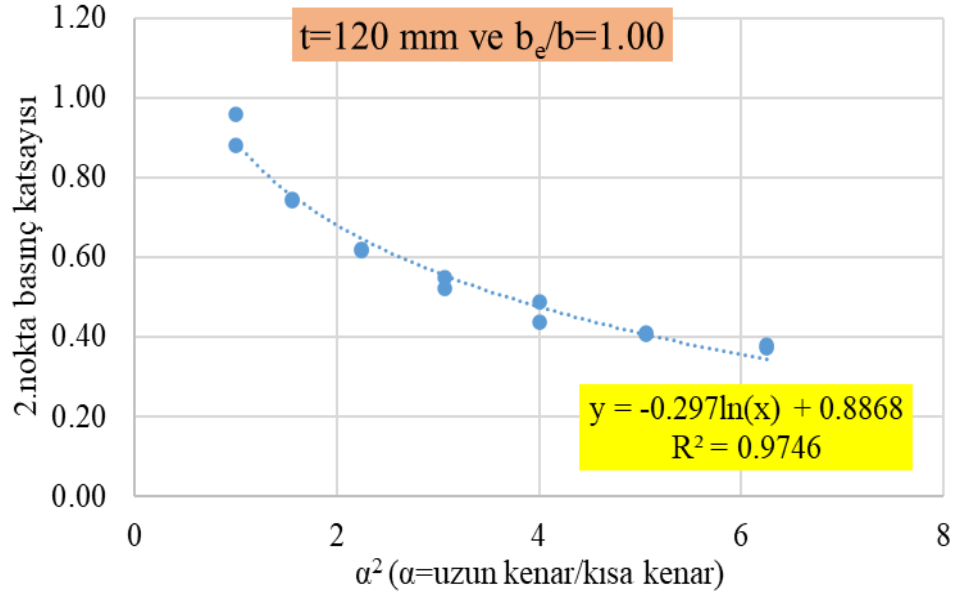
Şekil 5.92: $t=120$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



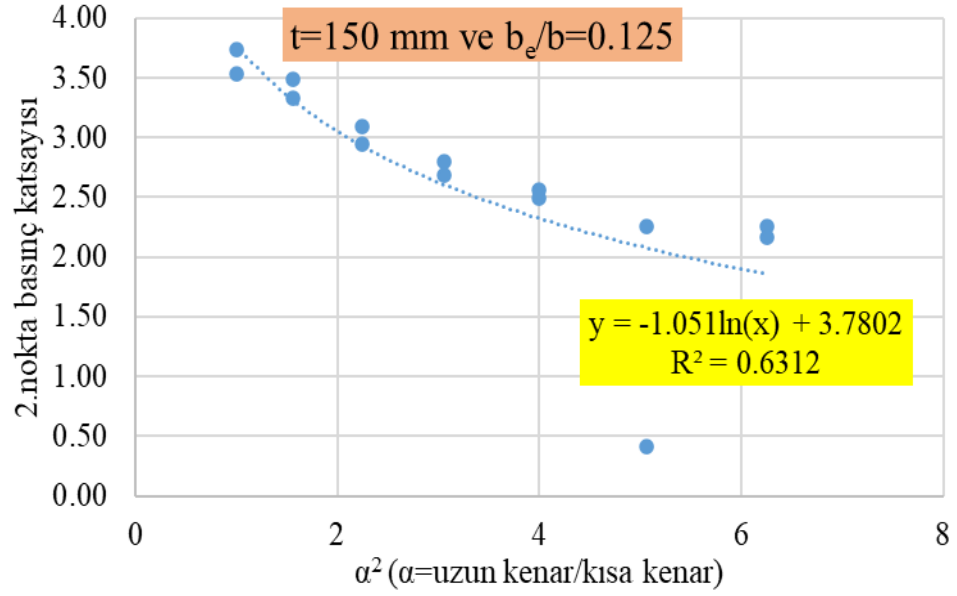
Şekil 5.93: $t=120$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



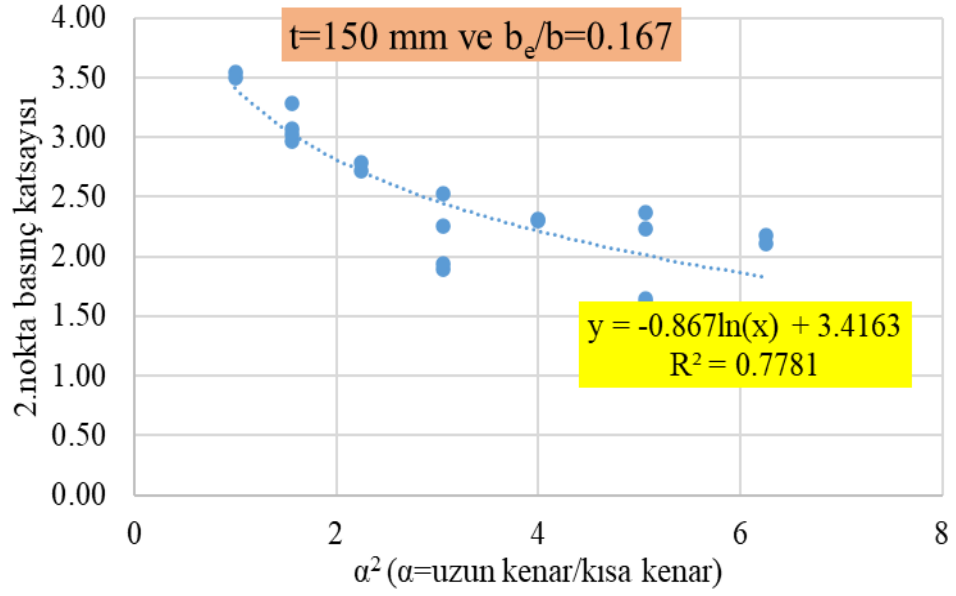
Şekil 5.94: $t=120$ mm ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



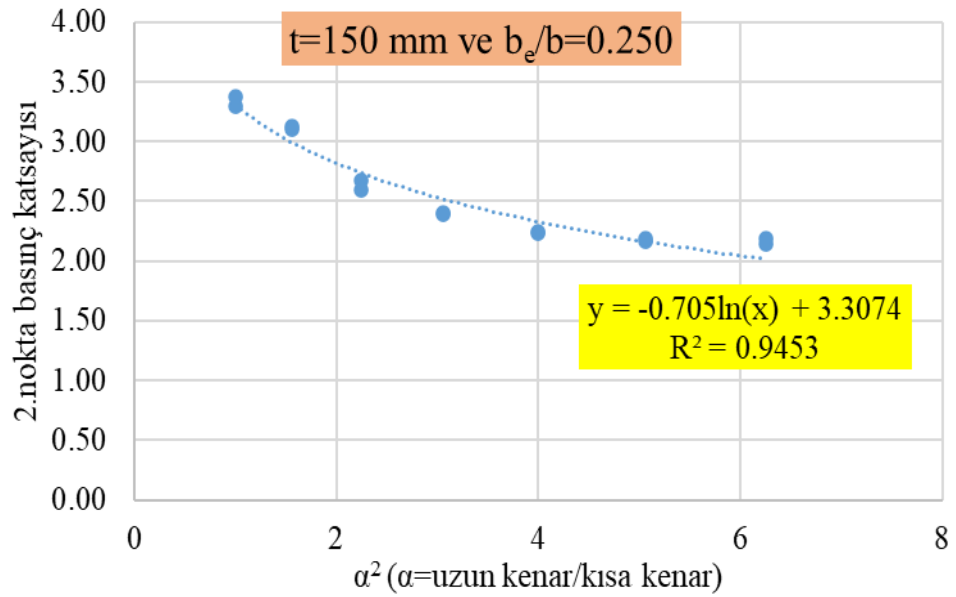
Şekil 5.95: $t=120$ mm ve $b_e/b = 1.000$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



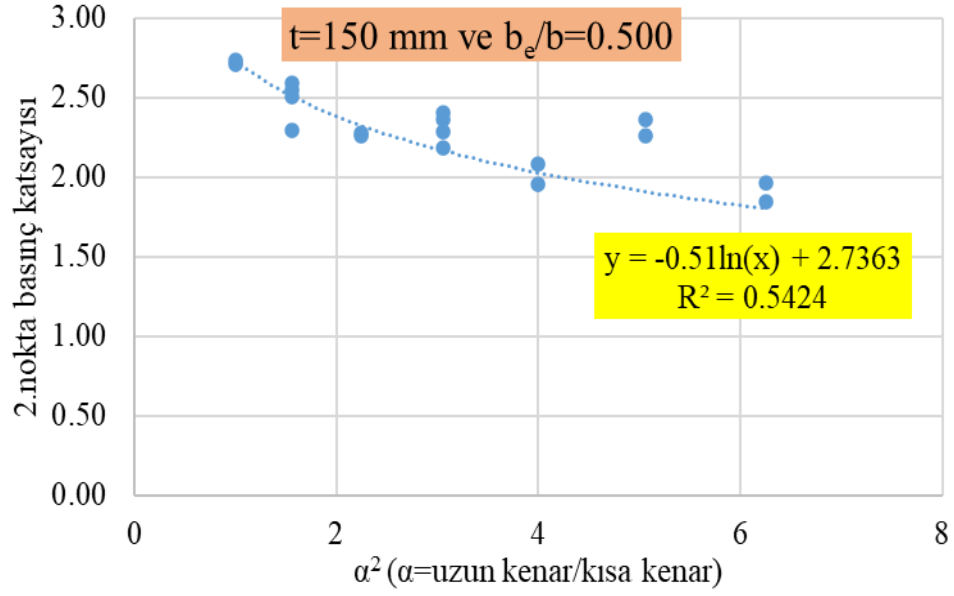
Şekil 5.96: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.125$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



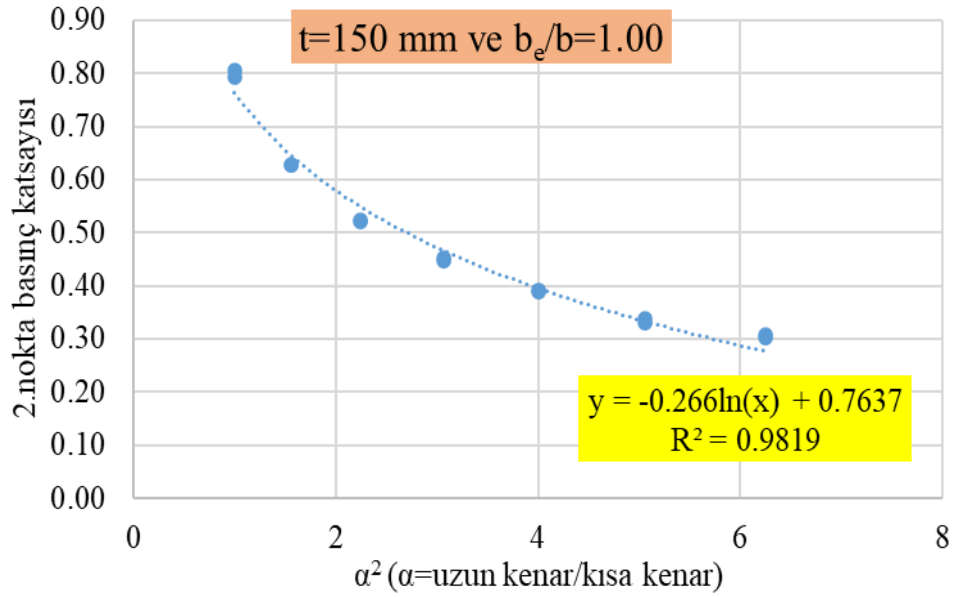
Şekil 5.97: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.167$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



Şekil 5.98: $t=150$ mm ve $b_e/b = 0.250$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



Şekil 5.99: $t=150 \text{ mm}$ ve $b_e/b = 0.500$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi



Şekil 5.100: $t=150 \text{ mm}$ ve $b_e/b = 1.000$ olan paneller için göçme noktasındaki basınç katsayısının α^2 ile değişimi

Elde edilen veriler ışığında 2.noktadaki yüzey basıncı için belirlenen matematiksel ifade şu şekildedir.

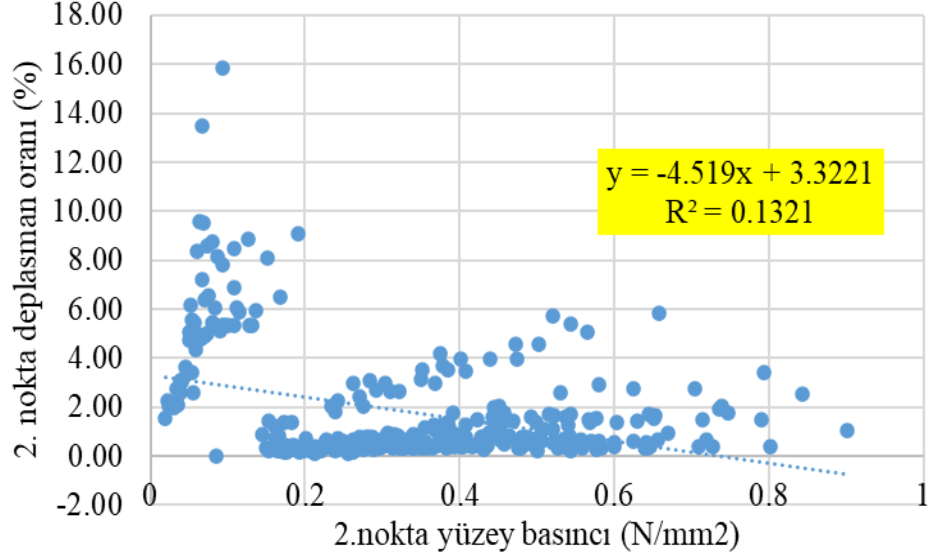
$$k_2 = \left[\left(k_{21} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{22} \right) \cdot t + \left(k_{23} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{24} \right) \right] \cdot \ln(\alpha^2) + \left[\left(k_{25} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{26} \right) \cdot t + \left(k_{27} \cdot \frac{b_e}{b} + k_{28} \right) \right] \quad (5.9)$$

$$SP_2 = k_2 \cdot f_t \cdot \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (5.10)$$

Burada k_2 2.nokta için basınç katsayısı, SP_2 2.noktadaki yüzey basıncı (N/mm^2), t panel kalınlığı (mm), b panel kısa kenar uzunluğu (mm) ve b_e kısa kenar mesnet aralığı (mm), α ise uzun kenar/kısa kenar oranı değerlerini sembolize etmektedir. Ayrıca f_t kullanmış olduğumuz malzeme türüne bağlı çekme dayanımını ifade etmektedir. Böylelikle SP45 ve SP60 malzemedan oluşan panel verilerini ayırmadan tek bir formül ortaya çıkmıştır Denklemden yer alan sabitlerin değerleri de sırasıyla, $k_{21}=-0.00049$, $k_{22}=0.00355$, $k_{23}=0.7726$, $k_{24}=-1.403$, $k_{25}=0.01311$, $k_{26}=-0.01936$, $k_{27}=-5.27611$ ve $k_{28}=7.05891$ şeklinde elde edilmiştir.

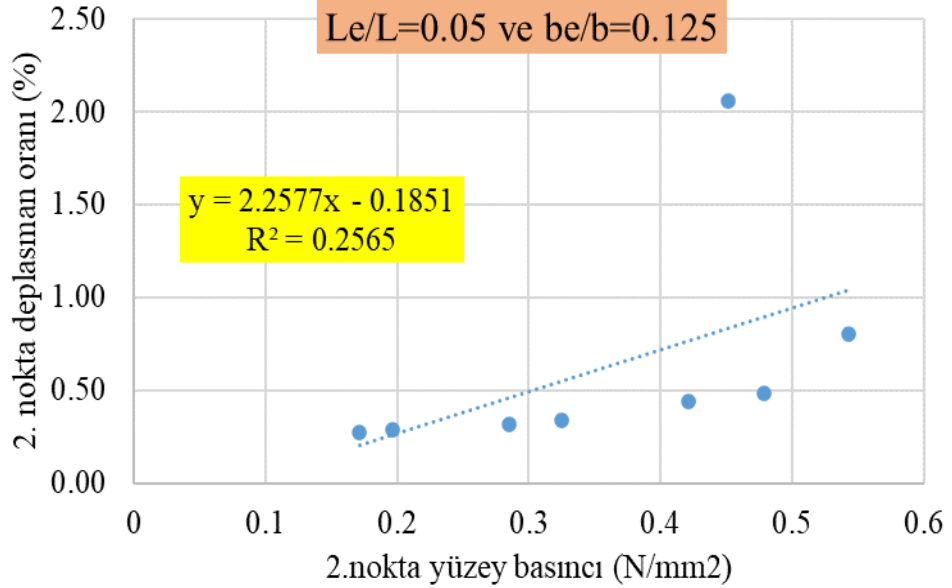
5.4 2.Karakteristik Nokta Deplasman Değeri

Göçme noktasındaki deplasman oranı değerlerinin yüzey basıncı ile parametrelere bağlı olmak üzere doğrusal olarak hesaplanabilecek bir bağıntıya sahip olabileceği görülmüştür (Şekil 5.101). Grafikte karşılaştırma yaparken deplasman için kısa kenar uzunluğuna göre normalize edilen değerler kullanılmıştır (1.karakteristik noktada olduğu gibi).

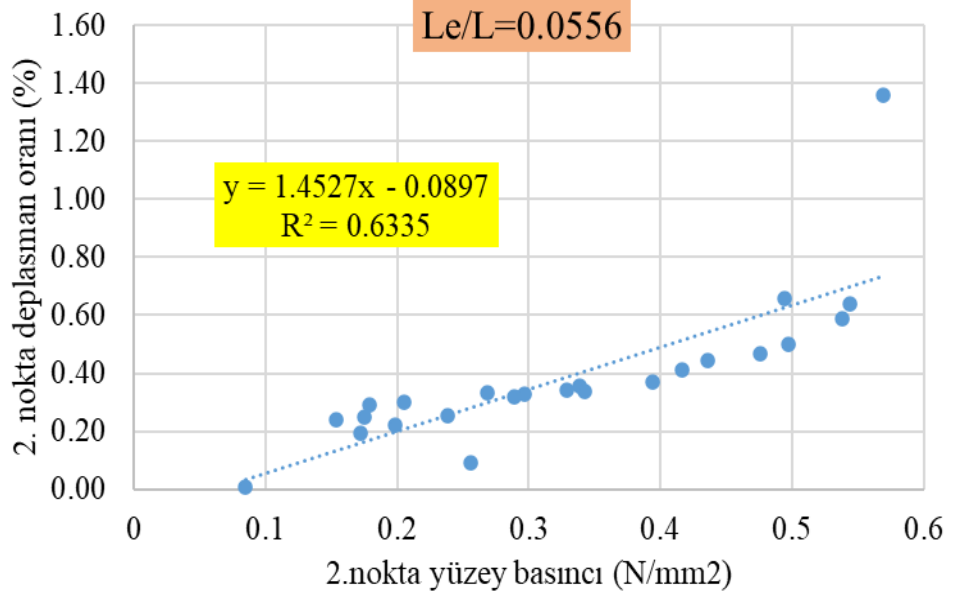


Şekil 5.101: 2 nokta için deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi

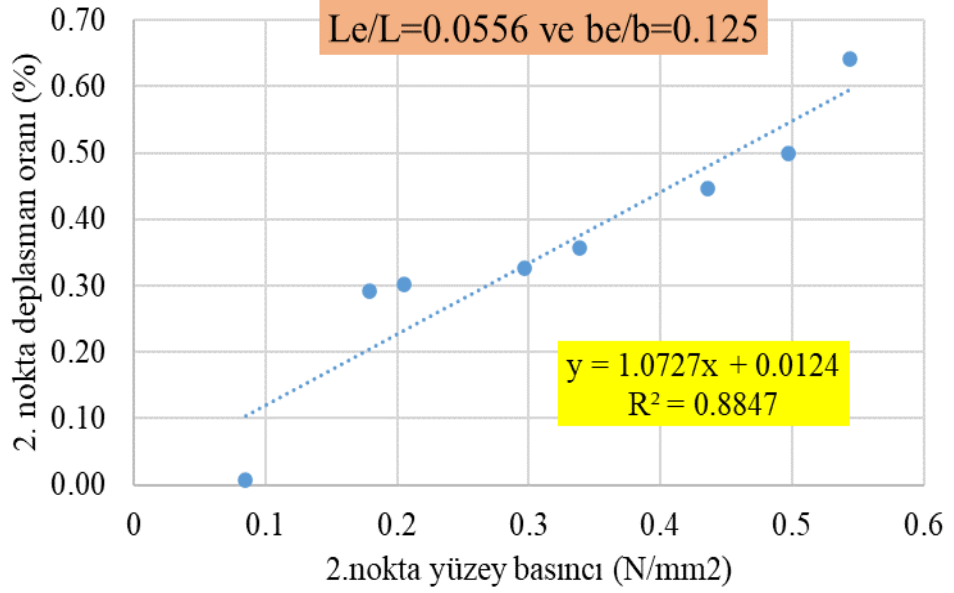
Burada verilerin dağılımı ayrıntılı incelendiğinde kendi içlerinde L_e/L ve b_e/b ile doğrusal bir denklem ile ifade edilebilecek bir ilişkiye sahip oldukları görülmüştür. Şekil 5.101'deki verilerin kendi içinde alt gruplara ayrıldığı grafikler aşağıda verilmiştir.



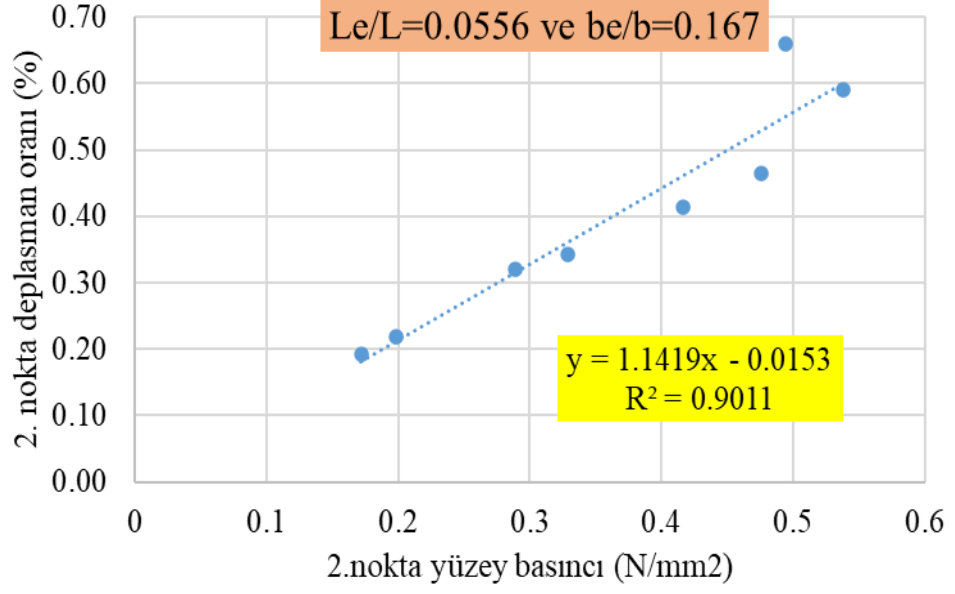
Şekil 5.102: $L_e/L= 0.05$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



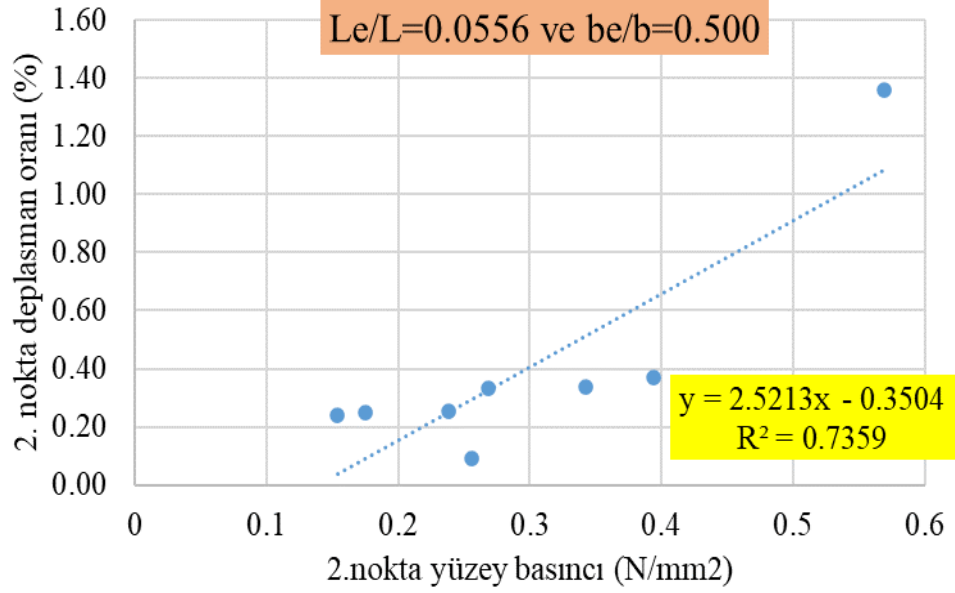
Şekil 5.103: $L_e/L=0.056$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



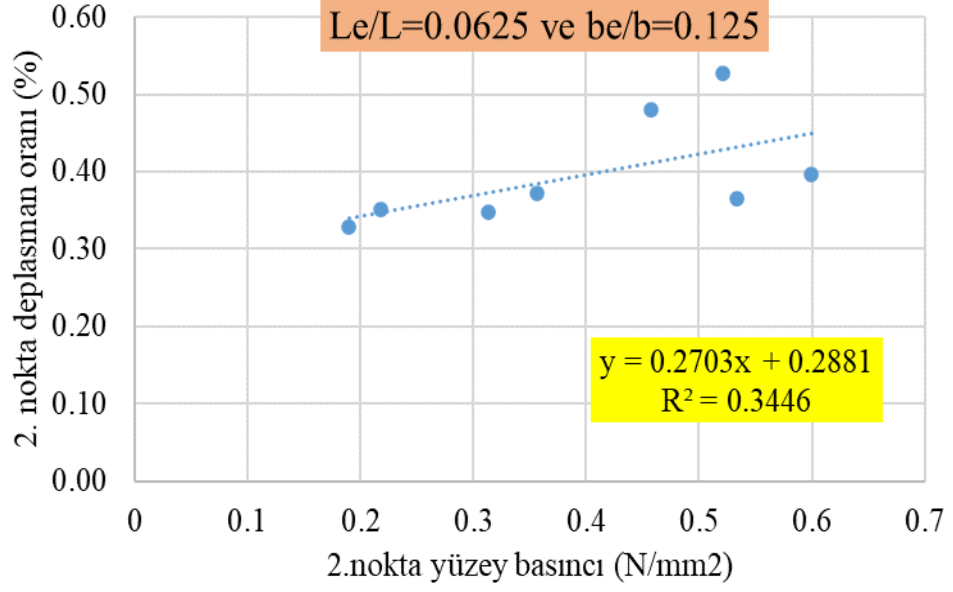
Şekil 5.104: $L_e/L=0.056$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 100'ün alt grupları)



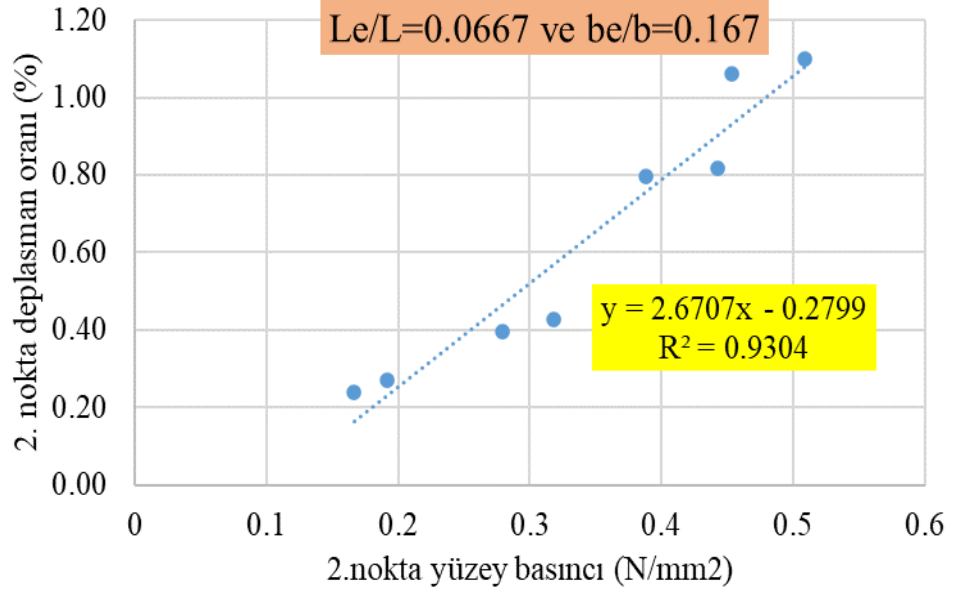
Şekil 5.105: $L_e/L=0.056$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 100'ün alt grupları)



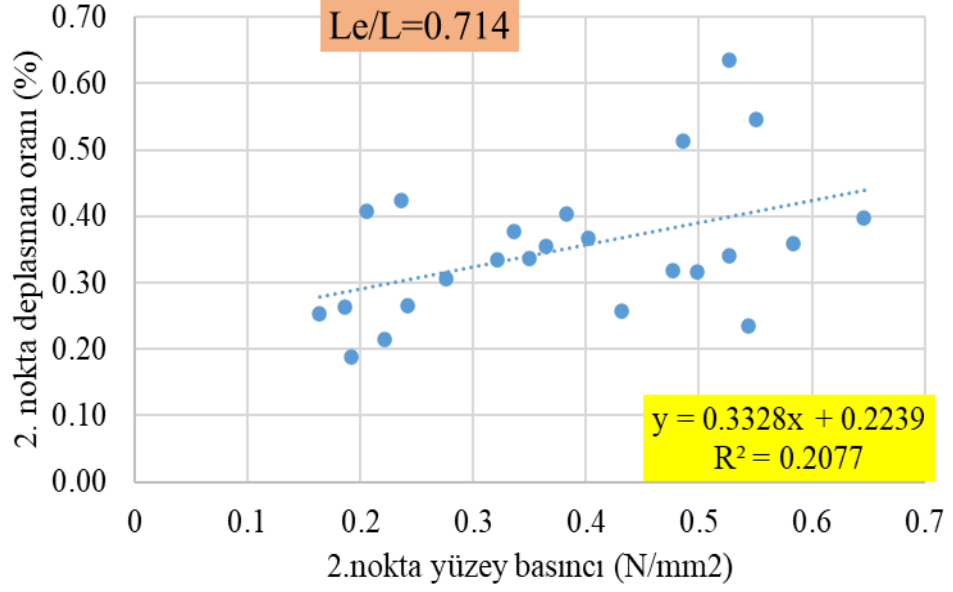
Şekil 5.106: $L_e/L=0.056$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 100'ün alt grupları)



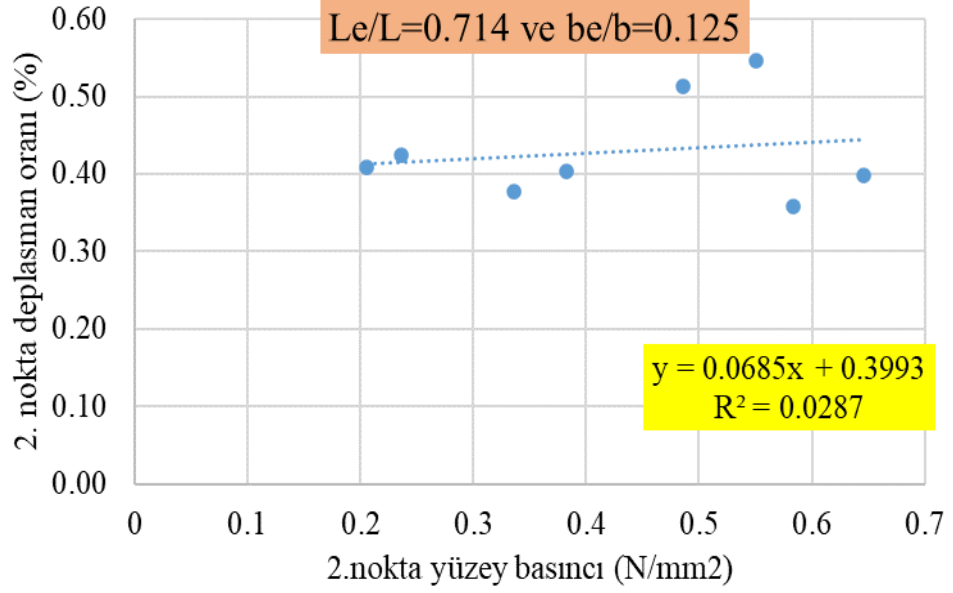
Şekil 5.107: $L_e/L=0.0625$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



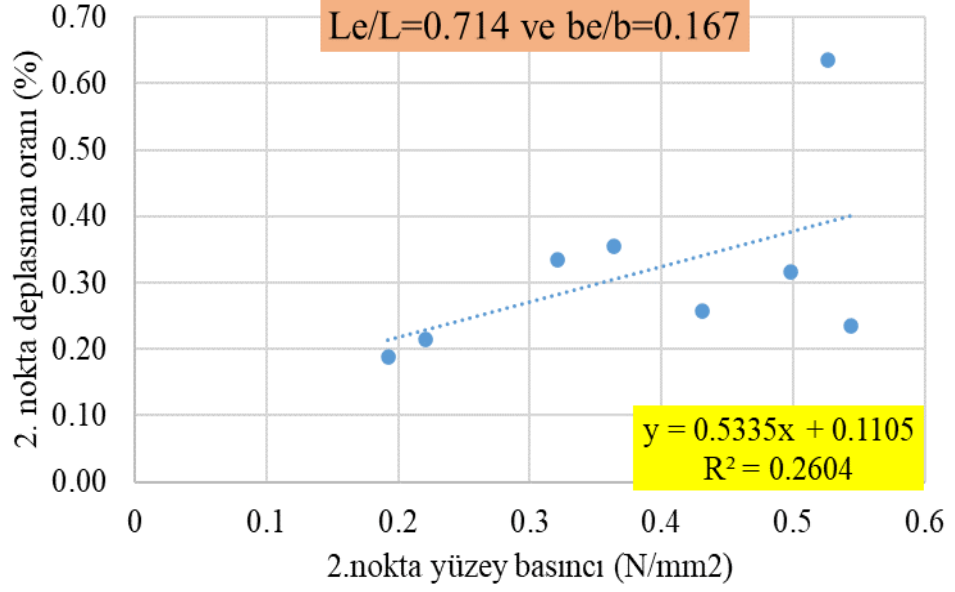
Şekil 5.108: $L_e/L=0.0667$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



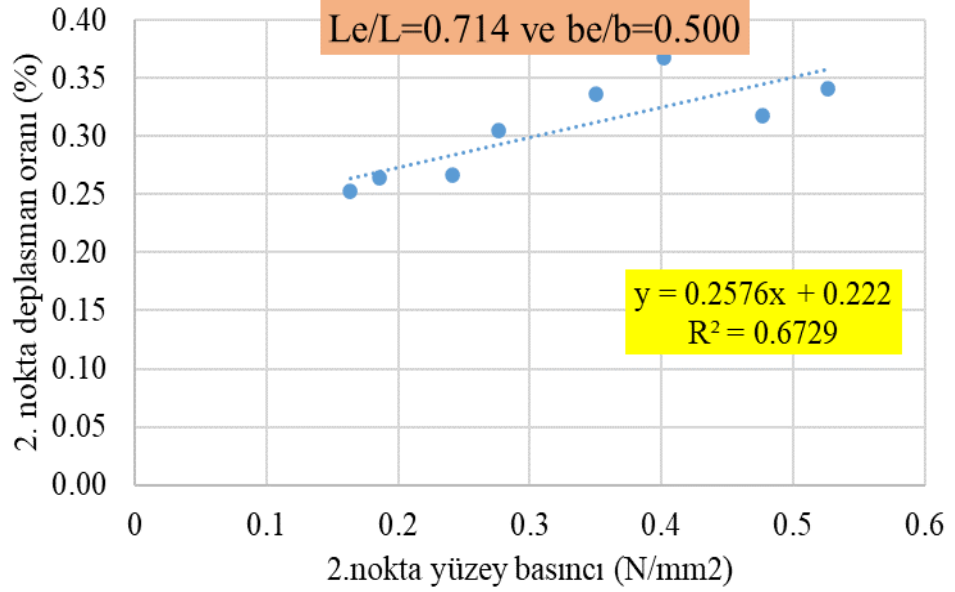
Şekil 5.109: $L_e/L=0.714$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



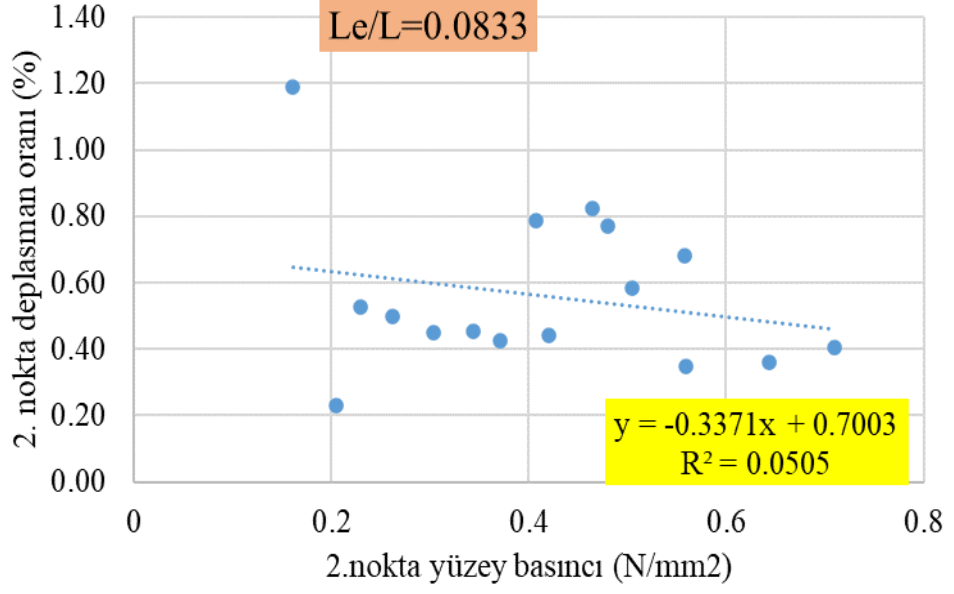
Şekil 5.110: $L_e/L=0.714$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 106'nın alt grupları)



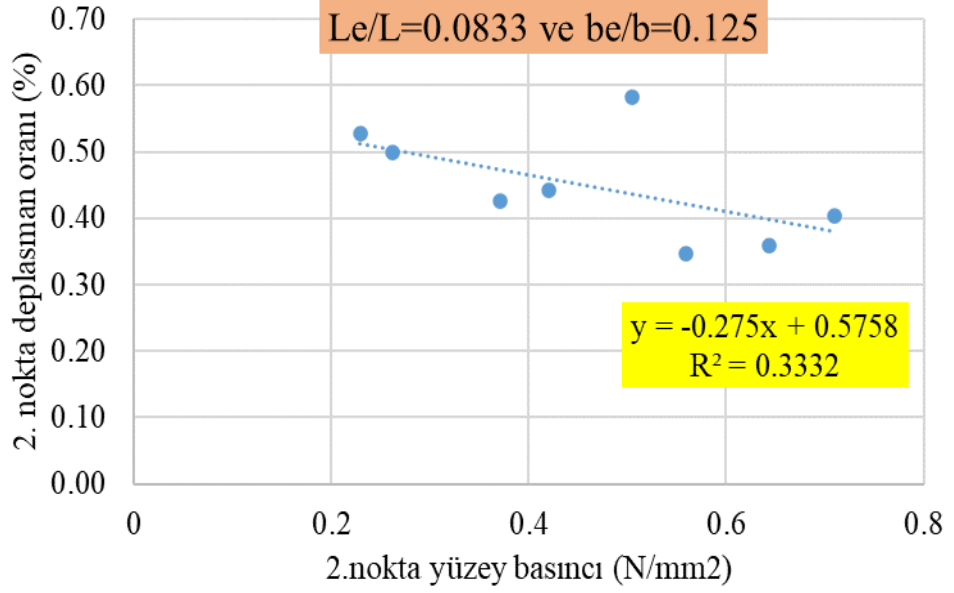
Şekil 5.111: $L_e/L=0.714$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 106'nın alt grupları)



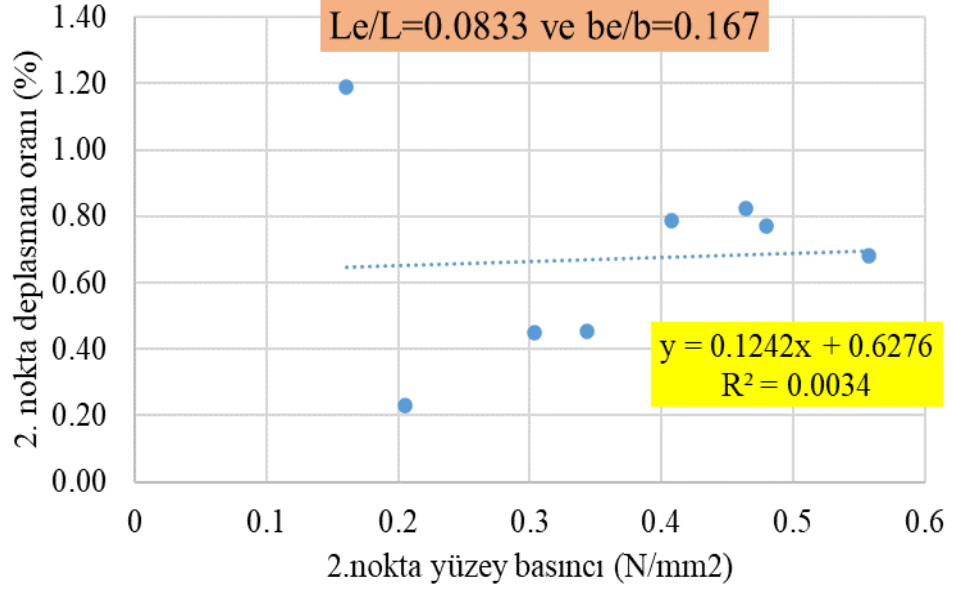
Şekil 5.112: $L_e/L=0.714$ ve $b_e/b=0.500$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 106'nın alt grupları)



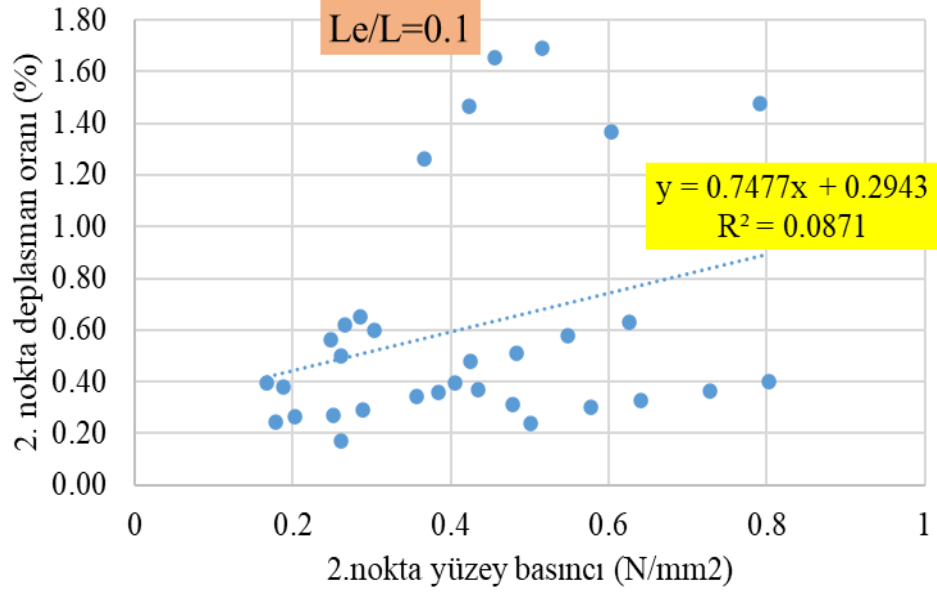
Şekil 5.113: $L_e/L=0.0833$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



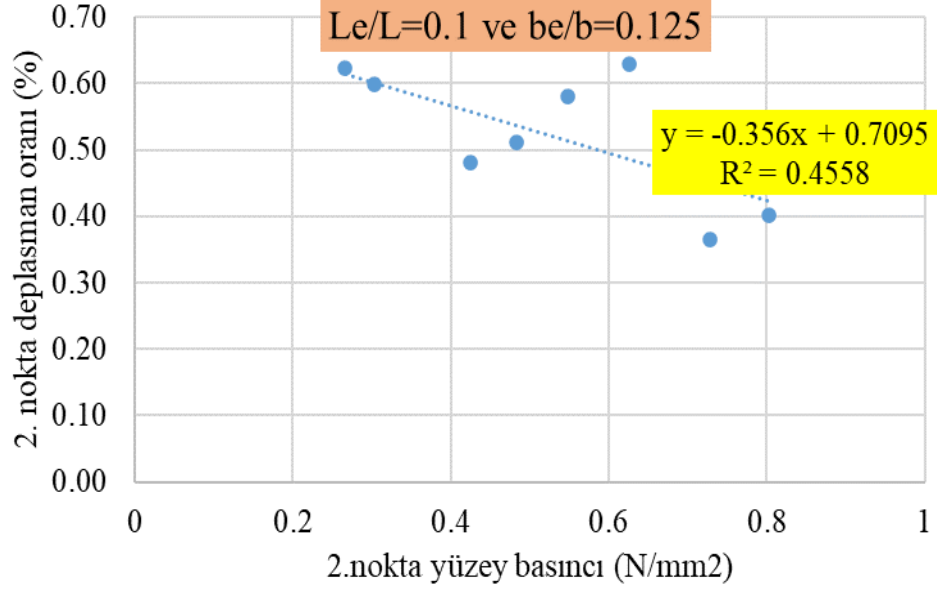
Şekil 5.114: $L_e/L=0.083$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 110'un alt grupları)



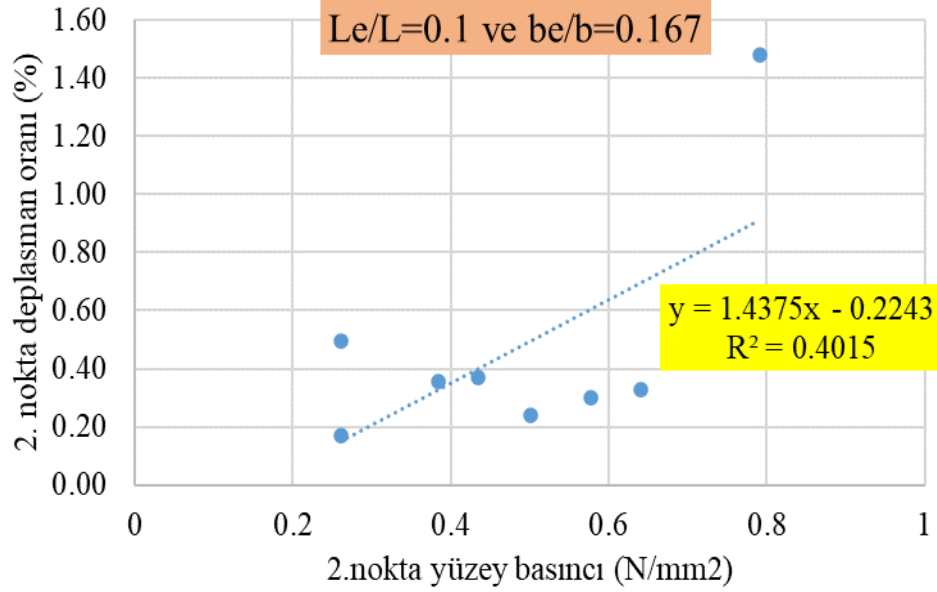
Şekil 5.115: $L_e/L=0.0833$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 110'un alt grupları)



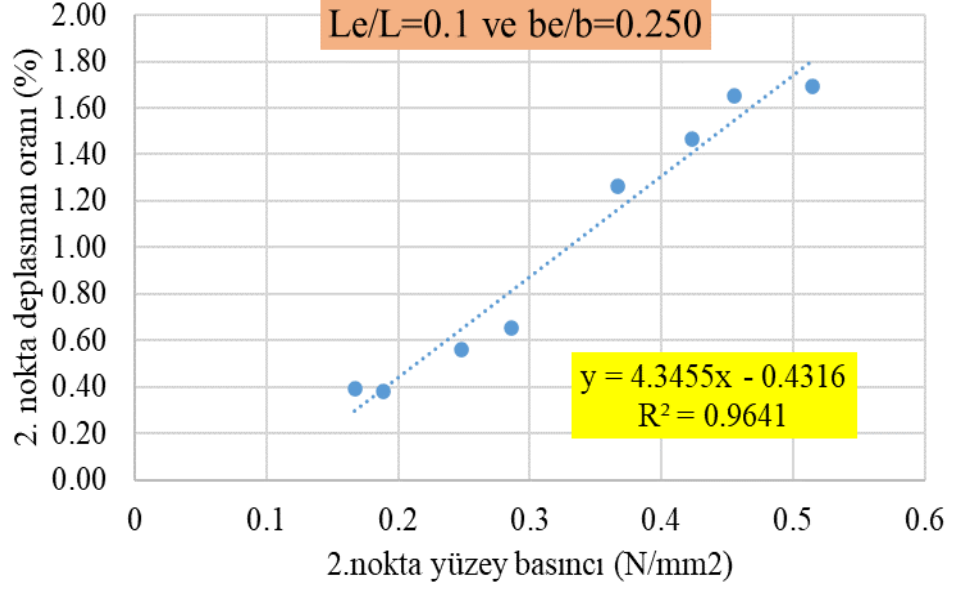
Şekil 5.116: $L_e/L=0.1$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



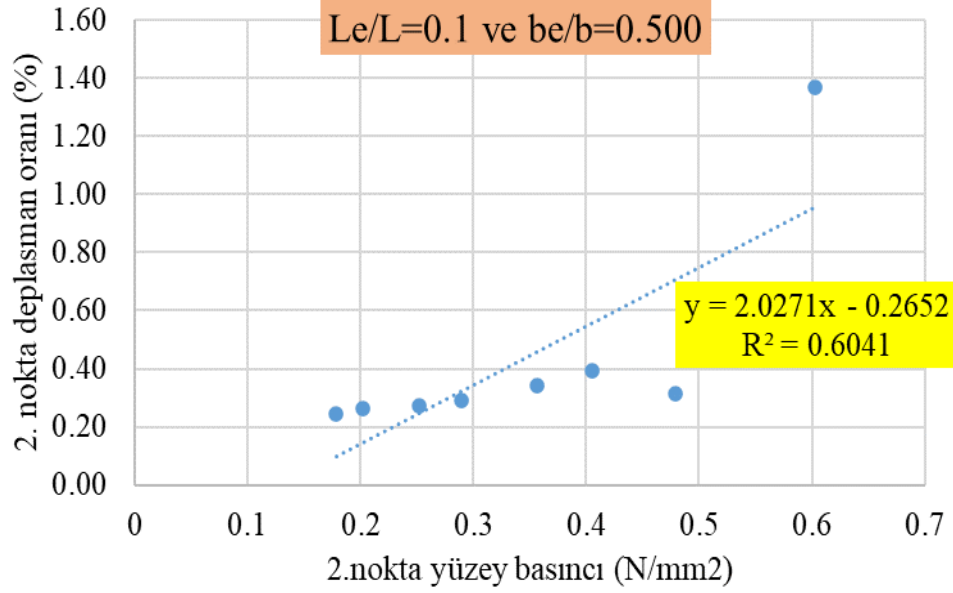
Şekil 5.117: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)



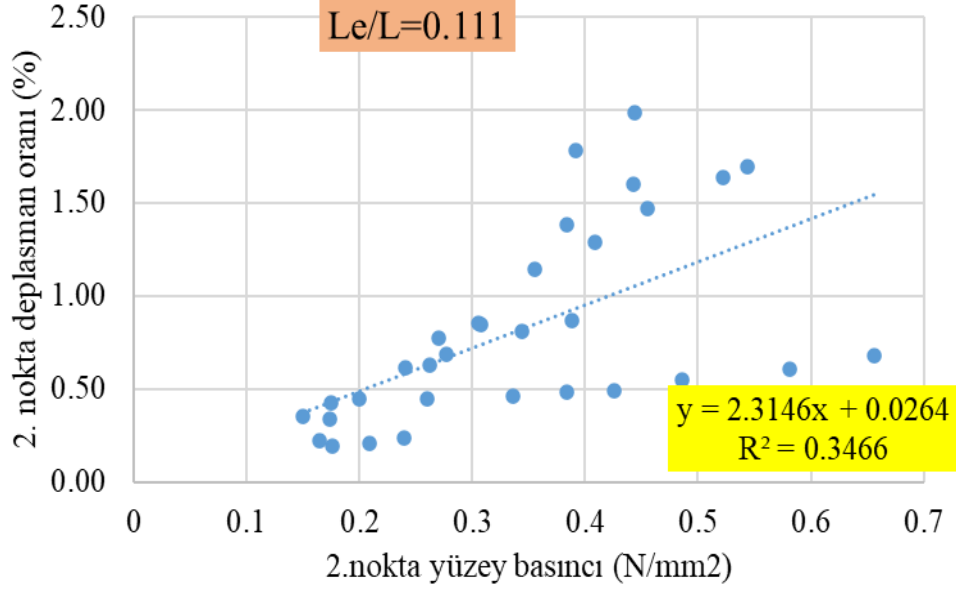
Şekil 5.118: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)



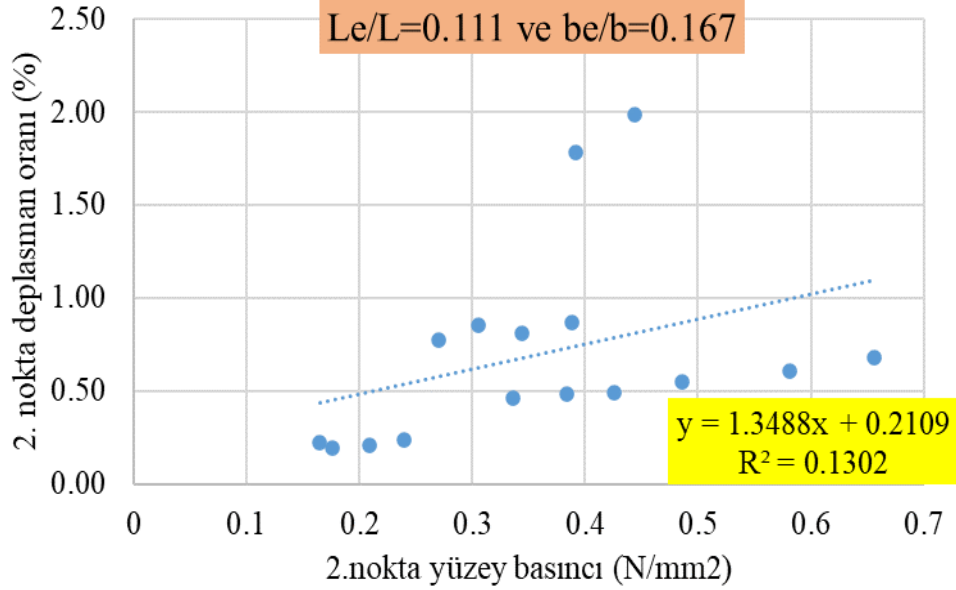
Şekil 5.119: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)



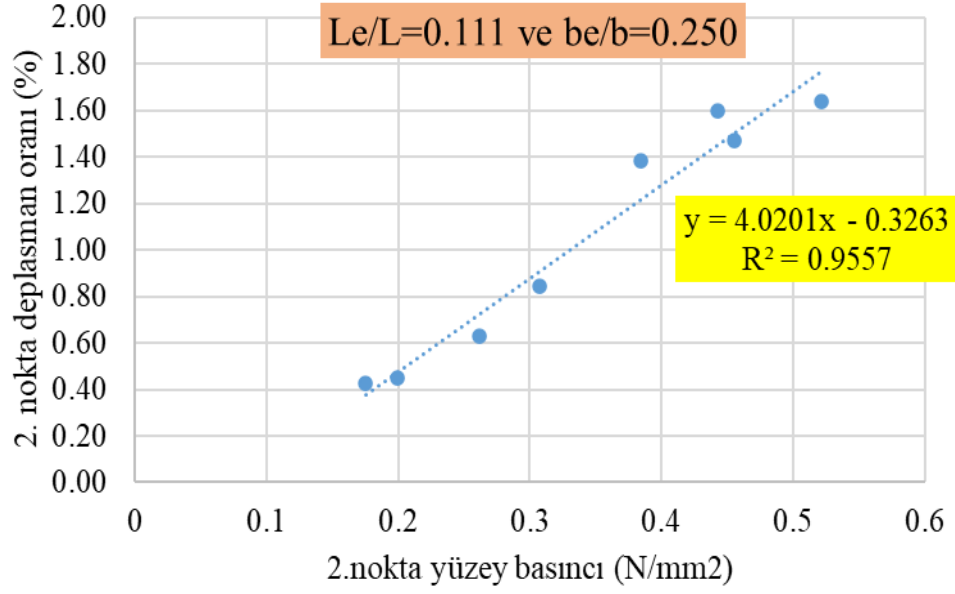
Şekil 5.120: $L_e/L=0.1$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 113'ün alt grupları)



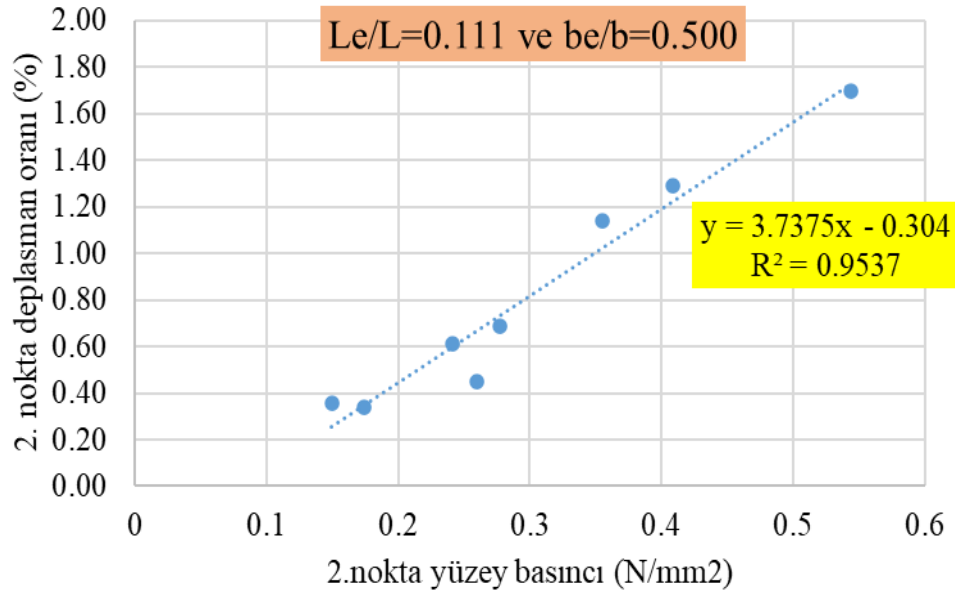
Şekil 5.121: $L_e/L=0.111$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



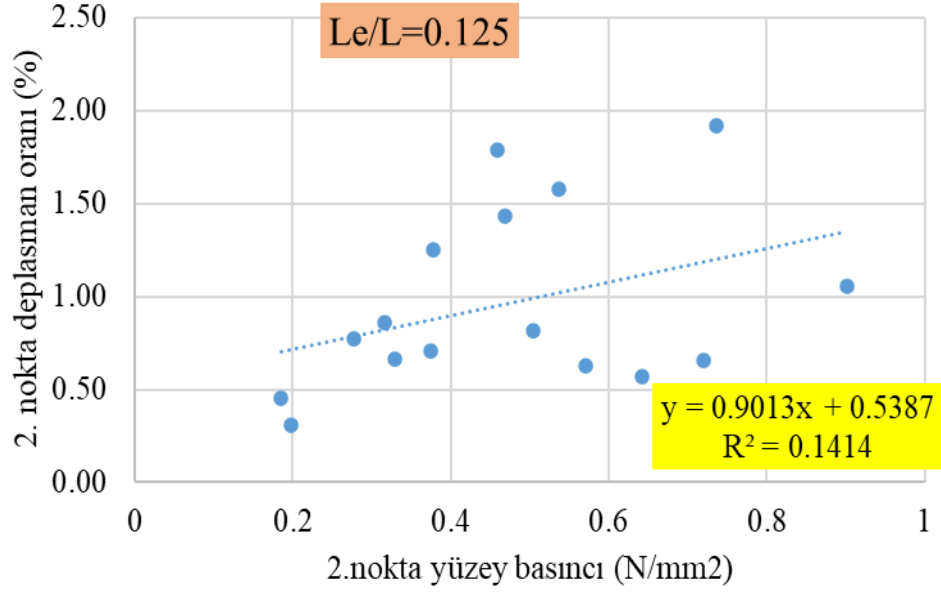
Şekil 5.122: $L_e/L=0.111$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 118'in alt grupları)



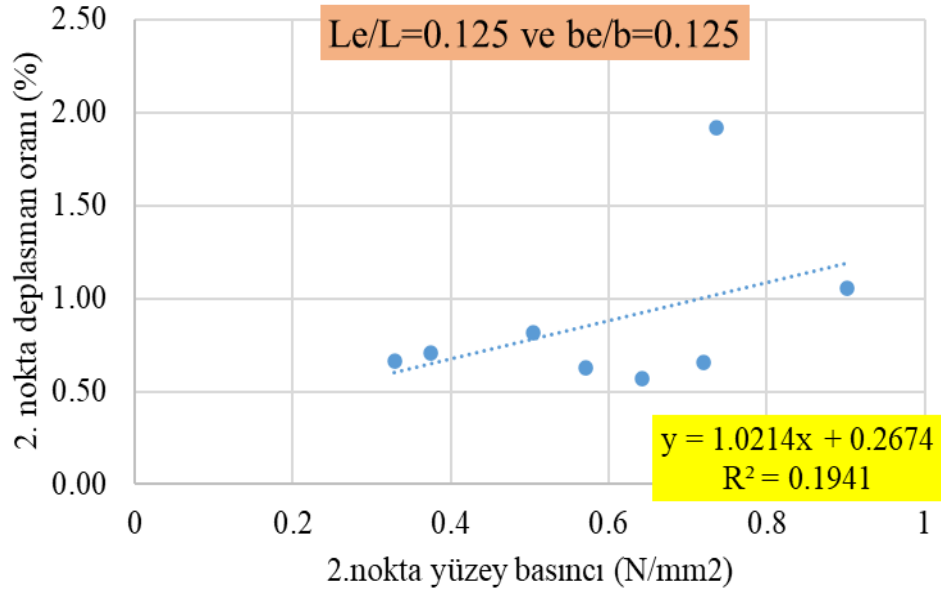
Şekil 5.123: $L_e/L=0.111$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 118'in alt grupları)



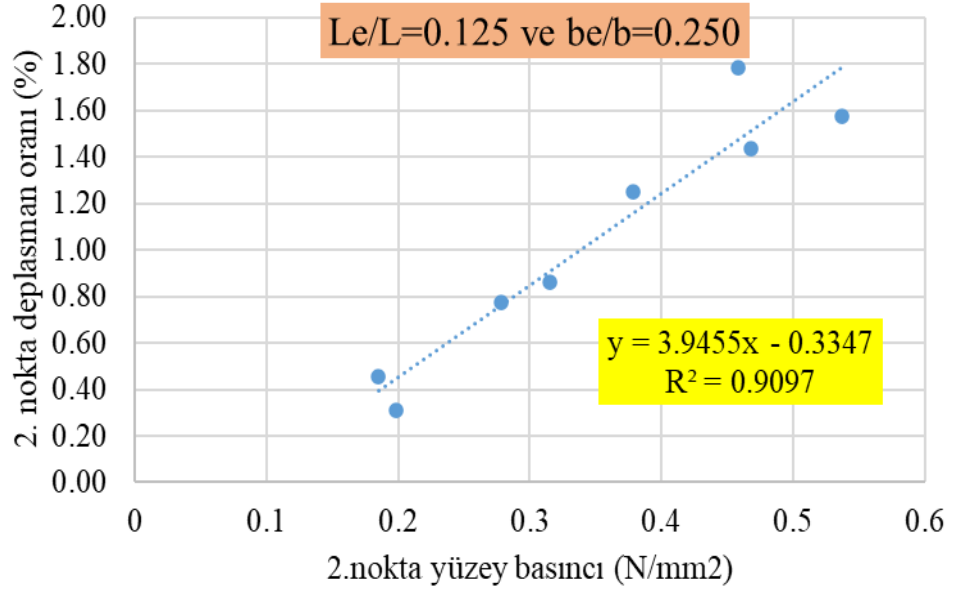
Şekil 5.124: $L_e/L=0.111$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 118'in alt grupları)



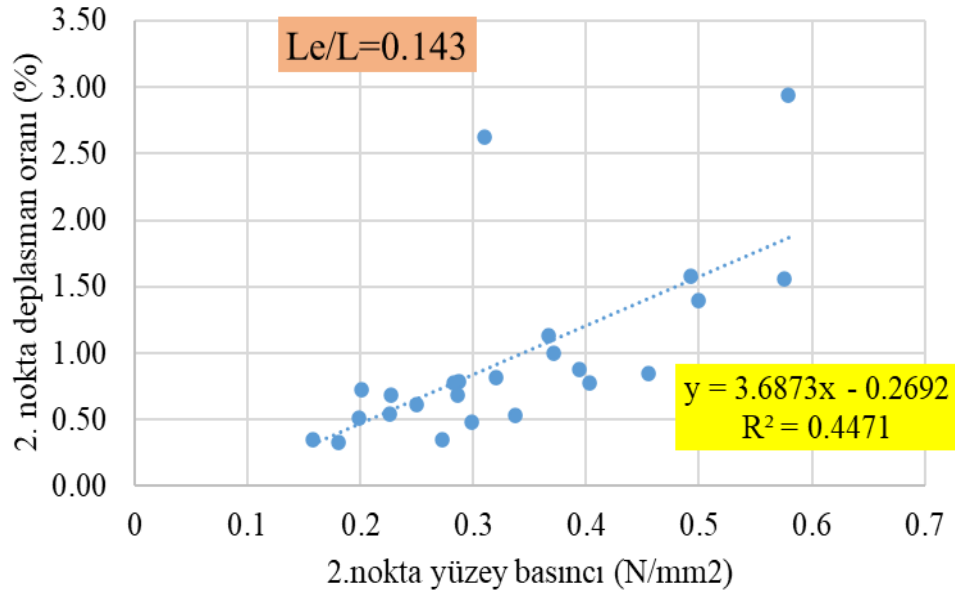
Şekil 5.125: $L_e/L=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



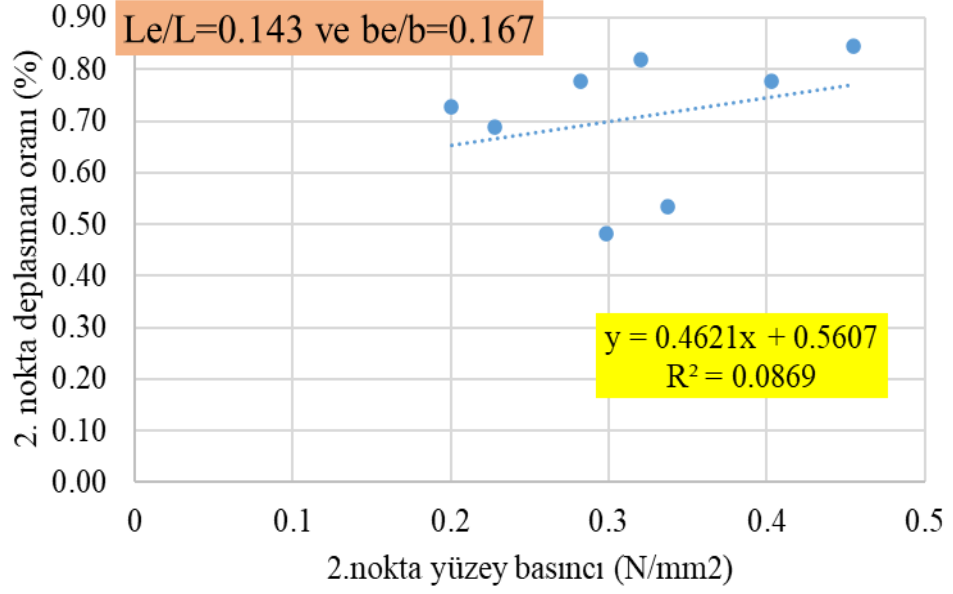
Şekil 5.126: $L_e/L=0.125$ ve $b_e/b=0.125$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 124'nin alt grupları)



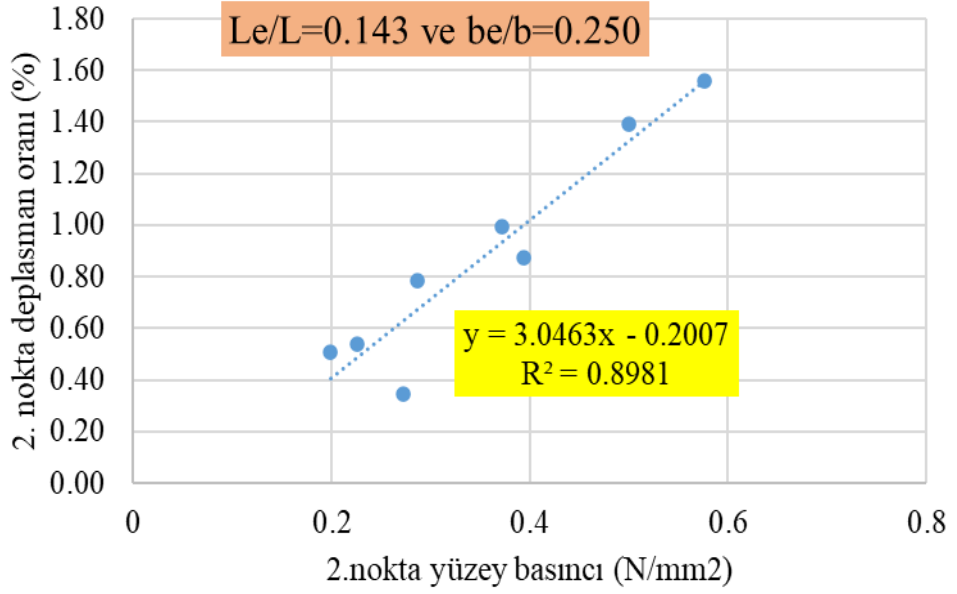
Şekil 5.127: $L_e/L=0.125$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 124'nin alt grupları)



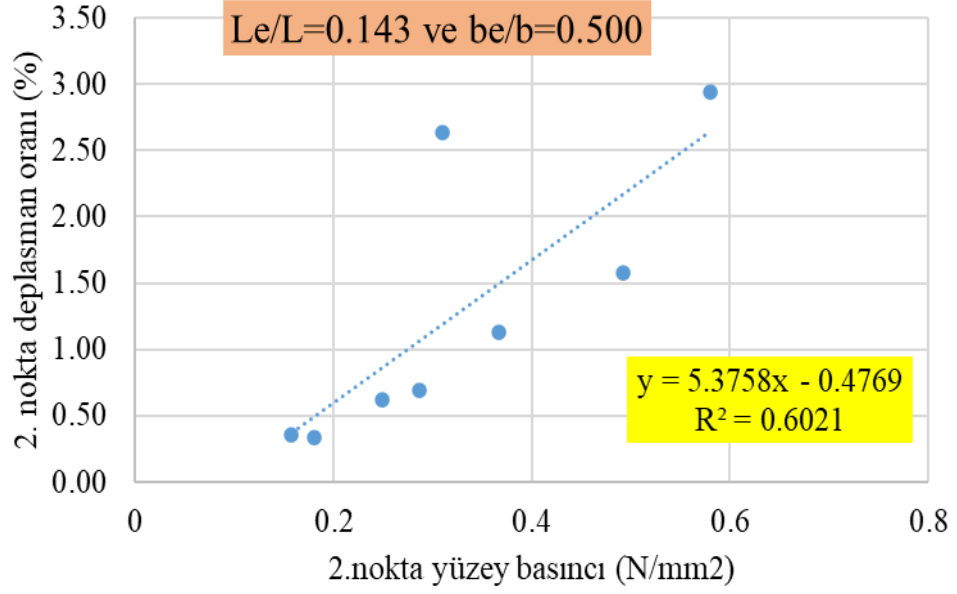
Şekil 5.128: $L_e/L=0.143$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



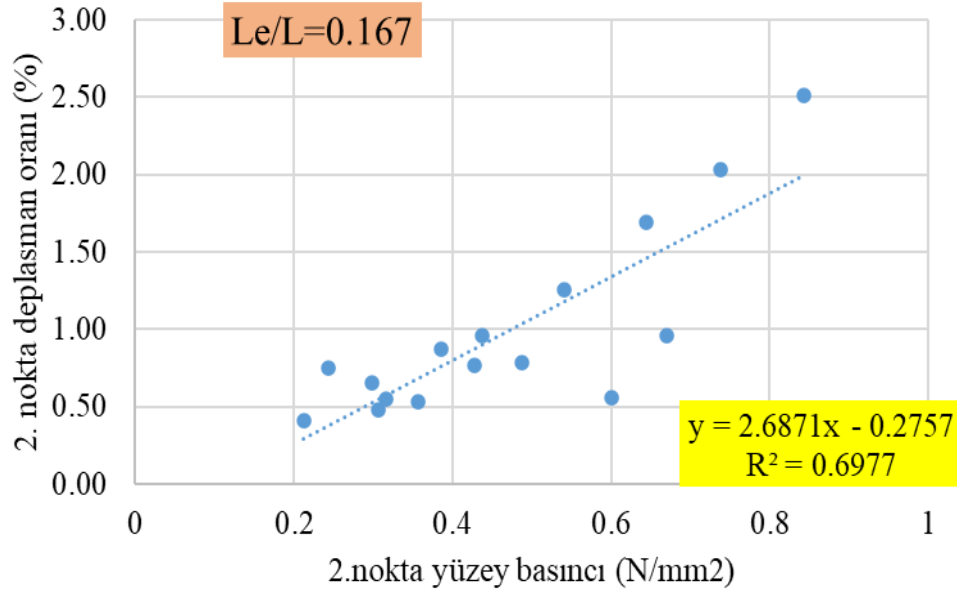
Şekil 5.129: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 127'in alt grupları)



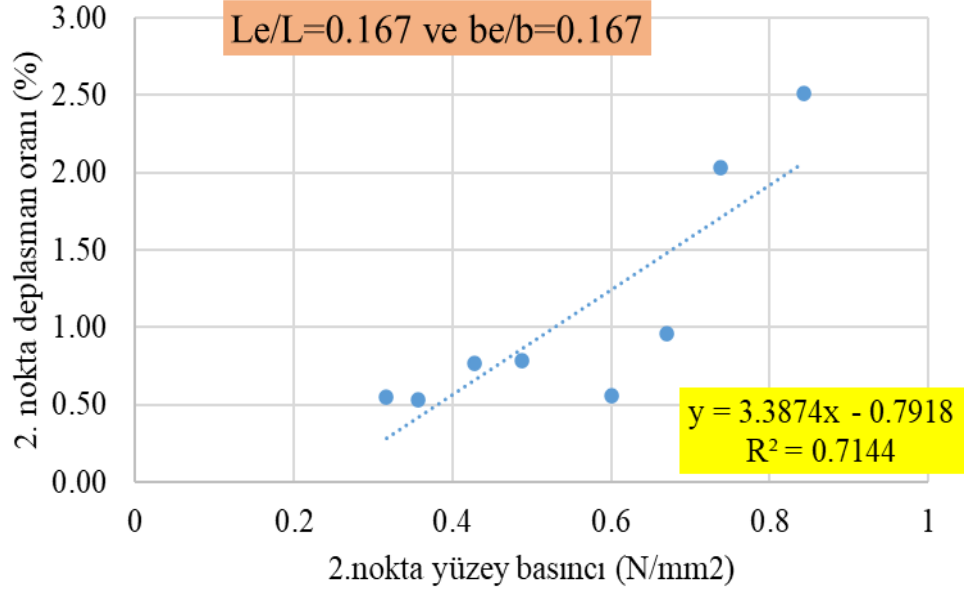
Şekil 5.130: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 127'in alt grupları)



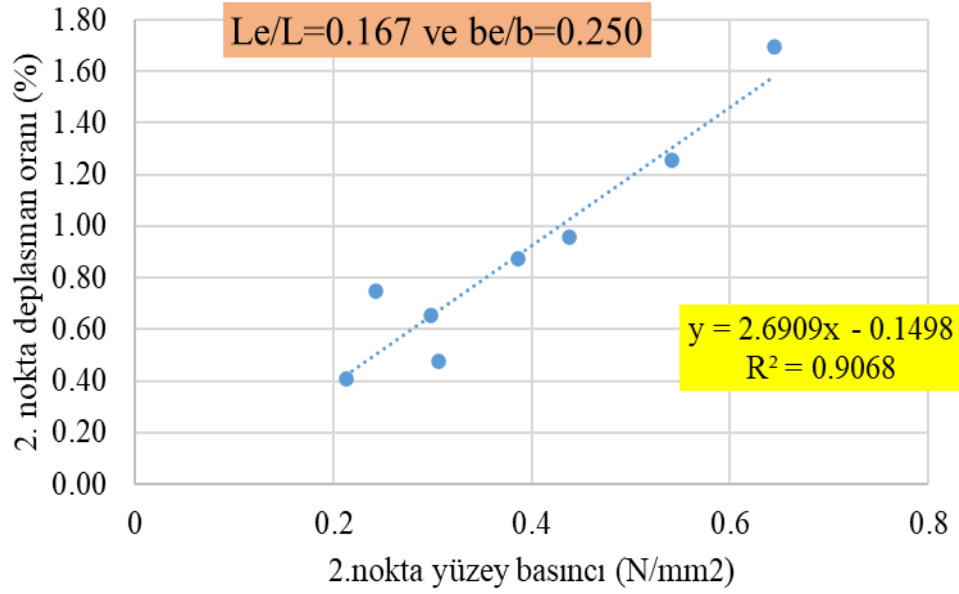
Şekil 5.131: $L_e/L=0.143$ ve $b_e/b=0.500$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 127'in alt grupları)



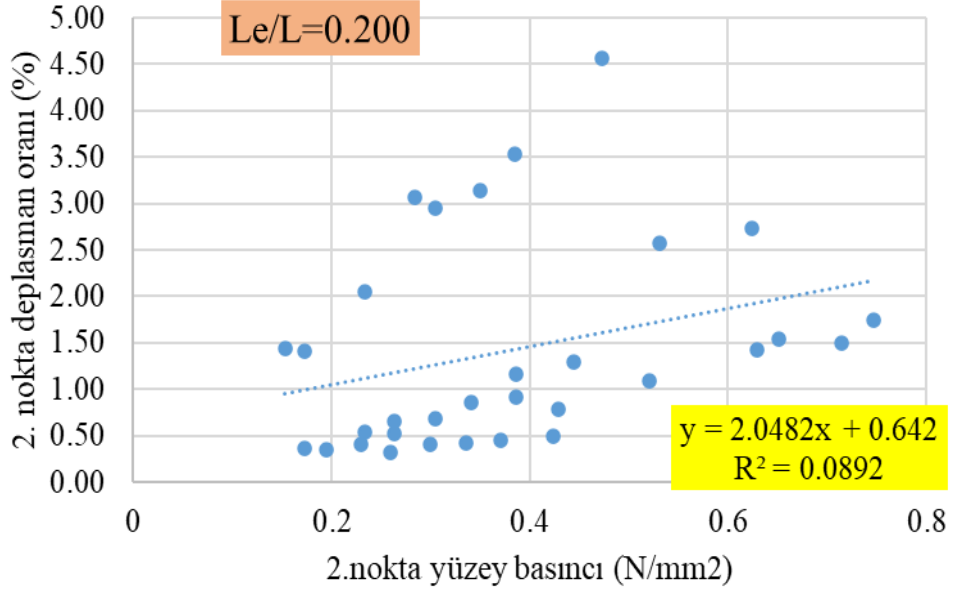
Şekil 5.132: $L_e/L=0.167$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



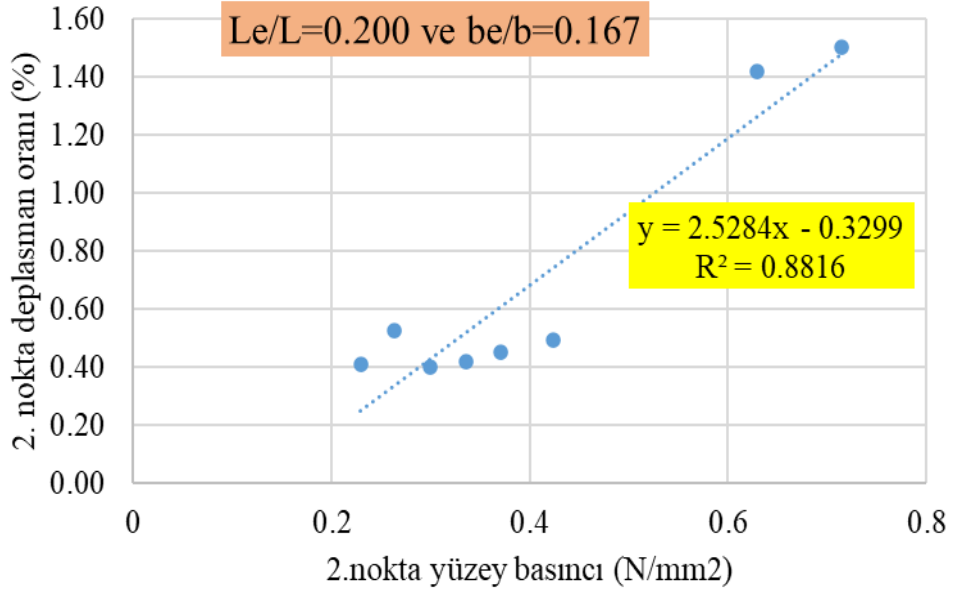
Şekil 5.133: $L_e/L=0.167$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 131'un alt grupları)



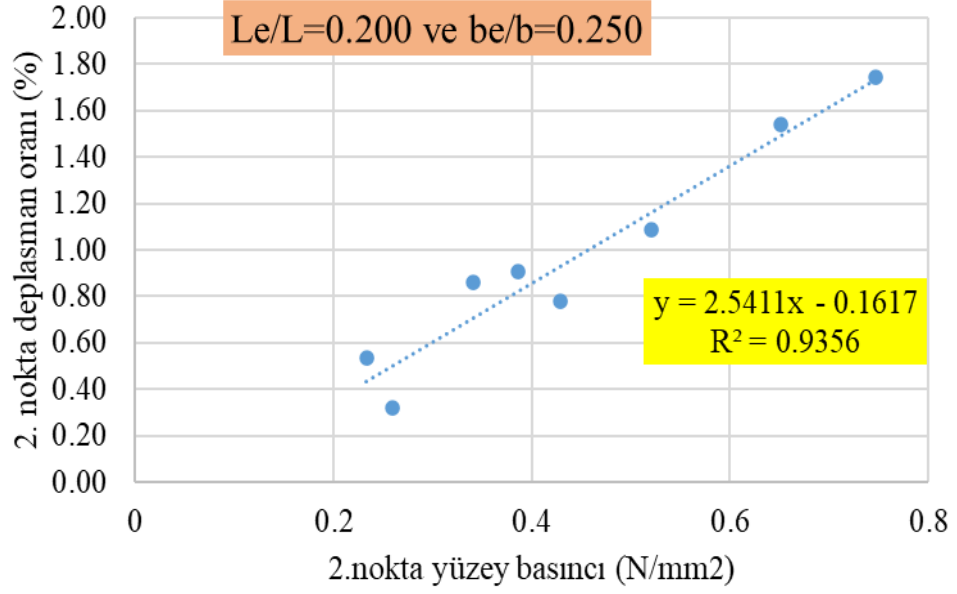
Şekil 5.134: $L_e/L=0.167$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 131'un alt grupları)



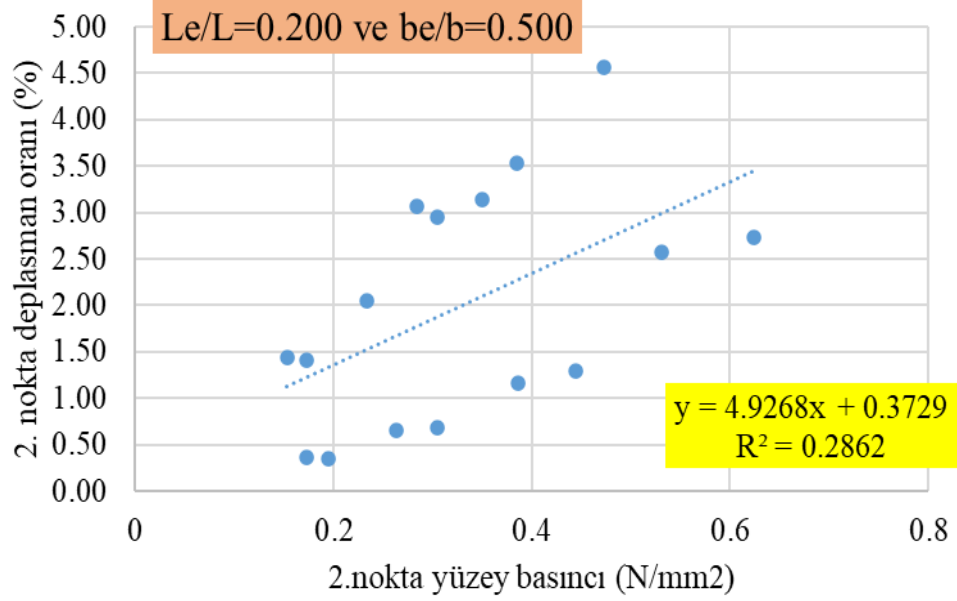
Şekil 5.135: $L_e/L=0.200$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



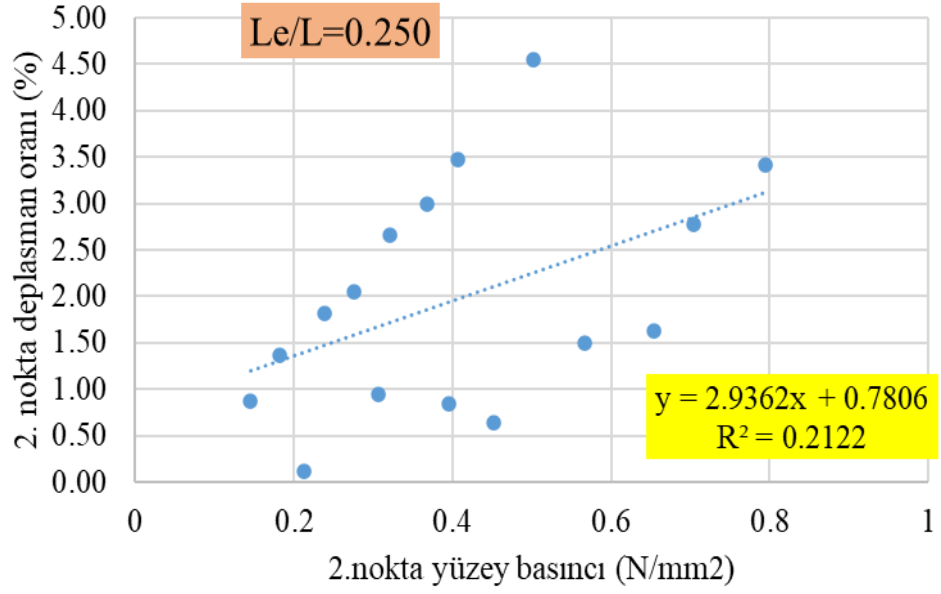
Şekil 5.136: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.167$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 134'ün alt grupları)



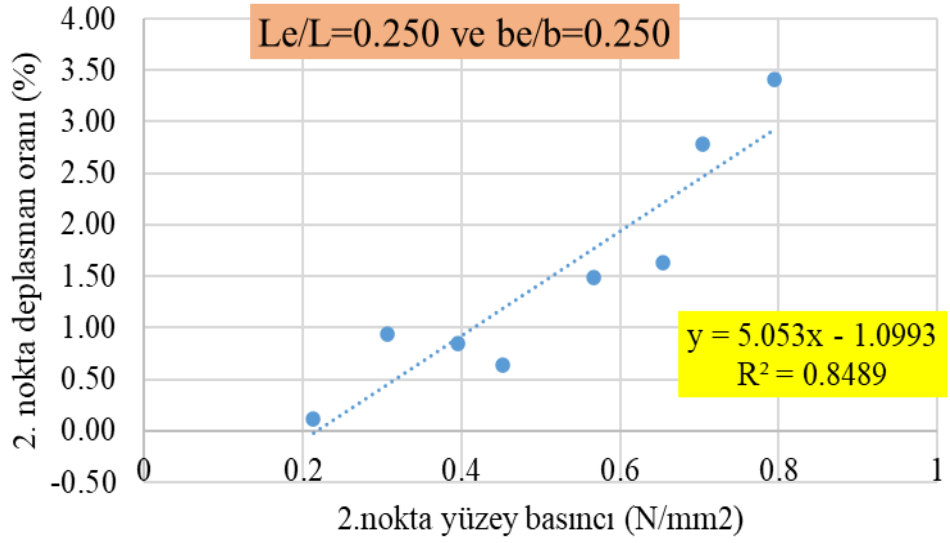
Şekil 5.137: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 134'ün alt grupları)



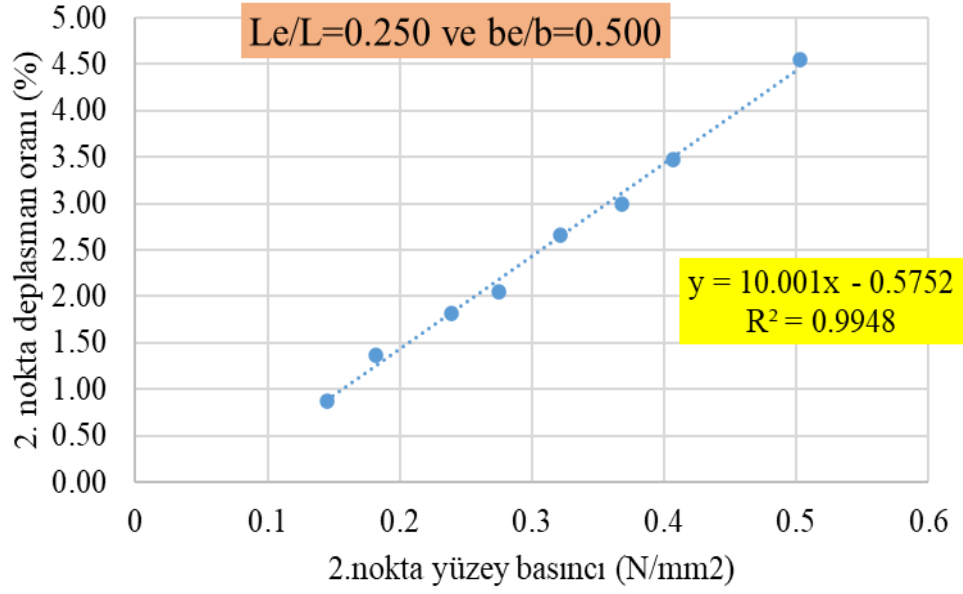
Şekil 5.138: $L_e/L=0.200$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 134'ün alt grupları)



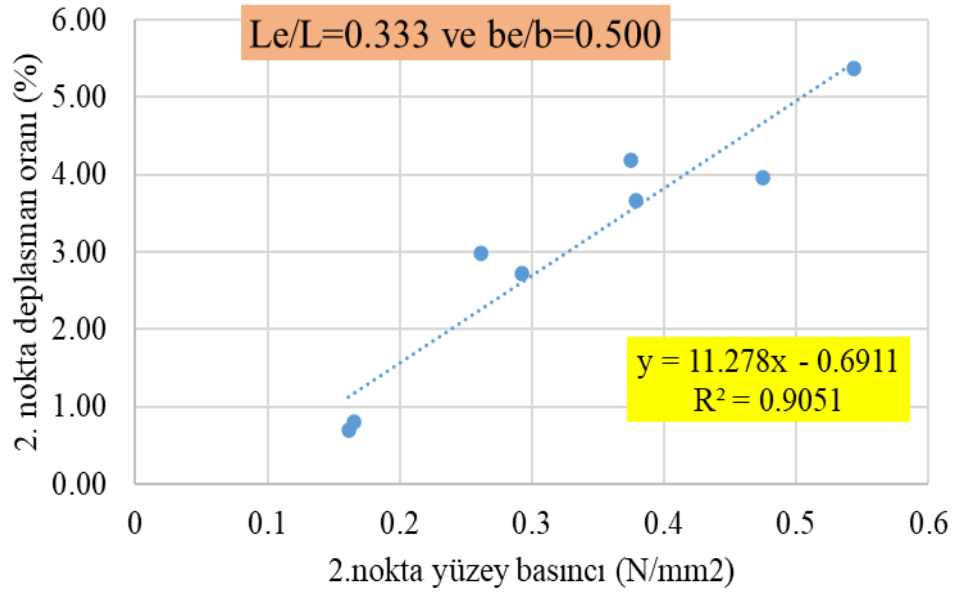
Şekil 5.139: $L_e/L=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



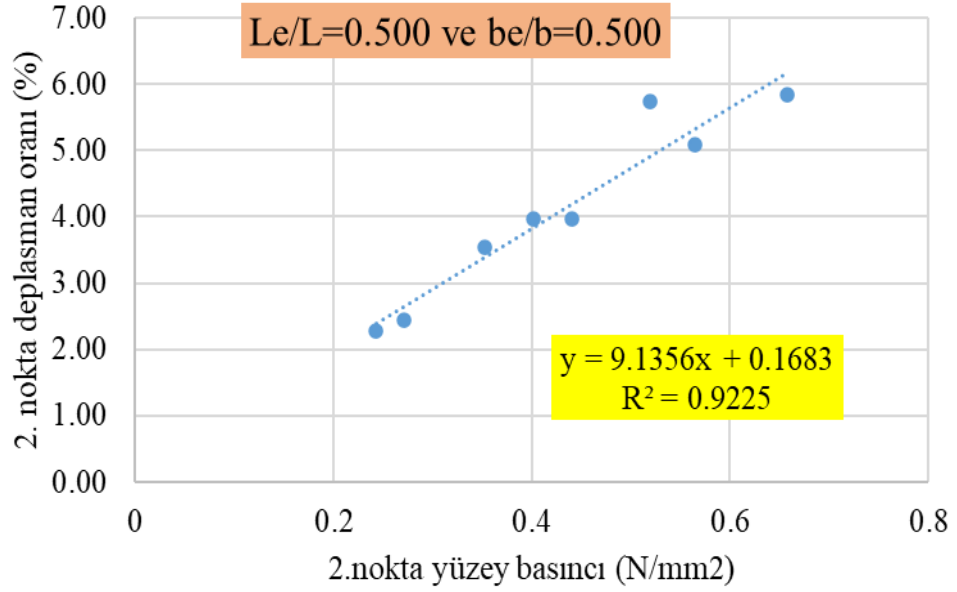
Şekil 5.140: $L_e/L=0.250$ ve $b_e/b=0.250$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 138'in alt grupları)



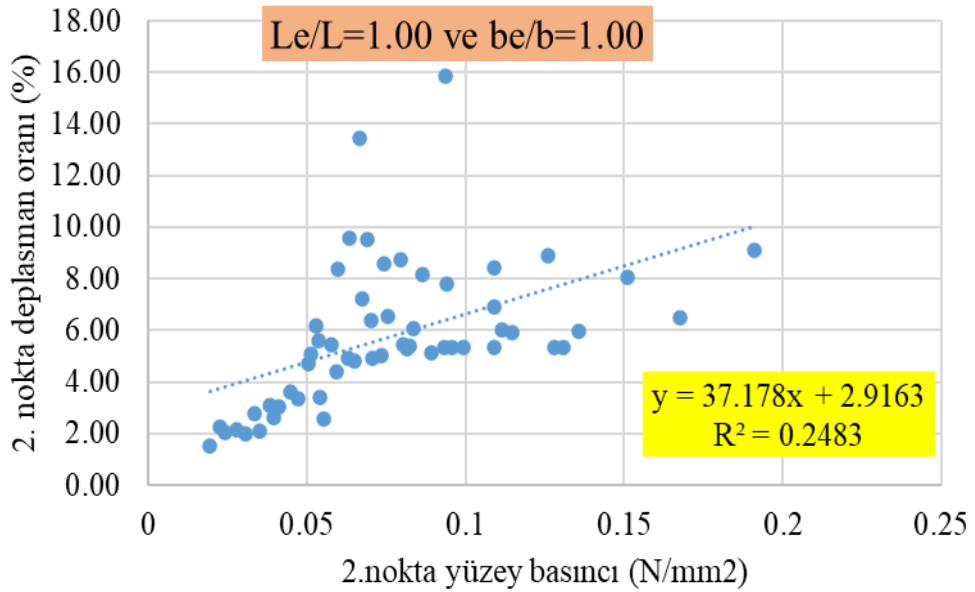
Şekil 5.141: $L_e/L=0.250$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi (Şekil 138'in alt grupları)



Şekil 5.142: $L_e/L=0.333$ ve $b_e/b=0.500$ için 2.noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



Şekil 5.143: $L_e/L=0.500$ ve $b_e/b=0.500$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi



Şekil 5.144: $L_e/L=1.00$ ve $b_e/b=1.00$ için 2. noktadaki deplasman oranı-yüzey basıncı ilişkisi

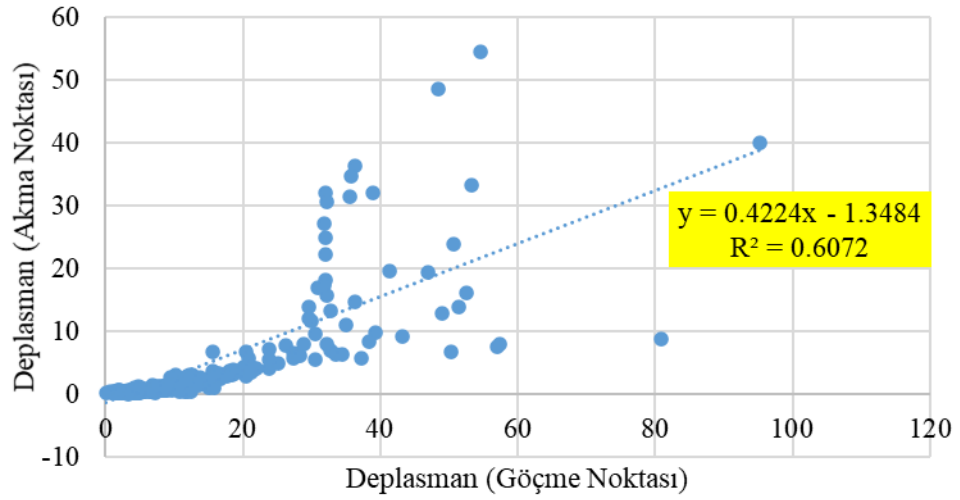
İncelenen parametreler ve gözlemlenen durumlar ışığında göçme noktasındaki deplasman değeri öncelikle aynı noktadaki yüzey basıncı değeri ile doğrusal bir ilişki içinde, daha sonra kendi içlerinde sırasıyla L_e/L ve t ile doğrusal bir denklem ile ifade edilebilecek bir ilişkiye sahiptir (akma noktası gibi aynı). Göçme noktası deplasman değerleri için elde edilen matematiksel model aşağıdaki gibidir.

$$DR_2 = \left[\left(d_{21} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{22} \right) \cdot \frac{L_e}{L} + \left(d_{23} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{24} \right) \right] \cdot SP_2 \quad (5.11)$$

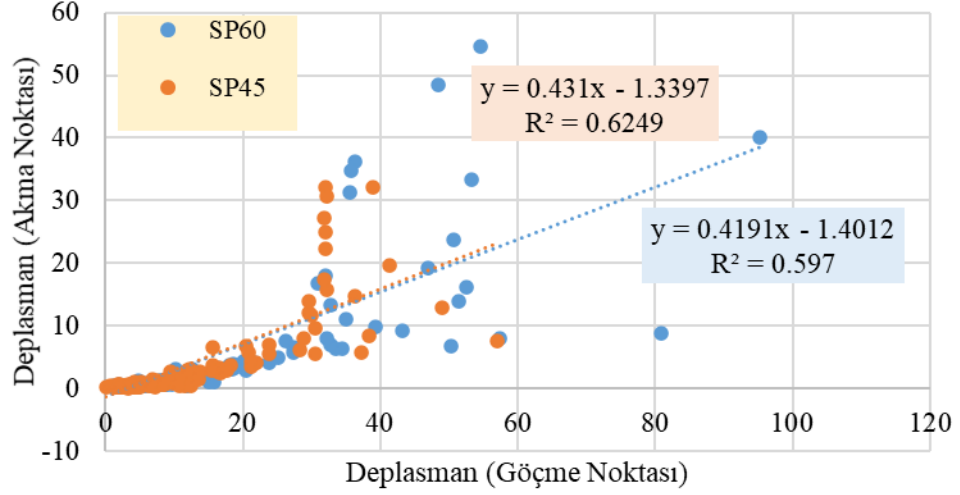
$$+ \left[\left(d_{25} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{26} \right) \cdot \frac{L_e}{L} + \left(d_{27} \cdot \frac{b_e}{b} + d_{28} \right) \right]$$

$$DR_2 = 100 \cdot \frac{\Delta_2}{b} \quad (5.12)$$

Denklemden verilen DR_2 2.noktaya ait deplasman oranını, Δ_2 1.noktaya ait deplasman değerini (mm), L panelin uzun kenar uzunluğunu (mm) ve L_e uzun kenar mesnet aralığını (mm) ifade etmektedir. Ayrıca denklemden kullanılan katsayılar $d_{21}=-0.09913$, $d_{22}=28.66727$, $d_{23}=0.0178$, $d_{24}=-5.12315$, $d_{25}=0.00388$, $d_{26}=3.45679$, $d_{27}=0.01534$ ve $d_{28}=-0.99956$ şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 5.145: Akma ve göçme noktasına ait deplasman değerlerinin ilişkisi (malzeme ayrımı yapmadan)

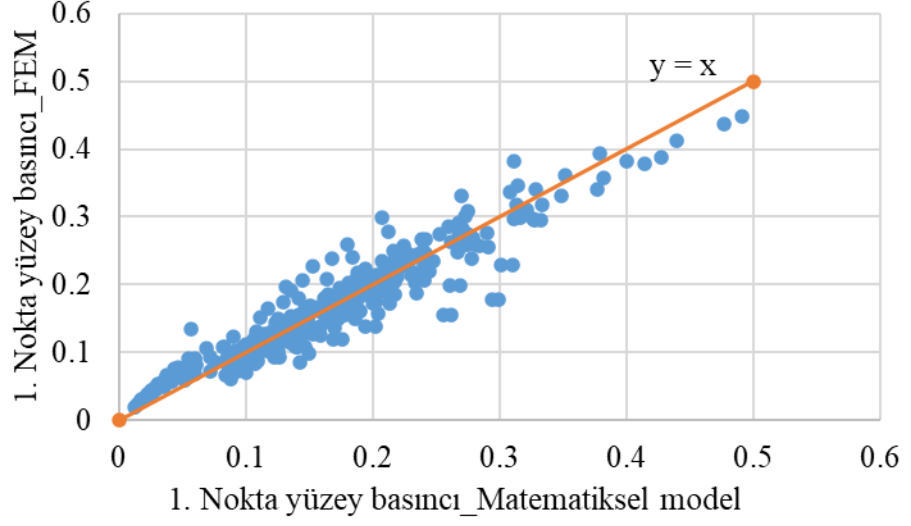


Şekil 5.146: Akma ve göçme noktasına ait deplasman değerlerinin ilişkisi (SP45 ve SP60 ayrı)

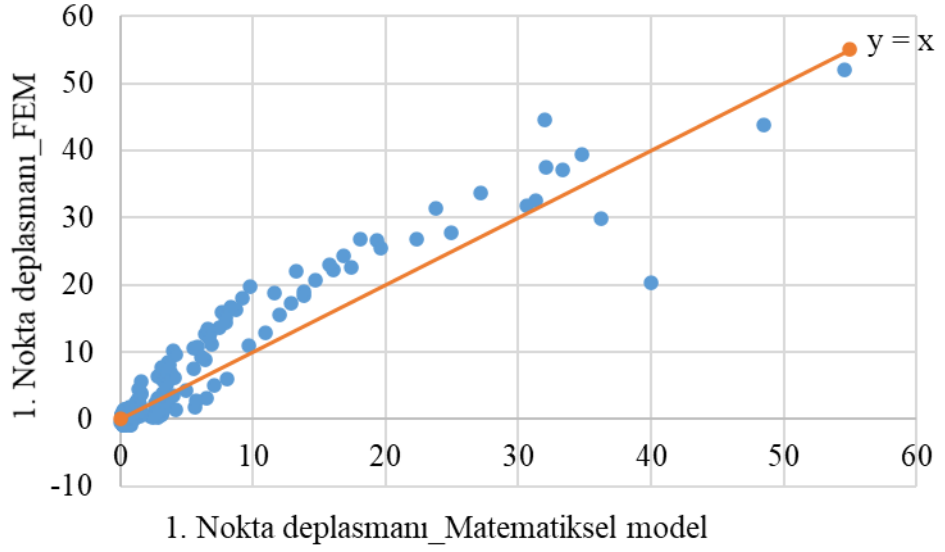
Deplasman değerlerini elde ederken yüzey basınçları ile ilişkisinde yola çıkarak matematiksel model bulma yoluna gidilmiştir. Fakat akma ve göçme noktalarındaki deplasman değerleri için yukarıda grafiklerde verilen ilişkiyi göstermekte mümkündür.

5.5 Matematiksel Model ve Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

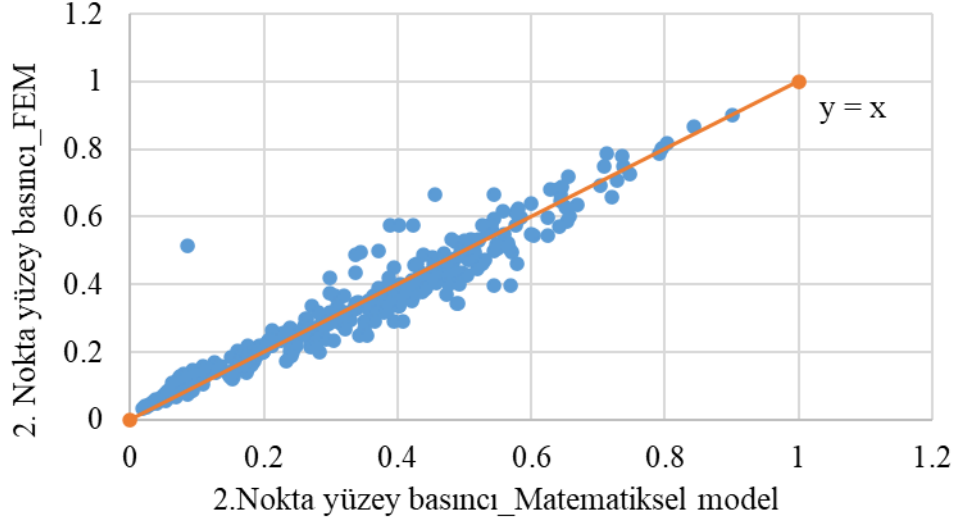
Yukarıda önerilen matematiksel modeller kullanılarak bulunan, 1 ve 2 numaralı karakteristik noktalar için yüzey basıncı ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Önerilen model sonuçları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Burada Şekil 147-150 arasındaki grafikler incelendiğinde hem yüzey basıncı için hem de deplasman değerleri için 2 noktada da matematiksel model kullanılarak bulunan değerlerin $y=x$ doğrusu etrafında dağıldıkları görülmüştür.



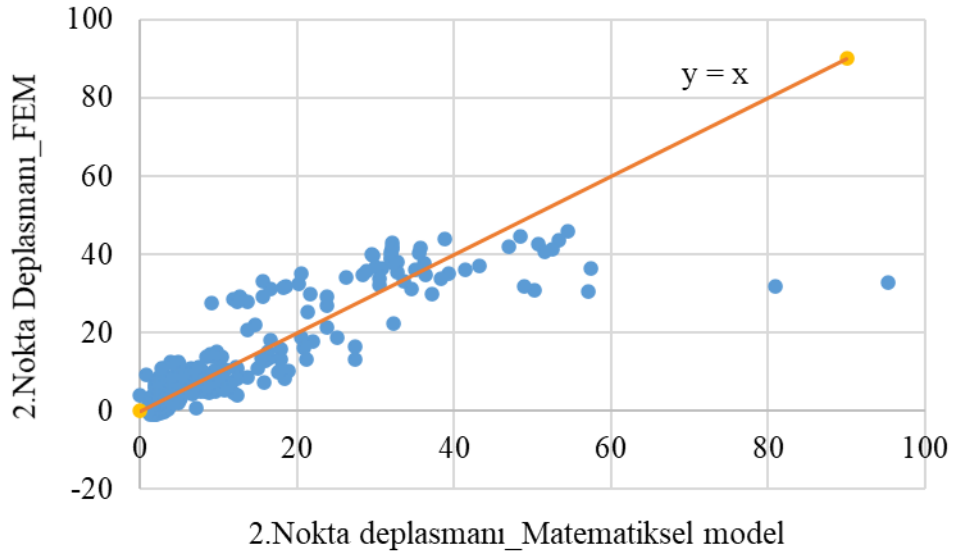
Şekil 5.147: 1.karakteristik nokta yüzey basıncı değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması



Şekil 5.148: 1.karakteristik nokta deplasman değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması



Şekil 5.149: 2.karakteristik nokta yüzey basıncı değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması



Şekil 5.150: 2.karakteristik nokta deplasman değerlerinin FEM-matematiksel model karşılaştırılması

- Tez kapsamında kullanılan iki farklı malzeme tipi vardı. Önerilen matematiksel model;

- Malzemeden bağımsız hale getirilmiştir.
 - Sınır koşullarının etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır.
 - Panel boyutlarının etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır.
- Matematiksel model için deplasman değerleri incelenirken yüzey basıncına karşılık $DR_I=100(\Delta/b)$ şeklinde normalize edilmiş deplasman değerlerinin grafiği çizilmiştir. Normalize edilen durum $DR_I=100(\Delta/b)$ şeklinde olduğunda $R^2=0.93409$, $DR_I=100(\Delta/b_e)$ şeklinde olduğunda $R^2=0.9165$ çıkmıştır. Görüldüğü üzere normalizasyonda b kullanıldığında daha yüksek bir R^2 değeri elde edilmiştir. Yani sınır koşulları burada çok da olumlu bir etki ortaya koymamıştır. Orta açıklıkta sınır koşullarının belirgin bir etkisi olmadığı için ya da orta noktalara geldikçe sınır koşullarının etkisi azalacağı için b_e 'nin değil de b 'nin kendi etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Yani toplam deplasman daha tahmin edilebilir hale gelmiştir.
- Matematiksel modelde deplasman değerlerini elde ederken, ilgili noktadaki deplasman-yüzey basıncı ilişkisinden yola çıkılmıştı. Fakat 1. ve 2.karakteristik noktadaki deplasman değerlerinin kendi arasındaki ilişkiyi yararlanarakta bir veri elde etmenin mümkün olabileceği grafiklerden görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Özet

Tez çalışması kapsamında, 328 adet çelik lifli beton panel sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ABAQUS programında analiz edilmiştir. Bu çalışmada panellerin düzlem dışı yüzey basıncı etkisi altında davranışları incelenmiştir. Panel boyutlarının öncelikle sonlu elemanlar analiz modeline esas teşkil eden ve literatürde yer almakta olan deneysel çalışma ile uyumlu olmasına özen gösterilmiştir. Analiz matrisi oluşturulurken panellerin ince kabuk (membran) davranışından daha ziyade kiriş teorisi ile uyumlu olabilecek şekilde kalınlıkları ve kısa kenar boyu sabit tutularak alan değişimine sebep olacak şekilde en-boy oranları farklılaştırılmıştır. Panellerin boyutları ayrıca, panellerin düzlem içi yüklemelere karşı da kullanılabileceği beklentisi ile belirlenmiştir. Panellerin yalnızca yüzey basıncı doğrultusunda ötelenmeleri engellenecek şekilde sınır koşulları seçilmiştir. Farklı sınır koşullarını incelemek amacıyla mesnet aralıkları değiştirilmiştir. Özetle, panel kalınlığı, panel boyutları, kısa kenar ve uzun kenar mesnet aralıkları ve malzeme tipi analizlerde incelenen parametreleri oluşturmaktadır. Analizler sonucunda, yüzey basıncı- orta açıklık sehimi ilişkileri elde edilmiş ve göz önüne alınan parametrelerle arasında bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca düzlem dışı yükleme altında davranışa ait karakteristikler için incelenmiş olan parametrelere bağlı matematiksel bağıntı kurulmuştur. Elde edilmiş olan matematiksel bağıntıların sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlarla uyumlu oldukları görülmektedir. Tez çalışmasına ait elde edilen genel sonuçlar ve öneriler alt başlıklar halinde sunulmuştur.

6.2 Sonuçlar

Tez kapsamında elde edilen veriler değerlendirildiğinde aşağıda özetlenmiş olan bulgular ön plana çıkmaktadır.

- Genel olarak çelik lif miktarındaki artış, basınç dayanımında etkin bir değişim beklenmeksizin (kimi zaman nispi miktarlarda artırarak) çekme dayanımını arttırmaktadır. Bu sebeple eğilmeye maruz kalan elemanların nihai taşıma

kapasitelerinde bir artış olması beklenen bir sonuçtur. Lif miktarındaki değişimin, SFRC panellerin genel davranışı ile incelenen parametreler arasındaki ilişkiyi değiştirmedeği gözlemlenmiştir. Benzer sınır koşulları, en-boy oranları ve kalınlıklar için, fiber miktarındaki artışın, daha yüksek orta-açıklık sehim değerlerinde daha yüksek nihai taşıma kapasitesinin gözlemlenmesine ve daha yüksek nihai orta açıklık sehimlerine ulaşılabilesine neden olduğu görülmüştür.

- Kalınlıktaki artış ile panelin rijitliği arttığı için daha küçük orta-açıklık sehim değerlerinde daha yüksek nihai taşıma kapasitesi gözlemlenebilmektedir. Bununla birlikte, panelin sınır koşulu ve en-boy oranı, daha yüksek bir orta-açıklık sehiminde gözlemlenen nihai taşıma kapasitesi ile sonuçlanabileceği görülmüştür.
- Yapılan çalışma kapsamında en-boy oranındaki artışın aynı kalınlıktaki paneller için maksimum mukavemette azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Ancak, panellerin nihai taşıma kapasitesindeki azalmaya en-boy oranının etkisinin, desteklenen konum sayısı azaldıkça daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. En-boy oranındaki artış panelin rijitliğini azalttığından, daha yüksek orta açıklık sehimlerinde daha düşük nihai taşıma kapasitesi gözlemlenebilmektedir. Bununla birlikte, sınır koşulları, nihai taşıma kapasitesinde orta açıklık sehim değerlerindeki değişimleri önemli ölçüde sınırlayabilmektedir. Benzer sınır koşullarına sahip ancak farklı en boy oranlarına sahip panellerin farklı davranışlar sergileyebileceği görülmüştür.
- Panellerin yüzey basıncı altında davranışını iyileştirmek için sadece köşelerden tutulmasının yeterli olmadığı, ara desteklerin gerekli olduğu gözlemlenmiştir. Orta açıklık sehim değerleri açısından değerlendirildiğinde, sadece köşelerde desteklenen (sınır şartı 1) panellerin yüzey basıncına karşı daha düşük direnç gösterdiğini ve bu dirence ancak daha büyük orta açıklık sehimlerinde erişilebildiğini göstermiştir.
- Kısa kenardaki mesnetler, panellerin nihai taşıma kapasitesinde hayati bir role sahiptir ve nihai taşıma kapasitesinde gözlemlenen orta-açıklık sehimini çoğu durumda daha yüksek deformasyon seviyelerine taşımıştır. Uzun kenar mesnet aralığı sabit olmak üzere farklı kısa kenar mesnet aralıklarının etkisi

incelendiğinde, panel kalınlığı arttıkça kısa kenar mesnet aralığının azalması, boyut artışı ile ortaya çıkan sehım miktarındaki artışı azaltmaktadır.

- Uzun kenardaki destek koşulları, kısa kenardaki destek koşulu ne olursa olsun, nihai taşıma kapasitesinde orta açıklık sehım değerlerindeki değişimi etkilemiştir. Ancak, sınır koşulunun maksimum orta-açıklık sehım değerleri üzerindeki etkisi, kısa kenardaki sınır koşuluna bağılı olarak farklılaşabilmektedir. Panellerin nihai taşıma gücünün değişimi üzerinde kısa kenardaki mesnet koşullarının uzun kenardaki mesnet şartlarına göre daha etkili olduğu görülmüştür. Uzun kenardaki mesnet şartları, nihai taşıma kapasitesinde önemli bir değişiklik olmaksızın panelin yüzey basıncına karşı rijitliğini etkilemektedir.
- Araştırılan parametrelerin nihai taşıma kapasitesi ve nihai taşıma kapasitesinde orta-açıklık sehım değerleri üzerindeki etkileri net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Buna karşın araştırılan parametrelerdeki varyasyonlardan dolayı nihai orta açıklık sehım değerlerindeki değişimler daha düşük korelasyonlar ile gözlemlenmiştir. Benzer bulgular, SFRC panellerin orta açıklıkta noktasal yüke tabi tutulmuş olduğu literatürde yer alan deneysel bir araştırmada da gözlenebilmektedir. Bu sebeple araştırılan parametreler ile nihai orta-açıklık sehım değerleri arasında nispeten daha düşük korelasyonlu bağıntı kurulabilmiştir.
- Boyut değişiminin enerji yutma kapasitesine etkisi incelendiğinde kalınlık ve mesnet durumu sabit tutularak çeşitli analizler yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları göz önüne alındığında, en küçük boyutlu panellerin en büyük enerji emilim yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.
- En-boy oranındaki (yüzey alanındaki) artışın, incelenen diğer parametrelerden bağımsız olarak nihai taşımayı azalttığı açıkça görülmektedir. En ince paneller için, uzun kenarlardaki destekler arasındaki mesafenin değişiminden nihai taşıma kapasitesi etkilenmemiştir. Mesnetler arasındaki mesafenin kısa kenardaki değişiminin etkisi, daha küçük en-boy oranlarına sahip en kalın panellerde daha belirgindir. En-boy oranı arttıkça sınır koşullarının etkisi daha ihmal edilebilir hale gelmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışması kapsamında etkisi incelenmiş olan parametrelerin, panellerin düzlem dışı yüzey basıncı altındaki davranışına yalın halde

etkilerinin, benzer sınır koşulları oluşturulduğunda, literatürde kabul gören temel teorilerle izah edilebilir durumda olduğu görülmektedir. Ancak, farklı sınır koşulları altında bu parametrelerin düzlem dışı yükleme altında davranışa etkilerinin yalın halde dikkate alınması durumunda yapılacak öngörülerde hata durumu artmakta hatta farklı davranış karakteristikleri ortaya çıkmaktadır. Farklı sınır koşulları altında panelin en-boy oranı ve panelin kalınlığındaki değişimler SFRC panelin düzlem dışı yüzey basıncı etkisi altındaki davranışlarında farklı etkilere sebep olmaktadır. Bir başka ifade ile panellerin düzlem dışı yüzey basıncı altında davranışını öngörebilmek adına kalınlık, en-boy oranı, sınır koşulları durumlarının etkisinin birlikte göz önüne alınması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında gözlemlenen bulgular ışığında panellerin düzlem dışı yüzey basıncı yüklemesi altında davranışına ait karakteristikleri öngören ve bunun için parametrelerin birleşik etkisini göz önüne alan yüksek korelasyonlu hassas numerik bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntılardan yalnızca nihai dayanımda gözlemlenen orta-açıklık sehim değeri diğerlerine göre daha düşük korelasyonla elde edilebilmiştir. Literatürde yer almakta olan deneysel (orta açıklıkta tekil yüke tabi tutulmuş SFRC panellerin davranışları) çalışmalara ait sonuçlar nihai dayanımda gözlemlenen orta-açıklık sehim değerlerinin öngörülebilirliği kapsamında değerlendirildiğinde, diğer karakteristiklerin öngörülebilirliğine göre daha yüksek hata payına sahip olduğu görülmektedir.

6.3 Öneriler

- Sunulan çalışma kapsamında düzlem dışı basınç yüküne maruz bırakılan panellerin kalınlıkları kiriş davranış modelini ön plana çıkararak şekilde seçilmiştir. Daha ince kalınlığa (veya kalınlık/yüzey alanı) sahip kabuk (membran) davranışı ortaya çıkması beklenen boyutlarda sonuçların farklı formda gözlenebilmesinin mümkün olacağı değerlendirilmektedir.
- Ele alınan bu panellerin düzlem içi yüklemeler altında davranışındaki farklılaşmalar ele alınarak karakterize edilmesi ve bu panellerin taşıyıcı sistem içinde davranışının deprem, patlama gibi farklı etkilerde taşıyıcı sistem davranışına etkisi incelenebilmesinin mümkün olduğu değerlendirilmektedir.

- Matematiksel modelde özellikle Δ_2 için gözlemlenen düşük korelasyonun sebepleri araştırılarak, belki farklı yaklaşımlar kullanılarak daha yüksek korelasyonlu numerik formüller incelenebilir.
- Yapılan çalışma simetrik sınır koşullarına dayanmaktadır. Asimetrik sınır koşullarında ortaya çıkabilecek farklılaşmaların ayrıca değerlendirilmesi önerilmektedir. Bununla birlikte, sınır koşulları yalnızca yüzey basıncı doğrultusunda ötelemeyi engelleyecek şekilde tanımlanmış olup, panellerin sınırlarında düzlem içi doğrultularda hareketleri sınırlandırıldığında farklı sonuçların gözlemlenebileceği öngörülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Abbass, W., Khan, M. I. and Mourad, S., "Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete", *Constr. Build. Mater.*, 168, 556–569, (2018).

Abdel-Kader, M. and Fouda, A., "Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles", *Int. J. Impact. Eng.*, 63, 1–17, (2014).

Abolhassan, A. A., Casey, H. and QiuHong, Z., "Analysis of Car-Bomb Effects on Buildings using MSC-Dytran Software and Protective Measures", in Proceedings of The MSC Software Virtual Product Development Conference, 1–10, (2003).

Abrishambaf, A., Barros, J. A. O. and Cunha, V. M. C. F., "Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels", *Cem. Concr. Res.*, 51, 57–66, (2013).

Abrishambaf, A., Barros, J. A.O., Cunha, V. M.C.F., "Time-dependent flexural behaviour of cracked steel fibre reinforced self-compacting concrete panels", *Cem. Concr. Res.* 72, 21–36, (2015).

Abrishambaf, A., Cunha, V. M. C. F. and Barros, J. A. O., "A two-phase material approach to model steel fibre reinforced self-compacting concrete in panels", *Eng. Fract. Mech.*, 162, 1–20, (2016).

ACI 544.1R-96, State-of-the-art report on fiber reinforced, American Concrete Institute, USA, (2002).

ACI 544.4R-18 Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete.

Adhikary, B. B. and Mutsuyoshi, H., "Prediction of shear strength of steel fiber RC beams using neural networks", *Constr. Build. Mater.*, 20, 801–811, (2006).

Aghniaey, N., "Behaviour Of Self Consolidating Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Under Reversed Cyclic Loading", Master Thesis, University of Ottawa, Ottawa, Canada, (2013).

Akbaba, M., "Elastik Zemin Oturan Çelik Lif Donatılı ve Çelik Hasır Donatılı Beton Plakların Sayısal Analizi" Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).

Alias Yusof, M., Mohd Zain, F., Ng, C., Pertahanan Nasional Malaysia, U. and Sungai Besi Kuala Lumpur, K., "Normal Strength Steel Fiber Reinforced

Concrete Subjected to Explosive Loading", *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.*, 1, (2010).

Almeida, M.I.A., "Structural behaviour of composite sandwich panels for applications in the construction industry", M.Sc. Thesis Extended Abstract, Instituto Superior Técnico Universidade de Lisboa, October, (2009).

Alsaif, A., Koutas, L., Bernal, S.A., Guadagnini, M., Pilakoutas, K., "Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements", *Constr. Build. Mater.*, 172, 533–543 (2018).

Amabili, M., *Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates*, Cambridge University Press, ISBN-13:978-0-521-88329-0, (2008).

Aoude, H., Dagenais, F. P., Burrell, R. P., Saatcioglu, M., "Behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading", *Int. J. Impact. Eng.*, 80, 185-202, (2015).

Atiş, C.D. and Karahan, O., "Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete", *Constr. Build. Mater.*, 23, 392–399, (2009).

Babaie, R., Abolfazli, M., and Fahimifar, A., "Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete", *J. Mech. Behav. Mater.*, 28, 119–134, (2019).

Banthia, N. and Sappakittipakorn, M., "Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization", *Cem. Concr. Res.*, 37, 1366–1372, (2007).

Barros, J.A.O., and Figueiras, J.A., "Experimental Analysis of Fiber Reinforced Concrete Slabs", SISE - Comunicações a Conferências Internacionais, (1997).

Barros, J.A.O., Pereira, E.N.B., Ribeiro, A.F., Cunha, V.M.C.F., and Antunes, J.A.B., "Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precast sandwich panels : experimental and numerical research", International RILEM Symposium On Fibre Reinforced Concrete, 6, Varenna, (2004).

Behnood, A., Verian, K. P. and Modiri Gharehveran, M., "Evaluation of the splitting tensile strength in plain and steel fiber-reinforced concrete based on the compressive strength", *Constr. Build. Mater.*, 98, 519–529, (2015).

Bischoff, P., "Tension stiffening and cracking of steel fibre reinforced concrete", *J. Mater. Civ. Eng.*, 2(15), 174–182, (2003).

Borges, L.A.C., Monte, R., Rambo, D.A.S., de Figueiredo, A. D., "Evaluation of post-cracking behavior of fiber reinforced concrete using indirect tension test", *Constr. Build. Mater.*, 204, 510–519, (2019).

Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., Taylor, C., “Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 124, 878–886, (2016).

Choi, K.K., Taha, M.M.R., Park, H.G. and Maji, A.K., “Punching shear strength of interior concrete slab–column connections reinforced with steel fibers”, *Cem. Concr. Compos.*, 29, 409–420, (2007).

Choudhary, S., Jain, A., Bhavsar, H., Chaudhary, S. and Choudhary, R., "Analysis of steel fiber reinforced concrete wall panels under compression, flexural and impact loading", *Mater. Today: Proceedings*, 38, 2471–2475, (2020).

Corley, W. G., "Applicability of Seismic Design in Mitigating Progressive Collapse", Construction Technology Laboratories Report, Inc., Skokie, Illinois, Nist workshop, (2002).

DAL, H., “Elastik ve Sönüm Mesnetli Plakların Titreşimlerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).

Dere, Y., and Koroglu, M.A., “ Nonlinear FE Modeling of Reinforced Concrete”, *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, 6(1), (2017).

Ding, Y., and Kusterle, W., "Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age", *Cem. Concr. Res.*, 29, 1827–1834, (1999).

Doh, J.H., "Experimental and Theoretical Studies Of Normal And High Strength Concrete Wall Panels", PhD Thesis, School of Engineering Faculty of Engineering and Information Technology, Griffith University, Gold Coast Campus August, (2002).

Dvorkin, L., Dvorkin, O., Zhitkovsky, V. and Ribakov, Y., "A method for optimal design of steel fiber reinforced concrete composition", *Mater. Des.*, 32, 3254–3262, (2011).

Feng, J., Sun, W., Liua, Z., Cui, C., Wang, X., “An armour-piercing projectile penetration in a double-layered target of ultra-high-performance fiber reinforced concrete and armour steel: Experimental and numerical analyses”, *Mater. Des.*, 102, 131–141, (2016).

Feng, J., Gao, X., Li, J., Dong, H., Yao, W., Wang, X., Sun, W., “Influence of fiber mixture on impact response of ultra-high-performance hybrid fiber reinforced cementitious composite”, *Compos. B. Eng.*, 163, 487–496, (2019).

fib Model Code 2010 – final draft: CEB and FIP; 2011.

Figuli, L., Bedon, C., Zvaková, Z., Jangl, Š. and Kavický, V., "Dynamic analysis of a blast loaded steel structure", *Procedia Eng.*, 199, 2463–2469, (2017).

Foglar, M., Hajek, R., Kovar, M. and Štoller, J., "Blast performance of RC panels with waste steel fibers", *Constr. Build. Mater.*, 94, 536–546, (2015).

Ganesan, N., Indira, P. v. and Himasree, P. R., "Strength and behaviour of bamboo reinforced concrete wall panels under two way in-plane action", *Adv. Concr. Constr.*, 6, 1–13, (2018).

Gao, J., Suqa, W. and Morino, K., "Mechanical Properties of Steel Fiber-reinforced, High-strength, Lightweight Concrete", *Cem. Concr. Compos.*, 19, 307–313, (1997).

Gopalaratnam, V.S., and Gettu, R., "On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes", *Cem. Concr. Compos.*, 17, 239-254, (1995).

Gribniak, V., Kaklauskas, G., Hung Kwan, A. K., Bacinskas, D. and Ulbinas, D., "Deriving stress-strain relationships for steel fibre concrete in tension from tests of beams with ordinary reinforcement", *Eng. Struct.*, 42, 387–395, (2012).

Guo, W., Fan, W., Shao, X., Shen, D., Chen, B. "Constitutive model of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for low-velocity impact simulations", *Compos. Struct.*, 185, 307–326, (2018) .

Haido, J. H., Bakar, B. H. A., Abdul-Razzak, A. A., Jayaprakash, J. and Choong, K. K., "Simulation of dynamic response for steel fibrous concrete members using new material modeling", *Constr. Build. Mater.*, 25, 1407–1418, (2011).

Hao, Y., Hao, H., "Pull-out behaviour of spiral-shaped steel fibres from normal-strength concrete matrix", *Constr. Build. Mater.*, 139, 34–44, (2017).

Himasree, P. R., Ganesan, N. and Indira, P. v., "Bamboo as a substitute for steel in reinforced concrete wall panels", in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 80, (2017).

Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K. and Bier, T. A., "Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC)", *Constr. Build. Mater.*, 98, 325–333, (2015).

Islam, M. M., Khatun, M.S., Ul Islam M.R., Dola, J.F., Hussan, M., and Siddique, A., "Finite element analysis of steel fiber-reinforced concrete

(SFRC): validation of experimental tensile capacity of dog-bone specimens", *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, 6, (2014).

Jamnam, S., Maho, B., Techaphatthanakon, A., Sonoda, Y., Yoo, D.Y., Sukontasukkul, P., "Steel fiber reinforced concrete panels subjected to impact projectiles with different caliber sizes and muzzle energies", *Case Stud. Constr. Mater.*, 13, (2020).

Jeon, S. J. and Jin, B. M., "Improvement of impact-resistance of a nuclear containment building using fiber reinforced concrete", *Nucl. Eng. Des.*, 304, 139–150, (2016).

Jongvivatsakul, P., Bui, L.V.H., Koyekaewphring, T., Kunawisarut, A., Hemstapat, N., and Stitmannaitum, B., "Using Steel Fiber-Reinforced Concrete Precast Panels for Strengthening in Shear of Beams: An Experimental and Analytical Investigation", *Adv. Civ. Eng.*, (2019).

Kim, H., Kim, G., Nam, J., Kim, J., Han, S., and Lee, S., "Static mechanical properties and impact resistance of amorphous metallic fiber-reinforced concrete", *Compos. Struct.*, 134, 831–844, (2015).

Koksal, F., Ilki, A. and Tasdemir, M. A., "Optimum Mix Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete Plates", *Arab. J. Sci. Eng.*, 38, 2971–2983, (2013).

Lee, D. H., Han, S. J., Kim, K. S. and LaFave, J. M., "Shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams", *Struct. Concr.*, 18, 278–291, (2017).

Li, Q.M., Reid, S.R., Wen, H.M., and Telford, A.R., "Local impact effects of hard missiles on concrete targets", *Int. J. Impact. Eng.*, 32, 224-284, (2005).

Lin, X., Zhang, Y. X. and Hazell, P. J., "Modelling the response of reinforced concrete panels under blast loading", *Mater. Des.*, 56, 620–628, (2014).

Luccioni, B., Isla, F., Codina, R., Ambrosini, D., Zerbino, R., Giaccio, G., Torrijos, M.C., "Effect of steel fibers on static and blast response of high strength concrete", *Int. J. Impact. Eng.*, 107, 23-37, (2017).

Lu X., Zhang Y., Zhang H., Zhang H, Xiao R., "Experimental study on seismic performance of steel fiber reinforced high strength concrete composite shear walls with different steel fiber volume fractions", *Eng. Struct.*, 17, 247-259, (2018).

Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, McGraw-Hill, New York, 2006.

Meng, W., Khayat, K.H., Bao, Y., "Flexural behaviors of fiber-reinforced polymer fabric reinforced ultra-high performance concrete panels", *Cem. Concr. Compos.*, 93, 43–53, (2018).

- Meskenas, A., Gelazius, V., Kaklauskas, G., Gribniak, V. and Rimkus, A., "A new technique for constitutive modeling of SFRC", *Procedia Eng.*, 57, 762–766, (2013).
- Michels, J., Christen, R. and Waldmann, D., "Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete", *Eng. Fract. Mech.*, 98, 326–349, (2013).
- Michal, S., and Andrzej, W., "Calibration of the CDP model parameters in Abaqus", The 2015 World Congress on Advances in structural Engineering and Mechanics, Incheon, Korea, August 25-29, (2015).
- Mo, K.H., Yap, S.P., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., and Bu, C.H., "Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete", *Constr. Build. Mater.*, 50, 499-507, (2014).
- Mohaisen, S., Al-Jaberi, L., Haqi Ismael, A., "Experimental Study on Structural Behavior of Thin Wall Concrete Panels Experimental Study on Structural Behavior of Thin Wall Concrete Panels Subjected to Axial Eccentric Uniformly Distributed Loading", *J. Eng. Sustain. Dev.*, 21(01), (2017).
- Mohammadhosseini H., Tahir, M.Md., Sam, A.R.M., "The feasibility of improving impact resistance and strength properties of sustainable concrete composites by adding waste metalized plastic fibres", *Constr. Build. Mater.*, 169, 223–236, (2018).
- Moradi, M., Valipour, H., Foster, S.J., Bradford, M.A., "Deconstructable steel-fibre reinforced concrete deck slabs with a transverse confining system", *Mater. Des.*, 89, 1007–1019, (2016).
- Moradi, M., Valipour, H., Foster, S., "Fatigue behaviour of transversely restrained precast steel fibre reinforced concrete slabs in a deconstructable composite deck", *Constr. Build. Mater.*, 132, 516–528,(2017).
- Mousavi, S. E., "Flexural response and crack development properties of ferrocement panels reinforced with steel fibers", *J. Build. Eng.*, 12, 325–331, (2017).
- Naaman, A.E., "Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites", *J. Adv. Concr. Technol.*, 1, 241-252, (2003).
- Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P., "Stress±strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression", *Cem. Concr. Compos.*, 21, 383–390, (1999).

Nataraja, M.C., Nagaraj, T.S., Basavaraja, S.B., "Re-proportioning of Steel Fibre Reinforced Concrete Mixes and their Impact Resistance", *Cem. Concr. Res.*, 35, 2350-2359, (2005).

Nehme, S. G., László, R. and Mir, A. el, "Mechanical Performance of Steel Fiber Reinforced Self-compacting Concrete in Panels", *Procedia Eng.*, 196, 90–96, (2017).

Nguyen-Minh, L., Rovnák, M., Tran-Ngoc, T. and Le-Phuoc, T., "Punching shear resistance of post-tensioned steel fiber reinforced concrete flat plates", *Eng. Struct.*, 45, 324–337, (2012).

Nguyen, D.L., Kim, D.J., Ryu, G.S., Koh, K.T., "Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete", *Compos. B. Eng.*, 45, 1104-1116, (2013).

Olivito, R.S., and Zuccarello, F.A., "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete", *Compos. B. Eng.*, 41, 246–255, (2010).

Ou, Y.C., Tsai, M.S., Liu, K.Y., and Chang, K.C., "Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index", *J. Mater. Civ. Eng.*, 24, 207–215, (2012).

Özcan, D.M., Bayraktar, A., Şahin, A., Haktanir, T., and Türker, T., "Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior", *Constr. Build. Mater.*, 23, 1064–1077, (2009).

Özdemir, Y.I., "Deprem Etkisindeki Kalın Plakların Mindlin Teorisi Kullanılarak Parametrik Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).

Özgan, K., ve Daloğlu A.T., "Elastik Zemine Oturan Kalın Plaklar İçin Kayma Kilitlenmesiz Bir Sonlu Eleman Modeli", *İMO Teknik Dergi*, 5341-5358, (2011).

Pantelides, C. P., Garfield, T. T., Richins, W. D., Larson, T. K. and Blakeley, J. E., "Reinforced concrete and fiber reinforced concrete panels subjected to blast detonations and post-blast static tests", *Eng. Struct.*, 76, 24–33, (2014).

Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S. and Koh, K.T., "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete", *Cem. Concr. Compos.*, 34, 172–184, (2012).

Pérez, Q.V., Prieto, C.D. and Zapata Orduz, Z.L.E., "Mechanical characterization of self-compacting steel fiber reinforced concrete using digital image correlation", *Eng. Fract. Mech.*, 246, (2021).

Pikus, G. A., "Steel Fiber Concrete Mixture Workability", *Procedia Eng.*, 150, 2119–2123, (2016).

Ribeiro, T.S.A., and Serna, P., “Numerical analysis of steel fiber reinforced concrete shells”, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, (2019).

RILEM TC 162-TDF, “Final Recommendation of RILEM 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete σ - ϵ Design Method,” *Mater. Struct.*, 36 (262), 560-567, 2003.

Saheb, M.S., Desayi, P., “Ultimate Strength of RC Wall Panels in Two-Way In-Plane Action”, *J. Struct. Eng. ASCE*, 116(5), 1384-1402, (1990).

Salehian, H., Barros, J. A. O. and Taheri, M., "Evaluation of the Influence of Post-Cracking Response of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) on Load Carrying Capacity of SFRC Panels", *Constr. Build. Mater.* 73, 289–304, (2014).

Sánchez, M. L., Capote, G., Carrillo, J., “Composites reinforced with Guadua fibers: Physical and mechanical properties”, *Constr. Build. Mater.*, 228, (2019).

Shah, S.P., Stroeven, P., Dalhuisen, D. and Van Stekelenburg, P., “Complete stress-strain curves for steel fibre reinforced concrete in uniaxial tension and compression, in Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, RILEM Symposium, pp. 399-408, Construction Press, Lancaster, (1978).

Singhal, A., Kasilingam, S., and Bawa, S., "Influence of Boundary Condition and Mass of TNT on the Behaviour of Concrete Slab under Blast Loading” Proceedings of National Conference : Advanced Structures, Materials and Methodology in Civil Engineering , 03 - 04th November, (2018).

Song, P.S., and Hwang, S., "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete", *Constr. Build. Mater.*, 18, 669–673, (2004).

Sucharda, O., Pajak, M., Ponikiewski, T., and Konecny, P., “Identification of mechanical and fracture properties of self-compacting concrete beams with different types of steel fibres using inverse analysis”, *Constr. Build. Mater.*, 138, 263–275, (2017).

Sun, X., Zhao, K., Li, Y., Huang, R., Ye, Z., Zhang, Y., Ma, J., “A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 158, 657–669, (2018).

Susetyo, J., Gauvreau, P. and Vecchio, F.J., "Effectiveness of Steel Fiber as Minimum Shear Reinforcement", *ACI Struct. J.*, 108, 488–496, (2011).

Susetyo, J., Gauvreau, P. and Vecchio, F.J., "Steel Fiber-Reinforced Concrete Panels in Shear: Analysis and Modeling", *ACI Struct. J.*, 110, 285–296, (2013).

Soufeiani, L., Raman, S.N., Jumaa M.Z.B., Alengaram, U.J., Ghadyani, G., Mendis, P., "Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiberreinforced concrete subjected to dynamic loading – A review", *Eng. Struct.*, 124, 405–417, (2016).

Soulioti, D.V., Barkoula, N.M., Paipetis, A. and Matikas, T.E., "Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete," *Strain*, 47, 535–541, (2011).

Tai, Y. S., "Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target", *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 51, 117–128, (2009).

Tan, K.H., and Venkateshwaran, A., "Punching Shear in Steel Fiber-Reinforced Concrete Slabs with or without Traditional Reinforcement", *ACI Struct. J.*, 116, 107–118, (2019).

Tan, K.H. and Paramasivam, P., "Punching Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs", *J. Mater. Civ. Eng.*, 6, 240–253, (1994).

Tasneem, P., Khalid, A. Z. and Al-Jahwari, F. K. S., "Effects of boundary conditions in laminated composite plates using higher order shear deformation theory", *Appl. Compos. Mater.*, 17, 499–514, (2010).

Teng, T.L., Chu, Y.A., Chang, F.A., Shen, B.C., and Cheng, D.S., "Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact", *Comput. Mater. Sci.*, 42, 90-99, (2008).

Temami, O., Ayoub, A., Hamadi, D. and Bennoui, I., "Effect of Boundary Conditions on the Behavior of Stiffened and Un-Stiffened Cylindrical Shells", *Int. J. Steel Struct.*, 19, 867–878, (2019).

Tlemat, H., Pilakoutas, K., and Neocleous, K., "Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres", *Mater. Struct.*, 39 (3), 365-377, (2006).

Toutanji, H., and Bayasi, Z., "Effect of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete", *Cem. Concr. Res.*, 28, 115-124, (1998).

Ünal, O., Demir, F. and Uygunoğlu, T., "Fuzzy logic approach to predict stress-strain curves of steel fiber-reinforced concretes in compression", *Build. Environ.*, 42, 3589–3595, (2007).

Usta, F., Mullaoglu, F., Türkmen, H.S., Balkan, D., Mecitoğlu, Z., Kurtaran, H., Akay, E., "Effects of Thickness and Curvature on Impact Behaviour of Composite Panels", *Procedia Eng.*, 167, 216–222, (2016).

Vandenberghe, M., and Zwevegem, B., "Steel fibres for the Construction of military shelters, ", in IV. International Dramix Conference, (1990).

Venkateshwaran, A., Tan, K. H. and Li, Y., "Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers", *Struct. Concr.*, 19, 352–365, (2018).

Vossoughi, F., Ostertag, C. P., Monteiro, P. J. M. and Johnson, G. C., "Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact", *Cem. Concr. Res.*, 37, 96–106, (2007).

Wang, H.T., and Wang, L.C., "Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete", *Constr. Build. Mater.*, 38, 1146–1151, (2013).

Wu, C., and Sheikh, H., "A finite element modelling to investigate the mitigation of blast effects on reinforced concrete panel using foam cladding", *Int. J. Impact. Eng.*, 55, 24–33, (2013).

Wu, Z., Shi, C., He, W., and Wu, L., "Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete", *Constr. Build. Mater.*, 103, 8–14, (2016).

Yaghoobi, H. and Torabi, M., "Exact solution for thermal buckling of functionally graded plates resting on elastic foundations with various boundary conditions", *J. Therm. Stress.*, 36, 869–894, (2013).

Yalçın, M., "Çelik lif donatılı betonların performansına dayalı tasarımı ve optimizasyonu", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2009).

Yanga, L., Lina, X., Lib, H., Gravina, R. J. "A new constitutive model for steel fibre reinforced concrete subjected to dynamic loads", *Compos. Struct.*, 221, (2019).

Yao, S., Zhang, D., Lu, F. and Li, X., "Experimental and numerical studies on the failure modes of steel cabin structure subjected to internal blast loading", *Int. J. Impact. Eng.*, 110, 279–287, (2017).

Yardımcı, M.Y., "Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı", Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2007).

Ye, Z.B., Huang, R.Y., Li, Y.C., Lv, L., Zhao, K., Zhang, Y.L., Ma, J., Ma, Ji., "Steel fiber-reinforced concrete under impact loading dynamic constitutive equation", *Constr. Build. Mater.*, 190, 1049–1055, (2018).

Yoo, D. Y., Banthia, N., "Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast", *Constr. Build. Mater.*, 149, 416–431, (2017).

Yoo, D. Y., Yoon, Y. S. and Banthia, N., "Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate", *Cem. Concr. Compos.*, 64, 84–92, (2015).

Yoo, D. Y., Banthia, N. "Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review", *Cem. Concr. Compos.*, 104, (2019).

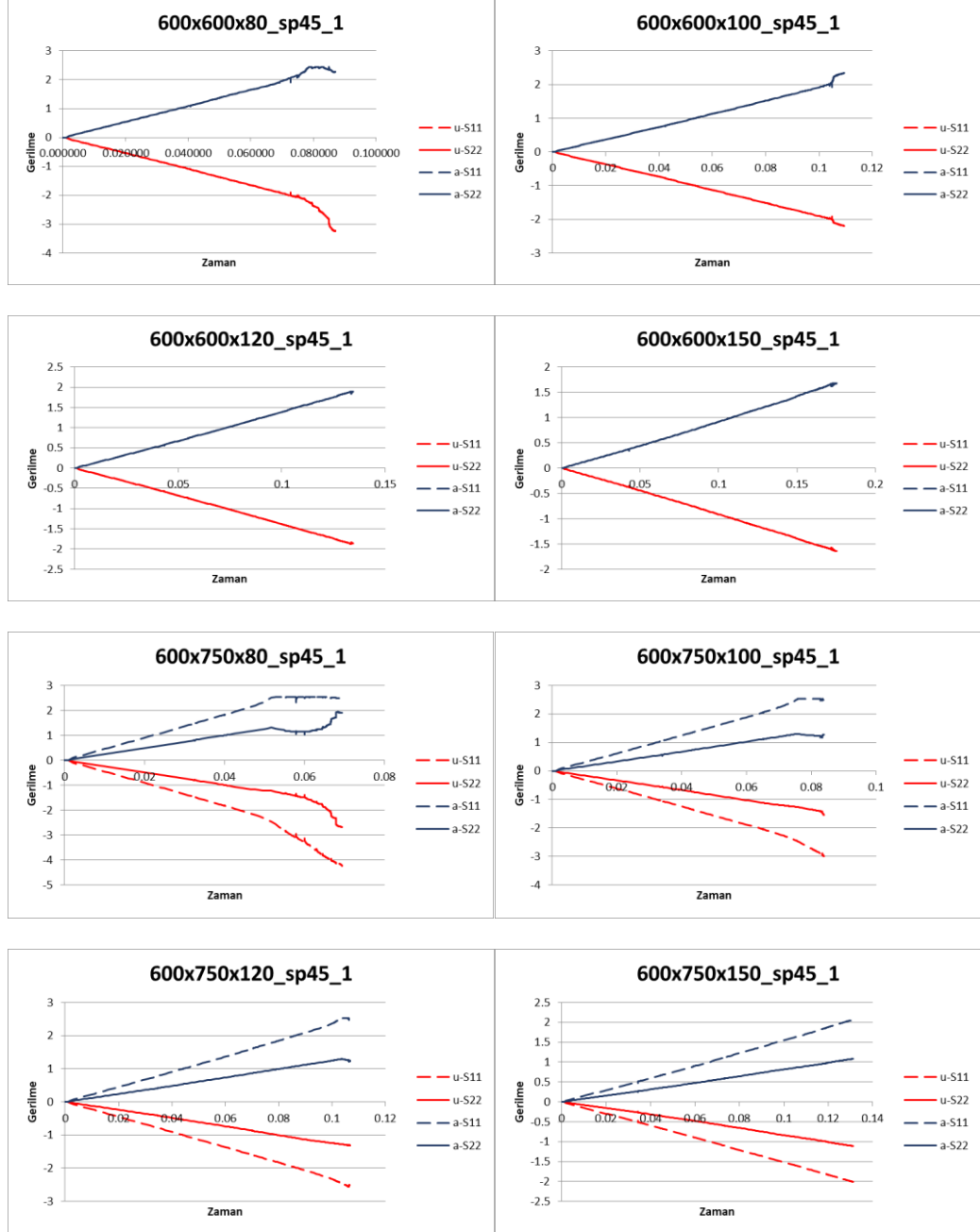
Yuan, C., Chen W., Pham, T. M., Hao, H., Cui, J., Shi, Y. "Strain rate effect on interfacial bond behaviour between BFRP sheets and steel fibre reinforced concrete", *Compos. B. Eng.*, 174, (2019).

Zhang, W., Chen, S., Liu, Y., "Effect of weight and drop height of hammer on the flexural impact performance of fiber-reinforced concrete", *Constr. Build. Mater.*, 140, 31–35, (2017).

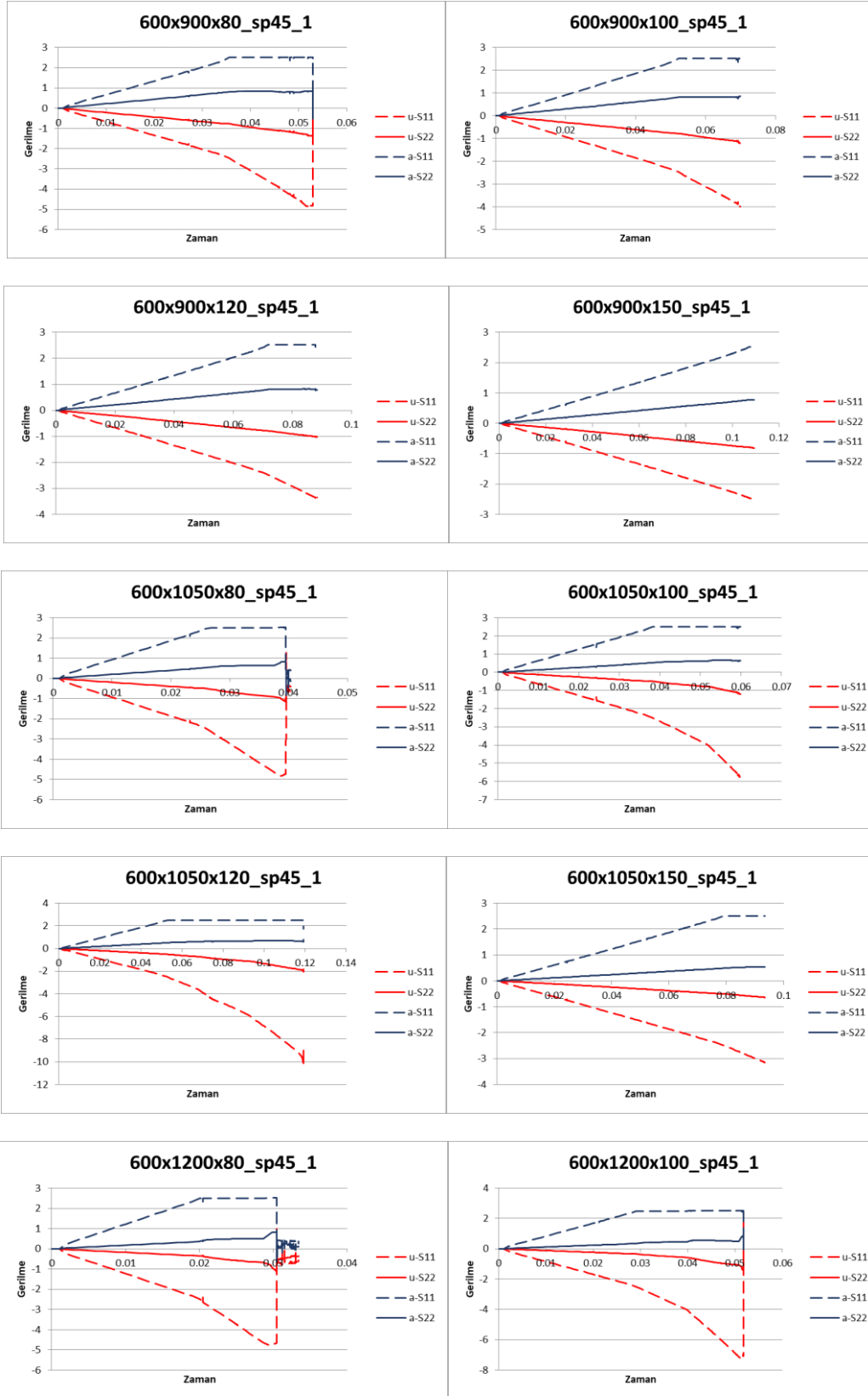
EKLER

8. EKLER

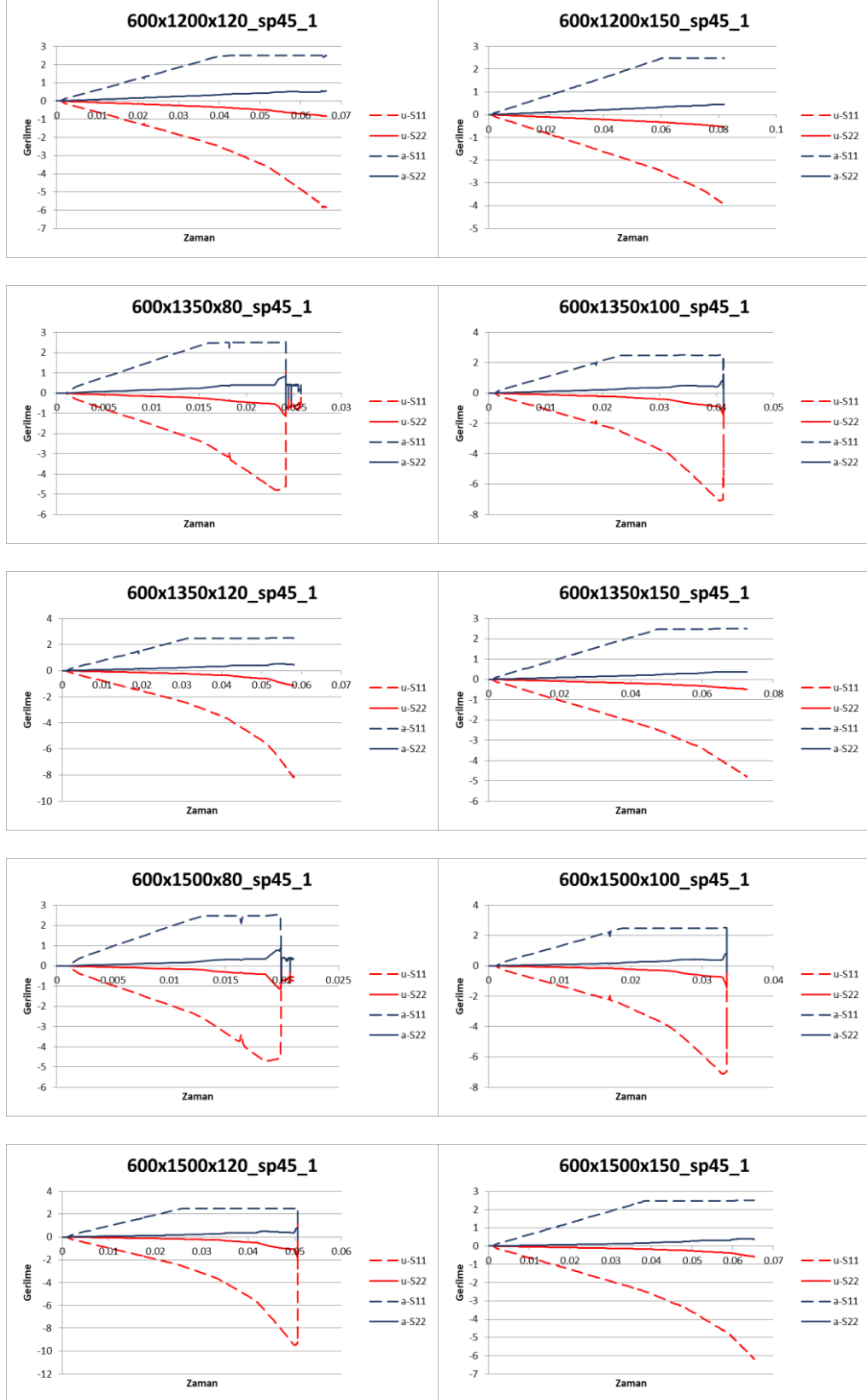
EK A SP45 MALZEMELİ PANELLER İÇİN GERİLME-ZAMAN GRAFİKLERİ



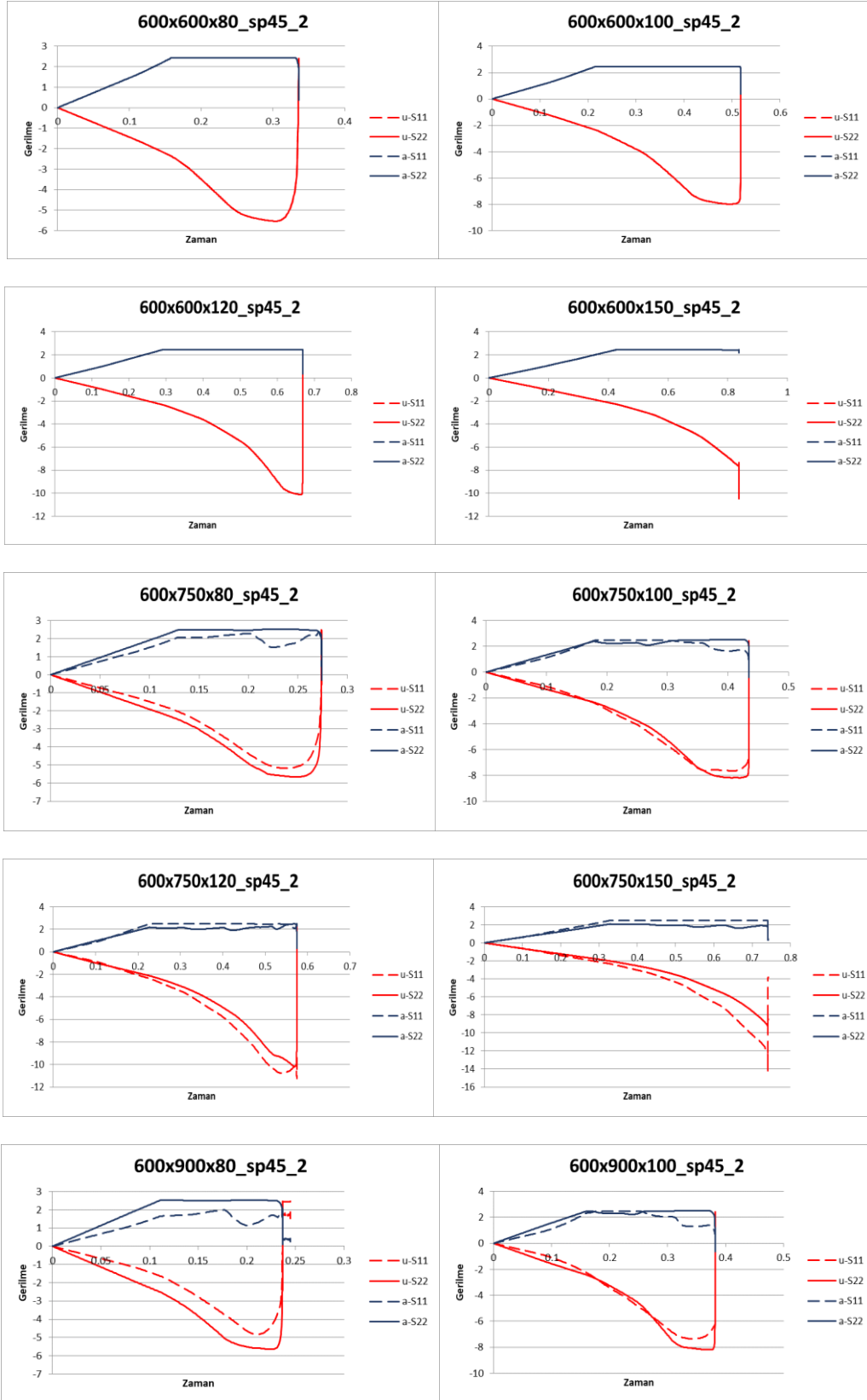
Şekil A. 1: Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



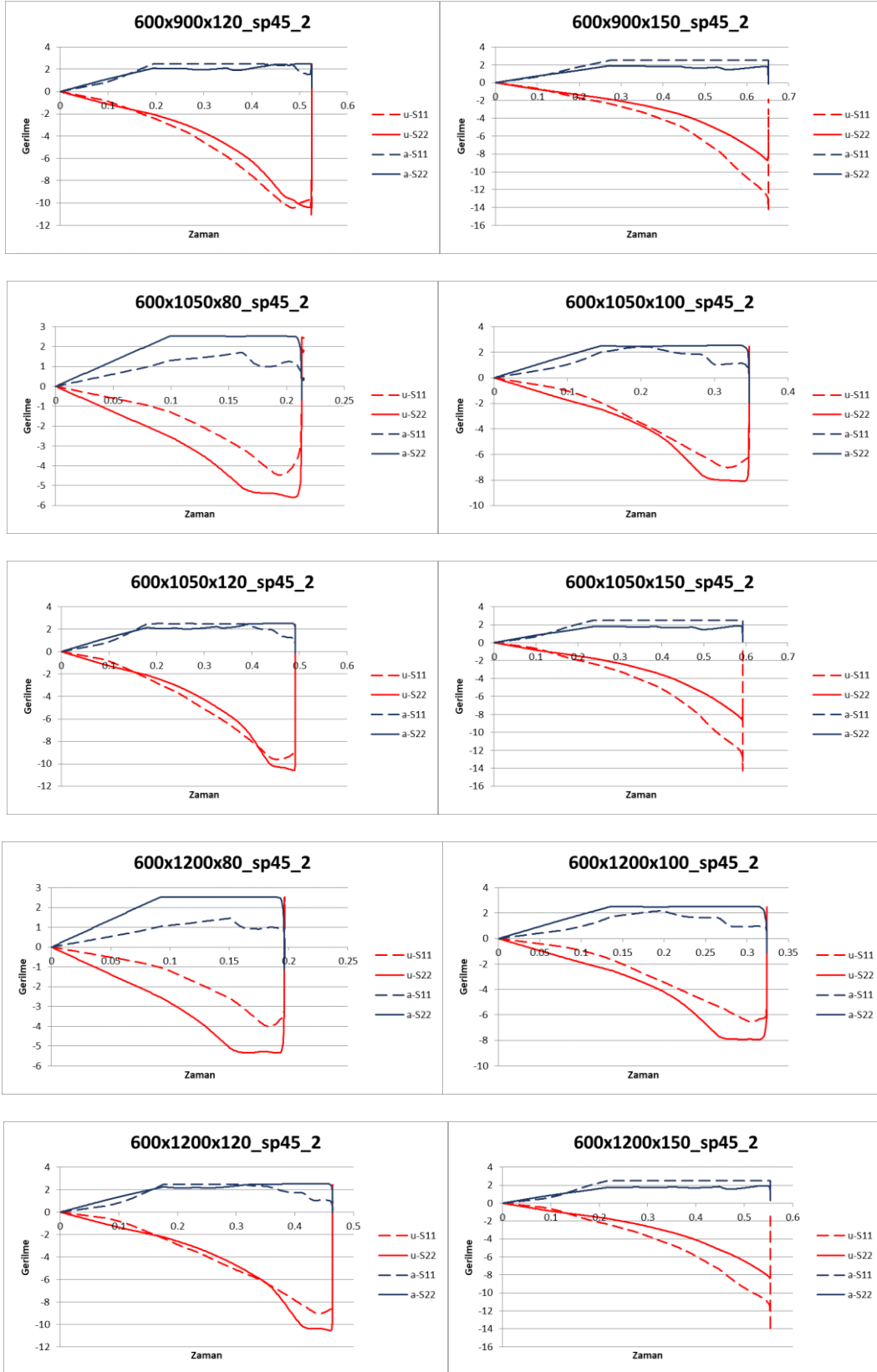
Şekil A. 1(devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



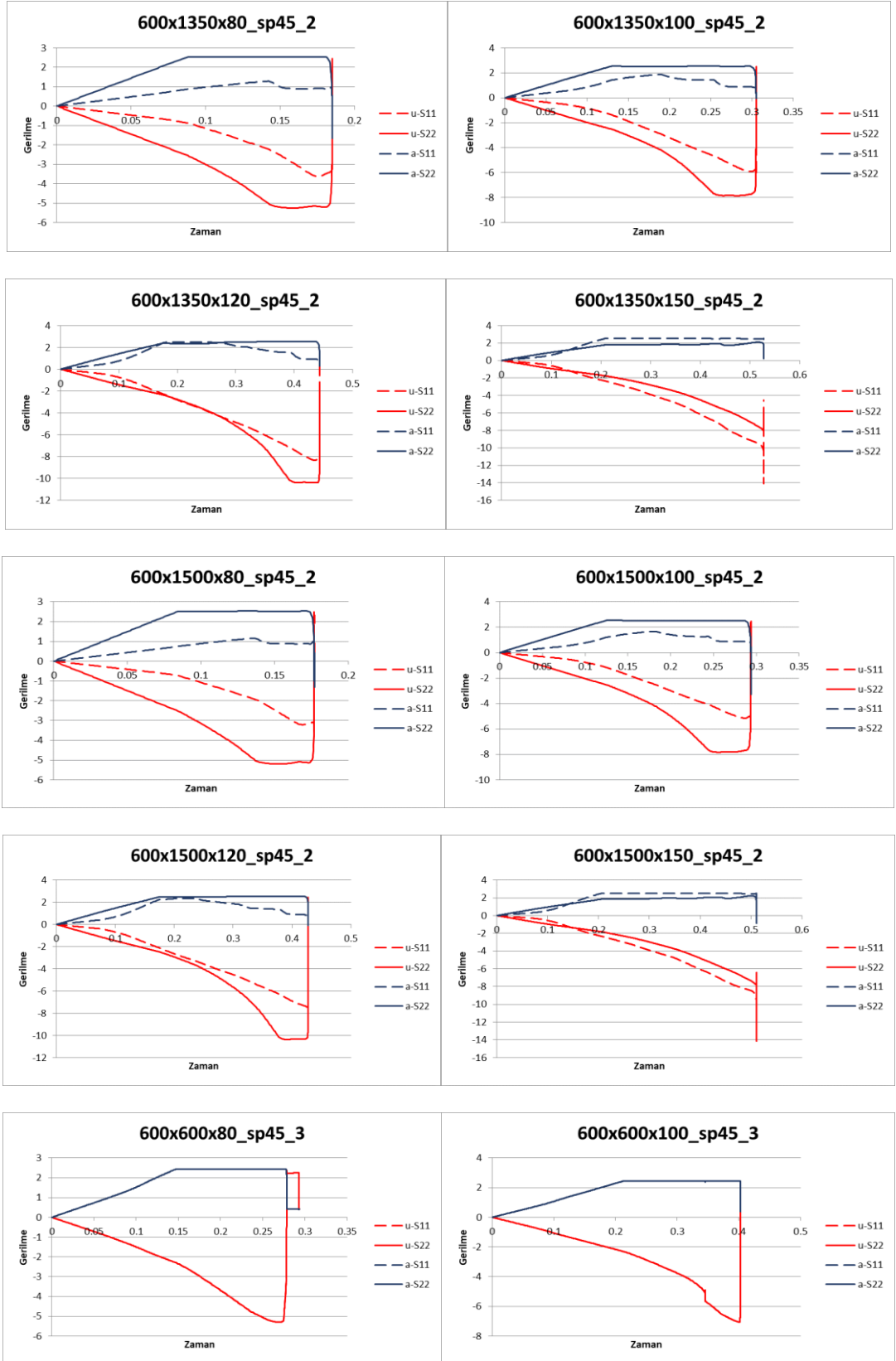
Şekil A. 2 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



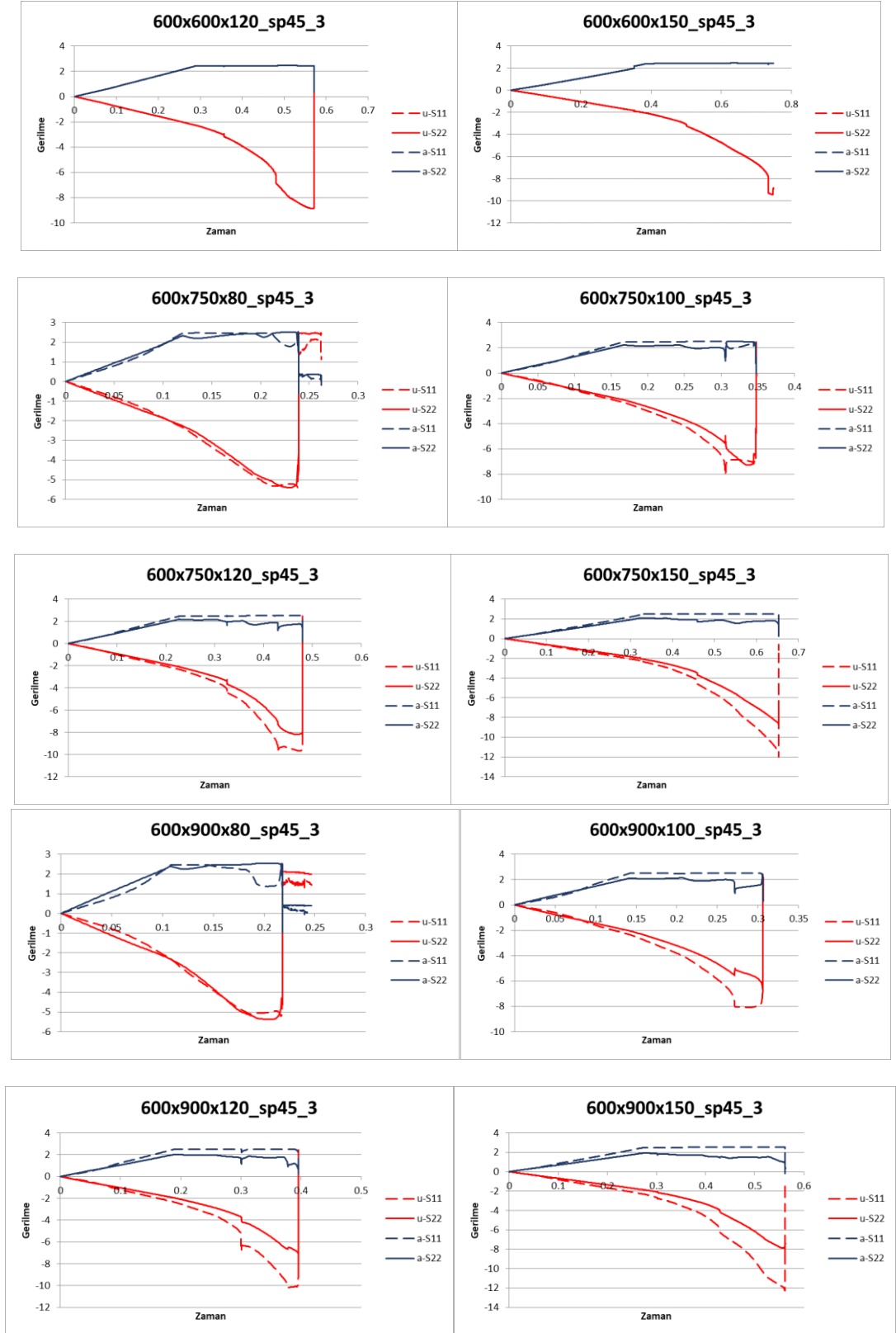
Şekil A. 3 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



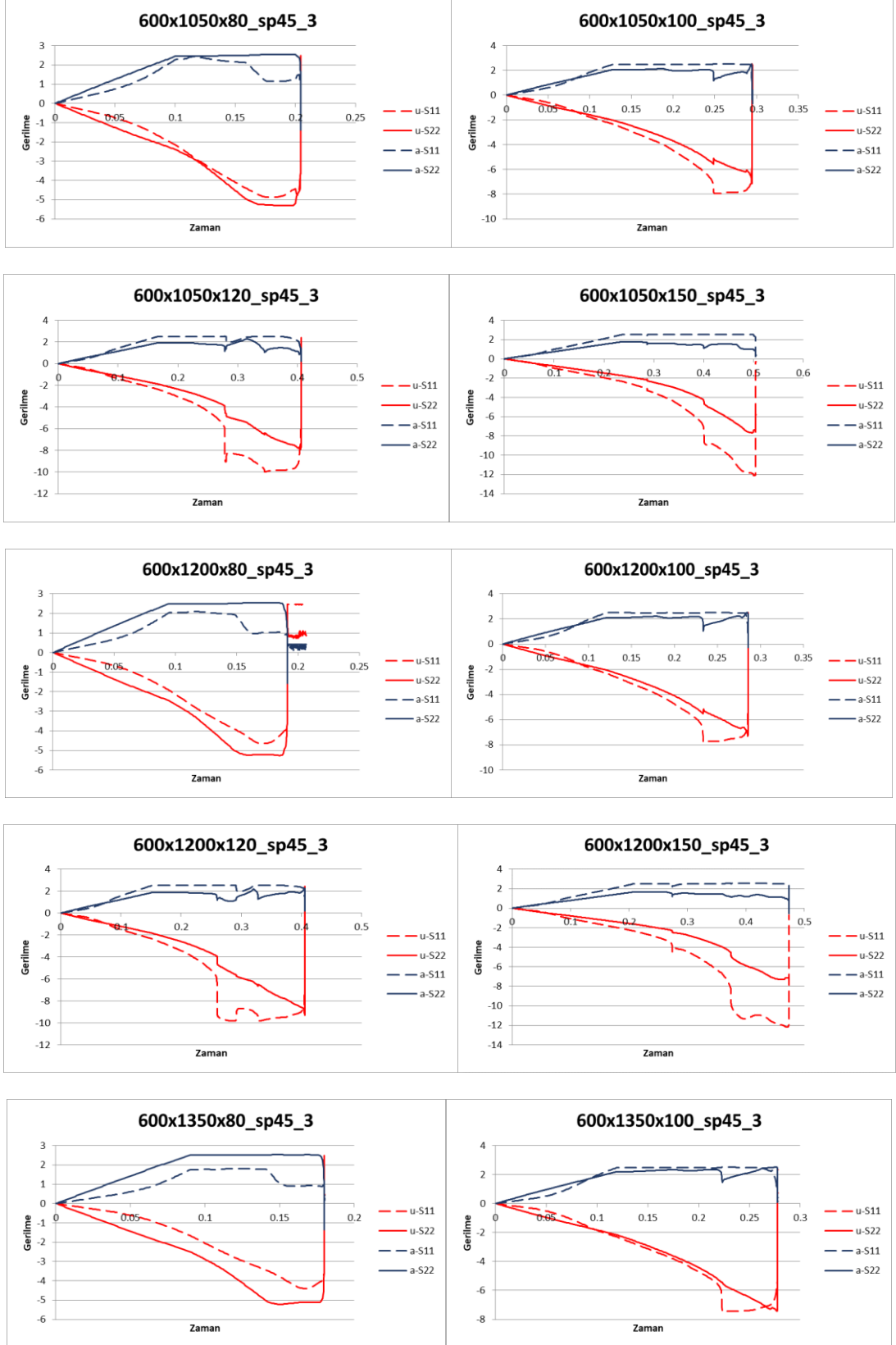
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



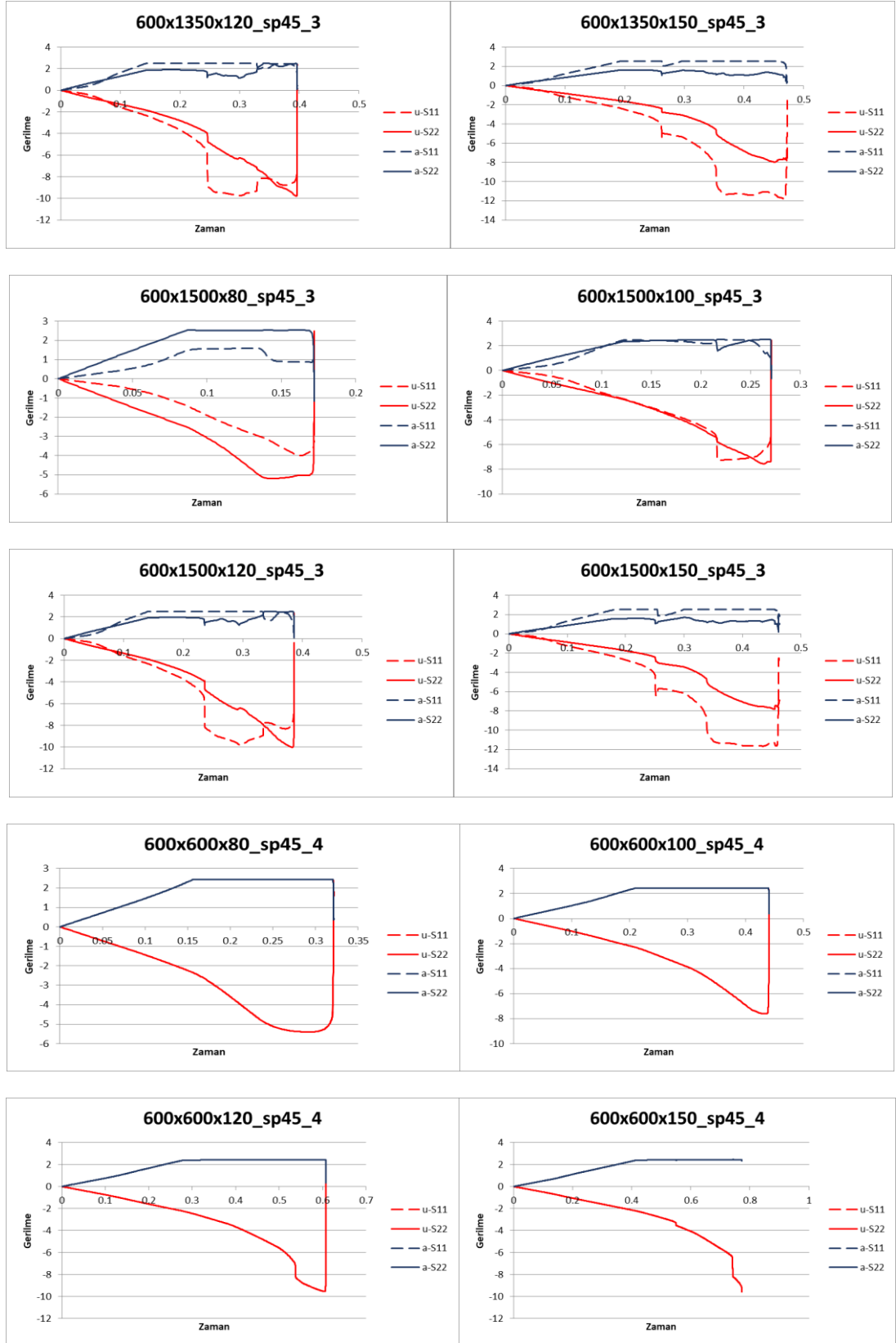
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



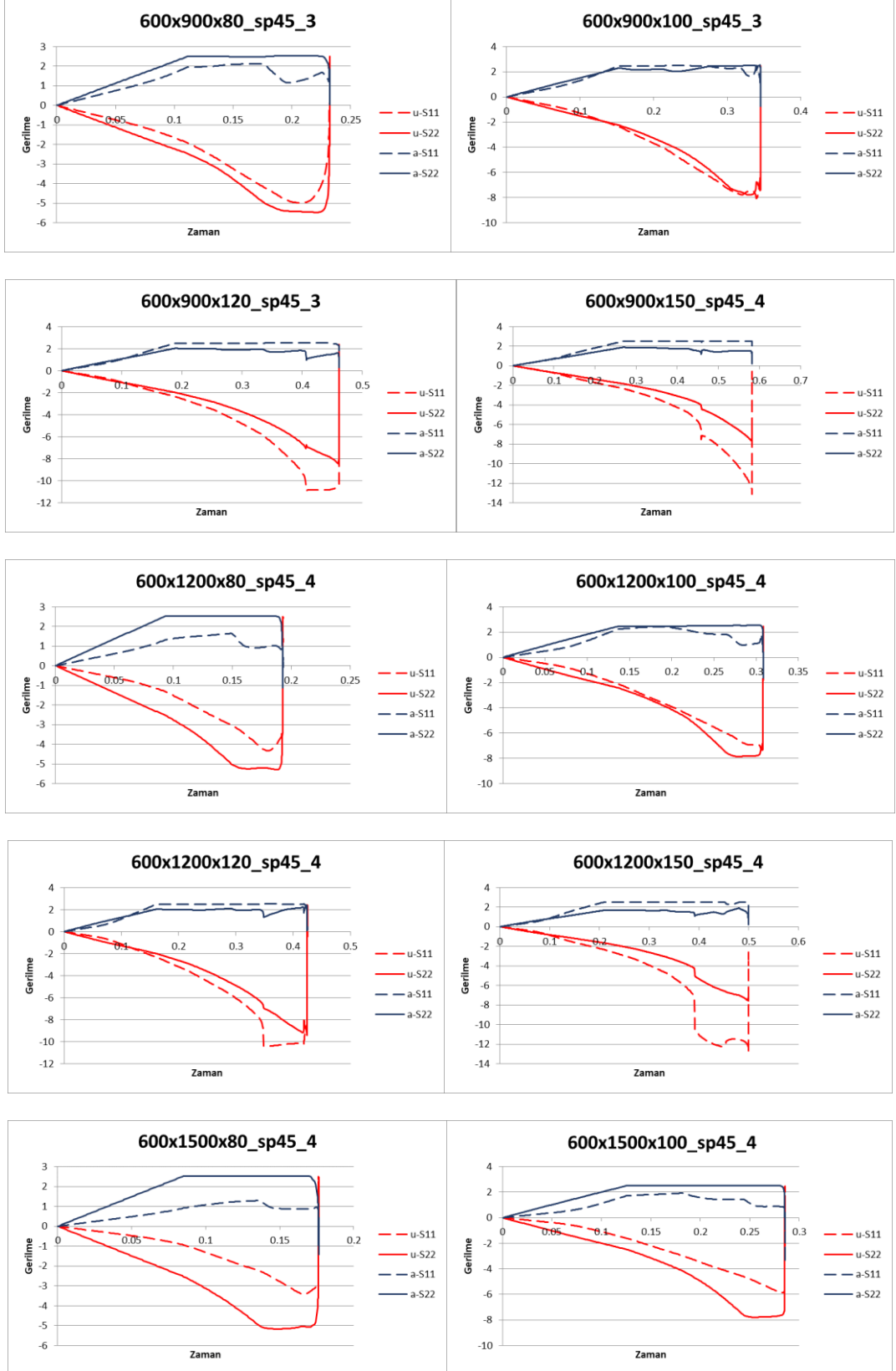
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



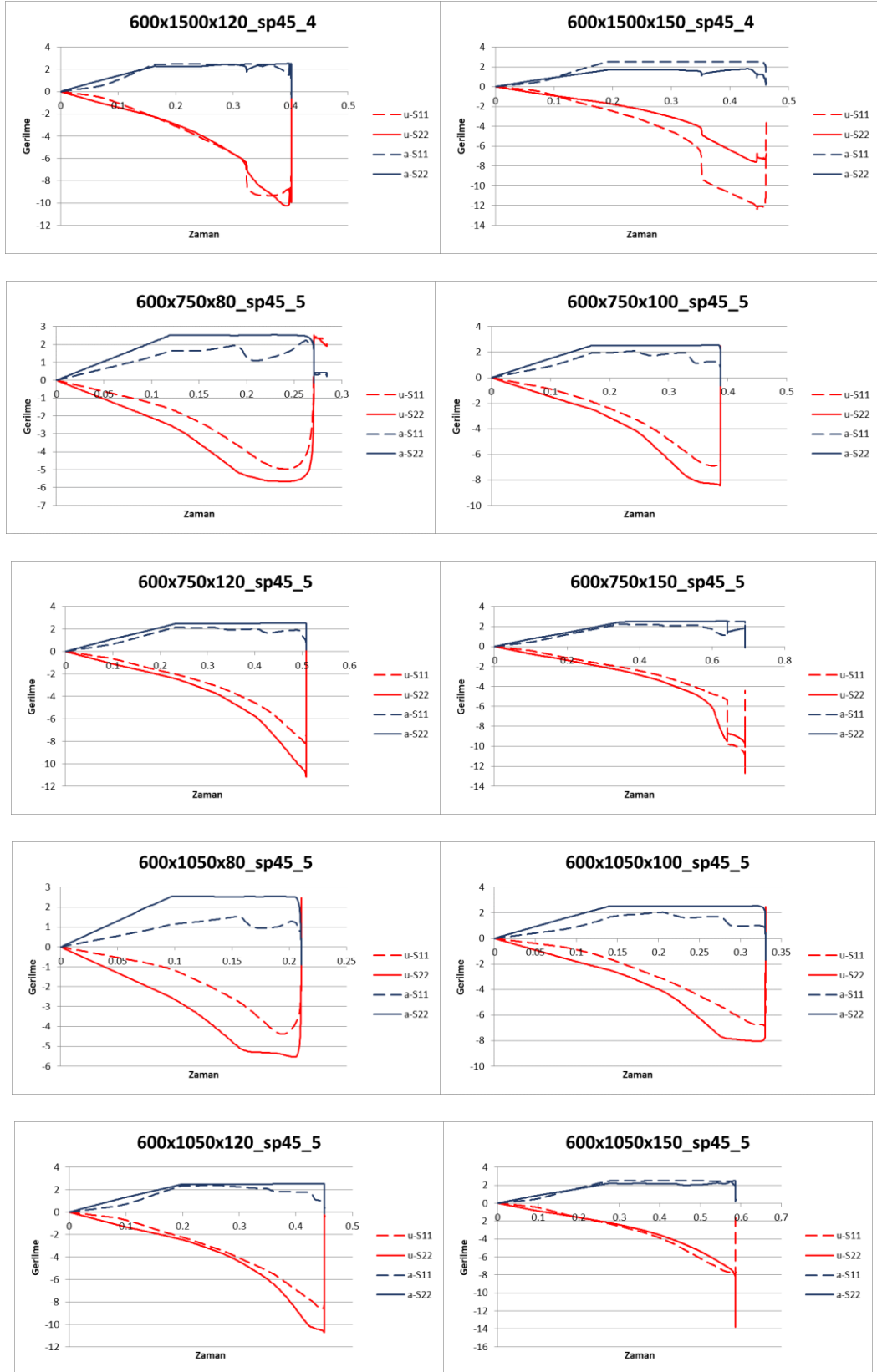
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



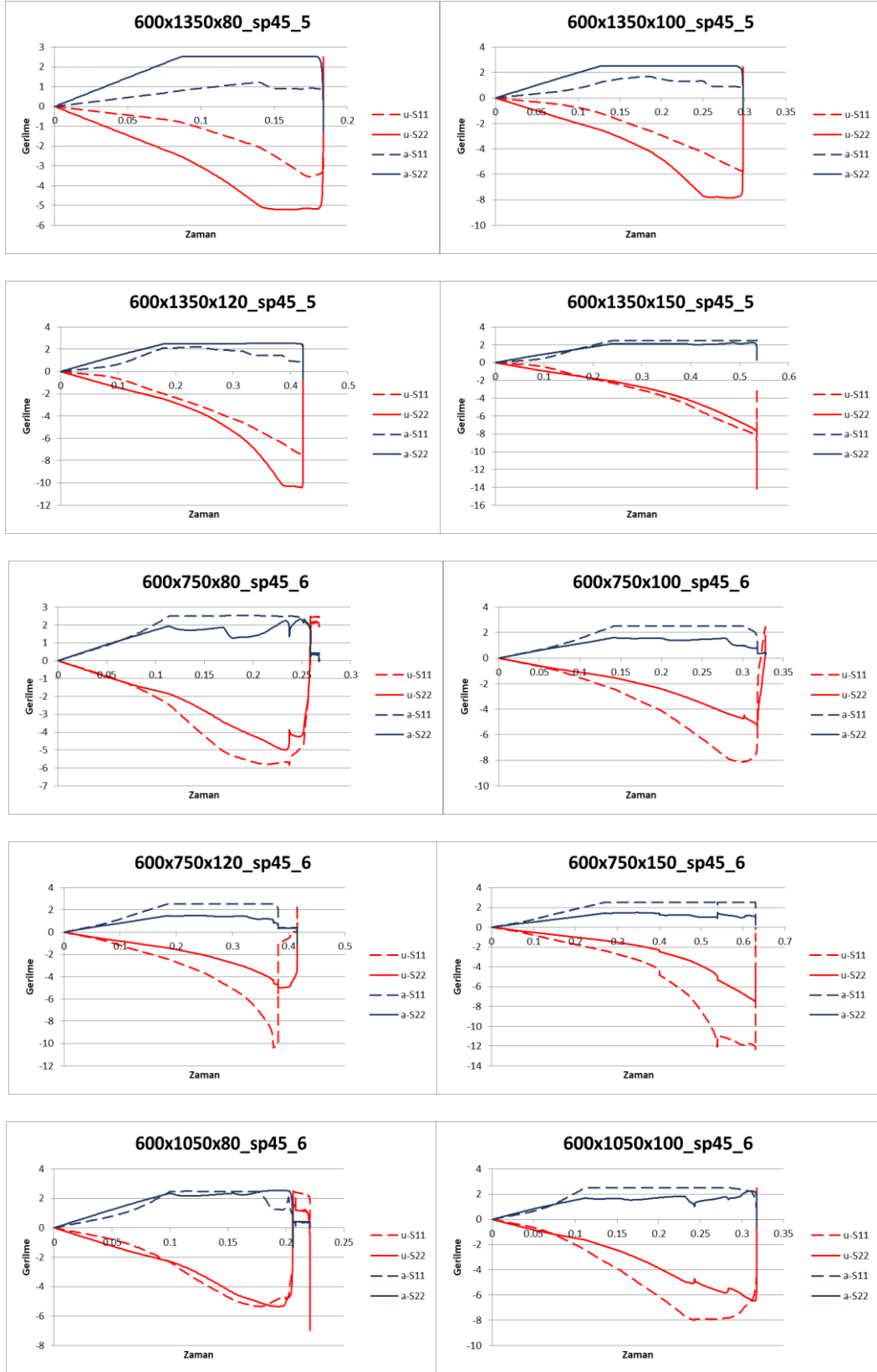
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



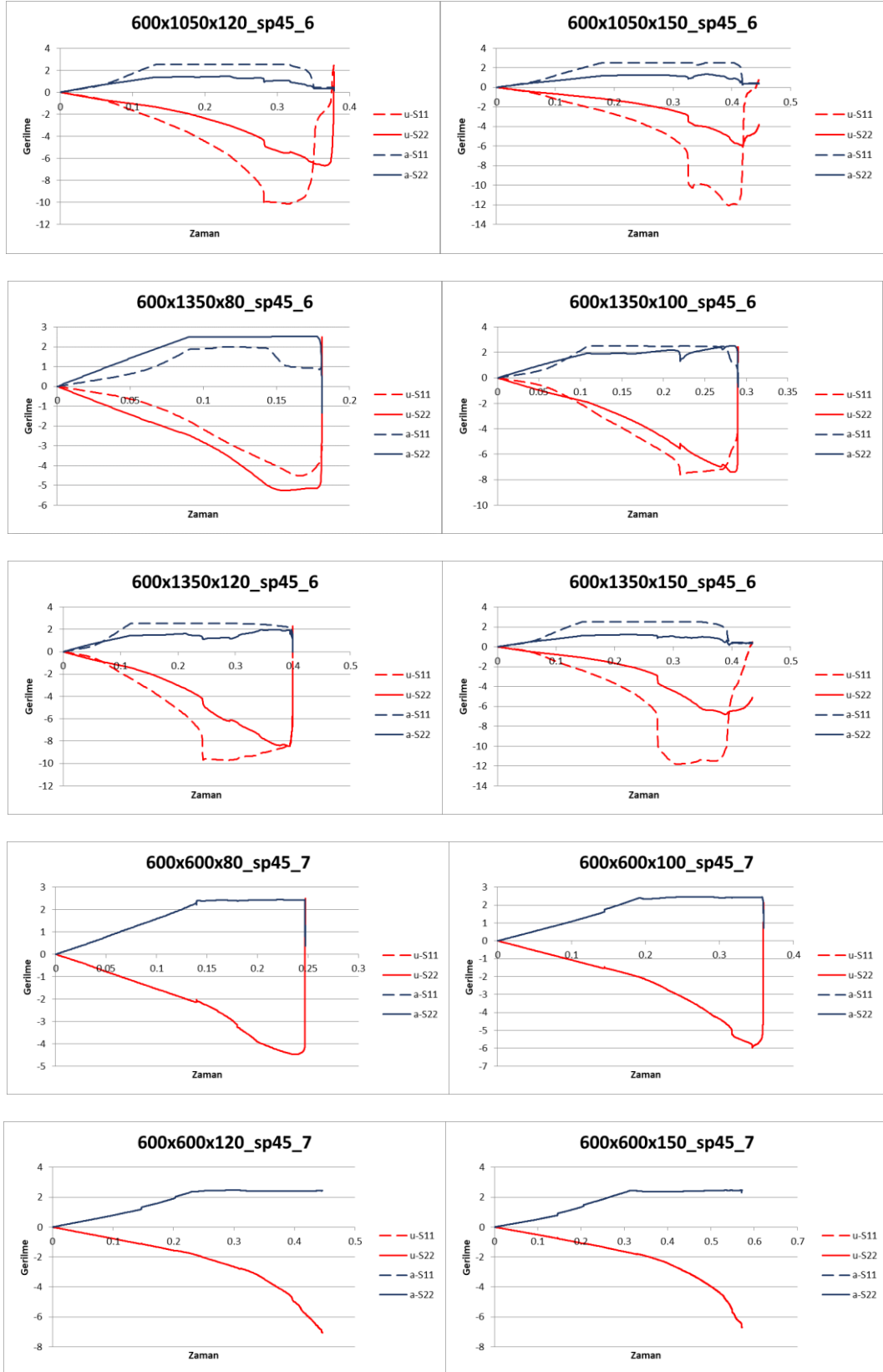
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



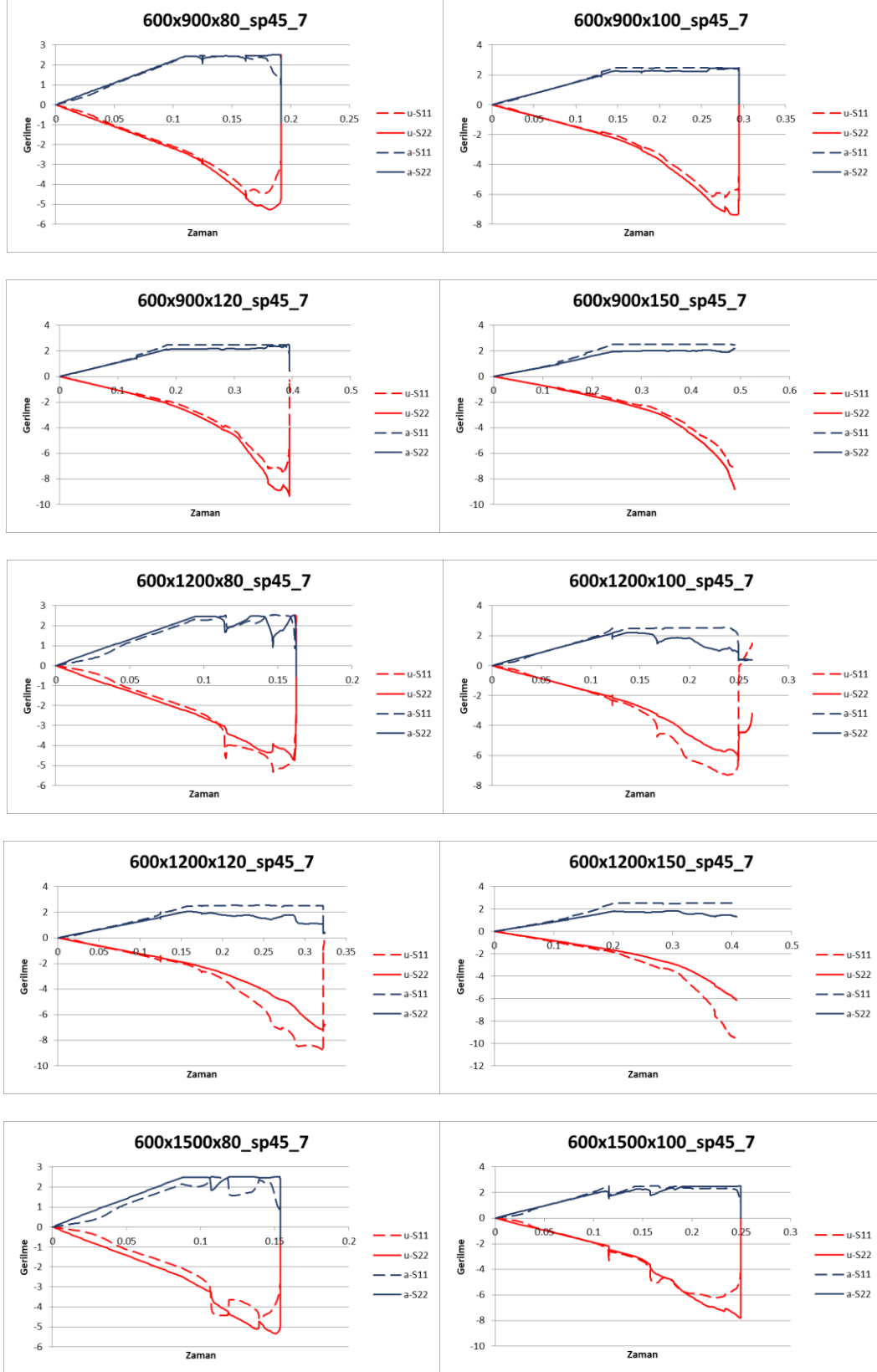
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



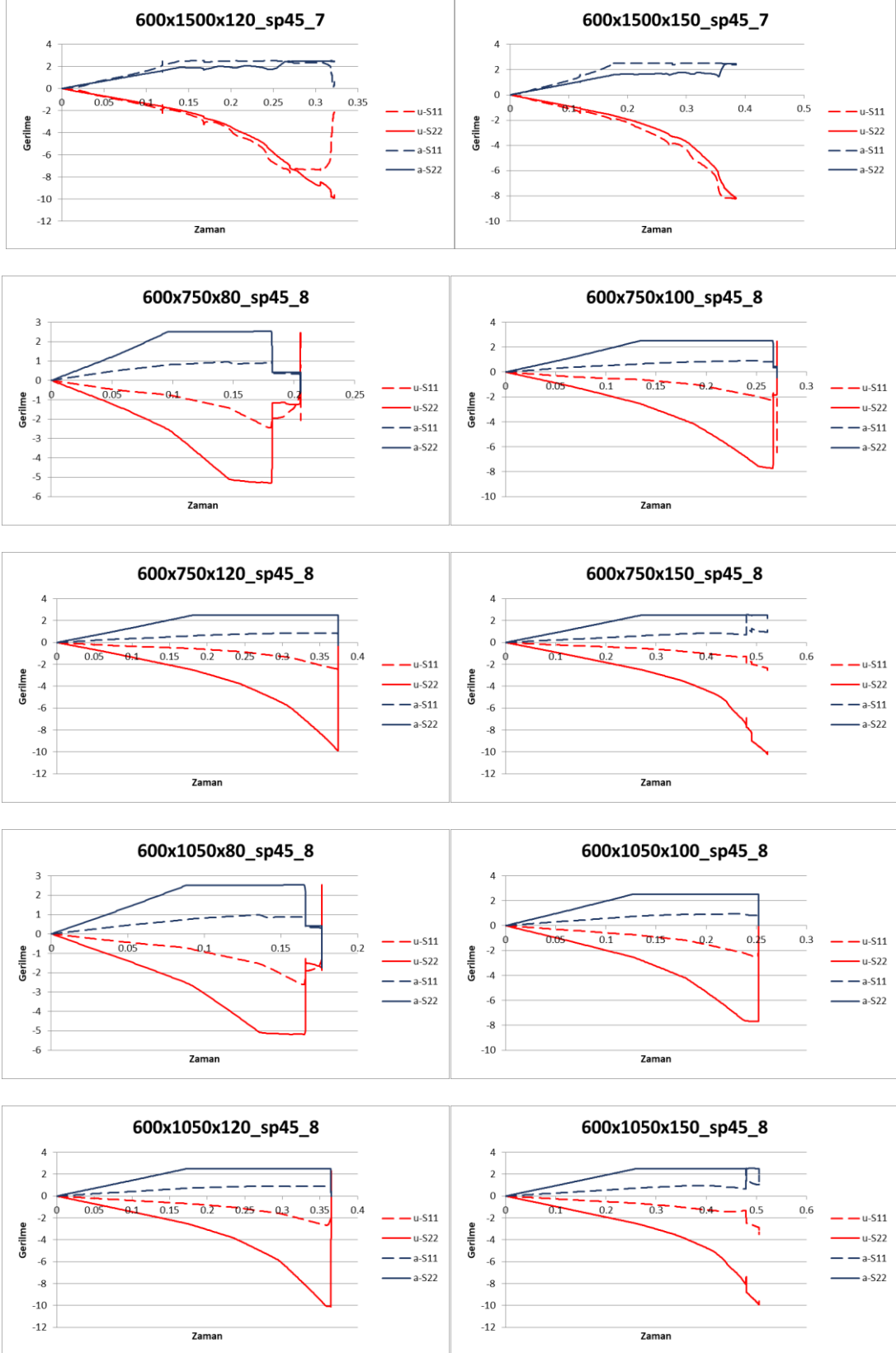
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



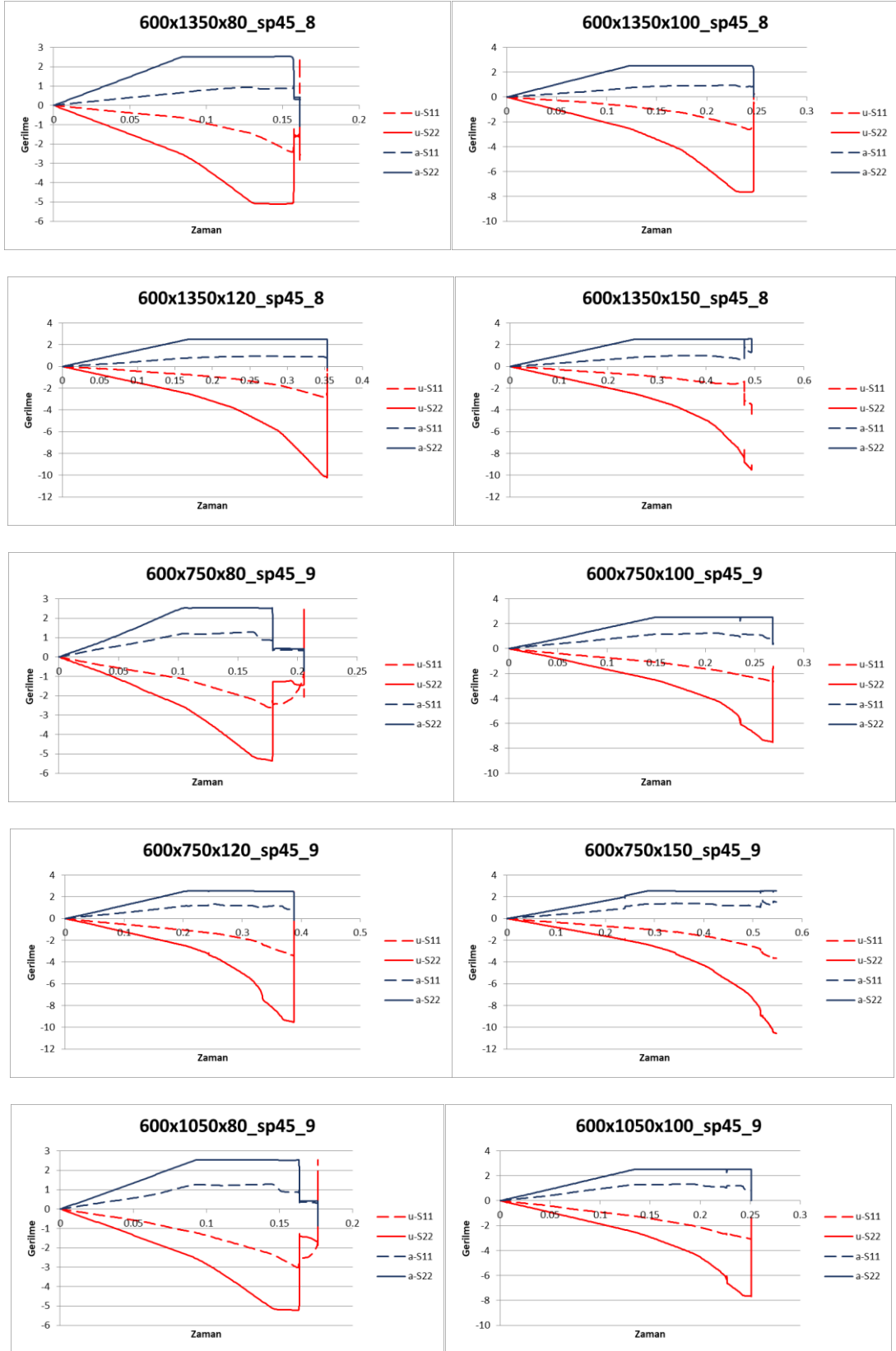
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



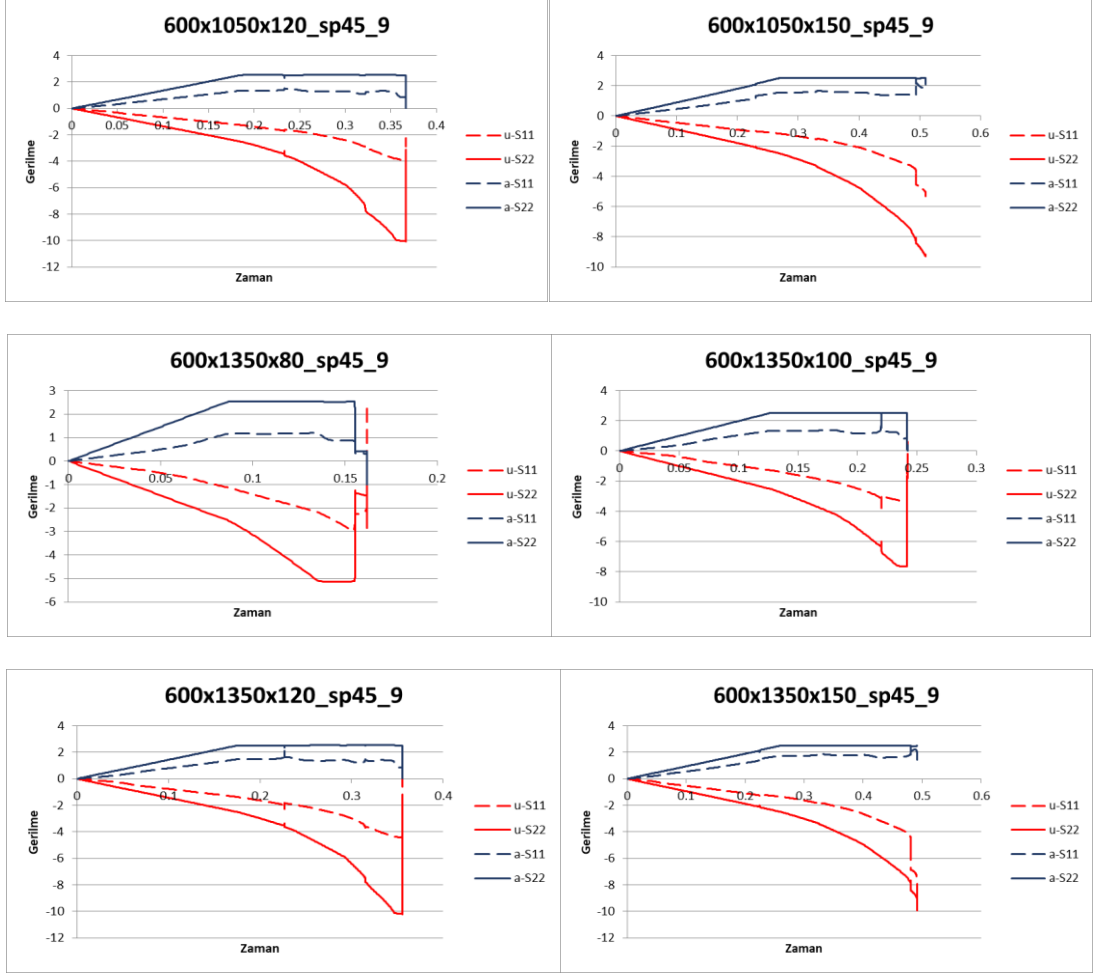
Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri

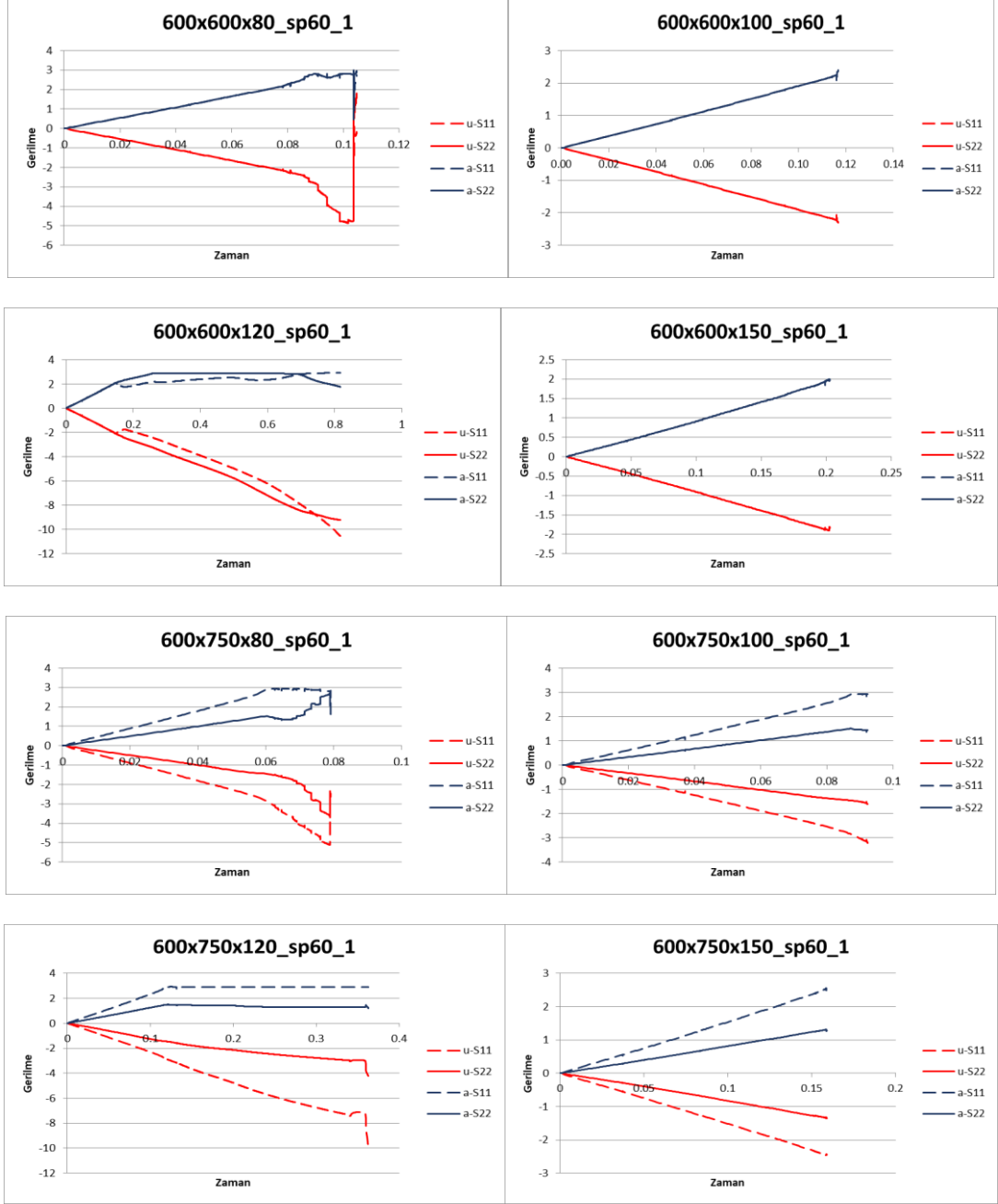


Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri

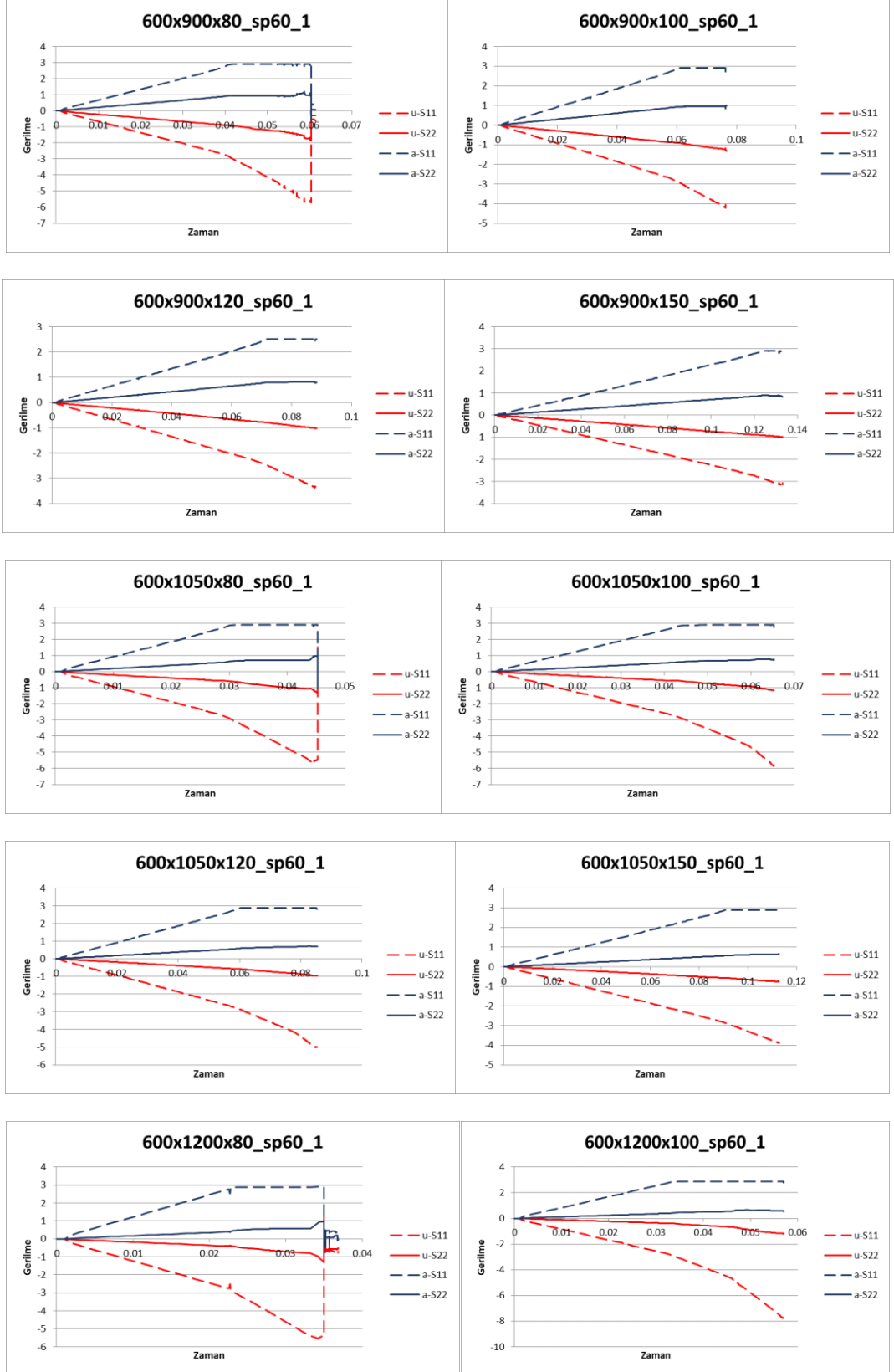


Şekil A.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP45 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri

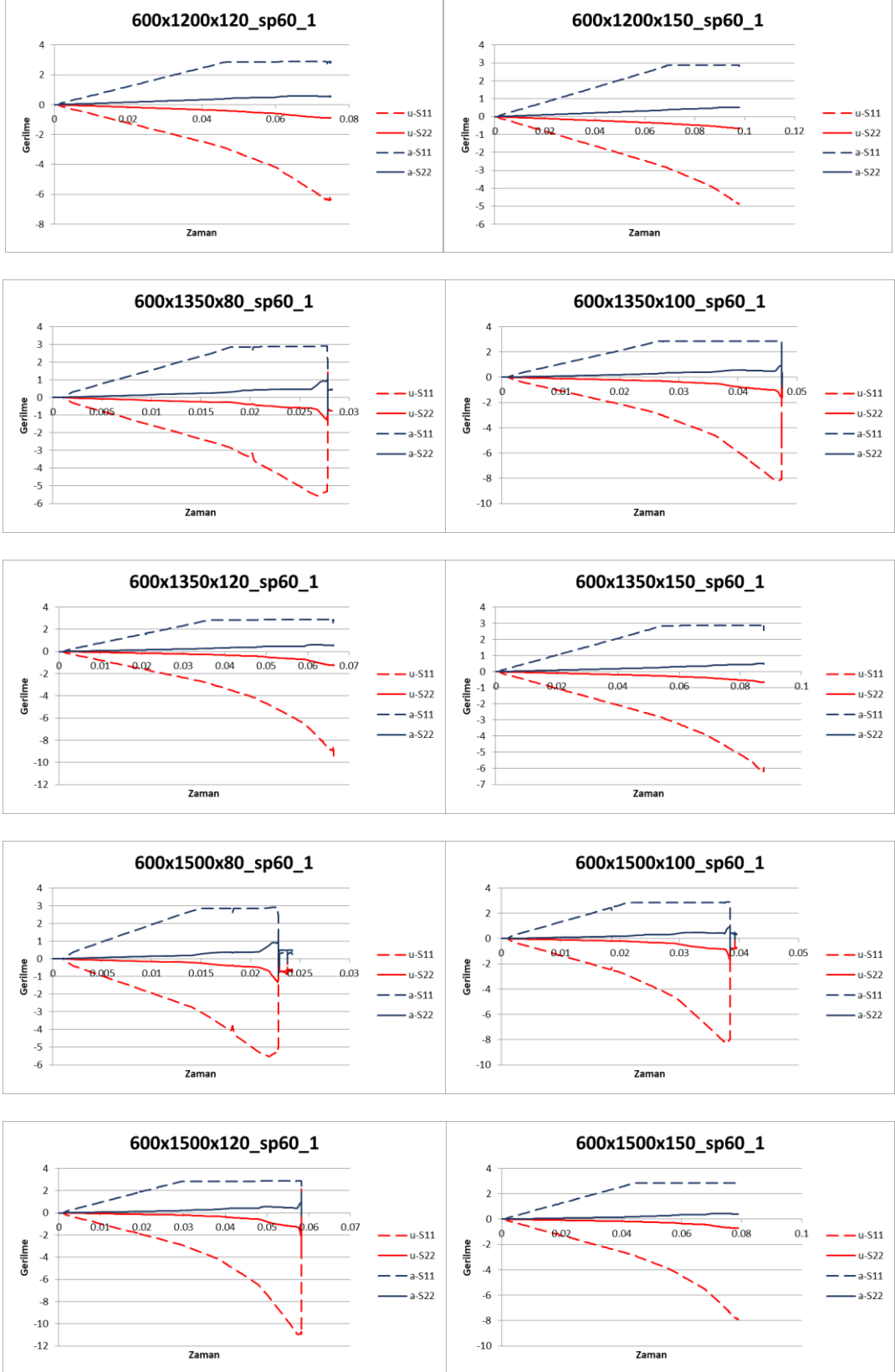
EK B SP60 MALZEMELİ PANELLER İÇİN GERİLME-ZAMAN GRAFİKLERİ



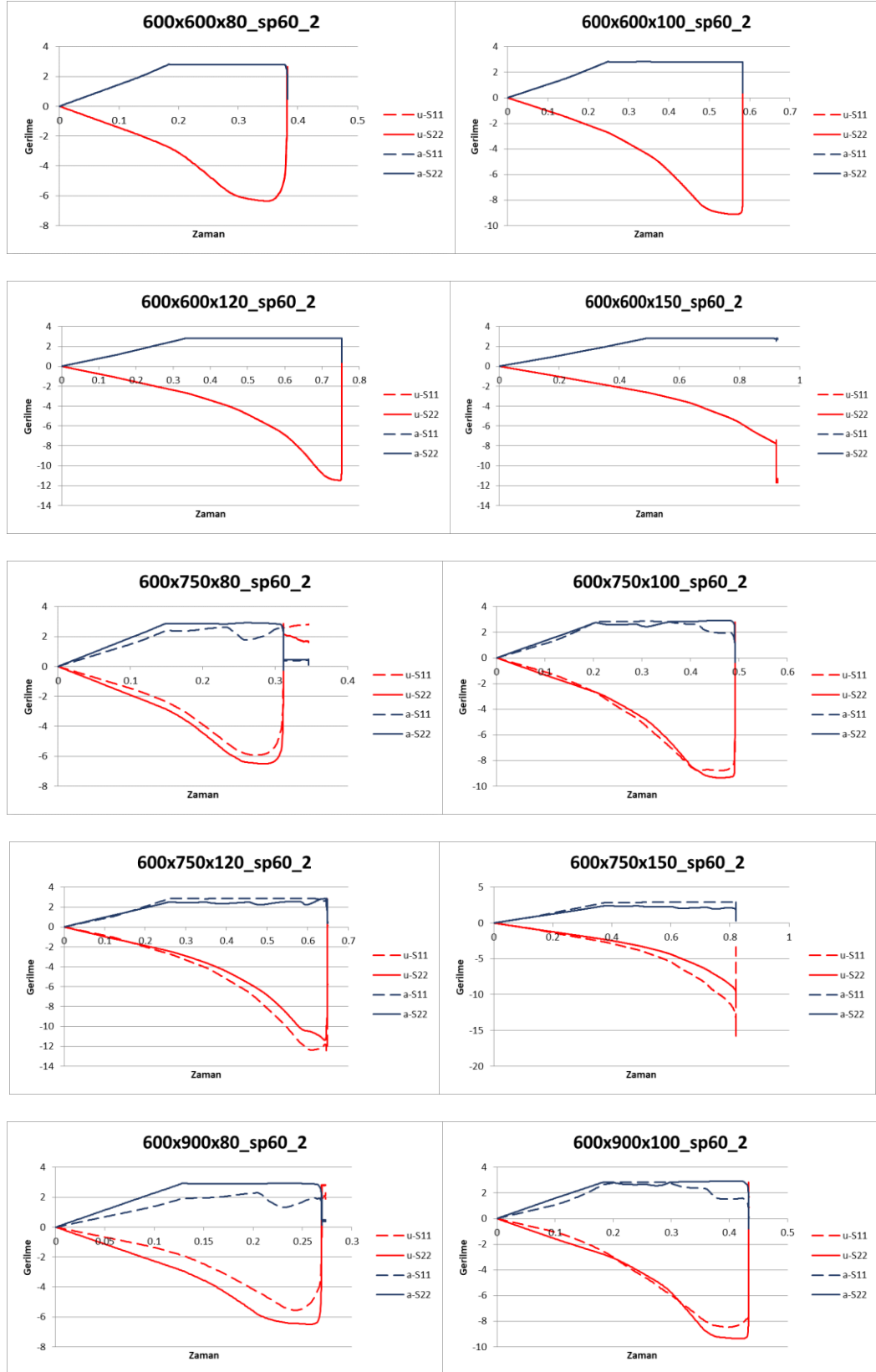
Şekil B.1: Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



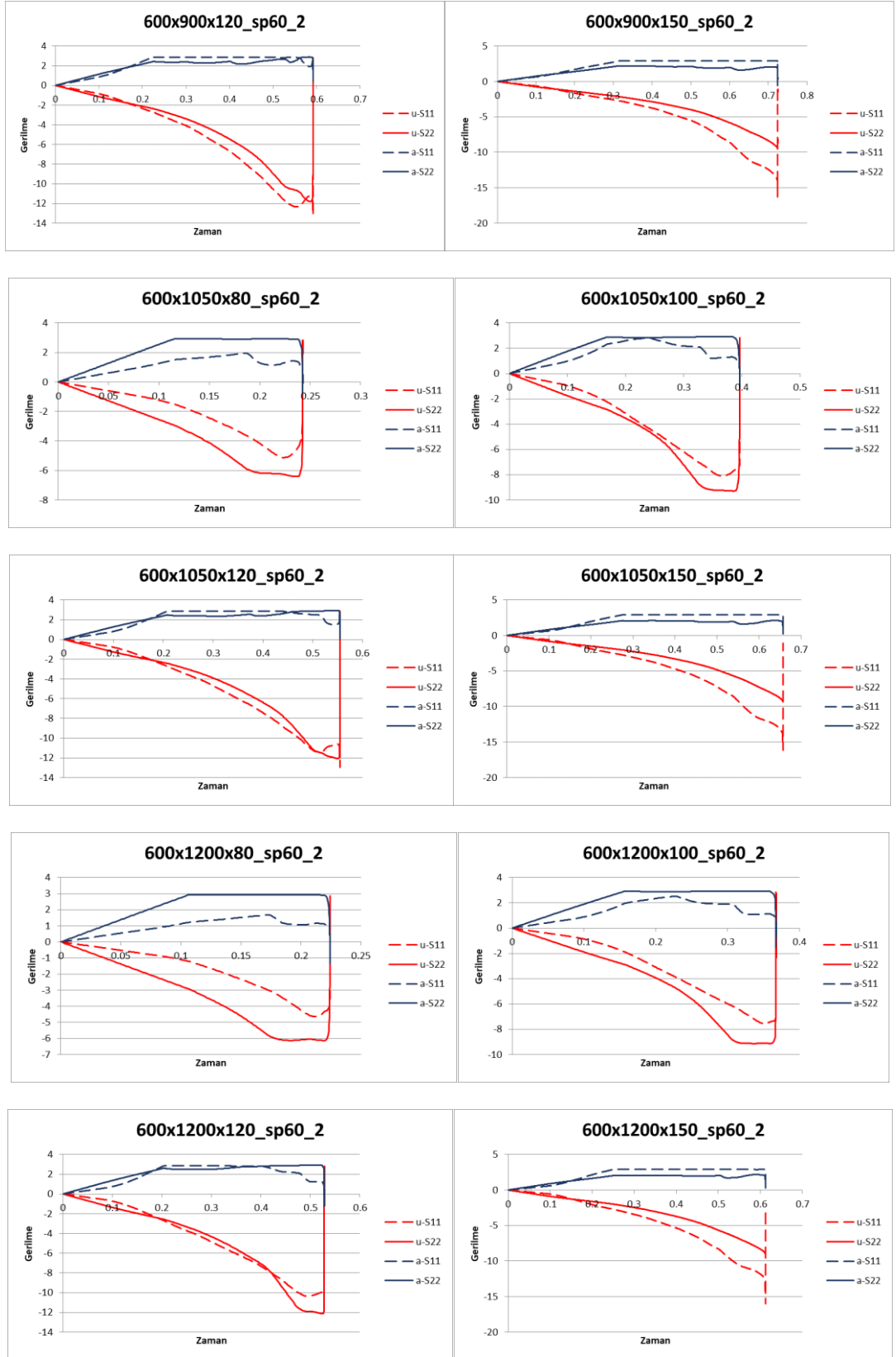
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



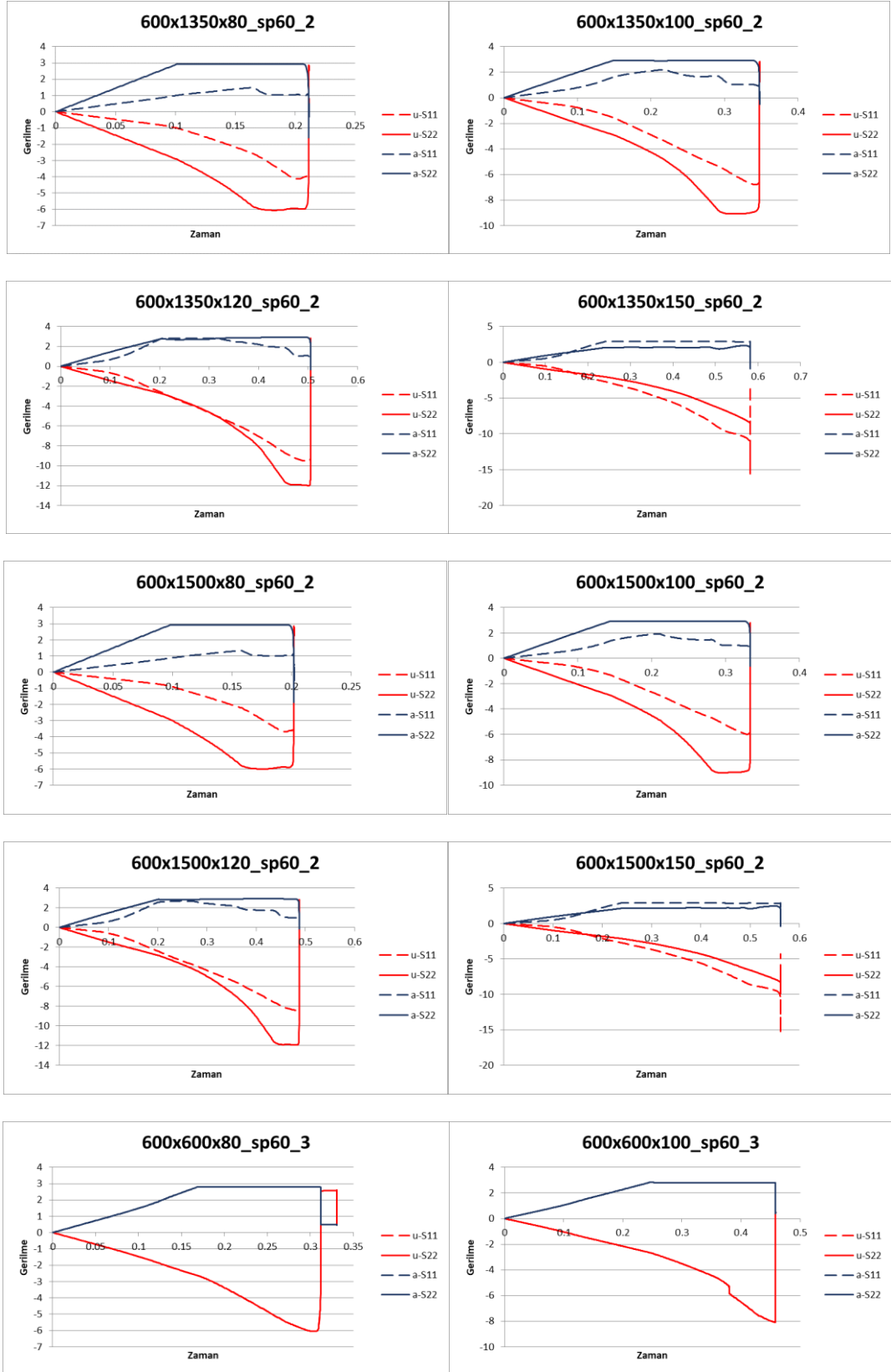
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



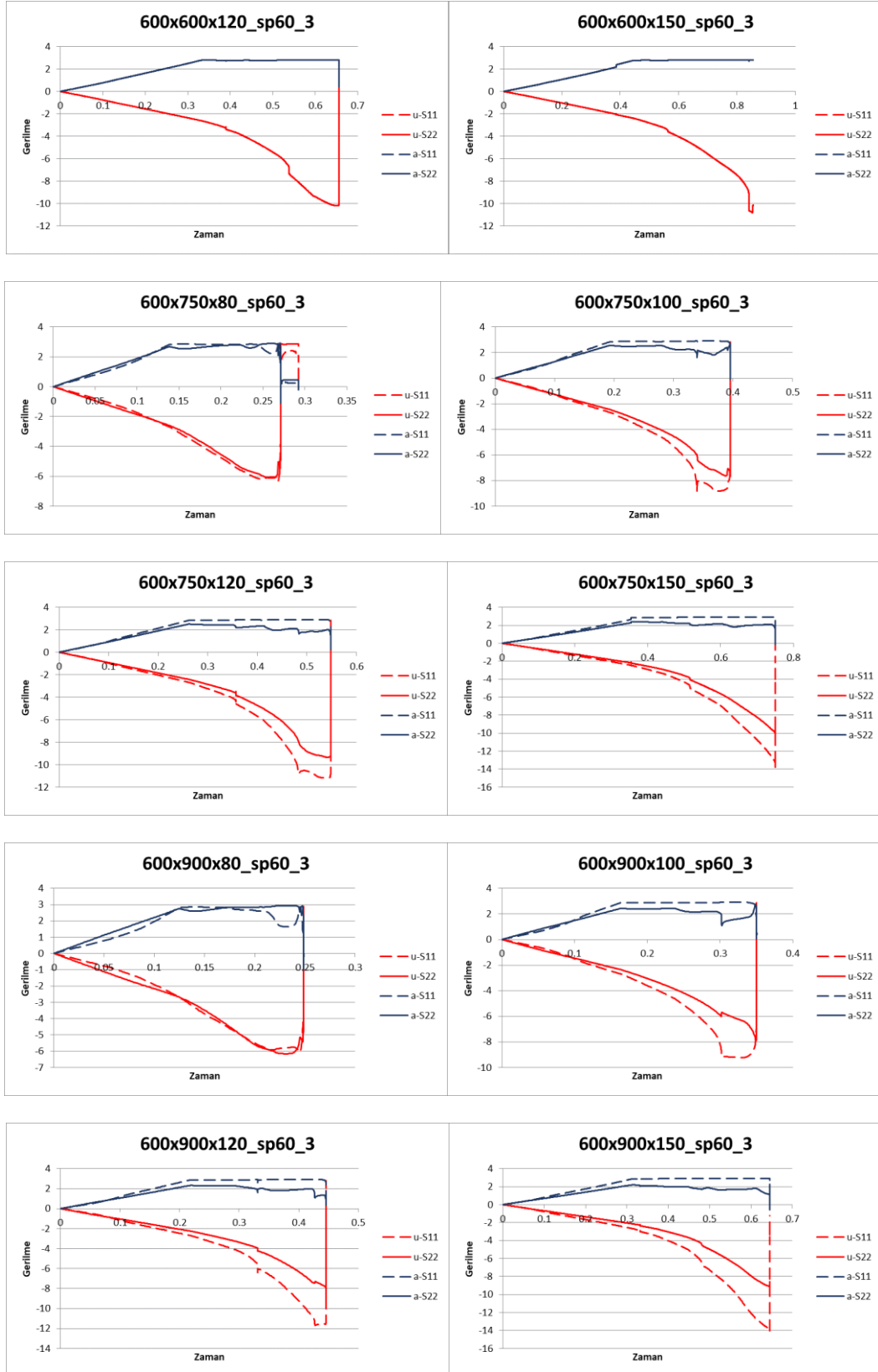
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



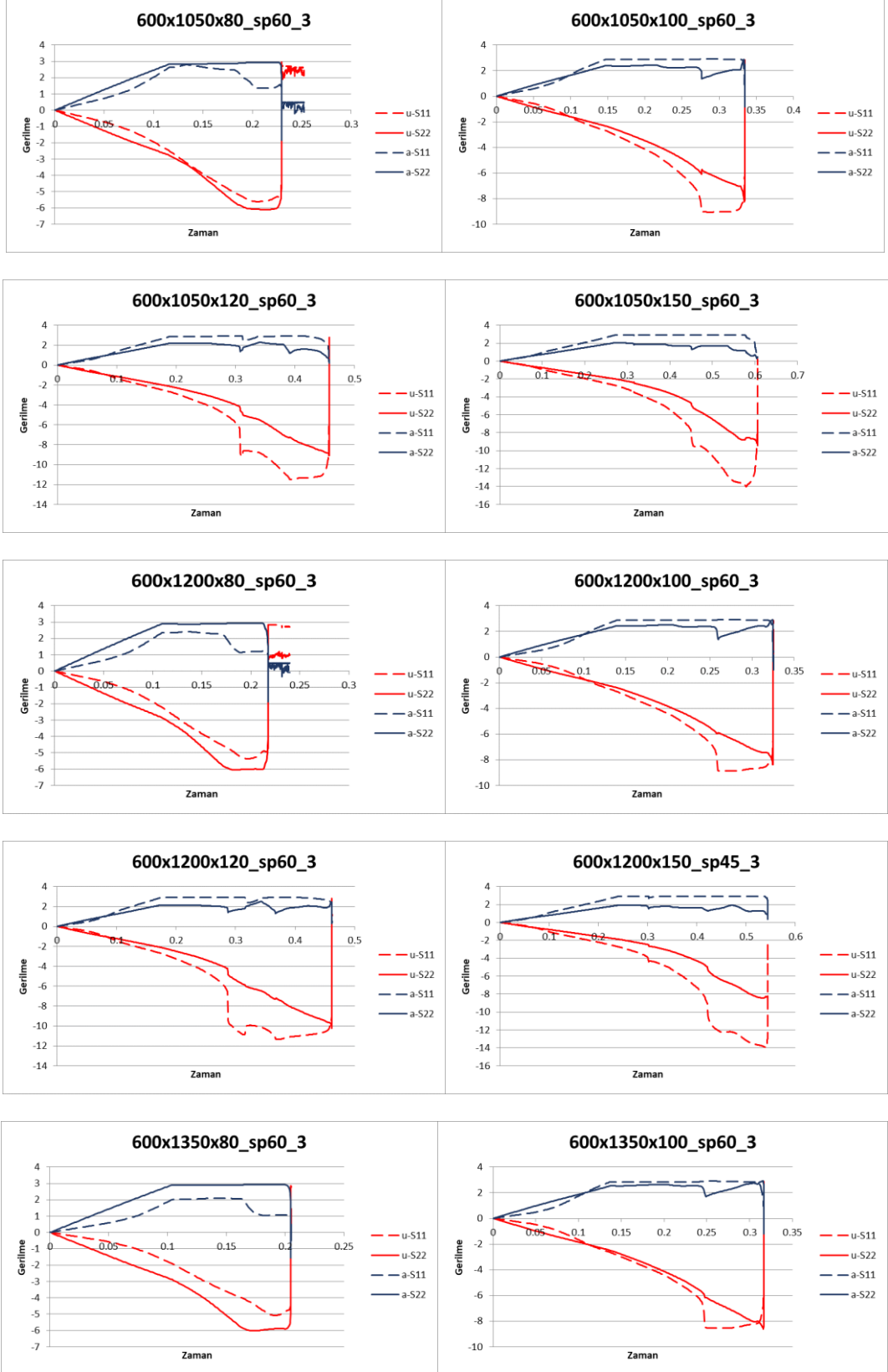
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



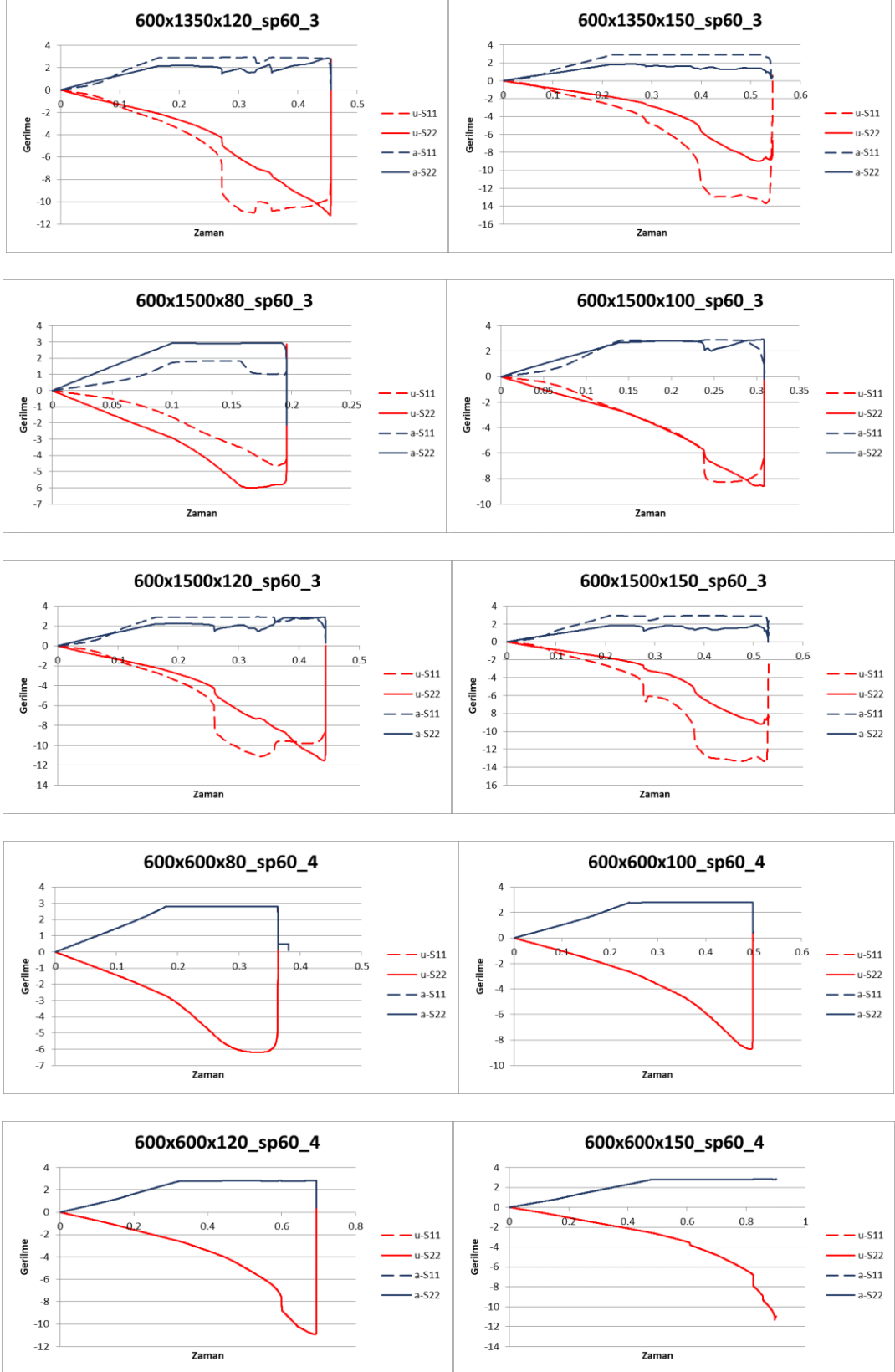
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



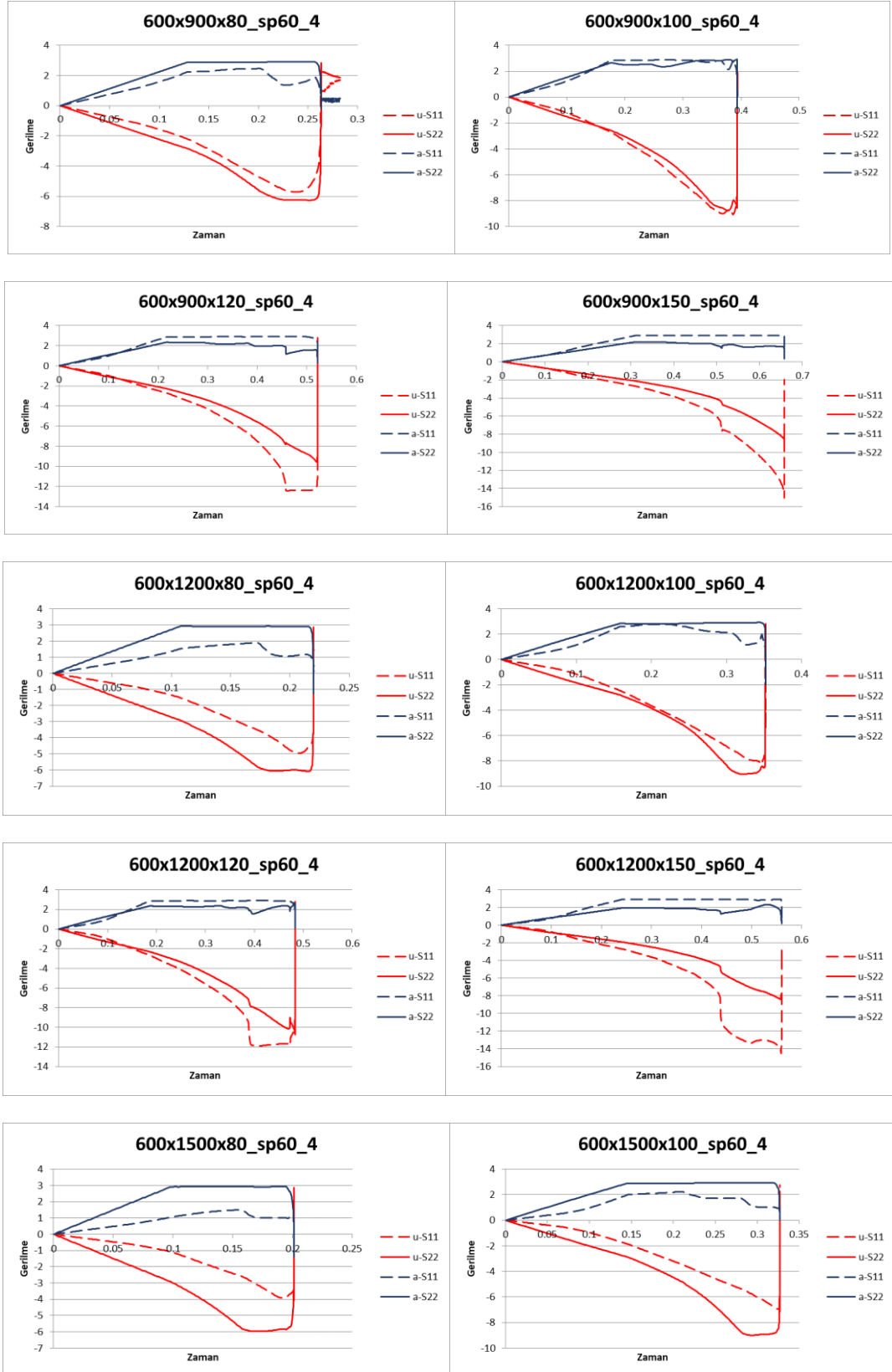
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



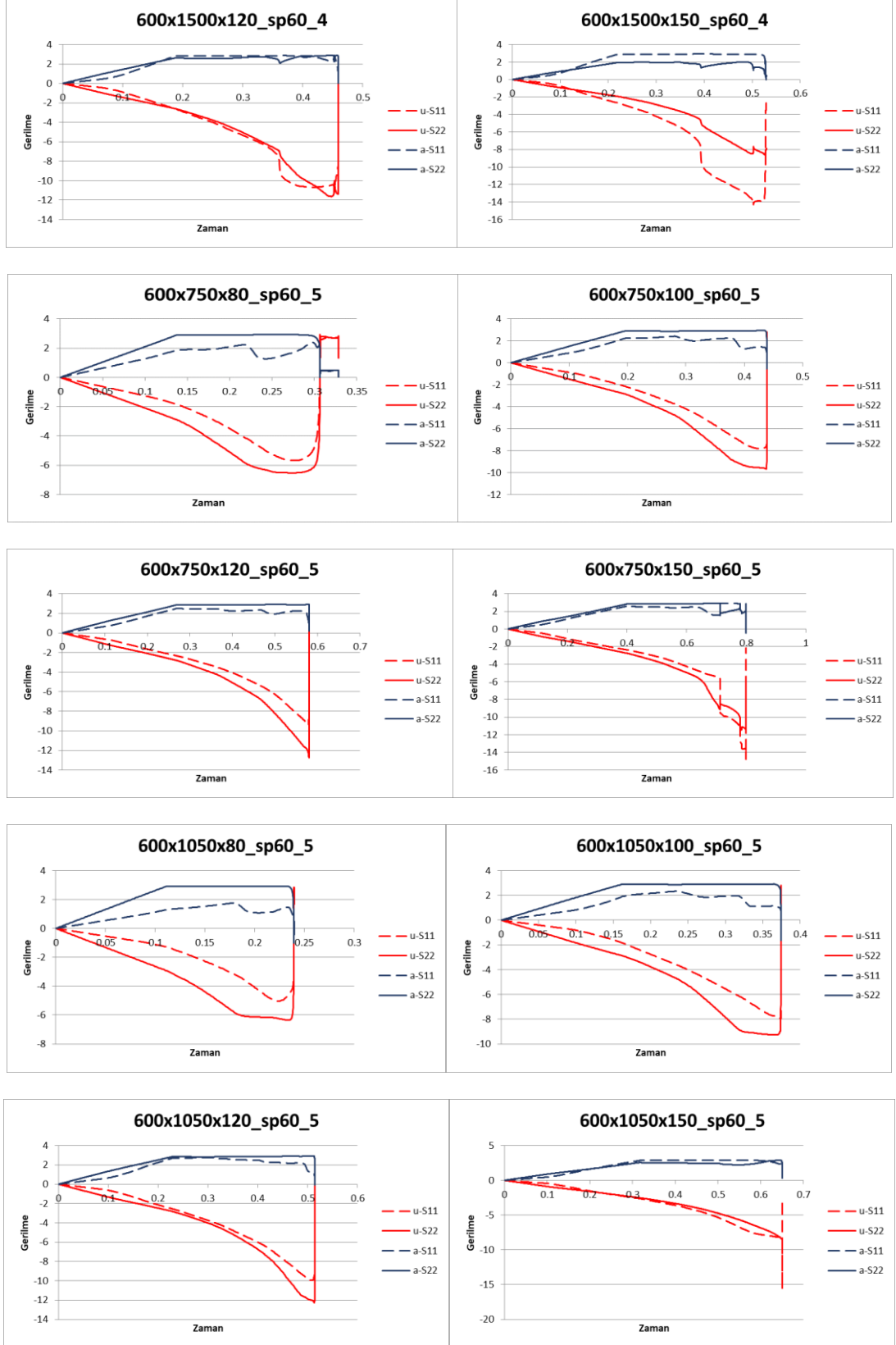
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



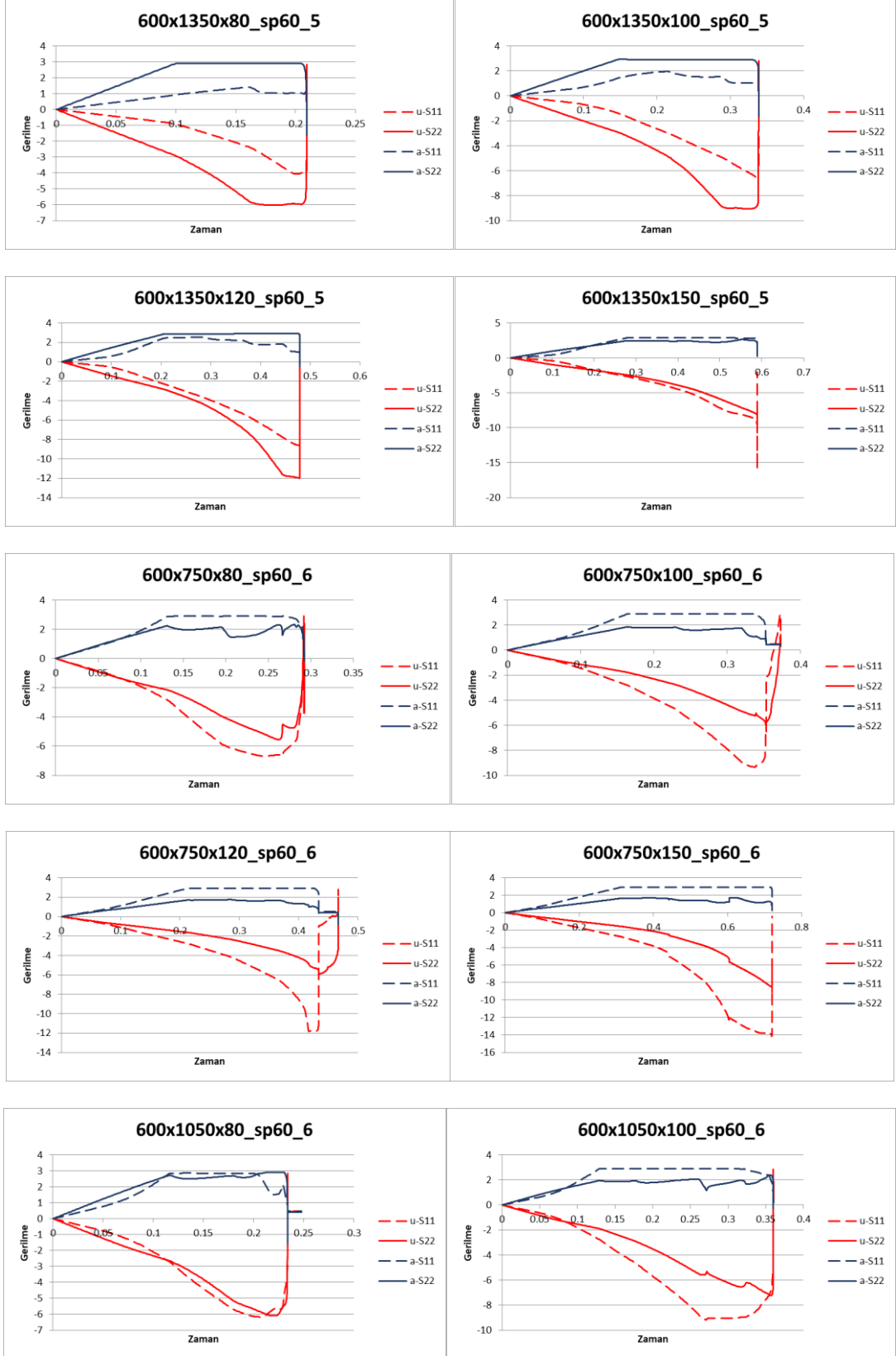
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



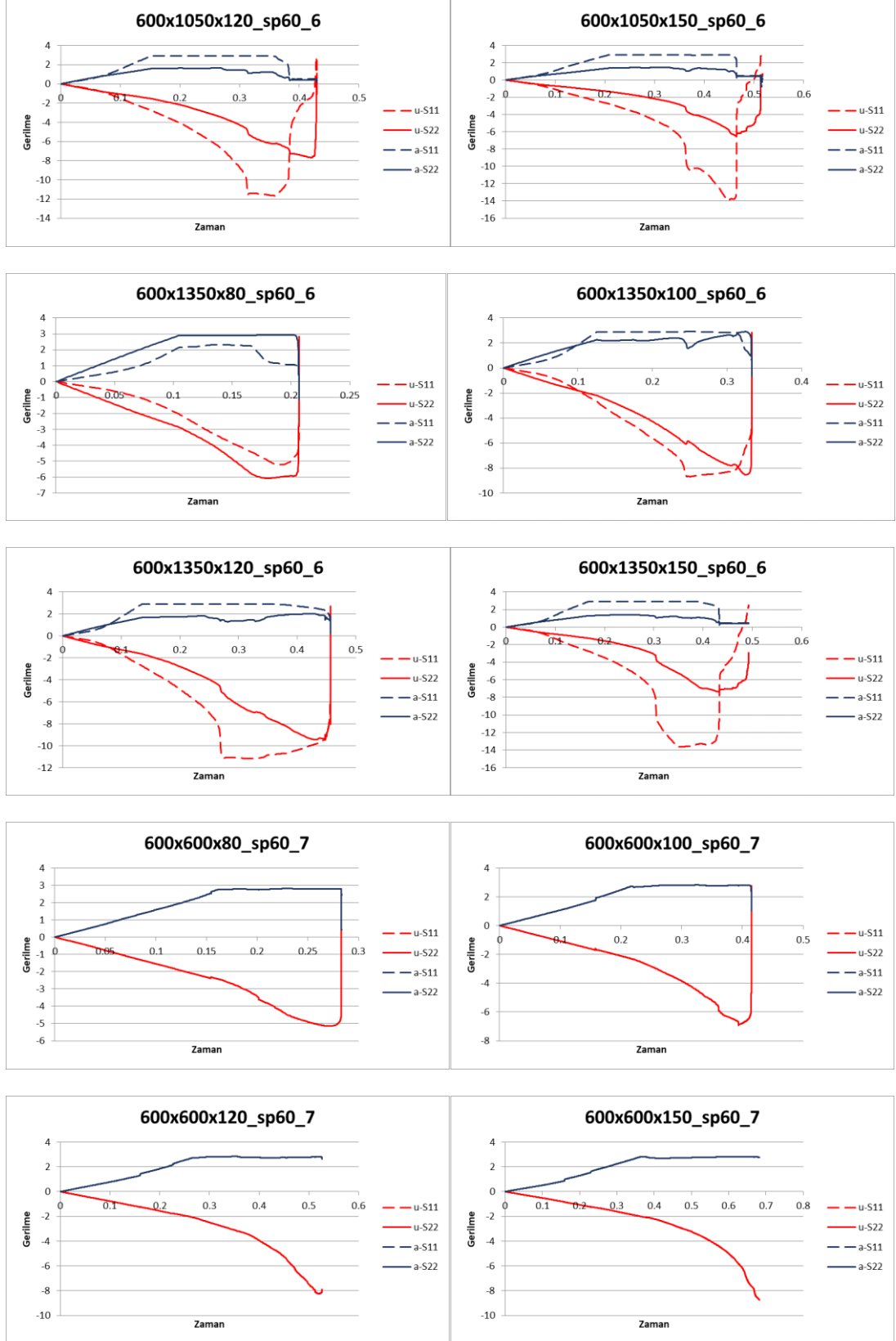
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



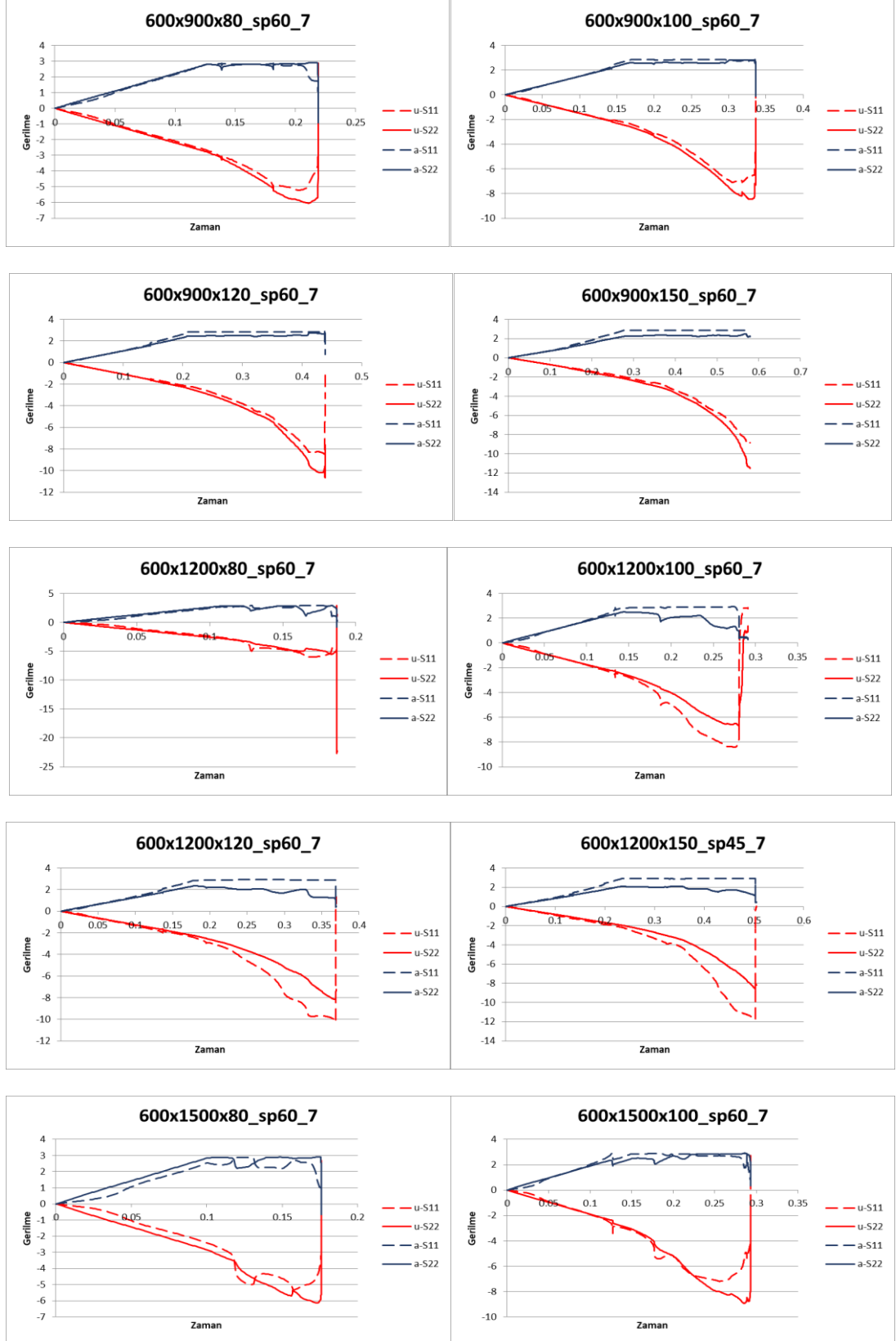
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



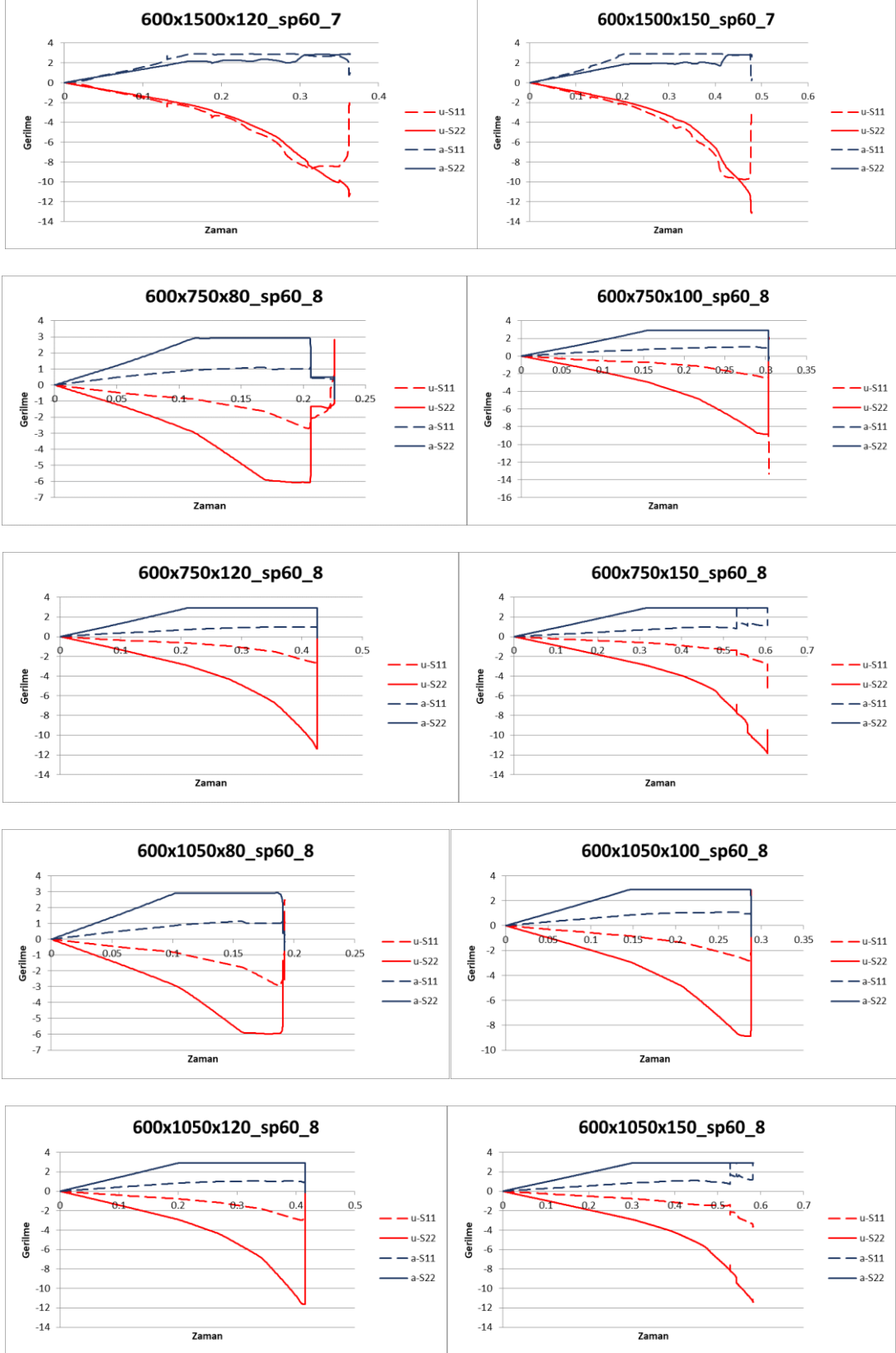
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



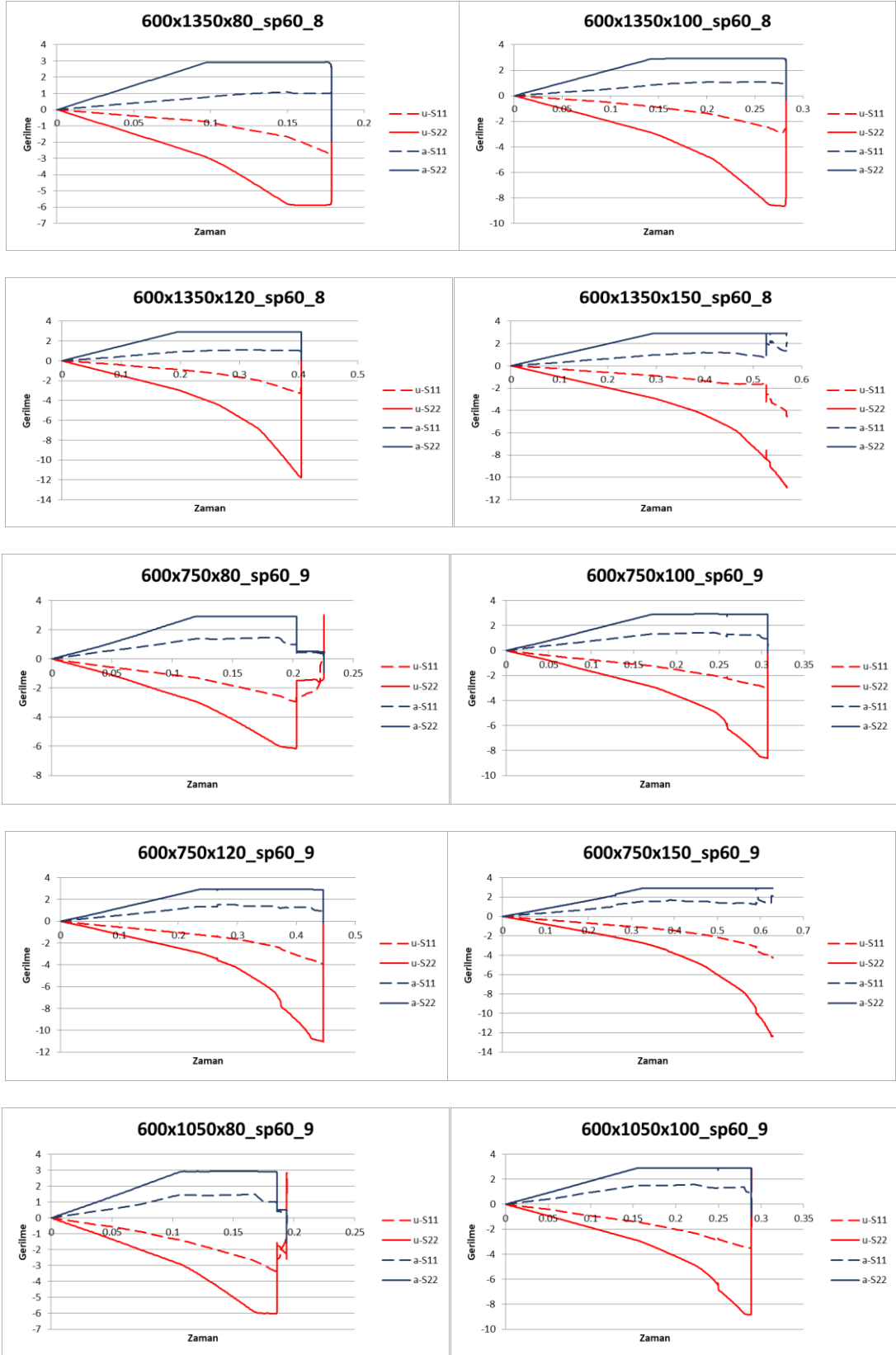
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



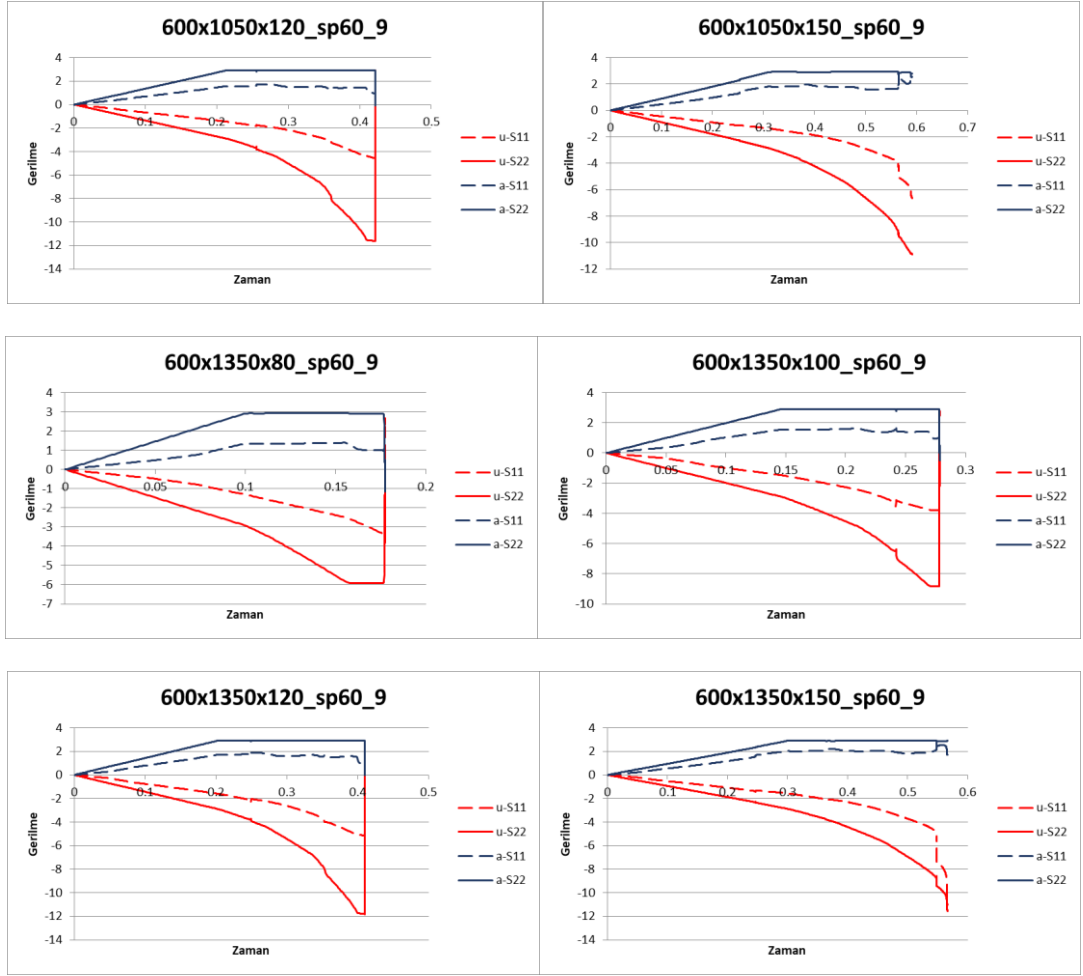
Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri



Şekil B.1 (devam): Tüm boyutlar ve mesnet tipleri için SP60 malzemeli panellerin gerilme-zaman grafikleri