

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PERÇİN VE YAPIŞTIRMA HİBRİT BAĞLANTILARININ DENEYSEL VE
SAYISAL ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ
Murat ÖZENÇ**

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon ve İmalat

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU

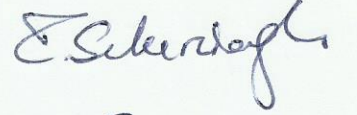
HAZİRAN 2014

DOKTORA TEZ ONAY FORMU

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 071609004 nolu öğrencisi Murat ÖZENÇ tarafından hazırlanan “**PERÇİN VE YAPIŞTIRMA HİBRİT BAĞLANTILARININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı :
(Jüri Başkanı)

Doç. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU (PAÜ)



Jüri Üyesi :

Prof. Dr. Osman ASİ (UÜ)



Jüri Üyesi :

Yrd. Doç. Dr. Yasin YILMAZ (PAÜ)



Jüri Üyesi :

Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ (PAÜ)



Jüri Üyesi :

Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU (PAÜ)



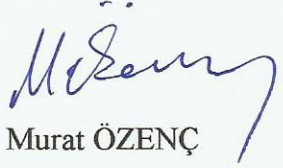
Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
09/07/2014 tarih ve ...29/13.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Orhan KARABULUT

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.

İmza

: 

Öğrenci Adı Soyadı : Murat ÖZENÇ

ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinde ve çalışmanın hazırlanmasında beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU' na, tez izleme komitesi hocalarımdan Prof. Dr. Osman ASI ve Yrd. Doç. Dr. Yasin YILMAZ'a, en içten dileklerle teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım boyunca yardım ve desteklerini aldığım Doç. Dr. Emin ERGUN, Arş. Gör. İnan AĞIR, Araş. Gör. Tufan TOPAL, Araş. Gör. Recep YURTSEVEN, Arş. Gör. Dr. Mehmet AKÇAY ve Araş. Gör. H. Murat ENGİNSOY'a ayrıca teşekkür ederim.

Akademik hayatım boyunca yardım ve desteğini aldığım değerli hocam Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU'ya özellikle teşekkür ederim.

2012FBE012 numaralı proje ile bu doktora tezini destekleyen Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (PAÜBAP) teşekkür ederim.

Deneylerde kullanılan alüminyum levhaları ve perçinleri ücretsiz olarak temin eden Sakarya'da bulunan TIRSAN firmasına teşekkür ederim.

Tüm bunların yanında özellikle bana hep moral ve güç veren, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan anneme, babama ve çalışmalarımı yaparken destek olup sabreden ve manevi yardımını esirgemeyen eşime minnettarım.

Haziran 2014

Murat ÖZENÇ

Makina Yük. Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

1. GİRİŞ	1
1.1 Ön Bilgi	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	3
1.3 Literatür Özeti.....	4
2. KURAMSAL TEMELLER VE GENEL BİLGİLER	8
2.1 Yapışma İşlemi ve Temel Kavramları.....	8
2.1.1 Adhezyon.....	8
2.1.1.1 Mekanik kilitlenme teorisi	9
2.1.1.2 Elektrostatik teori	9
2.1.1.3 Difüzyon teorisi	10
2.1.1.4 Islatma teorisi	10
2.1.1.5 Kimyasal bağlar teorisi	11
2.1.1.6 Zayıf sınır tabaka teorisi	12
2.1.2 Kohezyon.....	12
2.2 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri.....	13
2.2.1 Adhezyon hasarı.....	14
2.2.2 Kohezyon hasarı.....	15
2.3 Hibrit bağlantı türleri.....	15
2.3.1 Kaynak - yapıştırma hibrit bağlantısı	16
2.3.2 Kenet perçin - yapıştırma hibrit bağlantıları.....	18
2.3.3 Perçin - yapıştırma hibrit bağlantısı	20
2.4 Yapıştırma Bağlantılarına Uygulanan Yüzey İşlemler.....	22
2.4.1 Genel yüzey hazırlama yöntemleri.....	22
2.4.1.1 Yüzeylerin yağdan arındırılması	22
2.4.1.2 Yüzeylerin mekanik olarak aşındırılması	23
2.4.2 Alüminyum alaşımlarına uygulanan özel yüzey işlemler.....	25
2.4.2.1 Kimyasal uygulamalar (Dağlama)	27
Sülfürik asit - Sodyum dikromat çözeltisi (Optimize edilmiş FPL)	27
Sülfürik asit - Ferrik sülfat çözeltisi (P2)	28
2.4.2.2 Elektrokimyasal uygulamalar (Anodizasyon)	29
Fosforik asit anodizasyonu (PAA)	31
Kromik asit anodizasyonu (CAA)	32
Borik - sülfürik asit anodizasyonu (BSAA)	33
Fosforik sülfürik asit anodizasyonu (PSA)	33
Sülfürik asit anodizasyonu (SAA)	34
3. MATERYAL VE METOD	36
3.1 Deneysel Çalışmalar	36
3.1.1 Yapıştırılan malzeme özellikleri	36
3.1.2 Deneylerde kullanılan perçin özellikleri.....	38
3.1.3 Deneylerde kullanılan yapıştırıcının özellikleri.....	39
3.1.4 Deney numuneleri	40
3.1.5 Deney numunelerinin yüzey hazırlık işlemleri	42

3.1.5.1 Sülfürük asit - Sodyum dikromat çözeltisinin (FPL) uygulanması	42
3.1.5.2 Sülfürük asit - Ferrik sülfat çözeltisinin (P2) uygulanması	43
3.1.6 Deney numunelerinin birleştirilmesi	45
3.1.7 Yaşlandırma işlemleri	49
3.1.8 Deney ekipmanları	50
3.2 Sayısal Çalışmalar	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	55
4.1 Deneysel Bulgular	55
4.1.1 Perçin bağlantıları	55
4.1.2 Yapıştırma bağlantıları	57
4.1.2.1 Yapıştırma bağlantılarına uygulanan yüzey işlemlerinin etkisi	57
4.1.2.2 Yapıştırma bağlantılarına sıcaklığın ve yaşlandırma işleminin etkisi	61
4.1.3 Hibrit bağlantılar	62
4.1.3.1 Hibrit bağlantılara uygulanan yüzey işlemlerinin etkisi	64
4.1.3.2 Hibrit bağlantılara sıcaklığın ve yaşlandırma işleminin etkisi	68
4.1.4 Yapıştırma ve hibrit bağlantıların karşılaştırılması	72
4.2 Sayısal Bulgular	82
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	93

KISALTMALAR

BSAA	: Borik - Sülfirik Asit Anodizasyonu
CAA	: Kromik Asit Anodizasyonu
COH3D8	: 8-Node Three - Dimensional Cohesive Element
C3D8R	: 8-Node Linear Brick, Reduced Integration
FPL	: Sülfirik Asit - Sodyum Dikromat Çözeltisi (Forest Products Laboratory)
NTMP	: Nitrotrimetilenfosfonik Asit
PAA	: Fosforik Asit Anodizasyonu
PBSAA	: Fosforik – Borik - Sülfirik Asit Anodizasyonu
PSA	: Fosforik Sülfirik Asit Anodizasyonu
P2	: Sülfirik Asit - Ferrik Sülfat Çözeltisi
SAA	: Sülfirik Asit Anodizasyonu
SEM	: Scanning Electron Microscope
TUAM	: Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (Afyon Kocatepe Üniversitesi)
σ	: Normal gerilme
ϵ	: Normal şekil değiştirme

TABLO LİSTESİ

Tablolar

2.1 : Adhezyon teorileri.....	8
2.2 : Yağ almada kullanılan solvent örnekleri.....	23
2.3 : 2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik aşındırma sonrasında yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.....	24
2.4 : Yapıştırma bağlantılarında, malzemeye göre yüzey işlem farklılığının bağlantı mukavemeti üzerindeki etkileri.....	26
2.5 : FPL çözeltisi bileşenleri.....	28
2.6 : P2 çözeltisi bileşenleri.....	28
2.7 : Oksit yapısının doğru akımda anodizasyon türlerine göre karşılaştırılması.....	31
2.8 : Fosforik asit anodizasyonu koşulları.....	32
2.9 : Doğru akımda farklı anodizasyon uygulamalarının karşılaştırılması.....	34
3.1 : 1050A alüminyum malzemesinin kimyasal kompozisyonu.....	36
3.2 : 1050A alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri.....	36
3.3 : 1050A alüminyum malzemesinin plastik bölgede mühendislik ve gerçek çekme eğrisi değerleri.....	38
3.4 : Perçine ait boyut ve mekanik özellikler.....	39
3.5 : Loctite Hysol 9466'nın fiziksel ve mekanik özellikleri.....	40
3.6 : Deney numunelerinin kodlanması.....	46
3.7 : Deney koşulları ve sayıları.....	48
4.1 : Perçinli bağlantılara ait deney sonuçları.....	55
4.2 : Yapıştırma bağlantılarına ait deney sonuçları.....	57
4.3 : Hibrit bağlantılara ait deney sonuçları.....	63
4.4 : Yapıştırma bağlantısının ve iki perçinli hibrit bağlantının deneysel çalışma ve sayısal analiz neticesinde elde edilen hasar yükleri.....	87

ŞEKİL LİSTESİ

Şekiller

2.1 : Mekanik kilitlenme	9
2.2 : Polimer metal ara yüzeyinde elektriksel tabaka oluşumu	10
2.3 : Yapıştırıcı ve malzeme yüzeylerinden moleküllerin difüzyonu	10
2.4 : Yapıştırıcının yüzeyi iyi ve kötü ıslatma örneği	11
2.5 : Adhezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi	12
2.6 : Temel hasar tipleri	14
2.7 : Punta kaynağı - yapıştırma hibrit bağlantısının işlem basamakları	16
2.8 : Alüminyum levhaların punta kaynağı ve yapıştırıcı ile birleştirilmesi	17
2.9 : Lazer kaynağı - yapıştırma hibrit bağlantısı	18
2.10 : Kenetleme ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş hibrit bağlantı örnekleri	19
2.11 : Kenetleme ve yapıştırma hibrit bağlantısının şematik gösterimi	20
2.12 : Kama test örneğinde hidrasyonun neden olduğu hacimsel genişleme ile çatlak ilerlemesinin yayılması	25
2.13 : FPL çözeltisi uygulanmış 2024 alüminyum yüzeyi ve oksit yapının şematik resmi	27
2.14 : P2 çözeltisi uygulanmış 2024 alüminyum yüzeyi	28
2.15 : Anodik oksit yapısı	30
2.16 : Zamanla ve voltaj artışıyla oksit tabakasındaki değişim	30
2.17 : a) PAA uygulanmış b) CAA uygulanmış 2024 alüminyum alaşımı kesiti	33
3.1 : Metalik malzemeler için çekme numunesi	37
3.2 : 1050A alüminyum malzemesinin çekme eğrisi	37
3.3 : 1050A malzemesinin ve perçinlerin tır dorsesinde kullanıldıkları yerler	39
3.4 : Perçin geometrisi	39
3.5 : Deney numunelerinin boyutları ve perçin konfigürasyonu	41
3.6 : Perçinlenmiş levhanın önden ve yandan yırtılmaması için tasarım kriterleri	41
3.7 : Zımparalanmış yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri	42
3.8 : FPL uygulanmış yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri	43
3.9 : P2 uygulanmış yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri	44
3.10 : Çözeltiye alınmış deney numuneleri	44
3.11 : Ölçülen yüzey pürüzlülüklerine ait değerler	45
3.12 : Yapıştırma işlem basamakları	47
3.13 : Yapıştırılmış deney numuneleri	47
3.14 : Hibrit bağlantıların oluşturulması ve bağlantı örnekleri	48
3.15 : Eğilme gerilmesine karşı önlem alınmış numune	49
3.16 : Deney numunelerinin şartlandırılması	49
3.17 : Instron 8801 dinamik çekme/basma deney cihazı	50
3.18 : Yapıştırma ve hibrit bağlantıların Abaqus modeli	51
3.19 : Hibrit bağlantıya ait ağ yapısı	52
3.20 : Hibrit bağlantının yükleme ve sınır koşulları	53
4.1 : Perçin bağlantılarına ait çekme deneyi sonuçları	56

4.2 : Perçinlerde oluşan hasar şekli.....	56
4.3 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (-20°C, 30 gün).....	59
4.4 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (0°C, 30 gün).....	59
4.5 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (20°C, 30 gün).....	59
4.6 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 30 gün).....	60
4.7 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 60 gün).....	60
4.8 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 90 gün).....	60
4.9 : Yüzeyi aşındırılmış yapıştırma bağlantılarında ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün, % 95 nem; ***90 gün, % 95 nem).....	61
4.10 : FPL dağlaması yapılmış yapıştırma bağlantılarında ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün, % 95 nem; ***90 gün, % 95 nem).....	62
4.11 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma bağlantılarında ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün, % 95 nem; ***90 gün, % 95 nem).....	62
4.12 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (-20°C, 30 gün).....	65
4.13 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (-20°C, 30gün).....	65
4.14 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (0°C, 30 gün).....	65
4.15 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (0°C, 30 gün)....	66
4.16 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (20°C, 30 gün).....	66
4.17 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (20°C, 30 gün).....	66
4.18 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 30 gün).....	67
4.19 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 30 gün).....	67
4.20 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 60 gün).....	68
4.21 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 90 gün).....	68
4.22 : Yüzeyi aşındırılmış 2 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem, **60 gün, % 95 nem, ***90 gün, % 95 nem).....	69
4.23 : Yüzeyi aşındırılmış 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (* 30 gün, % 95 nem).....	69
4.24 : FPL dağlaması yapılmış 2 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün % 95 nem; ***90 gün % 95 nem)....	70
4.25 : FPL dağlaması yapılmış 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (* 30 gün, % 95 nem).....	70
4.26 : P2 dağlaması yapılmış 2 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün, % 95 nem; ***90 gün, % 95 nem)..	71
4.27 : P2 dağlaması yapılmış 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem).....	71
4.28 : Yüzeyi aşındırılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (-20°C, 30 gün).....	72
4.29 : Yüzeyi aşındırılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (0°C, 30 gün).....	73
4.30 : Yüzeyi aşındırılmış perçin, yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (20°C, 30 gün).....	73

4.31 : Yüzeyi aşındırılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (50°C, %95 nem, 30 gün)	74
4.32 : Hibrit bağlantılarda çatlak başlangıcı ve ilerlemesi	75
4.33 : Yapıştırma bağlantılarda çatlak başlangıcı ve ilerlemesi	75
4.34 : FPL dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (-20°C, 30 gün).....	77
4.35 : FPL dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (0°C, 30 gün).....	77
4.36 : FPL dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (20°C, 30 gün).....	78
4.37 : FPL dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (50°C, %95 nem, 30 gün)	78
4.38 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (-20°C, 30 gün).....	79
4.39 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (0°C, 30 gün).....	79
4.40 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (20°C, 30 gün).....	80
4.41 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (50°C, % 95 nem, 30 gün)	80
4.42 : Yapıştırma bağlantılarının kırılma yüzeyleri	81
4.43 : 0°C’de yapıştırma bağlantılarına ait hasar sonrası SEM görüntüleri	82
4.44 : 50°C ve %95 nemde yaşlandırılmış yapıştırma bağlantılarına ait hasar sonrası SEM görüntüleri.....	82
4.45 : Perçinli bağlantının deney sonrası hasar görüntüsü.	83
4.46 : Plaka ve perçindeki gerilmeler ve hasar durumu.	83
4.47 : İki perçinli bağlantıya ait sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması. 83	
4.48 : Yapıştırma bağlantısında oluşan gerilme dağılımı.	84
4.49 : Yapıştırma bağlantısındaki yapıştırıcı tabakada oluşan gerilme dağılımı. ..	85
4.50 : Hibrit bağlantısında oluşan gerilme dağılımı.	86
4.51 : Hibrit bağlantıdaki yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımı.	86
4.52 : Bağlantılardaki yapıştırıcı tabakasında oluşan von Mises gerilmeleri.	87
4.53 : Yapıştırma bağlantısının ve iki perçinli hibrit bağlantının hasar yükü-uzama eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması	88

ÖZET

PERÇİN VE YAPIŞTIRMA HİBRİT BAĞLANTILARININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ

Yapıştırma bağlantılarının ve yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan hibrit bağlantıların dayanımları yapıştırılan malzemeye, çalışma sıcaklığına, yüzeye uygulanan işlemlere vb. etkenlere bağlı olarak etkilenmektedir. Bu çalışmada, yapıştırılacak yüzeye uygulanan işlemlerin ve çalışma sıcaklığının bağlantı dayanımı üzerine olan etkileri deneysel olarak incelenmiş ve bir kısım deneysel çalışmalar sayısal analiz ile desteklenmiştir. Deneysel numunelerinin yüzeylerine mekanik aşındırma, FPL ve P2 dağlama işlemleri uygulanmış ve numuneler -20°C, 0°C, 20°C, 50°C sıcaklıklarda şartlandırılarak deneyleri yapılmıştır. Perçin takviyesinin etkisini görmek amacıyla 3 farklı perçin dizilimi ile hibrit bağlantılar oluşturulmuştur. Test sonuçları FPL ve P2 dağlama işleminin mekanik aşındırma işlemine göre bağlantı mukavemetini artırdığını göstermiştir. Mekanik aşındırma ile bağlantı mukavemetinde sıcaklığa ve neme bağlı olarak önemli bir değişiklik oluşmamıştır. Fakat asitle dağlanmış numuneler sıcaklık ve nemden etkilenmiştir. Özellikle P2 dağlaması ile bağlantılar 50°C ve %95 bağıl nemde düşük dayanım göstermiştir. Yapıştırma bağlantısına perçin takviyesinin bağlantı dayanımına olan etkisi, çevresel koşullara ve yüzey işlem durumuna göre değişmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma bağlantısı, Hibrit bağlantı, Yüzey işlemleri, Sıcaklık etkisi

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF RIVET AND ADHESIVELY BONDED HYBRID JOINTS

The strength of adhesively bonded and hybrid joints is affected by various factors which include type of assembly, type of adherend, operating temperature, surface pre-treatment and others. In this study, the effect of pre-treatment and operating temperature on bonding strength are investigated experimentally and some experimental studies was supported by numerical analysis. The experiments are carried out under mechanical abrasion, FPL and P2 etching conditions at different test temperatures of -20°C, 0°C, 20°C, 50°C. Three type rivet arrangements are tested in order to see effect of rivet reinforcement. Test results showed that FPL and P2 etching improved the strength of the joint according to mechanical abrasion. The strength of the joints did not change significantly depending to temperature and humidity for mechanical abrasion. But the acid etched joints are affected with temperature and humidity. Especially P2 etched joints presented lower strength at 50°C and %95 Rh. Effect of the rivet reinforcement to bond strength on the adhesive bonding has changed according to enviromental conditions and state of surface treatment.

Key Words: Adhesive joint, Hybrid joint, Surface treatments, Temperature effect

1. GİRİŞ

1.1 Ön Bilgi

Malzeme birleştirme teknolojisi insanoğlunun kullandığı hemen hemen her ürünü etkilemiştir. Güvenilir ve düşük maliyetli ürünlere ve üretim tekniklerine olan talepler malzeme birleştirme tekniklerinin gelişmesini hızlandırmıştır. Şu anda, yapısal uygulamalar için kullanılan malzeme birleştirme yöntemleri, kaynaklı birleştirme, yapıştırma bağlantıları ve mekanik sabitleme (cıvata, perçin, pim vb.) olarak sınıflandırılabilir. Bazı durumlarda tek bir birleştirme yönteminin kullanılmasıyla bağlantıdan beklenen yeterli rijitlik, dayanım, titreşim sönümlenme gibi özellikler sağlanamayabilir. Böyle durumlarda bu türlü gereksinimleri gidermek için aynı anda birden fazla birleştirme yöntemi birlikte kullanılabilir. Kaynak-yapıştırma, perçin-yapıştırma, cıvata-yapıştırma gibi hibrit bağlantılar günümüzde kullanılan birleştirme yöntemlerindedir.

Otomobil üretiminde çelik, maliyetinin nispeten düşük olması, çok çeşitli özelliklerde ve formlarda bulunabilir olması, oto gövdesinde tasarım ve üretim veritabanınının çelik için oturmuş olması gibi özellikleri nedeniyle ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Belki de en önemlisi, çelik ile çeliğin ve çelik ile diğer malzemelerin birleştirilebilmesi için pek çok yöntem geliştirilmiş olmasıdır (Sun, 2008). Çeliğin bu özelliklerinin yanında hatırı sayılır bir ağırlığının olması kullanımı için dezavantaj oluşturmaktadır. Otomotiv üreticileri, araçların ağırlığını ve buna bağlı olarak hidrokarbon yakıtlar gibi doğal enerji kaynakların tüketimini, hava kirliliği oluşturan CO₂ gibi emisyon gazlarının salınımını azaltmak için alternatif malzeme arayışları içindedirler.

Alüminyum alaşımları, hafifliği, soğuk şekillendirilebilirliği, korozyon direnci, boyasız halde de estetik bir görünüm sergilemesi gibi özellikleri sayesinde otomotiv ve havacılık sektöründe alternatif malzeme olarak adından bahsettirmektedir. Alüminyum alaşımlarının bahsi geçen özellikler sayesinde önemli bir malzeme haline gelmesi, bazı üretim ve uygulama sorunlarını da gündeme getirmiştir. Örneğin

yapısal uygulamalarda alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi belki de en önemli sorunlardan biridir. Alüminyum alaşımlarının kaynağı çeliğe nazaran oldukça karmaşık ve zordur. Yüksek sıcaklıklarda ergiyen oksit tabakası ve oksit oluşturma meyli, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, ısıl genleşme katsayısının yüksek olması gibi özellikleri alüminyum alaşımlarının kaynağını oldukça zorlaştırmaktadır. Alüminyum alaşımlarının kaynağındaki zorluklar ve dezavantajlar nedeniyle alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde, yapıştırma ile birleştirme ve hibrit bağlantı (nokta kaynağı-yapıştırma, perçin-yapıştırma, cıvata-yapıştırma) uygulamaları alternatif olarak kullanılmaktadır.

Yapıştırmanın sağladığı hafiflik, korozyon direnci, farklı türlerdeki malzemelerin birleştirilebilmesi gibi teknik özellikler sayesinde de bu yöntemler özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe oldukça geniş uygulama alanı bulmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının, yapısal bütünlüğü sağlamada, üretimi kolaylaştırmada, performansı artırmada, güvenliği iyileştirmede, zaman ve maliyet tasarrufunda önemli katkıları vardır. Yapıştırma bağlantısıyla bağlantı noktasındaki gerilme dağılımı nispeten düzenli hale gelmektedir. Gerilmenin düzenli dağılmasıyla mükemmel yorulma direnci ve enerji absorpsiyonu sağlamaktadır (Gomez, 2007; Kelly, 2005; Liu, 2001). Bu gibi avantajlarının yanında yapıştırma bağlantıları ile ilgili bir takım sorunlarda mevcuttur. Yapıştırma bağlantılarının, çarpışma direnci açısından önemli olan soyulma gibi düzlem dışı yük taşıma kapasitelerinin sınırlı olması en büyük dezavantajlarından biridir. Bir başka sorunda yüksek sıcaklıklara (~100°C) çıktığında bağlantı dayanımının düşmesidir. Bundan dolayı yapıştırma işlemini perçin ile takviye ederek kullanmak ideal bir çözüm yolu olarak değerlendirilebilir.

Yapıştırma bağlantısı, mekanik sabitleme elemanlarıyla örneğin perçinle, birlikte kullanılarak yapıştırılan malzemelerin merkezlenmesi ve yapıştırıcı kürleşene kadar birbirlerine tespitini sağlar. Buna ek olarak hibrit bağlantı, soyulma gerilmesi düşük olan yapıştırma bağlantılarında herhangi bir hasar durumunda yüzeylerin birbirinden ayrılmasına engel olmaktadır. Bu sebepten dolayı yapılacak olan tasarımlar için bu türlü hibrit bağlantıların mukavemet değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Kullanılacak olan yapıştırıcı türü, perçin yerleşim geometrisi, yapıştırılacak olan malzemelere uygulanacak ön yüzey işlemleri, çevresel şartlar bağlantı mukavemet değerlerini etkilemektedir. Bu etkenler göz önünde bulundurularak tasarım yapılması gerekmektedir.

Bütün bunlarla birlikte tüm yapıştırma bağlantı türlerini (farklı bindirme türleri, farklı hibrit bağlantı yöntemleri vb.) ilgilendiren en önemli hususlardan biri yapıştırıcıların çevresel değişikliklere karşı hassas olmaları ve zamanla değişen sıcaklık ve nem koşullarına bağlı olarak performanslarında oluşabilecek azalmalardır. Yapıştırma bağlantılarının yapısal uygulamalarda kullanımı hususundaki en önemli dezavantajı, tasarım aşamasında bağlantının ileriye dönük performansı noktasında net kestirimlerde bulunulamamasıdır. Tasarım düşünülürken sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerin zamanla bağlantı mukavemetini önemli ölçüde düşüreceği mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu tezin amacı; yapıştırma bağlantılarının farklı sayılarda ve dizilimlerde perçinle desteklenmesiyle oluşturulan hibrit bağlantılarda, perçinin bağlantı dayanımına olan etkisini araştırmak ve oluşturulan hibrit bağlantıların ve yapıştırma bağlantılarının çevresel etkiler altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla deneysel ve sayısal çalışmalar yapmaktır, ayrıca farklı yüzey işlemlerinin bağlantı mukavemetleri üzerindeki etkilerini incelemektir.

Bu amaç doğrultusunda bağlantı mukavemetini artırmaya yönelik, yapıştırma işlemi öncesinde metaller için yüzey hazırlama yöntemlerinin bahsedildiği ASTM D 2651-01 standardı referans alınarak yapıştırılacak alüminyum deney numunelerinin yüzeyleri hazırlanmıştır.

Yapıştırma bağlantılarını iki, üç ve dört adet perçinle takviye ederek hibrit bağlantılar oluşturulmuştur. Yapıştırma ve hibrit bağlantıların çevresel etkiler altındaki davranışlarını belirlemek ve ömürleri hakkında yorum yapabilmek için bağlantı örnekleri TS EN 2243-5 standartındaki şartlar dikkate alınarak laboratuvar koşullarında iklimik kabinde yaşlandırılmıştır.

1.3 Literatür Özeti

Son zamanlarda hibrit bağlantılar, uluslararası çalışmalarda ve pratik uygulamalarda önemli bir ilgi görmektedir. Perçin takviyeli yapıştırma bağlantılarını dikkate aldığımızda, otomotiv, uzay ve havacılık sektöründe fazlasıyla kullanılıyor (Gomez, 2007; Liu, 2001) olmasına rağmen yapılan literatür çalışmalarında bu tür hibrit bağlantıların çevresel etkiler altındaki davranışlarıyla ilgili olarak çok fazla bilimsel çalışmaya ve pratik uygulama örneklerine ulaşamamıştır. Ulaşılan literatür bilgilerinde genel olarak, analitik ve deneysel çalışmalar neticesinde hibrit bağlantılar, diğer geleneksel bağlantılar ile karşılaştırılmıştır, birbirlerine olan üstünlükleri belirlenmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Kelly (2005) tarafından üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanarak tek tesirli bindirme bağlantılı hibrit kompozitlerde cıvata-delik teması ve lineer olmayan malzeme davranışlarının yük dağılımına olan etkileri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Ceylan (2005) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde, değişik yüklemelere maruz, fiber takviyeli kompozit malzemelerin çeşitli (cıvata bağlantılı, yapıştırma bağlantılı ve hem cıvatalı hem de yapıştırmalı) bindirme bağlantılarındaki gerilme durumlarının, yapıştırıcı cinsi ve kalınlığı değiştirilerek ayrı ayrı incelenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının 0,5 mm den 1 mm ye artırılmasıyla bağlantı dayanım değerlerinde yaklaşık 7,5-10 kat azalma meydana gelmiştir.

Liu ve Sava (2001) yaptıkları çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanarak perçinle takviye edilmiş tek tesirli yapıştırma bağlantısının eğilme momenti altında gerilme analizi ve dayanım değerleri araştırılmıştır. İnce yapıştırıcı tabakalarında perçinle takviye edilmiş yapıştırma bağlantısı, yapıştırma bağlantısı ve perçinli bağlantı ile benzer dayanım değerleri sergilediği görülmüştür. Kalın yapıştırıcı tabakasında perçinle takviye edilmiş yapıştırma bağlantısı en yüksek dayanımı sergilerken sadece perçinle sağlanmış bağlantı en düşük dayanım değerlerini vermiştir.

Fongsamootr ve Sutcharikul (2004) araştırmalarında sonlu elemanlar analizi ve TALA metodunu kullanarak, perçinlenmiş yapıştırma bağlantılarının davranışının, perçin aralığının ve yapıştırıcı rijitliğinin değişmesi ile nasıl değiştiğini çalışmışlardır. Sonuçlarda maksimum çekme gerilmesi perçin aralıklarıyla artmış, yapıştırıcı rijitliği ile azalmıştır.

Haraga ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada bir kontrol panelinin montajında ark kaynağına alternatif olarak akrilik yapıştırıcıyı perçinle takviye ederek oluşturdukları birleştirme yöntemini kullanmışlardır. Kaynak işlemi, gerilme düzeltme gibi çalışan becerisi isteyen durumlar ortadan kaldırılmıştır. Kaynak işleminin kaldırılmasıyla çalışma ortamı iyileştirilmiştir. Yapıştırma bağlantısıyla üretim prosesi basitleştirilmiş ve maliyet azalması sağlanmıştır. Ayrıca toplam enerji tüketiminde %78, ince galvanizli çeliklerde %64, ön kaplamalı çeliklerde %51 azalmalar sağlanmıştır.

Gomez ve diğ. (2007) siyanoakrilat yapıştırıcı ve perçinle oluşturdukları hibrit bağlantının basit mekanik modelini oluşturmuşlardır. Kuvvet uzama eğrileri elde ederek hibrit bağlantının model sonuçları ile deneysel sonuçlar aynı grafik üzerinde konumlandırılmış ve eğriler birbirlerine çok yakın değerlerde çıkmıştır.

Lee ve diğ. (2006) nokta kaynağına alternatif olarak perçin ve yapıştırma bağlantıları çalışılmışlardır. Her üç bağlantı tipi için çarpışma testi yaparak darbe dayanımını etkileyen farklı parametreler analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlarda, absorbe edilen enerji, özgül enerji absorpsiyonu, deformasyon uzunluğu her üç bağlantı tipi için karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak perçin ve yapıştırma bağlantılarının nokta kaynağına alternatif olarak kullanılabilabileceği vurgulanmıştır.

Sun ve diğ. (2007) aynı ve farklı kalınlıklardaki saçları perçinle birleştirerek bağlantıların yorulma davranışlarını çalışmışlardır. Malzeme kalınlığının, delik yönlerinin ve yapısal yapıştırıcı kullanımının yorulma dayanımına olan etkiler araştırılmıştır. Test sonuçlarında çekme yükü altında yapıştırıcı ve perçinin birlikte kullanıldığı bağlantılarda yorulma dayanımı yapıştırıcı kullanılmaksızın yapılan bağlantıya göre 2 kat artış göstermiştir.

Moroni ve diğ. (2010) kaynak, perçin ve yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları hibrit bağlantıların, diğer geleneksel bağlantılar ile (punta kaynağı, perçin, yapıştırma bağlantıları) karşılaştırıldıklarında hangi şartlar altında daha optimum değerler elde edilebileceğini araştırmışlardır. Malzemenin, geometrik faktörlerin ve çevresel faktörlerin; statik mukavemet, rijitlik ve enerji absorpsiyonu üzerine etkileri varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlarda hibrit bağlantıların mekanik performanslarında güçlü bir iyileşme elde edilmiştir.

Sadowski ve diğ. (2010) deneysel ve nümerik olarak perçinle takviye edilmiş çift taraflı bindirme yapıştırma bağlantılarını çalışmışlardır. Deneysel deformatasyon süreci dijital görüntü korelasyon sistemi ARAMIS ile izlenmiştir. Nümerik çalışmalarda ABAQUS kodları kullanılmış ve bağlantının farklı bölgelerindeki gerilme konsantrasyonları ile hataya kadarki tüm sistemin analizi yapılmıştır. Perçinle takviye edilmiş bağlantı sadece yapıştırma bağlantısı ile karşılaştırıldığında enerji absorpsiyonunda %35'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Sadowski ve diğ. (2011) başka bir çalışmada poliüretan yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları çift taraflı bindirme bağlantısını perçinlerle takviye ederek bağlantının hasar davranışlarını analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda 1 den 9'a kadar perçin deneyerek en iyi yük taşıma kapasitesinin 5 perçinle sağlandığı sonucuna varmışlardır. ABAQUS programının kullanıldığı nümerik çalışmalar ile deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen değerler birbirlerini doğrulamıştır. Hibrit bağlantının çekme gerilmesi değeri, yapıştırma bağlantısından %11,5 perçinli bağlantıdan %130 daha yüksek çıkmıştır.

Booth ve diğ. (2000) çelik ve alüminyum numuneler kullanarak perçinle, punta kaynağıyla ve hibrit olarak (perçin+yapıştırıcı ve kaynak+yapıştırıcı) oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantılarının soyulma gerilmesi ve yorulma dayanımlarını araştırmışlardır. Deneyler sonucunda hibrit bağlantıların yorulma dayanımını artırdığı görülmüştür. Yapıştırıcı perçinle birlikte kullanıldığında yorulma dayanımları yalın hallerine nazaran %46, punta kaynağıyla birlikte kullanıldığında %172 artmıştır.

Hahn ve diğ. (1999) perçinli ve hibrit (perçin+yapıştırıcı) bağlantıların statik ve yorulma dayanımlarını termal yaşlandırma ve korozyonlu ortam etkilerini göz önünde bulundurarak değerlendirmişlerdir. 6016-T4 alüminyum alaşımının yapıştırılacak yüzeylerine farklı ön yüzey işlemleri uygulanmıştır. Statik olarak kesme gerilmesi uygulanan hibrit bağlantıların dayanım değerleri perçinli bağlantılara göre yaklaşık 2 kat daha fazla çıkmıştır. Kuvvet-deformatasyon davranışlarına, uygulanan ön yüzey işlemlerinin önemli etkileri olmuştur, ancak kuvvetin artırılmasıyla yapıştırma bağlantısında hasar oluştuğu zaman, yük her defasında sadece perçinin taşıyabileceği değerlere gerilemiştir.

Sun (2008), hazırlamış olduğu doktora tezinde çeşitli kaynak işlemleri uygulayarak alüminyum alaşımlarının ve yüksek dayanımlı çeliklerin birleştirilmesini araştırmıştır. Birleştirme yöntemleri olarak punta kaynağı, yapıştırma bağlantısı, perçin+yapıştırma hibrit bağlantısı ve punta kaynağı+yapıştırma hibrit bağlantısı uygulamıştır. Hibrit bağlantıların kaynağının hibrit olmayan bağlantıların kaynağı ile karşılaştırıldığında çekme ve kesme gerilmesi değerlerini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

Kachlik ve Klement (2005) yaptıkları deneysel çalışmada, poliüretan yapıştırıcı ve kör perçin kullanarak oluşturdukları hibrit bağlantıları yaşlandırarak, yaşlandırmanın bağlantı özelliklerine olan etkilerini çalışmışlardır. Bağlantının soyulma direnci, kayma gerilmesi ve rijitliği üzerine çevresel faktörlerin etkileri değerlendirilmiştir. Kayma gerilmesi değerlerinde dikkate değer bir yaşlandırma etkisi görülmemiştir. Sıcaklık çevriminin etkisinde bağlantı rijitliğinde %38'lere varan bir azalma görülmüştür. Soyulma gerilmesi değerlerinde çevresel faktöre ve maruz kaldığı süreye bağlı olarak %30'lara varan azalmalar görülmüştür.

Ergun ve diğ. (2011) deneysel ve nümerik olarak yaptıkları çalışmada, kompozit levhayı perçin ve yapıştırıcı ile birleştirerek oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantısını üç nokta eğme testine tabi tutarak bağlantıdaki hata davranışlarını araştırmışlardır. Perçinler farklı geometrik aralıklarla bağlantı üzerine yerleştirilmiştir. Perçin kullanılması bağlantıyı 4-5 kat daha güçlü hale getirmiştir, ayrıca perçinli bağlantının deplasman değerinde artış da tespit edilmiştir. Eğme yüklemesi altında perçin bağlantısında ki optimum sonuçlar, perçinlerin alt ve üst noktalarda bulunduğu, bindirme alanı kenarlarına en az mesafede konumlandığı durumda elde edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE GENEL BİLGİLER

2.1 Yapıştırma İşlemi ve Temel Kavramları

Yapıştırma bağlantılarını anlayabilmek için yapıştırma olayının gerçekleşme mekanizmasının ve temel kavramlarının bilinmesi gerekmektedir. ASTM D907 standardında yapıştırıcılar ile ilgili tanımlar açıklanmıştır. Yapıştırma olayı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelen adhezyon ve yapıştırıcının kendi içinde meydana gelen kohezyon kuvvetleri neticesinde oluşan fiziksel ve kimyasal bir olaydır. Yapışmanın doğasını daha iyi anlayabilmek için adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini daha iyi anlamak gerekir.

2.1.1 Adhezyon

Yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzey arasında meydana gelen bu olay, iki yüzeyin ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. Adhezyon mekanizmasını tanımlayabilmek için tarihsel olarak mekanik kilitleme, elektrostatik, difüzyon, fiziksel adsorbsiyon teorileri ileri sürülmüştür (Houwink ve diğ., 1965; Wake, 1986; Adams, 1997). Daha yakın zamanlarda olayın anlaşılabilmesi için farklı teoriler de tartışılmıştır. Tablo 2.1’de adhezyon teorileri ve hangi düzeyde gerçekleştikleri verilmiştir.

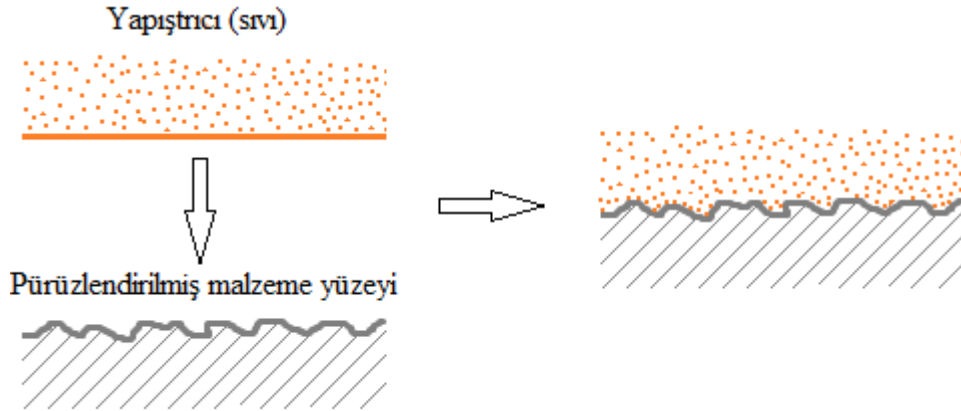
Tablo 2.1 : Adhezyon teorileri (Ebnesajjad, 2008).

Geleneksel teoriler	Geçerli teoriler	Eylem ölçeği
Mekanik kilitleme	Mekanik kilitleme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Fiziksel adsorbsiyon	Islanabilirlik	Moleküler
	Kimyasal bağlar	Atomik
	Zayıf sınır tabakası	Moleküler

Tek bir teorinin yapıştırma mekanizmasını tümüyle belirlemesi zordur ancak birden fazla teorinin kombinasyonu olarak adhezyon (yapıştırma) mekanizmasının açıklanması mümkün olabilir. Ortaya atılan bu teorilere kısaca bakmak faydalı olacaktır.

2.1.1.1 Mekanik kilitlenme teorisi

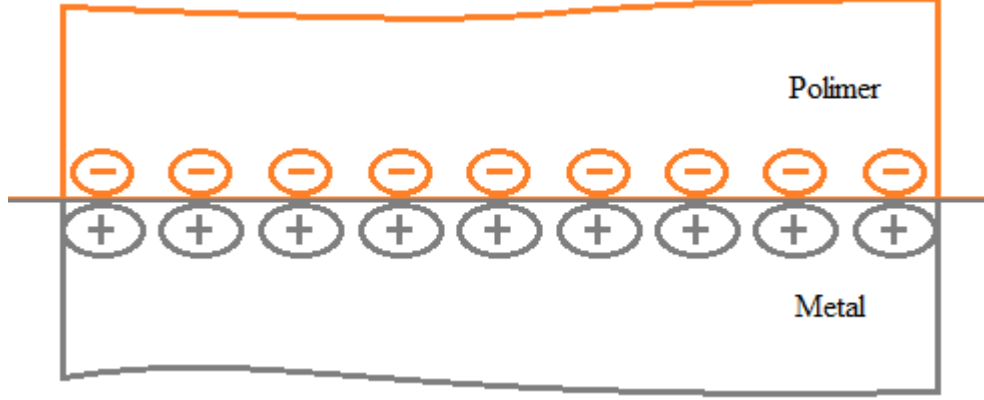
Mekanik kilitlenme teorisi 1925 yılında MacBain ve Hopkins tarafından önerilmiş olup, katı yüzey üzerine sürülen yapıştırıcının, yüzey üzerindeki boşluklara, gözeneklere, pürüzlere dolmasıyla yapıştırıcının kurluşmesi sonrasında mekanik kilitlenmeyi sağlayacağını ve dolayısıyla bağlantı mukavemetini olumlu etkileceğini söylemişlerdir. Şekil 2.1’de sıvı yapıştırıcının malzeme yüzeyindeki pürüzlülükleri doldurarak mekanik kilitlenmeyi oluşturduğu görülmektedir. Mekanik tutunma, yapıştırıcının yüzeyden kalkmasını engeller. Yapıştırılacak yüzeyin belirli bir oranda pürüzlendirilmesi yağ, pas vb. kirlere, oksitlere arınmış temiz bir reaktif yüzey oluşturacağından ve pürüzlülükler sayesinde temas alanı genişleyeceğinden bağlantı dayanımını artırdığı düşünülmektedir (Petrie, 2012). Ancak yüzey pürüzlülüğünün gereğinden fazla artmasıyla, yapıştırıcı kalınlığı artmakta ve fazla pürüzlülükten dolayı yapıştırıcının malzeme yüzeyine tam yayınamaması dolayısıyla bağlantı mukavemetinde azalmalar oluşmaktadır. (Şekercioğlu, 2001; 2003; Özenç, 2007).



Şekil 2.1 : Mekanik kilitlenme (Yang, 2001).

2.1.1.2 Elektrostatik teori

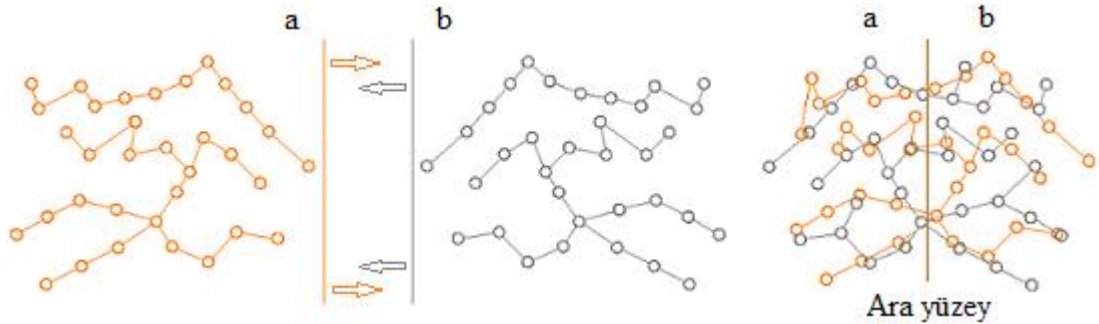
Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler arasındaki elektrostatik etkiler sonucunda yapışmanın gerçekleştiği savunulmaktadır (Cross, 1979; Possart, 1988). Yapıştırıcı ile esas malzeme arasındaki elektron transferinin, yapışmanın oluşmasını sağlayan bir çekim sarjı ürettiğini ileri sürülerek, yapıştırıcı ile esas malzeme arasındaki bağı kapasitöre benzetilmiştir (Deryaguin, 1948). Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin teması ile ara yüzeyde pozitif ve negatif yüklerin oluştuğu elektriksel bölge meydana gelir (Şekil 2.2). Bu teori, polimer ve metalik malzemeler gibi birbiriyle uyumsuz yapıdaki malzemeler için uygundur (Yang, 2001).



Şekil 2.2 : Polimer metal ara yüzeyinde elektriksel tabaka oluşumu (Sun, 2008).

2.1.1.3 Difüzyon teorisi

Yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcının moleküler düzeyde birbirleri içine difüze olmasıyla yapışma gerçekleşmektedir (Voyutskii, 1963). Difüzyon teorisi, hem yapıştırıcı hem de yapıştırılan malzeme için geçerli olmak üzere hareketli uzun zincirli moleküler yapıya sahip polimerik malzemeler için geçerlidir. Aynı zamanda moleküllerin birbirine difüze olabilmeleri ve karışabilmeleri için malzemeler arasında kimyasal uyumluluk da gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı difüzyon teorisinin sınırlı şekilde geçerliliği söz konusudur (Petrie, 2000). Şekil 2.3’de difüzyon olayı şematize edilmiştir.



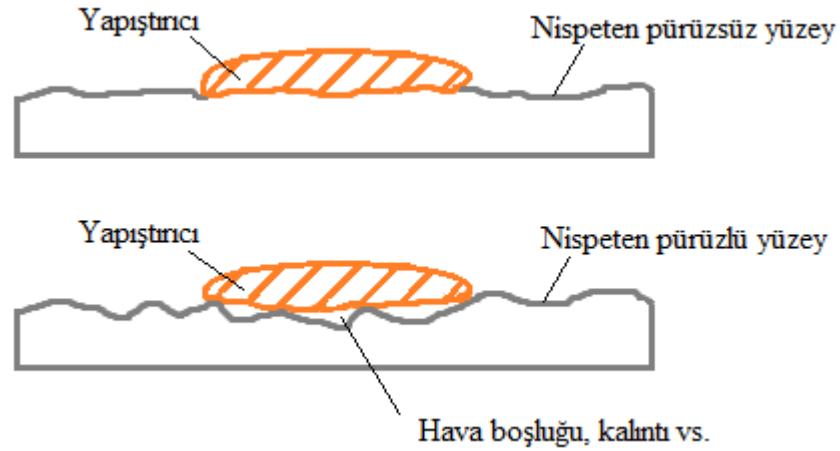
Şekil 2.3 : Yapıştırıcı ve malzeme yüzeylerinden moleküllerin difüzyonu
a) yapıştırıcı molekülleri b) malzeme molekülleri (Sun, 2008).

2.1.1.4 Islatma teorisi

Bu teoriye göre yapışma; iki malzemenin yüzey kuvvetleri tarafından sağlanan moleküler bağlantı ile gerçekleşmektedir. Bağ oluşumunda ilk adım yapıştırıcı ve malzeme arasındaki arayüzey kuvvetlerini güçlendirmektir. Yapıştırıcı ile malzeme arasında sürekli bir temas kurma işlemi ıslatma olarak adlandırılır. ıslatmanın tam

olabilmesi için yapıştırıcının yüzey geriliminin yapıştırılacak malzemenin kritik yüzey geriliminden daha düşük olması gerekmektedir.

Şekil 2.4'de yapıştırıcının yüzeyi iyi ve kötü ıslatma örneği verilmiştir. Yapıştırıcının, yapıştırılacak malzemenin yüzeyini tam olarak kaplaması ve aralarında hava boşluğunun kalmaması için malzemenin yüzey pürüzlülüğünün çok fazla olmaması gerekmektedir. Çok fazla pürüzlü yüzeylerde yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin teması tam olarak gerçekleşmemektedir. İyi bir ıslatmanın gerçekleşmediği uygulamalarda bağlantı dayanımı düşmektedir (Petrie, 2012).



Şekil 2.4 : Yapıştırıcının yüzeyi iyi ve kötü ıslatma örneği (Petrie, 2002).

2.1.1.5 Kimyasal bağlar teorisi

Yapışmanın yüzeylerdeki kimyasal kuvvetler tarafından gerçekleştiği savunulmaktadır. Yapıştırıcı ile malzeme arasında iyi bir temas sağlanmasıyla ara yüzeyde atomlar ve moleküller arası kuvvetlerin oluşması sonucu yapışma meydana gelmektedir. Yapıştırıcı- esas malzeme ara yüzeyindeki kuvvetler genel olarak iki kategoride gruplanabilir. a) İyonik, kovalent ve metalik bağlar olan birincil kuvvetler. b) van der Waals kuvvetleri, dipole-dipole, induced dipole dipole, hidrojen bağları ve asit-baz iç etkileşimini kapsayan ikincil kuvvetler (Kinloch, 1980). Birincil kuvvetlerin bağ enerjileri 60–1050 kJ/mol arasında değişirken ikincil kuvvetlerin bağ enerjileri 0,08–40 kJ/mol arasında değişir. Birbirinden bir nanometre kadar ayrılan iki katı yüzey arasında oluşan çekim kuvveti yaklaşık 100 MPa olarak hesaplanmış olup bu değer yapıştırma bağlantısı mukavemetinden daha fazladır (Kinloch, 1980). Bu fark bağlantı esnasında oluşan boşluk ve diğer kusurlardan kaynaklanmaktadır. Bağlantı mukavemetinin teorik ve deneysel değerleri arasındaki

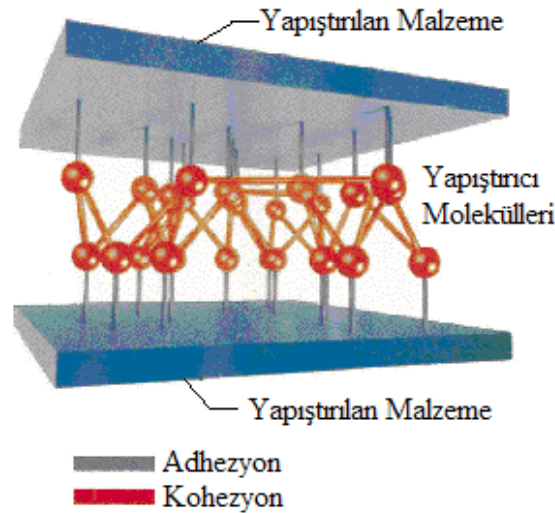
bu büyük farka rağmen yine de bağlantı mukavemetinin bu kadar yüksek değere sahip olmasının sebebi ikincil bağ kuvvetleridir. Kinloch'a göre bazı durumlarda ara yüzey bağlantısı için yüzey analiz teknikleri fikir vermesine rağmen birincil kuvvetlerin yapıştırma bağlantısındaki katkısını değerlendirmek oldukça zordur.

2.1.1.6 Zayıf sınır tabaka teorisi

İlk olarak Bikerman tarafından tanımlanan bu teoriye göre, yapıştırma bağlantısında meydana gelen hasar, zayıf sınır tabakası nedeniyle oluşmaktadır. Zayıf sınır tabaka oluşumu yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme, çevre veya bu faktörlerin herhangi bir kombinasyonu kaynaklı olabilir. Yapıştırılacak yüzeylerde kirletici tabakaların olmasıyla zayıf sınır tabakaları meydana gelecek ve oluşacak hasarlar bu zayıf sınır tabakaları sebebiyle gerçekleşecektir. Polietilen ve metal oksitler, doğal olarak zayıf sınır tabakaları içerebilmektedir. Yapışma yüzeyine yakın kirlilik konsantreleri ve ek yüzey formları zayıf sınır tabakaları oluşturmaktadır (Bikerman, 1967).

2.1.2 Kohezyon

Yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin, yapıştırıcının polimerizasyonu esnasında meydana gelen kimyasal (bağ kuvvetleri) ve fiziksel (van der Waals kuvvetleri) kuvvetler tarafından bir arada tutulması olayıdır. Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Adhezyon ve kohezyon olayları Şekil 2.5'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.5 : Adhezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi (Loctite, 1998).

Küçük yada büyük bir molekül için düşünüldüğünde, molekülün farklı yüklerine tesadüf eden pozitif ve negatif kutuplar bulunabilir. Böylece her molekülden ibaret küçük mıknatıslar ortaya çıkar. Burada aynen mıknatıslarda olduğu gibi, çeşitli dipoller elektromanyetik kuvvetlerle birbirlerine kenetlenmektedir. Bu arada oluşan bağlar *van der Waals bağı* olarak adlandırılmaktadır. Bu oluşan van der Waals bağları diğer bağlar kadar kuvvetli değildir.

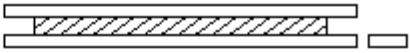
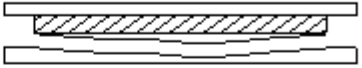
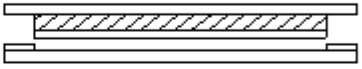
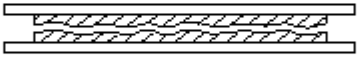


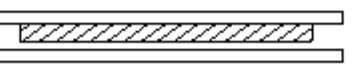
Kovalent bağ ise atomlar arasında elektron köprüleri kurularak kenetlenmeleri durumunda oluşur. Buradaki kuvvetler, ortak kullanılan elektronların kendi eksenleri etrafında birbirlerine zıt yönde dönmesinden dolayı ortaya çıkan elektromanyetik kuvvetlerdir. Zıt yönde dönen elektronların oluşturduğu elektromanyetik alanlar, birbirlerini bir mıknatısın artı ve eksi kutupları gibi çekerler.

Kohezyon, yapıştırıcının kendi içinde gerçekleşen bir olay olmasından dolayı kohezyon kuvvetleri daha ziyade yapıştırıcı malzemenin sahip olduğu özellikler ile ilişkili bir durumdur. Fakat yağ alma, mekanik aşındırma gibi işlemler ile yüzeydeki oksit tabakalar ve istenmeyen kalıntılar temizlenerek, yüzeye primerler kaplayarak aktif yüzeyler oluşturularak, korona işlemi, plazma işlemi vb. ile yüzey aktivitesini değiştirerek adhezyon kuvveti artırılabilir.

2.2 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri

Farklı yükleme şartlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Bir grup malzeme veya parçanın yapıştırıcı ile bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak iki tip hasar modeli ile (adhezyon ve kohezyon hasarları) karşılaşılır (TS EN ISO 10365).

Temel hasar modelinin tayini bir yapıştırma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasını ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılmasını sağlar. Temel hasar tipleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Hasar Tipleri	
Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar	 <p>Yapıştırılan malzemelerin birinde veya ikisinde de hasarın olması</p>
	 <p>Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı</p>
	 <p>Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar</p>
Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar	 <p>Kohezyon hasarı</p>
	 <p>Özel kohezyon hasarı</p>
	 <p>Özel kohezyon hasarı</p>
	 <p>Adhezyon hasarı</p>

Şekil 2.6 : Temel hasar tipleri (TS EN ISO 10365, 2001).

2.2.1 Adhezyon hasarı

Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen bir ayrılmanın olduğu kopma olayıdır. Adhezyon kopmasını önleyebilmek için;

- Uygun yapıştırma boşluğu, tolerans ve uygun malzeme seçilmelidir.
- Yüzeyler uygun temizleme yöntemleri ile temizlenmelidir.
- Sertleşme işleminin tam olarak gerçekleşip gerçekleşmediğinden emin olunmalıdır.
- Yüzey alanı genişletilmeli ya da uygun geometri ve kuvvet uygulanmalıdır.
- Çalışma sıcaklığına uygun yapıştırıcı seçilmelidir.

2.2.2 Kohezyon hasarı

Bir yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın oluştuğu kopma şeklidir. Kopma işlemi sonucunda artık yapıştırıcı genellikle her iki yüzeyde de bulunur.

Normal şartlar altındaki yüklemelerde ve deneysel çalışmalarda, eğer bir hasar meydana gelecekse kohezyon kopmasının meydana gelmesi beklenir. Eğer adhezyon kopması meydana geliyorsa yapıştırma prosesinde bir yanlışlık yapılmış sonucuna varılabilir.

2.3 Hibrit bağlantı türleri

Yapıştırma bağlantılarının, havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerinde kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir. Yapıştırma bağlantıları diğer mekanik birleştirme yöntemlerine göre (kaynak, cıvata, perçin) hafiflik sağlaması, maliyeti düşürmesi farklı malzemelerin birleştirilebilmesi gibi özellikleri nedeniyle avantaj elde etmektedir. Ancak bu tekniğin endüstride tamamen güvenilir olarak kullanılabilmesi için çözülmesi gerekli bir dizi sorunlar hala mevcuttur. Yapıştırıcıların polimerik doğası nedeniyle bağlantının zorlu çevresel ortamlara (sıcaklık, nem vb.) karşı direnci ve dayanımı dikkate alınmalıdır. Başka bir nokta ise özellikle kompozit malzemelerde görülen bindirme uç kısımlarındaki gerilme yoğunluğu nedeniyle hasarların erken oluşmasıdır. Bu sebeple, yapıştırıcının perçin, cıvata, punta kaynağı gibi yöntemlerle birlikte kullanılması sorunlara bir parça çözüm olabilmektedir (Silva ve diğ., 2011).

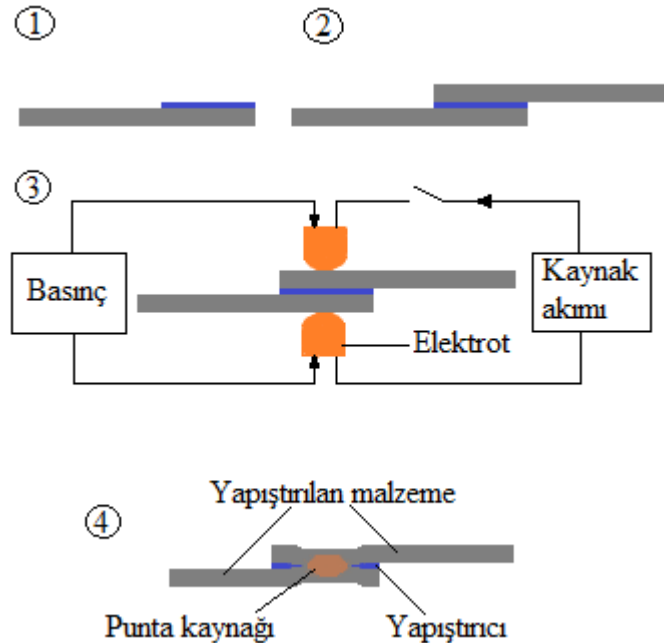
Yapıştırıcının diğer bağlantı yöntemleriyle birlikte kullanılması hibrit bağlantı olarak adlandırılmaktadır. Bu bağlantıların özellikleri ve dayanımı sadece yapıştırıcının doğasına ve özelliklerine bağlı değildir, aynı zamanda kullanılan mekanik sistem, dizilim, tasarım uyumluluğu gibi hibrit bağlantı oluşturmak için kullanılan diğer koşullara bağlıdır (Al-Samhan, 2003a). Hibrit bağlantılarda yapıştırma bağlantıları gibi sanayinin çeşitli sektörlerinde (havacılık, denizcilik, otomotiv vb.) kullanılmaktadır ve bu bağlantılar, yalın bağlantı türlerine göre (yapıştırma, kaynak, mekanik birleştirme vb.) daha iyi özellik göstermektedir.

Hibrit bağlantıların sağladığı avantajlar şu şekilde özetlenebilir (Gomez, 2007; Silva ve diğ., 2011):

- Yüksek statik ve yorulma dayanımı,
- Yüksek rijitlik ve soyulmaya karşı direnç,
- Nihai hasarın önceden daha kolay tespit edilebildiği, olayı daha güvenli hale getiren iki aşamalı çatlama süreci,
- Yapıştırıcı kürleşene kadar yapıştırılan elemanların bir arada tutulması, ilave tespit elemanına ihtiyaç duyulmaması,
- Sızdırmaz bağlantılar ve korozyona karşı daha iyi direnç.

2.3.1 Kaynak - yapıştırma hibrit bağlantısı

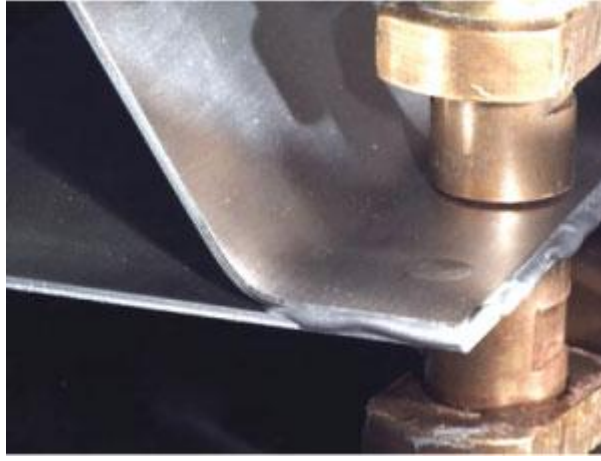
1950'li yılların ortalarında, uçak yapımında kullanılan alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde punta kaynağı ve yapıştırıcı birlikte uygulanmıştır (Aidun ve diğ., 1985; Al-Samhan ve diğ., 2003b). Şekil 2.7'de bu tür hibrit bağlantının işlem basamakları verilmiştir. Bu tür uygulamalarda punta kaynağından önce film veya macun formundaki yapıştırıcı birleştirilecek metal yüzeylerden birine uygulanır. Daha sonra diğer metal parça, yapıştırıcı uygulanmış parça üzerine bindirilir. Son olarak ise punta kaynağı uygulanarak hibrit bağlantı oluşturulmuş olur. Oda sıcaklığında veya sıcaklık uygulayarak yapıştırıcının kürleşmesi beklenir. Punta kaynağı yaklaşık 2,5-5 cm aralıklarla uygulanır (Sun, 2008).



Şekil 2.7 : Punta kaynağı - yapıştırma hibrit bağlantısının işlem basamakları.

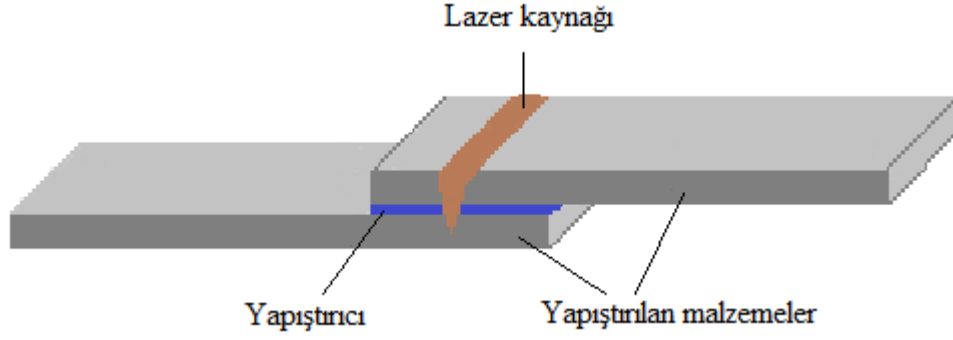
Kaynak - yapıştırma hibrit bağlantı yöntemi, direnç kaynağı ile karşılaştırıldığında daha yüksek çekme ve kayma gerilmeleri, daha uzun yorulma ömrü, daha esnek bir dayanım ve korozyona karşı daha iyi bir direnç sergilemektedir. Şekil 2.8’de bağlantı dayanımını iyileştirmek ve sızdırmazlığı sağlamak amacıyla alüminyum levhaların punta kaynağı ve yapıştırıcı ile birleştirilmesi gösterilmiştir.

Yukarıda bahsi geçtiği üzere yapıştırıcı, punta kaynağı öncesinde yüzeylere sürülmektedir. Ancak düşük viskoziteli yapıştırıcı kullanıldığında, yapıştırıcı kaynak sonrasında da bağlantı boşluğuna enjekte edilebilir. Böylece bağlantıdaki kılcal boşluklara dahi yapıştırıcı ulaştırılmış olur.



Şekil 2.8 : Alüminyum levhaların punta kaynağı ve yapıştırıcı ile birleştirilmesi (Url-1).

Lazer ışını ve yapıştırıcının birlikte kullanıldığı lazer kaynağı - yapıştırma hibrit bağlantıları da oluşturulabilmektedir (Liming ve diğ., 2006; Song ve diğ., 2006). Şekil 2.9’da lazer kaynağı - yapıştırma hibrit bağlantısı şematize edilmiştir. Yapıştırılacak iki yüzey arasına yapıştırıcı uygulandıktan sonra lazer ışınının üst plakaya uygulanmasıyla hibrit bağlantı tamamlanmış olur. Hibrit bağlantının dayanımı yapıştırıcının kayma gerilmesi ve lazer kaynağının sağladığı çekme gerilmesinin bileşkesi olarak ortaya çıkar. Dolayısıyla sadece yapıştırma ve lazer kaynağına göre daha yüksek kayma gerilmesi ve soyulma gerilmesi sağlar. Kaynak derinliği, ışın şiddetinin yoğunluğu ile kontrol edilebildiğinden alt plakaya olan kaynak nüfuziyeti kontrol edilebilir ve yüzey bozunmaları engellenir (Munro, 2008).



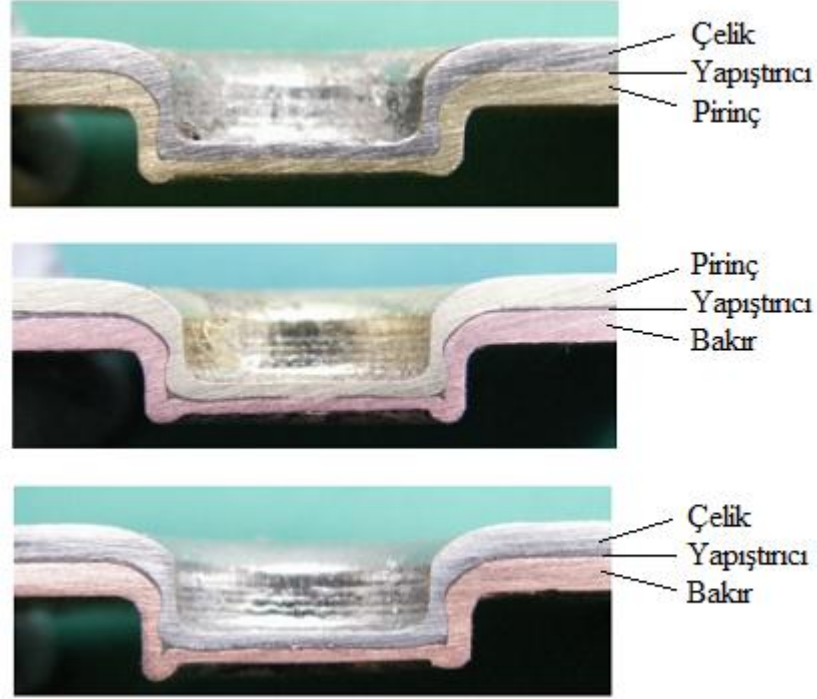
Şekil 2.9 : Lazer kaynağı - yapıştırma hibrit bağlantısı.

2.3.2 Kenet perçin - yapıştırma hibrit bağlantıları

Son yıllarda otomobil üreticileri araç ağırlığını hafifletmek, yakıt tüketimini azaltmak modüler yapı kullanımını artırmak ve bunlara bağlı olarak seyahat performansını iyileştirmek amacıyla alternatif arayışı içindedirler. Bunları sağlayabilmenin en efektif yolu ise araç ağırlığını hafifletmektir ve bunun için ise araç tasarımlarında alüminyum, magnezyum gibi hafif malzemelerin kullanılmasıdır. Ancak bu hafif malzemelerin araç parçaları olarak kullanımında, birleştirme yöntemlerinin ve ilgili uygulama teknolojilerinin eksiklikleri nedeniyle sıkıntılar vardır. Özellikle farklı türlerdeki malzemelerin birleştirilebilmesi bu hafif malzemelerin araç parçası olarak kullanımını kolaylaştıracak ve artıracaktır. Araç yapılarında farklı malzemelerin birleştirilmesinde geleneksel birleştirme yöntemlerinden punta kaynağının kullanımı uygun bir yöntem değildir. Bu amaçla kenet perçin yönteminin yapıştırıcıyla birlikte kullanılmasıyla elde edilen hibrit bağlantılar efektif bir çözüm yolu olabilir (Sun, 2008).

Kenet perçin teknolojisi patenti 1897 yılında Almanya'da alınmış oldukça eski bir birleştirme yöntemidir (Varis, 2003; He, 2010). Ancak bu yöntemin bir takım eksiklikleri nedeniyle 1980'li yılların ortalarına kadar endüstriyel ölçekte kullanılmamıştır. Bir tür soğuk şekillendirme ile mekanik birleştirmenin sağlandığı bu yöntemin yapıştırıcı ile kombine edilerek kullanılmasıyla oluşturulan hibrit bağlantılar ise özellikle otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modern ve yenilikçi birleştirme yöntemi ile farklı türdeki malzemeler birleştirilerek daha dayanıklı ve güvenli hafif konstrüksiyonlar oluşturulabilmektedir. Şekil 2.10'da farklı malzemelerin birleştirilmesinde kenetleme yöntemi ve yapıştırıcının birlikte kullanıldığı hibrit bağlantı örnekleri gösterilmiştir.

Farklı malzemelerin birleştirilebilmesine olanak sağlamasının yanında bağlantıların yük taşıma kapasitesini artırması, sağladığı rijitlik, yorulma dayanımını iyileştirmesi, gürültü ve titreşim sönümlenme özelliği, galvanik ve aralık korozyonu gibi korozyon türlerine karşı bağlantıyı koruması bu bağlantı türlerinin avantajlarıdır.



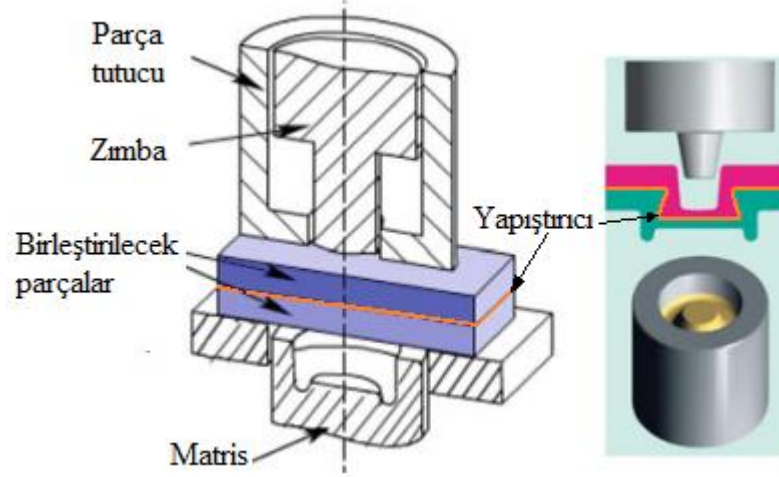
Şekil 2.10 : Kenetleme ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş hibrit bağlantı örnekleri (Balawender ve diğ., 2010).

Bu tarz bağlantılarda film tipi, sıvı veya macun formunda yapıştırıcılar kullanılabilir. Şekil 2.11’de kenetleme ve yapıştırıcı hibrit bağlantısı şematize edilmiştir. Bu hibrit bağlantı yöntemi üç farklı şekilde oluşturulabilmektedir (Sadowski ve Balawender, 2011).

Birinci yöntem: Yapıştırıcı birleştirilecek malzemelerden birinin yüzeyine uygulanır. Yapıştırıcı uygulanmış yüzey üzerine diğer parça bindirilir. Parçalar üst üste bindirildikten hemen sonra yapıştırıcı kurluşmeden kenetleme işlemi yapılarak hibrit bağlantı oluşturulmuş olur. Bağlantı kurluşmeye bırakılır.

İkinci yöntem: Arada yapıştırıcı olmaksızın birleştirilecek parçalar üst üste bindirilerek kenetleme işlemi yapılır. Düşük viskoziteli yapıştırıcı kenetlenmiş bölgeye enjekte edilir. Böylece bağlantıdaki yarıklara ve kılcal boşluklara dahi yapıştırıcı ulaştırılmış olur. Bağlantı kurluşmeye bırakılır.

Üçüncü yöntem: Yapıştırıcı, birleştirilecek malzemelerden birinin yüzeyine uygulanır, yapıştırıcı uygulanmış yüzey üzerine diğer parça bindirilir. Yapıştırıcının kurlleşmesi beklenir. Yapıştırıcı kurlleştikten sonra kenetleme işlemi yapılır ve hibrit bağlantı oluşturulmuş olur.



Şekil 2.11 : Kenetleme ve yapıştırma hibrit bağlantısının şematik gösterimi.

2.3.3 Perçin - yapıştırma hibrit bağlantısı

Mekanik performans açısından değerlendirildiğinde kaynak - yapıştırma hibrit bağlantısı, kenetlenme – yapıştırma ve perçin – yapıştırma hibrit bağlantılarına göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Fakat, kaynak bölgesindeki yapıştırıcı varlığının kaynak performansına olan etkisi, kaynağa uyumlu yapıştırıcı gereksinimi gibi ayrıntılar kaynak - yapıştırma hibrit bağlantısı uygulamalarını zorlaştırmaktadır. Perçinli hibrit bağlantılarının en önemli özelliklerinden biri, kaynaklı hibrit bağlantılara göre düşük performans sergilemesine rağmen oldukça zahmetsiz ve basit bir üretim kolaylığı sağlamasıdır. Bu nedenle perçinli hibrit bağlantıların üretim yolları araştırılmış ve geleneksel kaynaklı hibrit bağlantılarla karşılaştırıldığında farklı bir üretim yöntemi olduğunu vurgulamak amacıyla literatürde yerini almıştır (Moroni ve Pirondi, 2011).

Sadece perçin ve yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantıların eksikliklerini gidermek amacıyla, her iki bağlantı şeklinin avantajlarının alınıp tek bir bağlantıya aktarıldığı perçin ve yapıştırıcının birlikte kullanıldığı hibrit bağlantılar oluşturulmaktadır.

Sanayi ihtiyaçlarına bakıldığında bağlantılardan beklenen en önemli özellik dayanımdır. Sanayiye bağlı olarak da özellikle havacılık sektöründe bu beklentinin yanında bağlantılardan rijitlik, hasar toleransı ve hafiflik gibi özellikler de beklenmektedir. Tüm bu özellikler yapıştırma bağlantılarının karakteristik özelliklerindedir. Mesela yapıştırma bağlantısının perçin ile kombine edilerek kullanılmasıyla daha basit ve kolay bir bir bağlantı oluşturulmuş olacak ve aynı zamanda hasar toleransı artırılmış olacaktır. Ayrıca özellikle havacılık sektöründe, temelinde daha hafif yapılar elde etmek amacıyla, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, kompozit malzemeler, polimerler vb. malzemeler birlikte kullanılmaktadır ve bu malzemelerin birleştirilmesinde kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemleri kullanılması mümkün gözükmemektedir. Farklı türdeki bu malzemelerin cıvata ile birleştirilmesi çözüm olarak düşünülebilir ama cıvata kullanımı ağırlık artışına sebep olacağından hafif yapı tasarımı düşüncesine aykırıdır. Perçin – yapıştırma hibrit bağlantıları, dayanım, fiyat, hafiflik, farklı türde malzemelerin birleştirilebilmesi gibi istenen gereksinimleri karşıladığından bir çözüm yolu olarak düşünülebilir.

Perçin – yapıştırma hibrit bağlantısı üç farklı şekilde oluşturulmaktadır (Moroni ve Pirondi, 2011).

Birinci yöntem: Birleştirilecek parçalar perinlendikten sonra yüzeyler arasına yapıştırıcı enjekte edilerek hibrit bağlantı oluşturulur. Bu durumda düşük viskoziteli yapıştırıcı kullanılmalıdır. Böylelikle yapıştırıcı, bağlantıdaki tüm boşluklara sızarak doldurur ve başarılı bir sızdırmazlık da sağlanmış olur. Bu yöntem var olan perçinli bağlantıların dayanımını artırmak amaçlı kullanılır.

İkinci yöntem: Birleştirilecek yüzeyler arasına yapıştırıcı uygulandıktan sonra yapıştırıcının kürleşmesi beklenilmeden perçinleme işlemi yapılır. Bağlantının mekanik özelliklerinin yapıştırıcı sayesinde artması ve yapıştırıcının polimerizasyonu aşamasında perçinler vasıtasıyla yüzeylerin bir arada tutulması sayesinde ilave başka ekipmanlara ihtiyaç duyulmaması nedeniyle basit ve hızlı bir üretime müsaade etmesinden dolayı en çok kullanılan yöntemdir.

Üçüncü yöntem: Son yöntemde ise yüzeylere uygulanan yapıştırıcının kürleşmesinden sonra perçinleme işlemi yapılarak hibrit bağlantı oluşturulmuş olur. En az kullanılan yöntemdir.

2.4 Yapıştırma Bağlantılarına Uygulanan Yüzey İşlemler

Yüzey hazırlığı, yapıştırıcı kullanarak yapılan birleştirme yönteminin en kritik aşamasıdır. Yüzey hazırlamanın amacı, çevresel şartlara (nem, sıcaklık vb.) dayanıklı, sürekli ve yüksek dayanımlı bir yapıştırma bağlantısı sağlayacak malzeme yüzeylerinin oluşturulabilmesidir. Yapıştırılacak malzemelerin, oksit, boya, kimyasal kalıntılar, yağ vb. tabakaların araya girmeden yapıştırıcıyla direkt temas etmesi istenir. “Zayıf Sınır Tabakalar” olarak adlandırılan bu tabakalar arada olduğu durumlarda yapıştırıcı, yapıştırılacak malzeme yüzeyleri ile tam temas içinde olmayacaktır (Zuo ve diğ., 2008).

Yüksek bağlantı dayanımının, sürekliliğin ve verimliliğin istendiği yerlerde, dikkatli ve kontrollü bir yüzey hazırlama süreci gereklidir. Yüzey hazırlama yöntemlerinin seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır;

- Yapıştırılacak malzeme yüzeyindeki kirletici unsurların türü ve miktarı,
- Yapıştırılacak malzeme,
- Bağlantı dayanımı,
- Hizmet süresi ve hizmet verilen ortam.

2.4.1 Genel yüzey hazırlama yöntemleri

Yapıştırma bağlantıları, yapıştırıcı ve yüzeyler arasında tam temas olmamasından olumsuz etkilenirler. Başarılı bir yapıştırma için tasarımda, uygun yüzey hazırlama yöntemi ve uygun yapıştırıcı belirlenmelidir.

2.4.1.1 Yüzeylerin yağdan arındırılması

Mümkün olan en iyi yapışmayı elde etmek için yapıştırılacak yüzeylerden yağ, gres toz ve diğer kalıntıların tamamen temizlenmesi gerekir. Kalıntı bırakmadan buharlaşan solventler buna uygundur. Tablo 2.2’de yüzeyleri yağlardan arındırmak için kullanılan solventler verilmiştir (Loctite, 1998).

Tablo 2.2 : Yağ almada kullanılan solvent örnekleri.

Solvent türü	Temizleme kapasitesi	Yanıcı veya parlayıcı
Hidrokarbonlar (izoparafinler)	İyi	Evet
Ketonlar (aseton)	İyi	Evet
Alkoller (izopropanol)	Orta	Evet
Su bazlı	İyi	Hayır

Eğer yüksek miktarlı imalatlar için özel yağ alma banyoları kullanılıyorsa, temizlik banyosunun kirlenmemesi için çok kirli yüzeylere ön-temizlik yapılması tavsiye edilir. Buharlı yağ alma sistemleri çok sık kullanılır. Bu yöntemde solvent kaynama noktasına kadar ısıtılır ve buharlaştırılır. Soğuk parçalar buharlaşmış temizleyici ile temas ettiğinde, temizleyici yüzeyler üzerinde yoğunlaşır. Oluşan sıvı, yüzeylerde kalmış kir ve gres parçacıklarını temizler.

Yapıştırılacak yüzeydeki yağ, gres vb. gibi kirletici unsurlar deterjan kullanılarak da temizlenebilir. Parçalar 66-99°C'de suya daldırılır. Sonra hemen saf suda iyice çalkalandıktan sonra kurutulur. Genellikle, kullanılan deterjanın alkaline esaslı olması tavsiye edilir.

Alkaline veya asit bazlı sulu temizleyiciler her zaman korozyon önleyici içerirler. Bunlar eğer temizleme sonrası yüzeyde kalırsa, yapışma kuvvetini azaltabilir veya yapıştırıcının kürlenmesini engelleyebilir. Her durumda tüm yüzeyler iyice durulanmalı veya silinmelidir.

Solventler ile temizlik yapılırken daha iyi netice almak için, yüzeylerden kireyi ayıran kimyasal işlemler, mekanik olarak da desteklenebilir.

2.4.1.2 Yüzeylerin mekanik olarak aşındırılması

Kirli metal yüzeyler çoğunlukla bir oksit tabakasıyla kaplıdır ve bu tabaka yağ alma işlemi ile temizlenmez. Böyle durumlarda, çok aşamalı programların bir ön hazırlık aşaması olan mekanik aşındırma işlemi (kumlama, zımparalama, taşlama veya tel fırça ile fırçalama vb.) ile istenmeyen oksit tabakası kaldırılır ve aynı zamanda belli bir pürüzlülük değerinde yüzeyler elde edilir. Tablo 2.3'de 2024-T3 alüminyum alaşımının yüzeyinin farklı şekillerde aşındırılması sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülükleri karşılaştırılmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının dayanımı üzerine yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede etkisi vardır. Bu etki malzemenin yüzey alanını artırarak sağlanır. Dolayısıyla

malzeme ve yapıştırıcı arasındaki kimyasal bağlar artar. Aşırı pürüzlü yüzeyler bağlantıda boşluklar oluşturacağından dayanımı olumsuz yönde etkiler. Ayrıca bu durum sonucunda ıslanabilirlik iyi olmayabilir ve girintilerde sıkışan hava küreleşen yapıştırıcı içinde kalabilir (Pocius, 2002).

Tablo 2.3 : 2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik aşındırma sonrasında yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması.

Mekanik uygulama	Yüzey pürüzlülüğü (R_a, μm) \pm standart sapma	
	Liu ve diğ., 2006	Rider, 2001
Zımparalama (180 no)	1,75 \pm 0,06	---
Zımparalama (220 no)	---	1,60 \pm 0,10
Zımparalama (240 no)	1,51 \pm 0,05	---
Zımparalama (320 no)	---	1,70 \pm 0,20
Skoçbrayt bezi	---	1,10 \pm 0,20
Kumlama	1,78 \pm 0,07	1,60 \pm 0,10

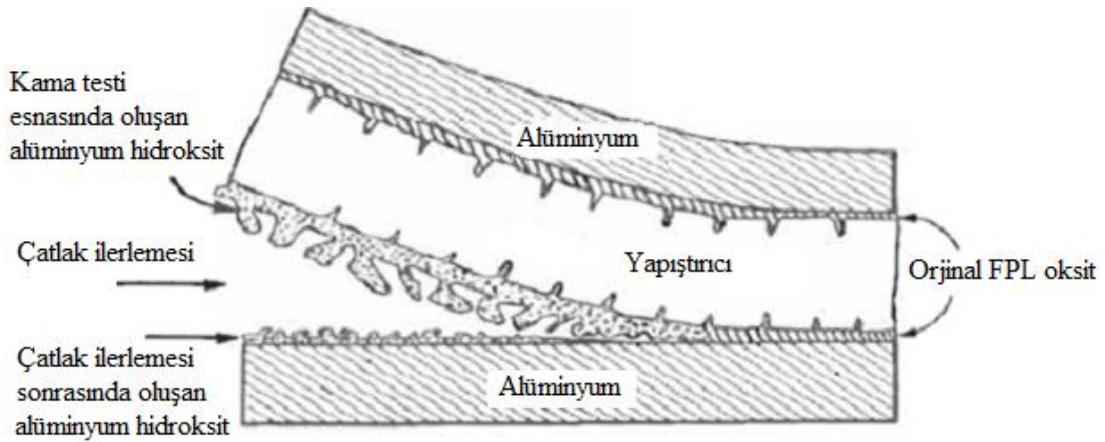
Borsellino ve diğ.'nin (2009) yaptığı bir çalışmada, AA6082 alüminyum alaşımının tek tesirli bindirme bağlantısının mukavemeti üzerinde yapıştırılan yüzeylerin durumu ve yapıştırıcı özelliklerinin etkilerini incelemişlerdir. Alüminyum levhaların yüzeyleri zımpara kağıdı ile üç farklı yüzey pürüzlülüğünde (R_a 0,33; 1,10; 2,35 μm) hazırlanmış ve dört farklı reçine kullanarak yapıştırılmıştır. Ayrıca yukarıda bahsi geçen parametrelerde ıslanabilirlik testleri yapılarak, yapıştırıcı yüzeyi ve yapıştırıcı arasındaki etkileşime olan etkileri çalışılmıştır. Yapılan çekme deneyi sonuçlarında 1,10 μm yüzey pürüzlülüğündeki bağlantılar, her yapıştırıcı türü için en yüksek mukavemeti göstermiştir. 2,35 μm sonuçları da 1,10 μm 'ye yakın değerlerde çıkmıştır. Islanabilirlik değerleri her yapıştırıcı için aynı pürüzlülük değerleri değişimlerine farklı tepkiler vermiştir.

Özenç ve Şekercioğlu (2008) yaptıkları deneysel çalışmalarda yapıştırma bağlantılarının darbe deneylerinde üç farklı yüzey pürüzlülük değerine sahip çelik, alüminyum ve bakır malzeme kullanmışlardır. En düşük mukavemet değerini, en az yüzey pürüzlülüğünde (R_a 0,5 μm) bulmuşlardır. Darbe mukavemeti açısından optimum yüzey pürüzlülük aralığını R_a 1,5–2 μm olarak tespit etmişlerdir.

Mekanik aşındırmayla malzeme yüzeyinde girintiler ve çıkıntılar oluşacağından bu girintilerde oluşan organik kirlenmenin yüzeyden tamamen kaldırılması zorlaşmaktadır. Dolayısıyla yüzeyleri tekrar kimyasal çözücülerle temizlemekte fayda vardır.

2.4.2 Alüminyum alaşımlarına uygulanan özel yüzey işlemler

Alüminyum malzemelerde nem, yüzeyde hidrasyona neden olur. Al_2O_3 yüzey işlem esnasında oksihidroksit $AlOOH$ veya trihidroksit $Al(OH)_3$ 'e dönüşür. Hidroksite dönüşüm esnasında ara fazda hacimsel bir genişleme söz konusudur ve bu genişleme Al_2O_3 'in kapladığı hacmin yaklaşık üç katı kadardır. Bu genişleme ve yüzey morfolojisindeki değişiklikler bağlantı hattında yüksek gerilmeleri harekete geçirir. Şekil 2.12'de bu durum şematize edilmiştir. Bu gerilmeler hidroksitin zayıf mekanik özelliği ile birleşerek, hidroksit - metal ara yüzeyinde çatlak yayılmasını teşvik eder (Pocius, 2002).



Şekil 2.12 : Kama test örneğinde hidrasyonun neden olduğu hacimsel genişleme ile çatlak ilerlemesinin yayılması (Pocius, 2002).

Yüzey işlem yöntemlerinden fosforik asit anodizasyonu (PAA) ile hidrasyona direnç gösteren bir oksit tabakası elde edilir. Bu durum, anodizasyon esnasında fosfat tabakası ile Al_2O_3 tabakasının birleşmesi sayesinde meydana gelir. Hidrasyon inhibitörleri (nitrilotrimetilenfosfonik asit, NTMP) kullanılarak da hidrasyon direnci artırılabilir. Fenolik ve silan bazlı katkı maddeleri ile primerler kullanılarak hidrasyon direnci artırılabilir (Pocius, 2002). Tablo 2.4'de iki farklı yapıştırıcı ve çeşitli yüzey işlem tekniklerinin kullanılmasının metal malzemelerde yüzey hazırlığının önemini göstermektedir.

Tablo 2.4 : Yapıştırma bağlantılarında, malzemeye göre yüzey işlem farklılığının bağlantı mukavemeti üzerindeki etkileri (Petrie, 2002).

Malzeme	Uygulama	Yapıştırıcı	Kayma gerilmesi, (MPa)
Alüminyum	İşlemsiz	Epoksi	3,06
Alüminyum	Buharla yağ alma	Epoksi	5,77
Alüminyum	Mekanik aşındırma	Epoksi	12,1
Alüminyum	Asitle dağlama	Epoksi	19,0
Alüminyum	İşlemsiz	Vinilfenolik	16,8
Alüminyum	Yağ alma	Vinilfenolik	19,9
Alüminyum	Asitle dağlama	Vinilfenolik	35,7
Paslanmaz çelik	İşlemsiz	Vinilfenolik	36,0
Paslanmaz çelik	Yağ alma	Vinilfenolik	43,5
Paslanmaz çelik	Asitle dağlama	Vinilfenolik	49,7
Soğuk haddelenmiş çelik	İşlemsiz	Epoksi	20,0
Soğuk haddelenmiş çelik	Buharla yağ alma	Epoksi	19,9
Soğuk haddelenmiş çelik	Mekanik aşındırma	Epoksi	29,6
Soğuk haddelenmiş çelik	Asitle dağlama	Epoksi	30,8
Bakır	Buharla yağ alma	Epoksi	12,3
Bakır	Asitle dağlama	Epoksi	16,1

Alüminyum ve alaşımları özellikle yüksek nem ortamı gibi zor çevresel şartlara maruz kalacaksa, korozyondan korunma alüminyum yüzeylerinin hazırlığında düşünülmesi gereken en önemli parametredir. Çözeltiyle temizleme ve mekanik aşındırma işlemleri, çevresel dayanımın gerekli olduğu yerlerde korozyon dayanımı oluşturmadıklarından yeterli gelmemektedir. Bu noktada yüzeylerin hazırlanmasında kimyasal ve elektrokimyasal işlemlerin kullanılmasının oldukça etkili bir yöntem olduğu yapılan deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur.

Alüminyum ve alaşımlarının yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri için mevcut standartlar aşağıda verilmiştir.

- TS EN 13887-Şubat 2007, “Yapısal Yapıştırıcılar - Metallerin ve Plastiklerin Yapıştırma Öncesi Yüzey Hazırlama Kılavuzu”
- ASTM D 2651-01 (Reapproved 2008), “Standart Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding”
- ASTM D 3933-98 (Reapproved 2010), “Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing)”

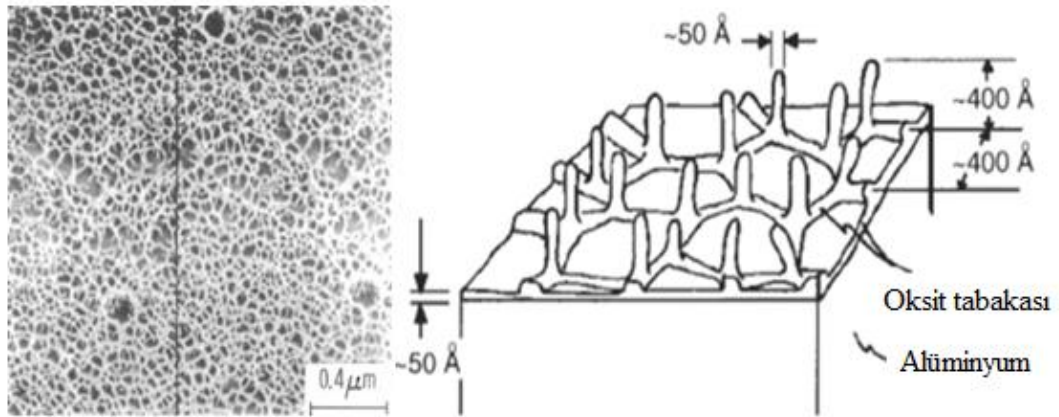
2.4.2.1 Kimyasal uygulamalar (Dağlama)

Tipik olarak kimyasal uygulama yani asitle dağlama, yağ alma, alkalikle yıkama ve elektrokimyasal işlemler arasında bir ara basamaktır. Bu sebeple, bu basamak sonraki yüzey uygulama işlemleri ile uyumlu olmalıdır (Critchlow, 1996).

Alüminyum alaşımları için ASTM D 2651 standardında yer almış iki çeşit asitle dağlama yöntemi vardır. Sülfürik asit / sodyum dikromat çözeltisi (optimize edilmiş FPL) ve sülfürik asit - ferriksülfat çözeltisi (P-2).

Sülfürik asit - Sodyum dikromat çözeltisi (Optimize edilmiş FPL)

Sülfürik asit - sodyum dikromat (optimize edilmiş FPL, Forest Products Laboratory) prosesi alüminyum ve alaşımlarının yüzey hazırlanmasında kullanılan etkili, kontrol edilebilir ve güvenli bir yöntemdir. Hazırlanan çözeltiyle yapılan dağlama ile yüzeyde bulunan başlangıçtaki oksit tabakası çözünür ve yeni bir ince oksit tabakası oluşur. Şekil 2.13'de şematize edilen bu tabaka, ince bir bariyer tabaka şeklinde olup ağısı yapıda, gözenekli ve çıkıntıları olan bir tabakadır. Oluşan bu gözenekli yapı yapıştırıcı ve oksit yüzeyi arasında mekanik kilitlenmeyi sağlamak için yeterlidir.



Şekil 2.13 : FPL çözeltisi uygulanmış 2024 alüminyum yüzeyi ve oksit yapının şematik resmi (Pocius, 2002).

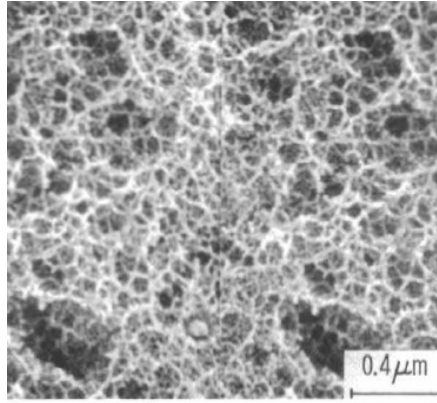
Dağlama yapılacak alüminyum alaşımının yapıştırılacak yüzeyi yağ ve gres artıklarından arındırılmak amacıyla asetonla yıkanmasından sonra, Tablo 3'de verilen 66-71°C'de hazırlanmış FPL çözeltisine 12-15 dakika daldırılır. Daldırma işleminden sonra 1-3 dakika süreyle oda sıcaklığındaki saf suyla yıkanır ve yaklaşık 60°C'lik fırında kurutulur.

Tablo 2.5 : FPL çözeltisi bileşenleri (ASTM D2651).

Çözelti bileşenleri	Konsantrasyon
Sülfürik asit	287,9-310 g/l
Sodyum dikromat	28-67,3 g/l
Alüminyum alaşımı-2024	1,5 g/l
Saf su	Aldığı kadar

Sülfürik asit - Ferrik sülfat çözeltisi (P2)

Bu çözeltide FPL çözeltisinde kullanılan sodyum dikromat yerine onun zararlı ve zehirli etkilerini yok etmek için oksitleyici olarak ferrik sülfat kullanılmaktadır. Bu yöntemle de FPL de olduğu gibi mekanik kilitlemeye izin veren bir oksit yüzey morfolojisi meydana gelir. Şekil 2.14’de P2 çözeltisi uygulanmış 2024 alüminyum yüzeyi gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : P2 çözeltisi uygulanmış 2024 alüminyum yüzeyi (Pocius, 2002).

P-2 çözeltisinin uygulaması da FPL de olduğu gibi yapıştırılacak yüzeylerin yağdan arındırılması sonrasında Tablo 4’de verilen 60-65°C’de hazırlanmış çözeltiye 10-12 dakika süreyle daldırılması ve sonrasında da yüzeylerin, oda sıcaklığında 1-3 dakika saf suyla yıkayıp yaklaşık 60°C’lik fırında kurutularak uygulanır.

Tablo 2.6 : P2 çözeltisi bileşenleri (ASTM D2651).

Çözelti bileşenleri	Konsantrasyon
Sülfürik asit	% 27-36 (ağırlıkça)
Ferrik sülfat	135-165 g/l
Saf su	Aldığı kadar

P-2 ile elde edilen yüzey morfolojisi FPL ile elde edilene benzemektedir fakat yüzeydeki oksit tabakası daha ince (<37nm) yapıdadır (Digby ve Packham, 1995). Griffen ve Askins (1988) yaptıkları bir çalışmada alüminyum yüzeylere P2 ve PAA (fosforik asit anodizasyonu) yöntemi uygulayarak bağlantıları kesme ve soyulma

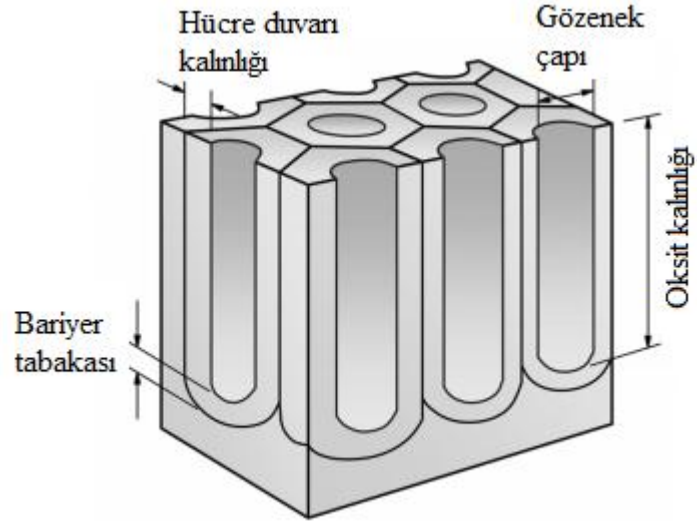
gerilmelerine tabi tutmuştur. Testler sonunda P2 yönteminin PAA yöntemine eşdeğer bir mukavemet sergilediği görülmüştür. Ancak Digby ve Packham (1995) yaptıkları kama testinde P-2 yönteminin düşük performans sergilediğini belirlemiştir.

Prolongo ve Urena tarafından 2009 yılında yapılan bir çalışmada, 1050A ve 2024A alüminyum malzemeler ile dört farklı epoksi kullanarak tek tesirli bindirme bağlantısı oluşturmuşlardır. Yapıştırma öncesinde deney numunelerini ayrı ayrı mekanik aşındırma, alkalin temizleme, FPL ve P2 dağlaması işlemleri uygulanmıştır. Numuneler çekme deneyine tabi tutularak uygulanan yüzey işlemleri karşılaştırılmıştır. Yapıştırıcı türüne bağlı olarak sonuçlarda farklılıklar gözlemlenmiştir. FPL ve P2 aşındırma ve alkalikle temizlemeye göre bağlantıların dayanımlarını artırmış ve birbirlerine yakın mukavemet değeri sergilemişlerdir.

2.4.2.2 Elektrokimyasal uygulamalar (Anodizasyon)

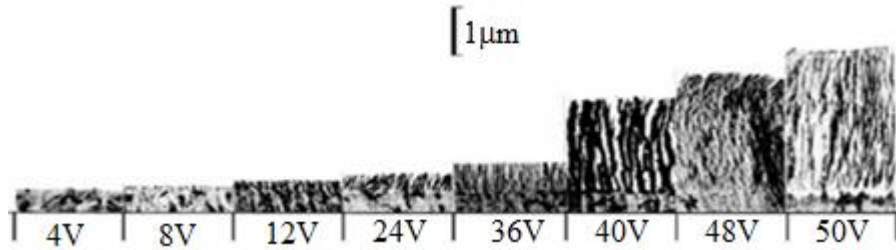
Eloksal alüminyum için özel bir yüzey kaplamadır ve elektrokimyasal bir proses ile yapılır. Kullanılan elektrolit genellikle asidik bir çözeltilerdir. Kaplanacak alüminyum elektroliz işleminin anotudur. Belirli ve kontrol edilen bir akım (genellikle doğru akım, DA) yoğunluğu, kaplanacak alüminyum ile uygun bir katot arasında, yine belirli bir süre için geçirilir. Bu süre, oluşacak eloksal tabakasının özellik ve kalınlığına göre belirlenir. Proses sırasında ısı ortaya çıkar ve elektrolitin sıcaklığını sabit tutmak için bu ısının işlem ortamından alınması (elektrolitin soğutulması) gerekir.

Eloksal tabakası, alüminyuma entegre bir tabaka şeklinde oluşur ve metal - oksit arakesitinde oluşan bölümüne özel olarak "bariyer tabakası" (barrier layer) adı verilir. Eloksal tabakasının gözenekli yapısı, bu bariyer tabakasının üstünde büyür. Tipik bir anodik oksit yapısı Şekil 2.15'de verilmiştir.



Şekil 2.15 : Anodik oksit yapısı (Critchlow ve diğ., 2006).

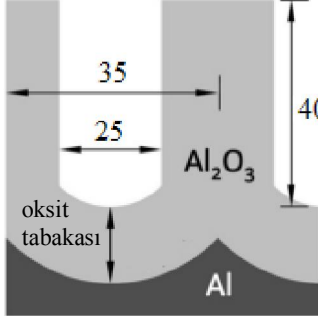
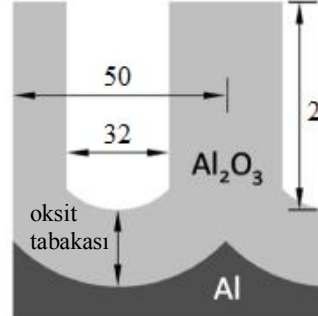
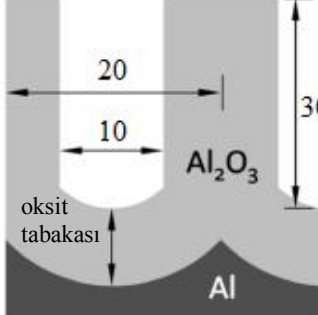
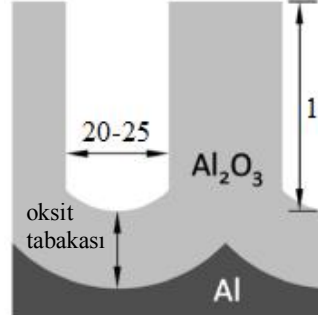
Oksit tabakasının kalınlığı, amper-dakika miktarına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.16). Ayrıca oksit tabakası kalınlığı, gözenek çapı, anodizasyon türüne bağlı olarak yani kullanılan elektrolit, sıcaklık ve uygulanan akıma göre de değişir. Tablo 2.7’de anodizasyon türüne göre oluşan oksit yapısı karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.16 : Zamanla ve voltaj artışıyla oksit tabakasındaki değişim (Congard, 2005)

Elektrokimyasal olarak uygulanan yüzey hazırlama teknikleri olarak, yapıştırma bağlantılarında en çok kullanılan yöntemler fosforik (PAA) ve kromik (CAA) asit anodizasyonu uygulamalarıdır. Bunların yanında sülfürik asit (SAA) ve borik-sülfirik asit (BSAA) anodizasyonları da mevcut olup kullanımları diğerleri kadar yaygın değildir. Ayrıca yapıştırma mukavemetleri PAA ve CAA ile karşılaştırıldıklarında daha düşük performans sergilemektedirler (Ebnesajjad, 2006).

Tablo 2.7 : Oksit yapısının doğru akımda anodizasyon türlerine göre karşılaştırılması (Park ve diğ., 2010).

	CAA	PAA
Oksit kalınlığı	4000nm	200nm
Gözenek çapı	25nm	32nm
Hücre duvarı kalınlığı	10nm	18nm
Oksit yapının şematik görünüşü (ölçeksizdir)		
	BSAA	PSA
Oksit kalınlığı	3000nm	1500nm
Gözenek çapı	10nm	20-25nm
Hücre duvarı kalınlığı	10nm	
Oksit yapının şematik görünüşü (ölçeksizdir)		

Fosforik asit anodizasyonu (PAA)

Boeing Şirketi tarafından geliştirilmiş olan bu yöntem ASTM D3933-98 (2010) standardında tanımlanan haliyle en yaygın olarak kullanılan anotlama yöntemidir. PAA uygulanarak birleştirilen bağlantılar FPL uygulamalarına nazaran nemli ortamlarda oldukça iyi dayanım sergilemektedir. Ayrıca uygulamada FPL kadar hassasiyet gerektirmemektedir. Bu sebeple uzay ve uçak sanayinde tercih edilen yüzey hazırlama yöntemidir (Pocius, 2002).

Malzeme yüzeyinden yağlar arındırıldıktan sonra anotlama işlemi ASTM D3933-98 (2010)'e göre Tablo 2.8'de verilen değerler kullanılarak yapılır. Anotlama işleminden sonra parçalar 10-15 dakika maksimum 43°C'de suyla yıkanır ve 30 dakika maksimum 80°C'de kurutulur.

Tablo 2.8 : Fosforik asit anodizasyonu koşulları (ASTM D3933-98).

Çözeltili bileşenleri	Uygulama değerleri
Fosforik asit, %85	%9-12 (ağırlıkça)
Sıcaklık	19-25 °C
Voltaj (Doğru akım)	9-16 V
Anotlama süresi	20-15 dakika

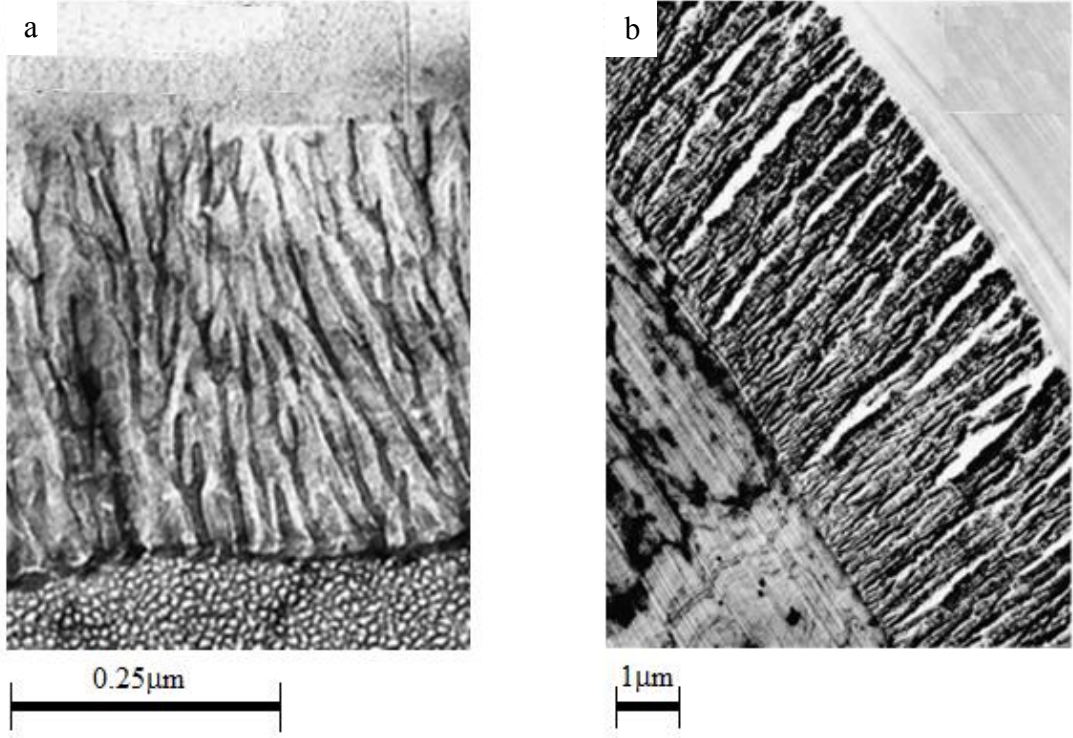
Bu yöntemlerle elde edilen oksit tabakası, dağlama ile elde edilen tabakadan daha kalın ve korozyon direnci daha üstündür (Ebnesajjad, 2006).

Kromik asit anodizasyonu (CAA)

Alüminyum yüzeylerinin korozyon direncini artırmak amacıyla geliştirilmiş bir yöntem olup daha sonra özellikle Avrupa'da havacılık uygulamalarında yapıştırma bağlantılarında yüzey hazırlama tekniği olarak kullanılmıştır (Pocius, 2002).

Bu proses (Benough Stuart metodu), 40 °C de %3 lük kromik asit elektroliti, doğru akımda 0-50V arasında değişen voltaj, 50 dakika süre ile uygulanır. Anodizasyon işlemini soğuk su ile yıkama ve hava ile kurutma işlemleri takip eder (Url-2).

CAA oksit tabakası PAA oksit tabakasından birkaç önemli açıdan farklılık göstermektedir (Şekil 2.17). Oksidin elektrolit içinde çözünebilirliği olmadığından dolayı PAA oksit tabakasına nazaran çok daha az gözenekli bir oksit tabakası vardır. Yine oksidin elektrolit içinde çözünmemesinden dolayı üst yüzey morfolojisi, tamamen eloksal işlemi öncesinde yüzeye yapılan işlem tarafından belirlenir. Örneğin eloksal işlemi öncesinde deoksidasyon işlemi olarak FPL işlemi uygulanmışsa, eloksal sonrasında üst yüzey morfolojisi FPL morfolojisine benzeyecektir. Uygulamadaki yüksek anodizasyon gerilimi nedeniyle oksit tabakasının kalınlığı diğer proseslerde elde edilenlere nazaran daha kalın olup 3-4 µm dolaylarındadır ayrıca oksit tabakasının dibinde, sütunların altında oluşan bariyer tabaka kalınlığı da 40 nm civarındadır (Pocius, 2002).



Şekil 2.17 : a) PAA uygulanmış b) CAA uygulanmış 2024 alüminyum alaşımı kesiti (Pocius, 2002).

Borik - sülfürik asit anodizasyonu (BSAA)

PAA uygulanan numunelerin dayanımları oldukça iyi olmasına rağmen, ince oksit tabakası ve çok gözenekli yüzey morfolojisi nedeniyle korozyon dirençleri düşüktür (Zhang ve diğ., 2008). BSAA işlemi Boeing tarafından geliştirilen, borik ve sülfürik asit karışımından oluşan elektrolitin kullanıldığı bir uygulamadır. Korozyon dayanımları çok iyi olan fakat çevreye zararlı etkileri olan CAA uygulamasının yerine alternatif olarak geliştirilmiştir. BSAA uygulaması CAA ile karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklık (26°C), daha düşük gerilim (15V) ve daha az uygulama süresi yeterli gelmektedir. Tablo 2.7’de BSAA oksit yapısına ait ortalama boyutlar verilmiştir. BSAA yöntemi korozyon direnci iyi olmasına rağmen nispeten düşük yapışma performansı nedeniyle yapısal olmayan yapıştırma ve boyama sistemleri için önerilmektedir (Critchlow ve diğ., 2006).

Fosforik sülfürik asit anodizasyonu (PSA)

Daimler Chrysler Aerospace Airbus şirketi tarafından geliştirilen bir başka kromik asit içermeyen anodizasyon yöntemi de PSA yöntemidir. Fosforik asit ve sülfürik asit

karışımından oluşan elektrolitin 18 volt doğru akımda uygulandığı bir yöntemdir. Uygulama sonrasında yüzeyde gözenek çapı yaklaşık 20-25 nm olan ve kalınlığı 1500 nm dolaylarında bir oksit tabakası oluşur (Matz ve diğ., 1996).

Sülfürik asit anodizasyonu (SAA)

SAA yönteminin ASTM D2651’de bahsi geçmesine rağmen detayları için MIL A 8625 standardına yönlendirmektedir. SAA uygulaması genel amaçlı ve boya öncesi koruma maksadıyla uygulanmaktadır. MIL A 8625’e göre Tip II (geleneksel) ve Tip IIB (ince film) olmak üzere iki çeşidi mevcuttur. TFSAA olarak adlandırılan ikinci tip, kromik asitsiz uygulama olarak yapıştırma bağlantılarında alternatif anodizasyon işlemi olarak geliştirilmiştir. Uygulaması BSAA yöntemine benzemektedir (Url-3).

Critchlow ve diğ. (2006), Mazza ve diğ. (2004), Matz ve diğ. (1996) yaptıkları çalışmalarda ASTM D 1002 standardında verilen şekliyle tek tesirli bindirme bağlantısı oluşturarak bağlantıları kesme gerilmesi testlerine tabi tutmuşlardır. Yapıştırıcı olarak FM73 film tipi yapıştırıcı kullanmışlardır. Yapıştırma öncesinde yüzeylere farklı anodizasyon işlemleri uygulamışlardır. Elde edilen değerlerin karşılaştırılması Tablo 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.9 : Doğru akımda farklı anodizasyon uygulamalarının karşılaştırılması.

Uygulama	Kesme gerilmesi (MPa)
CAA (Critchlow ve diğ., 2006)	39,75
PAA (Mazza ve diğ., 2004)	42,72
BSAA (Critchlow ve diğ., 2006)	40,25
PSA (Matz ve diğ., 1996)	43,20

Zuo ve diğ. tarafından 2008 yılında yapılan bir çalışmada, 2024 alüminyum alaşımı yapıştırma işlemi öncesinde dört farklı yöntemle anotlanarak deneye tabi tutulmuş ve uygulamaların korozyon direncine ve yapıştırma mukavemetine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca korozyon numunelerini korozyon testlerine tabi tutarak korozyon başlangıç sürelerini tespit etmişlerdir. Anotlama yöntemlerinden biri yeni bir uygulama olan fosforik – borik - sülfürik asit anodizasyonudur (PBSAA). Sonuçlarda yeni denedikleri PBSAA yöntemi korozyon başlangıç süresini artırmış ve bağlantının kayma gerilmesi değerini BSAA yöntemine göre iyileştirmiştir.

Özetlenecek olursa alüminyum alaşımlarına uygulanan yapıştırma öncesindeki kimyasal ve elektrokimyasal uygulamalar ile yüzeylerdeki olması muhtemel kararsız oksit tabakası, boya, kimyasal kalıntılar, yağ vb. tabakalar kaldırılarak, yüzeyde ince düzenli bir oksit tabakası oluşması sağlanmaktadır. Bu kararlı oksit tabakası zayıf sınır tabakalarının oluşmasını önlemekte ve/veya azaltmaktadır. Böylece korozyona daha dirençli ve mukavemeti yüksek bağlantılar oluşturulmaktadır. Aynı zamanda bağlantı mukavemeti açısından önemli olan ıslanabilirlik değerlendirildiğinde, uygun yüzey işlemi ile yapıştırıcının yüzey ile yaptığı temas açısı azalarak yapıştırıcının yüzeyi daha iyi ıslatması sağlanarak daha yüksek mukavemetli bağlantılar elde edilebilmektedir.

Yüzey hazırlama işlemlerinin birçoğunda kimyasallar kullanılmakta ve reaksiyonlar sonucu çeşitli gazlar açığa çıkmaktadır. Dolayısıyla kimyasalların insan sağlığına ve çevreye olan etkileri düşünüldüğünde uygulamalarda oldukça dikkatli davranılmalıdır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler (alüminyum alaşımı, perçin, yapıştırıcı vb.), test ekipmanları, deney numunelerinin hazırlanması ve deney yöntemleri hakkında detaylı bilgiler verilecektir.

3.1.1 Yapıştırılan malzeme özellikleri

Günümüzde alüminyum alaşımları fiziksel ve mekanik özellikleri, hafifliği, işlenebilirliği ve yüksek korozyon dayanımları dolayısıyla otomotiv ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tezdeki deneysel çalışmalarda 1050A alüminyum malzemesi kullanılmıştır. 1050A alüminyum malzemesi tekstil, gıda vb. taşımacılığında kullanılan kapalı tır dorselerinde dış levha olarak tüm dorsenin kaplanmasında kullanılmaktadır. Bu levhaların montajı dorsedeki taşıyıcı profillere perçinlerle yapılmaktadır. 1050A alüminyum malzemesi tır dorsesi imalatı yapan Sakarya'da faaliyet gösteren TIRSAN firmasından 1000x1600x3 mm boyutlarında levha halinde tedarik edilmiştir.

Üretici firma tarafından belirlenen, 1050A alüminyum malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler aşağıda sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de verilmiştir.

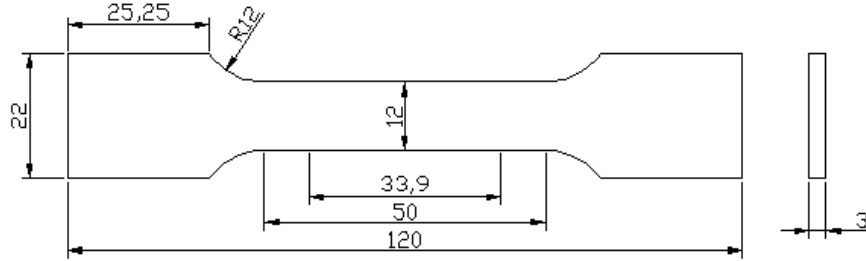
Tablo 3.1 : 1050A alüminyum malzemesinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça).

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0,317	0,060	0,001	0,006	0,002	0,006	0,016	99,593

Tablo 3.2 : 1050A alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri.

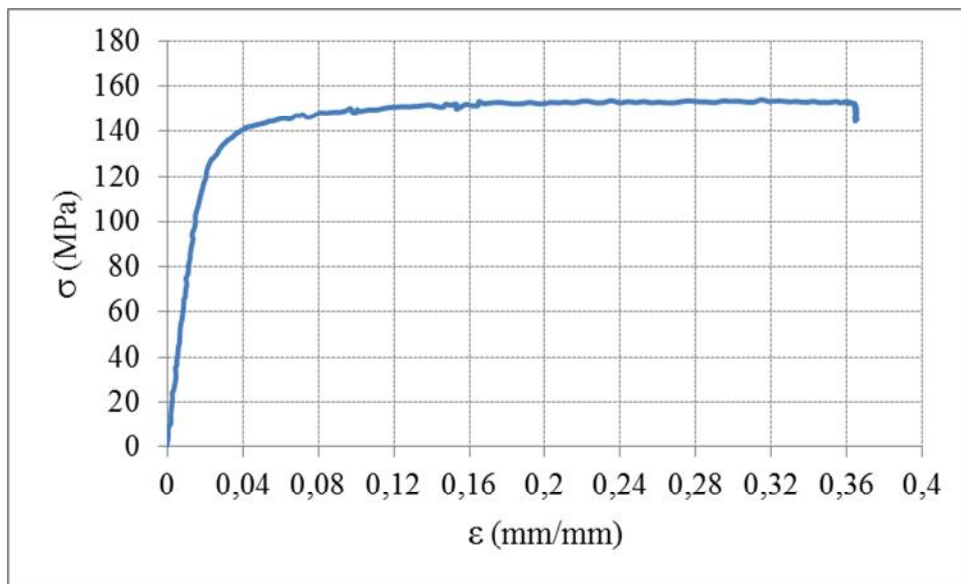
Özellik	Değer
Elastise modülü (MPa)	71000
Çekme dayanımı (MPa)	155
Akma dayanımı (MPa)	140
Poisson oranı	0,31
Yoğunluk (g/cm ³)	2,71

Sayısal çalışmalarda kullanmak üzere 1050A alüminyum malzemesinden TS EN 10002 standardına uygun olarak Şekil 3.1’de verilen boyutlarda çekme deneyi numuneleri hazırlanarak deneyler yapılmış ve gerilme-şekil değiştirme davranışı tespit edilmiştir.



Şekil 3.1 : Metalik malzemeler için çekme numunesi (TS EN 10002, 2004).

1050A alüminyum malzemesinin elasto-plastik özellikleri, çekme deneyinden elde edilen grafiklerden bulunmuştur. Şekil 3.2’de 1050A alüminyum malzemesine ait çekme eğrisi görülmektedir. Bu değerler ham değerlerdir ve mühendislik eğrisini oluşturmaktadır.



Şekil 3.2 : 1050A alüminyum malzemesinin çekme eğrisi.

Gerçek gerilme - şekil değiştirme değerlerini elde etmek için akma gerilmesinin üstünde kopma gerilmesine kadar belirli noktalar alınmıştır. Bu noktadaki değerler aşağıda verilen eşitlik (3.1), (3.2), (3.3) kullanılarak hesaplanmış ve gerçek elasto-plastik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir.

Burada; F: kuvvet, Δl : toplam uzama, b: numune genişliği, h: numune kalınlığını ifade etmektedir. Elde edilen değerler Tablo 3.3’de verilmiştir.

$$\varepsilon_{müh} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{ger} = \ln(1 + \varepsilon_{müh}) \quad (3.2)$$

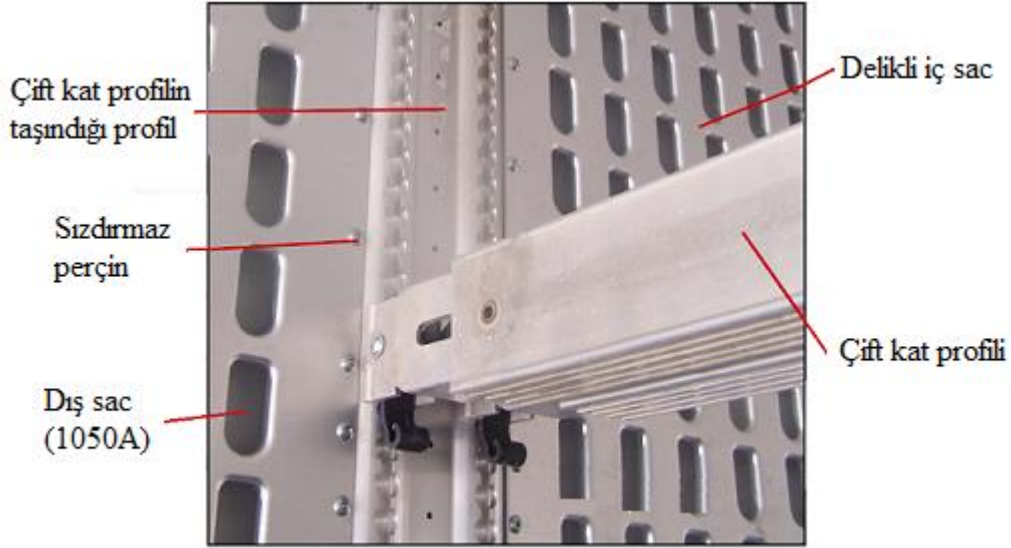
$$\sigma_{ger} = \frac{F \cdot (1 + \varepsilon_{müh})}{b \cdot h} \quad (3.3)$$

Tablo 3.3 : 1050A alüminyum malzemesinin plastik bölgede mühendislik ve gerçek çekme eğrisi değerleri.

Gerilme (Mühendislik) (MPa)	Şekil değiştirme (Mühendislik) (mm/mm)	Gerilme (Gerçek) (MPa)	Şekil değiştirme (Gerçek) (mm/mm)
140,43	0,0391	145,92	0,0384
148,29	0,8080	160,27	0,0777
150,92	0,1216	169,27	0,1148
151,55	0,1609	175,93	0,1492
152,31	0,1989	182,60	0,1814
152,74	0,2399	189,38	0,2150
153,23	0,2814	196,34	0,2480
153,51	0,2818	196,76	0,2483
153,39	0,3227	202,88	0,2797

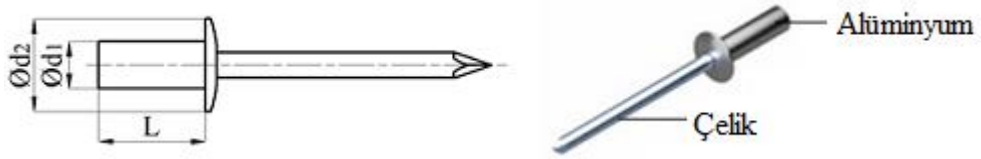
3.1.2 Deneylerde kullanılan perçin özellikleri

Hibrit bağlantılar oluşturmak için kullanılan perçinler 1050A alüminyum malzemesinin tedarik edildiği TIRSAN firması tarafından tarafımıza gönderilmiştir. Bu perçinler yukarıda bahsedildiği üzere alüminyum levhaların dorsedeki taşıyıcı profillere perçinlenmesinde kullanılmaktadır. Şekil 3.3’de deneylerde kullanılan 1050A alüminyum malzemesinin ve perçinlerin tır dorsesi üzerinde kullanıldığı yerler görülmektedir.



Şekil 3.3 : 1050A malzemesinin ve perçinlerin tır dorsesinde kullanıldıkları yerler.

İthalatçı firmadan alınan bilgilere göre perçinin alüminyum gövdesi 5154A (AlMg3,5) alüminyum alaşımıdır. Perçine ait boyut ve mekanik özellikler Tablo 3.4’de verilmiştir. Şekil 3.4’de ise perçin geometrisi görülmektedir.



Şekil 3.4 : Perçin geometrisi.

Tablo 3.4 : Perçine ait boyut ve mekanik özellikler.

Ød ₁ (mm)	Ød ₂ (mm)	L (mm)	Çekme yükü (N)	Kayma yükü (N)
4,8	9,5	11	3070	2230

3.1.3 Deneylerde kullanılan yapıştırıcının özellikleri

Deneylerde yapıştırıcı olarak Loctite 9466 epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır ve Denizli’de bayiliğini yapan firmadan temin edilmiştir.

Loctite 9466, iyi derecede kayma, çekme ve soyulma gerilmesi değerleri veren, karıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında kürleşebilen iki bileşenli (epoksi + hızlandırıcı) bir yapıştırıcıdır. Sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geniş yüzeylerin birleştirilmesi için uygundur. Yapıştırıcı için

üretici firma tarafından belirtilen başlıca fiziksel ve mekanik özellikler ile sayısal çalışmalar için gerekli literatürden alınan değerler Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5 : Loctite Hysol 9466’nın fiziksel ve mekanik özellikleri.

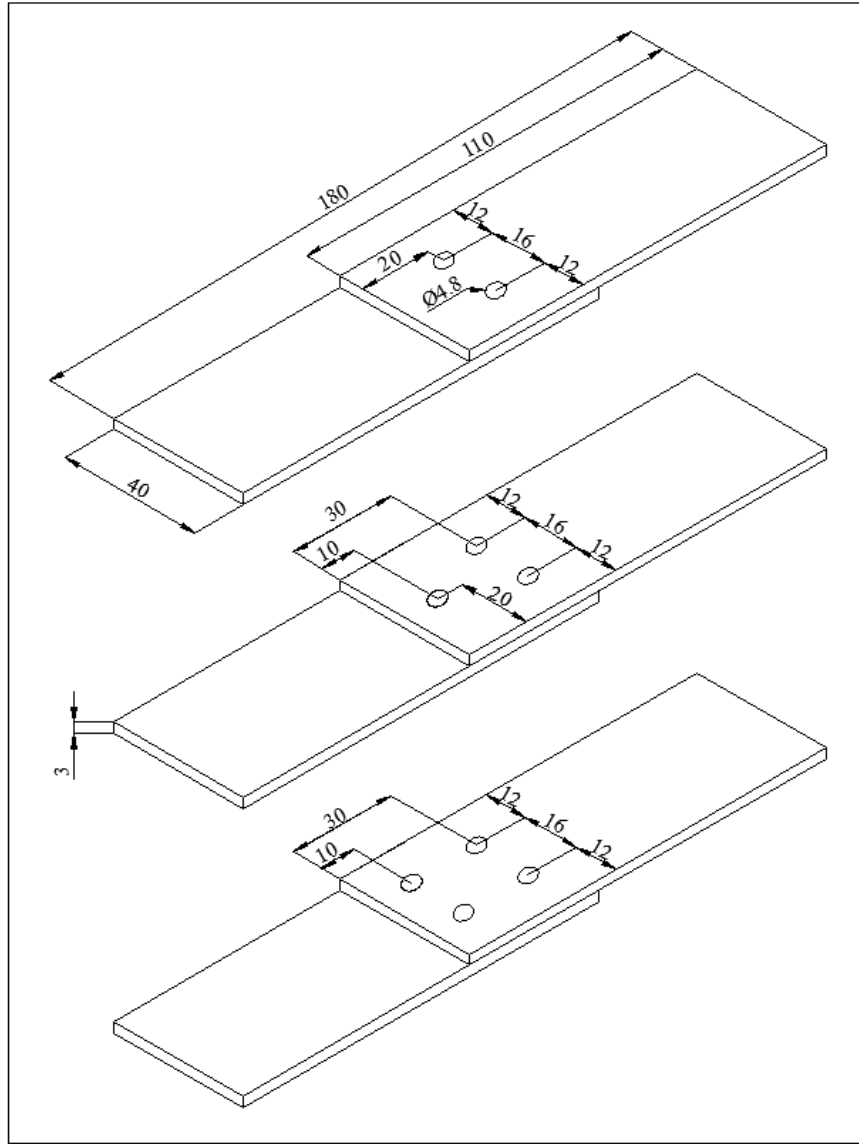
Kimyasal bileşim	Epoksi – Hızlandırıcı
Hacimsel karışım oranı (Epoksi / Hızlandırıcı)	2/1
Viskozite (mPa.s) (25°C’de)	30000
Elastise modülü (MPa)	1718
Kayma modülü (MPa)	685
Poisson oranı	0,3
Kırılma enerjisi (N/mm) (Pirondi ve Moroni, 2009)	725
Çekme gerilmesi (MPa) (ISO 527-3)	32
Çalışma süresi (min)	60

3.1.4 Deney numuneleri

Yapıştırma bağlantılarının dayanımlarının tespit edildiği farklı deneysel yöntemler olmasına rağmen, basit geometrileri ve üretim kolaylığı dolayısıyla yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının deneysel yöntemlerde kullanımı daha yaygındır. ASTM D1002, ASTM D3165, ISO 4587, TS EN 2243-1 standartları yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarını deney yöntemlerini tarif etmektedir. Bu yöntemlerle yapıştırıcının akma dayanımı, kayma gerilmesi gibi mekanik özellikleri belirlenemez ancak malzemelere göre bağlantı dayanımlarının, farklı yapıştırıcı türlerinin karşılaştırılması yapılabilir ve tasarımlar için önemli bilgiler elde edilebilir.

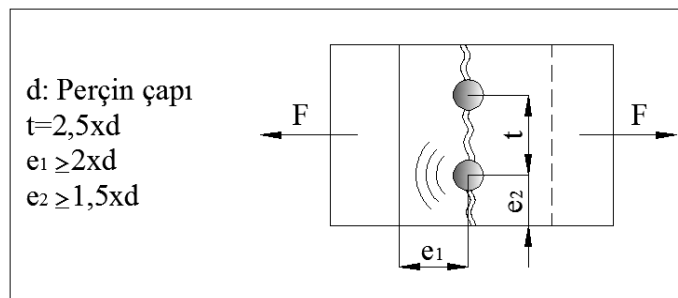
Bu çalışmadaki deneylerde de tek tesirli bindirme bağlantıları oluşturulacaktır. Fakat deney numunelerinin boyutları yukarıda bahsedilen standartlarda belirlenmiş deney numuneleri boyutlarından farklıdır. Bunun sebebi yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarına perçin takviyesinin bağlantı dayanımı üzerindeki etkilerini görmek için farklı sayıda ve konfigürasyonda perçin kullanılmış olmasıdır. Dolayısıyla daha geniş yüzey alanına ihtiyaç duyulmuştur.

Levha halindeki alüminyum malzeme, Denizli sanayisinde bir kısmı su jeti bir kısımda lazer kesim metodu ile kestirilerek 40x110x3 mm boyutlarında çekme deneyi numuneleri oluşturulmuştur. Çekme deneylerine tabi tutulacak deney numunelerine ait geometri ve perçin konfigürasyonu Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5 : Deney numunelerinin boyutları ve perçin konfigürasyonu.

Çekme numuneleri üzerindeki perçin deliklerinin yerleri belirlenirken deney numunesinin önden ve yandan yırtılmaması için aşağıdaki Şekil 3.6’da tavsiye edilen kriterler dikkate alınmıştır.

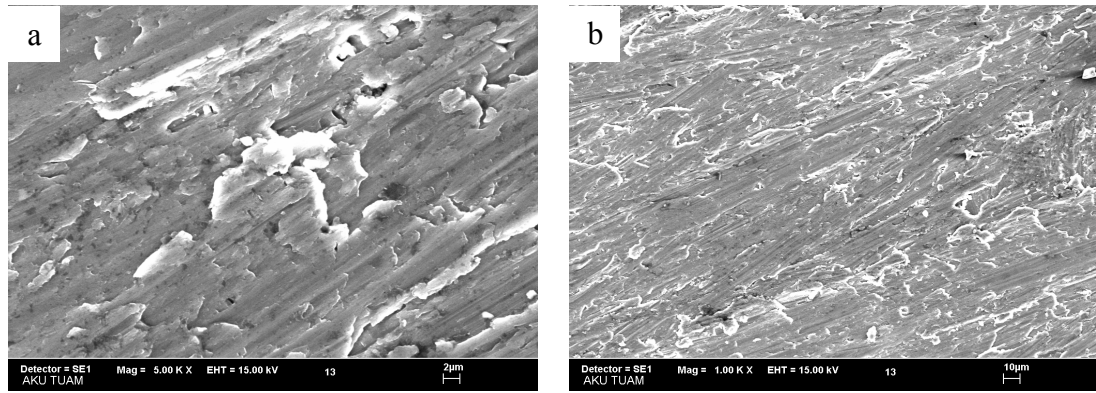


Şekil 3.6 : Perçinlenmiş levhanın önden ve yandan yırtılmaması için tasarım kriterleri (Şekercioğlu, 2013).

3.1.5 Deney numunelerinin yüzey hazırlık işlemleri

Yapıştırma ve hibrit bağlantılar oluşturulmadan önce yapıştırılacak yüzeylere üç farklı yüzey işlemi uygulanmıştır.

İlk olarak tüm yapıştırılacak yüzeyler aynı boyutta zımpara (P220C) ile mekanik olarak aşındırılmıştır. Mekanik aşındırmayla malzeme yüzeyinde girintiler ve çıkıntılar oluşacağından bu girintilerde oluşan organik kirlenmenin yüzeyden tamamen kaldırılması zorlaşmaktadır. Dolayısıyla yüzeyleri tekrar kimyasal çözücülerle temizlemekte fayda vardır. Şekil 3.7’de zımparalama sonrasında malzeme yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.7 : Zımparalanmış yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri a) 5000X b)1000X.

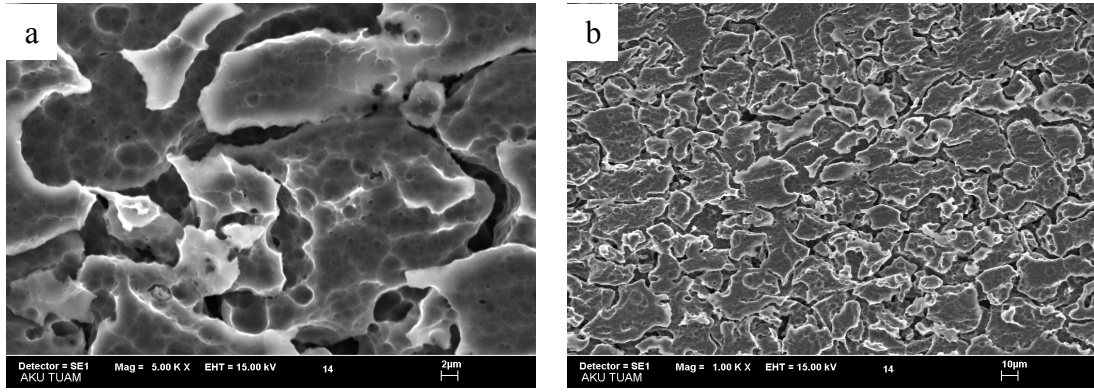
Deney numunelerinin yüzeyini temizlemek ve yağlardan arındırmak için Loctite 7063 marka solvent tabanlı endüstriyel bir temizleyici kullanılmıştır. 2 mPa.s gibi çok düşük viskoziteye sahip temizleyici yüzeye uygulandığında, oda sıcaklığında 60 saniyeden kısa bir sürede buharlaşmaktadır. Temizleyicinin yüzeye uygulanması, yapıştırıcının kürleşme hızına ve gerilme değerlerine herhangi bir etki etmemektedir.

Diğer yüzey işlemleri olarak aşağıda bahsedilecek olan FPL ve P2 çözeltileri, metallerin yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemlerinin bahsedildiği ASTM D2651-01 standardına göre hazırlanmıştır.

3.1.5.1 Sülfürik asit - Sodyum dikromat çözeltisinin (FPL) uygulanması

FPL çözeltisi 500 ml’lik hacimlerde hazırlanmıştır. Öncelikle beher içerisine 100-150 ml saf su konulmuştur. Su karıştırılarak üzerine yavaş yavaş 85 ml sülfürik asit (H_2SO_4) ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi devam ederken 25 g sodyum dikromat ($Na_2Cr_2O_7$) eklenmiş ve daha sonra çözelti hacmi 500 ml olana kadar saf su ilave

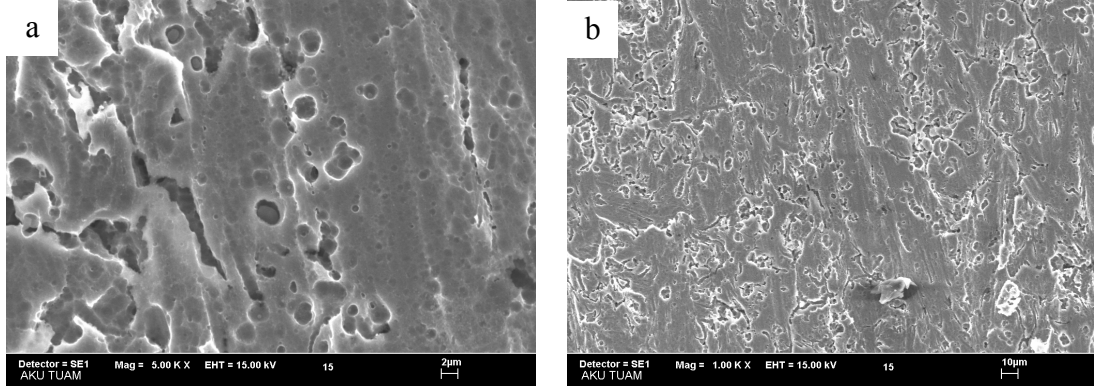
edilmiştir. Hazırlanan karışım bir taraftan karıştırılırken ısıtıcı üzerinde sıcaklığı 66-71°C olana kadar ısıtılmış ve bu değerlerde kalması sağlanmıştır. İlgili sıcaklığa ulaşıldığında, daha önceden yüzeyi zımparalanmış ve solvent çözücüyle temizlenmiş numuneler 12-15 dakika süreyle hazırlanan çözeltide bekletilmiştir. Süre sonunda çözeltiden çıkartılan numuneler musluk suyu altında yıkanmış ve daha sonra saf su içine daldırılmıştır. Birkaç dakika saf suda bekletildikten sonra 60°C'lik fırında kurumaya bırakılmıştır. Şekil 3.8'de FPL uygulaması sonrasında malzeme yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.8 : FPL uygulanmış yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri
a) 5000X b) 1000X.

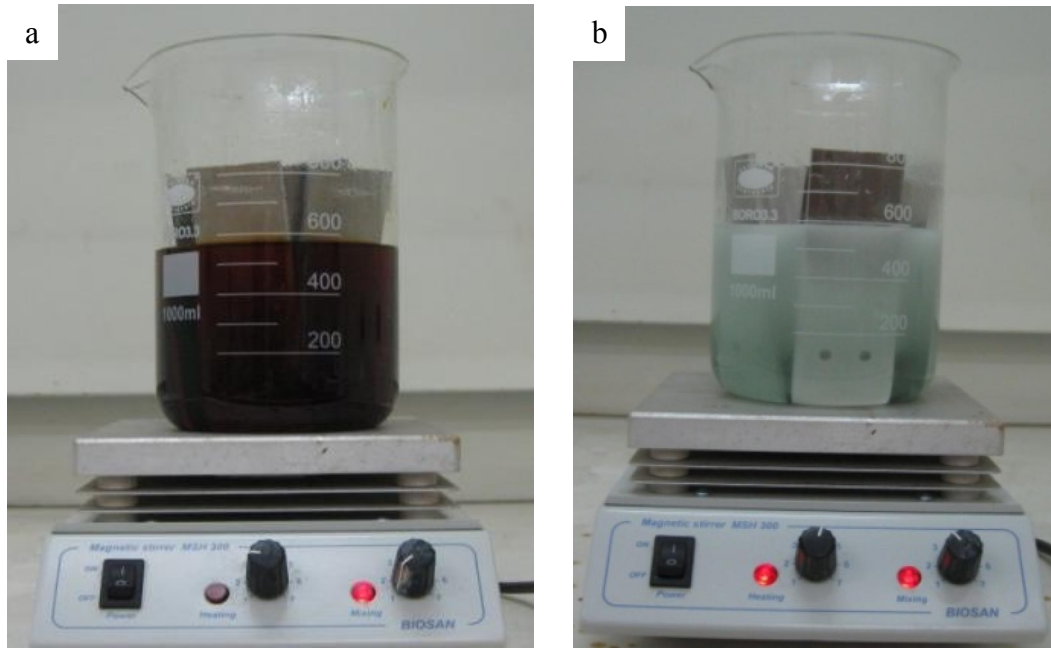
3.1.5.2 Sülfürik asit - Ferrik sülfat çözeltisinin (P2) uygulanması

P2 çözeltisi de 500 ml'lik hacimlerde hazırlanmıştır. Beher içerisine 100-150 ml saf su konulmuştur. Su karıştırılarak üzerine yavaş yavaş 90 ml sülfürik asit (H_2SO_4) ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi devam ederken 75 g ferrik sülfat ($FeSO_4$) eklenmiş ve daha sonra çözelti hacmi 500 ml olana kadar saf su ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım bir taraftan karıştırılırken ısıtıcı üzerinde sıcaklığı 60-65°C olana kadar ısıtılmış ve bu değerlerde kalması sağlanmıştır. İlgili sıcaklığa ulaşıldığında daha önceden yüzeyi zımparalanmış ve solvent çözücüyle temizlenmiş numuneler 10-12 dakika süreyle hazırlanan çözeltide bekletilmiştir. Süre sonunda çözeltiden çıkartılan numuneler musluk suyu altında yıkanmış ve daha sonra saf su içine daldırılmıştır. Birkaç dakika saf suda bekletildikten sonra 60°C'lik fırında kurumaya bırakılmıştır. Şekil 3.9'da P2 uygulaması sonrasında malzeme yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri verilmektedir.



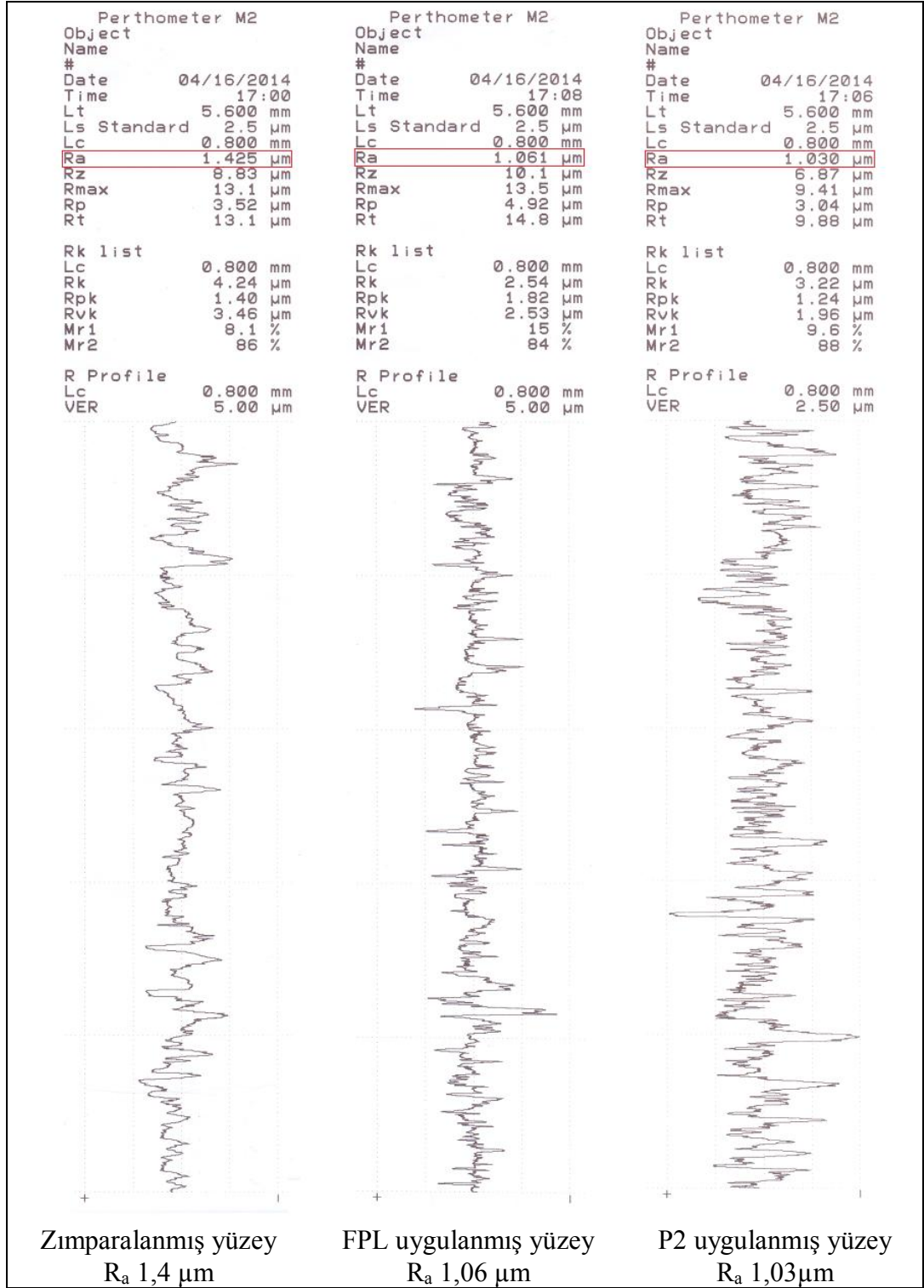
Şekil 3.9 : P2 uygulanmış yüzey morfolojisinin SEM görüntüleri a) 5000X b)1000X.

Her seferinde beher içine 1 grup deney numunesi oluşturacak şekilde 8 adet malzeme daldırılmıştır. Çözeltiye toplam 16 numune daldırıldığında çözelti özelliğini yitirebileceği ihtimalinden dolayı çözelti değiştirilmiş ve tekrar yukarıda bahsedilen şekillerde hazırlanmıştır. Şekil 3.10'da çözelti içine daldırılmış deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.10 : Çözeltiye alınmış deney numuneleri a) FPL b) P2 çözeltisi.

Uygulanan yüzey işlemlerinden sonra numune yüzeylerinin pürüzlülükleri üniversitemiz makine mühendisliği bölümü metalografi laboratuvarında bulunan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Elde edilen değerler Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11 : Ölçülen yüzey pürüzlülüklerine ait değerler.

3.1.6 Deney numunelerinin birleştirilmesi

Deneilerini yapmak amaçlı perçin, yapıştırma ve perçin + yapıştırıcı hibrit bağlantıları oluşturulmuştur. Bu manada deney numunelerini bağlantı türüne, yüzey

işlem türüne, koşullandırma sıcaklıklarına göre sınıflandırmak amaçlı bağlantılar aşağıda Tablo 3.6’da verilen şekilde kodlanmıştır.

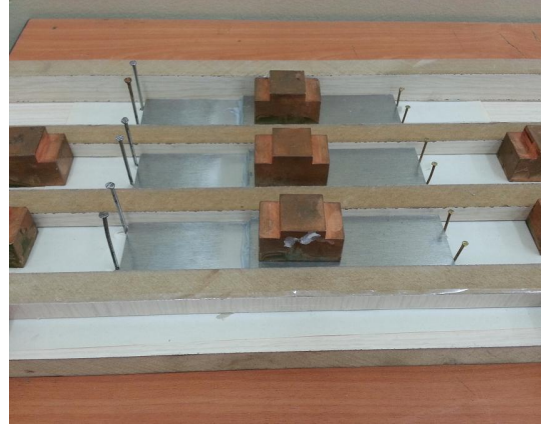
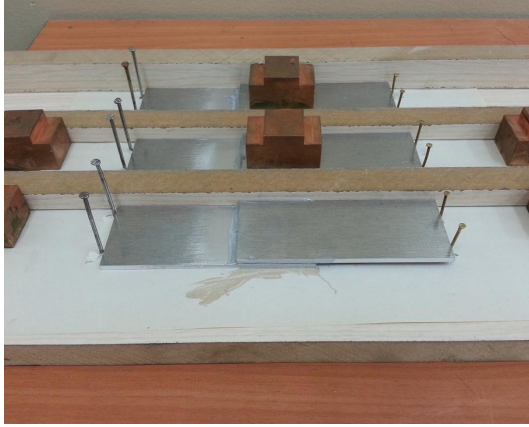
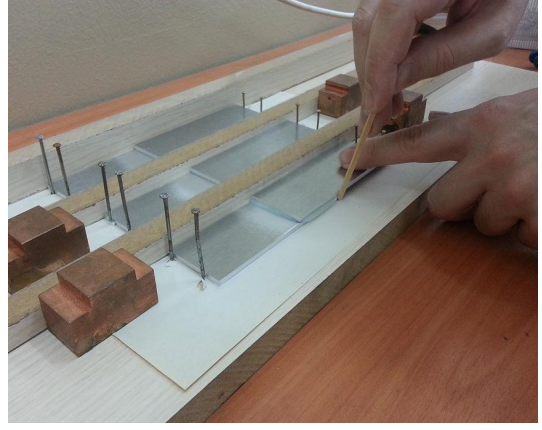
Tablo 3.6 : Deney numunelerinin kodlanması.

Örnek	-20CYD0 50C2HD1	-20C 50C	Y 2H	D0 D1
		Koşullandırma sıcaklığı	Bağlantı türü	Yüzey işlem türü
		-20°C	Y	D0
		0°C	2H	D1
		20°C	3H	D2
		50°C	4H	

- Y: Yapıştırma bağlantısı
- H: Hibrit bağlantı (2, 3 veya 4 perçinli)
- D0: Mekanik olarak aşındırılmış
- D1: FPL uygulaması yapılmış
- D2: P2 uygulaması yapılmış

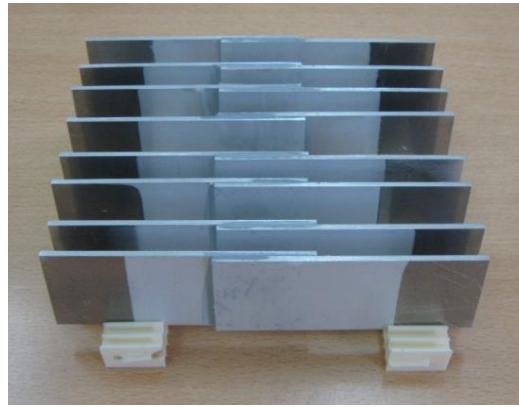
Perçinli bağlantıların taşıyabileceği yükü tayin etmek ve perçinlerde oluşan hasarları görmek amacıyla 2, 3 ve 4 perçinli bağlantılar oluşturularak çekme deneyleri yapılmıştır. Bu bağlantı türlerine herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamıştır.

Yapıştırma bağlantıları oluşturulurken yüzeyine işlem yapılmış numuneler kullanılmıştır. Deney numuneleri, uygulanan yüzey işlemlerin hemen akabinde yapıştırılmıştır. İki bileşenli olan yapıştırıcı, yapıştırıcı tüpünün ucuna takılan statik karıştırıcı sayesinde homojen olarak karışmaktadır. Elde edilen karışım birleştirilecek yüzeylere sürülmüştür ve yüzeylerin tamamen ıslanmış olmasına dikkat edilmiştir. Numunelerin birbiri üzerinde kaymaması ve standart 40 mm bindirme uzunluğunu sağlamak için Şekil 3.12’de görülen basit kalıp yardımıyla numuneler birbiri üzerine bindirilmiştir. Birleştirilen numuneler üzerine, uygulamada belirli bir standart yakalamak ve fazla yapıştırıcının çıkmasını sağlamak amacıyla aynı değerlerde ağırlık konulmuştur. Şekil 3.12’de yapıştırma işleminin aşamaları görülmektedir.



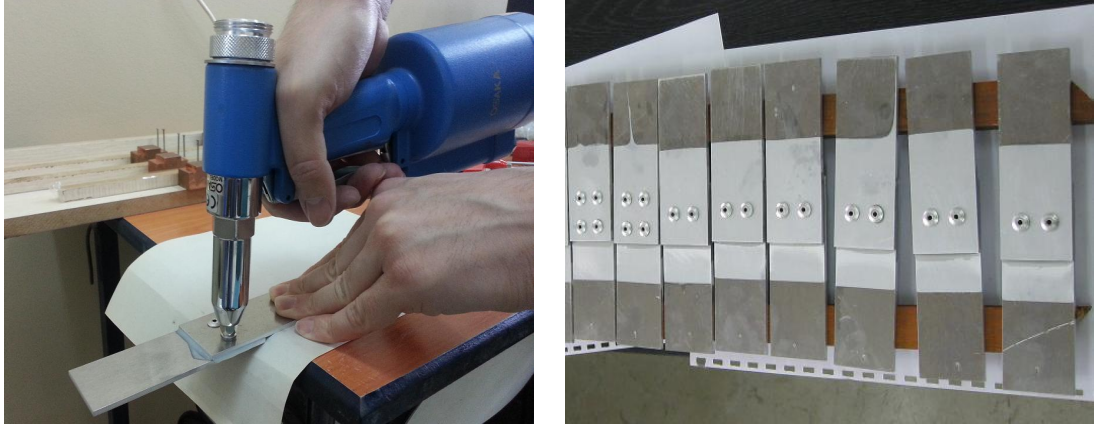
Şekil 3.12 : Yapıştırma işlem basamakları.

Oluşturulan bağlantılar yaklaşık 3-4 saat sonra taşınabilir hale gelmiştir. Yapıştırma kalınlığını ölçmek amacıyla yapıştırma öncesinde birbiri üzerine bindirilen numunelerin kumpas ile kalınlığı ölçülmüştür. Yapıştırma işlemi yapıldıktan ve yapıştırıcı kürleştikten sonra tekrar aynı numunelerin oluşturduğu bağlantının kalınlığı ölçülmüştür. Aradaki fark yapıştırıcı kalınlığını vermektedir ve 5 farklı deney numunesinde de yaklaşık 0,1 mm dolaylarında fark okunmuştur. Şekil 3.13’de yapıştırma bağlantıları görülmektedir.



Şekil 3.13 : Yapıştırılmış deney numuneleri.

Hibrit bağlantılar ise yapıştırma bağlantıları için yukarıda bahsedilen şekilde yapıştırıcının uygulanmasının hemen akabinde havalı perçin tabancasıyla perçinler çakılarak oluşturulmuştur. Perçinlerin çakılmasıyla taşan yapıştırıcılar temizlenmiştir. Perçinler sayesinde parçalar merkezleneceğinden dolayı herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmamıştır. Oluşturulan bağlantılar yapıştırıcının kürleşmesi için beklemeye alınmıştır. Şekil 3.14’de hibrit bağlantılar görülmektedir.



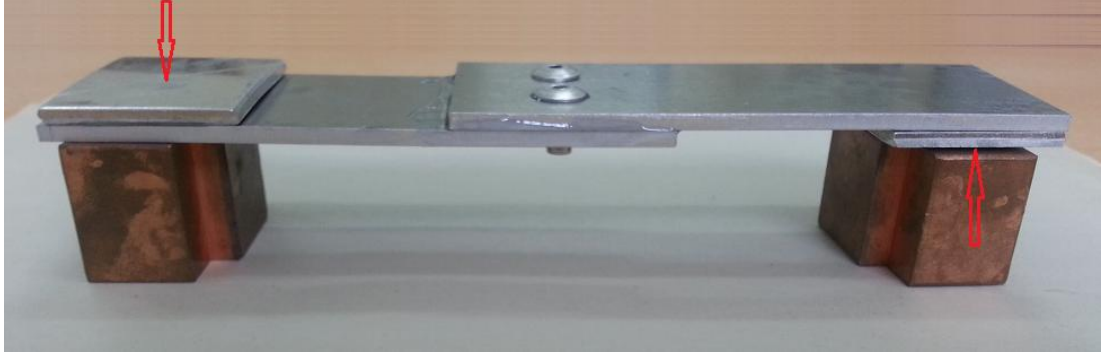
Şekil 3.14 : Hibrit bağlantıların oluşturulması ve bağlantı örnekleri.

Yapıştırıcının kürleşmesi için bağlantılar 1 hafta oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda bağlantı türleri koşullandırılacak ortamlarına alınarak beklemesi gereken sürelerin sonunda deneyleri yapılmıştır. Her bir bağlantı türü ve deney koşulu için 4’er adet numune hazırlanmıştır. Yapılan deneylerdeki şartlar (bağlantı türleri, sıcaklık koşulları, yüzey işlemleri) Tablo 3.7’de özetlenmiştir.

Tablo 3.7 : Deney koşulları ve sayıları.

Bağlantı türü	20°C	0°C/30 gün	-20°C/30 gün	50°C/30 gün	50°C/60 gün	50°C/90 gün
YD0	4	4	4	4	4	4
YD1	4	4	4	4	4	4
YD2	4	4	4	4	4	4
2HD0	4	4	4	4	4	4
2HD1	4	4	4	4	4	4
2HD2	4	4	4	4	4	4
3HD0	4	4	4	4	--	--
3HD1	4	4	4	4	--	--
3HD2	4	4	4	4	--	--
4HD0	4	4	4	4	--	--
4HD1	4	4	4	4	--	--
4HD2	4	4	4	4	--	--
Toplam	48	48	48	48	24	24

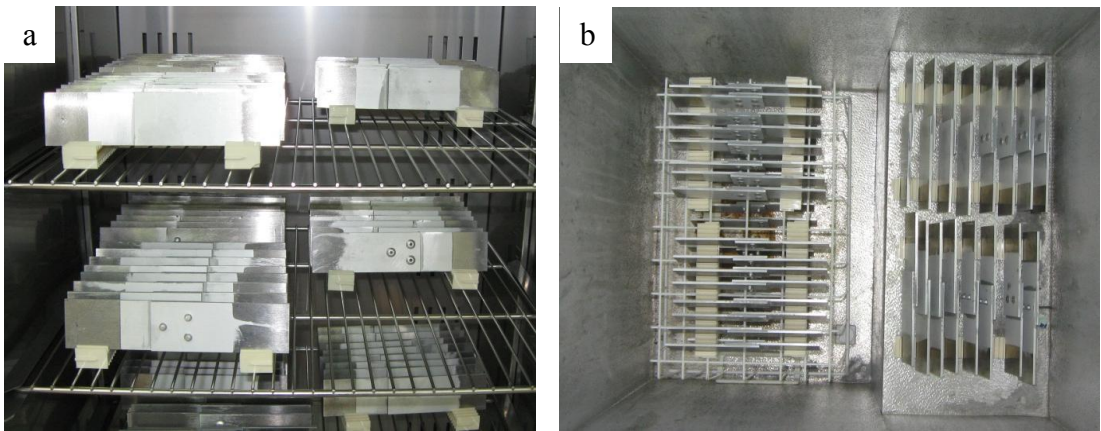
Deney numunelerinde çekme esnasında ilave eğilme gerilmesi oluşmasını engellemek için çekme eksenlerini aynı hizaya getirmek amacıyla tüm numunelerin iki ucuna (deney cihazı çenelerinde kalan kısımlar) deneyler öncesinde hızlı kürleşebilen yapıştırıcı kullanarak Şekil 3.15’de görüldüğü gibi 40x30x3 mm boyutlarında küçük parçalar yapıştırılmıştır.



Şekil 3.15 : Eğilme gerilmesine karşı önlem alınmış numune.

3.1.7 Yaşlandırma işlemleri

Oluşturulan hibrit ve yapıştırma bağlantıları 1 hafta oda sıcaklığında bekletildikten sonra yapıştırma bağlantılarının yaşlanma deneylerinin anlatıldığı TS EN 2243-5 standardına göre numuneler, % 95 bağıl nemde ve 50°C’de 30, 60, 90 gün süreyle iklimik kabinde tutulmuş ve bu sürelerin sonunda deneyleri yapılmıştır. -20°C ve 0°C’de ki numunelerin ise yapıştırma işlemi sonrasında derin dondurucuda 1 ay bekletildikten sonra deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.16’da iklimik kabine ve derin dondurucuya alınmış deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.16 : Deney numunelerinin şartlandırılması a) İklimik kabinde b) Derin dondurucuda.

3.1.8 Deney ekipmanları

Deneyleerde Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik laboratuvarında bulunan 50 kN kapasiteli Instron 8801 dinamik çekme/basma deney cihazı kullanılmıştır.

Tüm deney numuneleri aynı prosedürde 2mm/min hızla çekilmiştir. Şekil 3.17’de deneyleerde kullanılan 8801 Instron deney cihazı görülmektedir.



Şekil 3.17 : Instron 8801 dinamik çekme/basma deney cihazı.

Yaşlandırma deneyleeri için Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Metalografi laboratuvarında bulunan Nüve TK-252 marka klimatik kabin kullanılmıştır. Kullanılan klimatik kabin sahip olduğu sıcaklık, nem ve gece-gündüz döngüsü modelleme imkânı ile gerçek çevresel ortamları simule edebilmektedir. Cihazın çalışma sıcaklık aralığı 10°C - 60°C ve sağladığı nem aralığı ise %10 - %95 Rh değerlerindedir. Kullanılan derin dondurucu ise -40°C değerlerine kadar inebilmektedir.

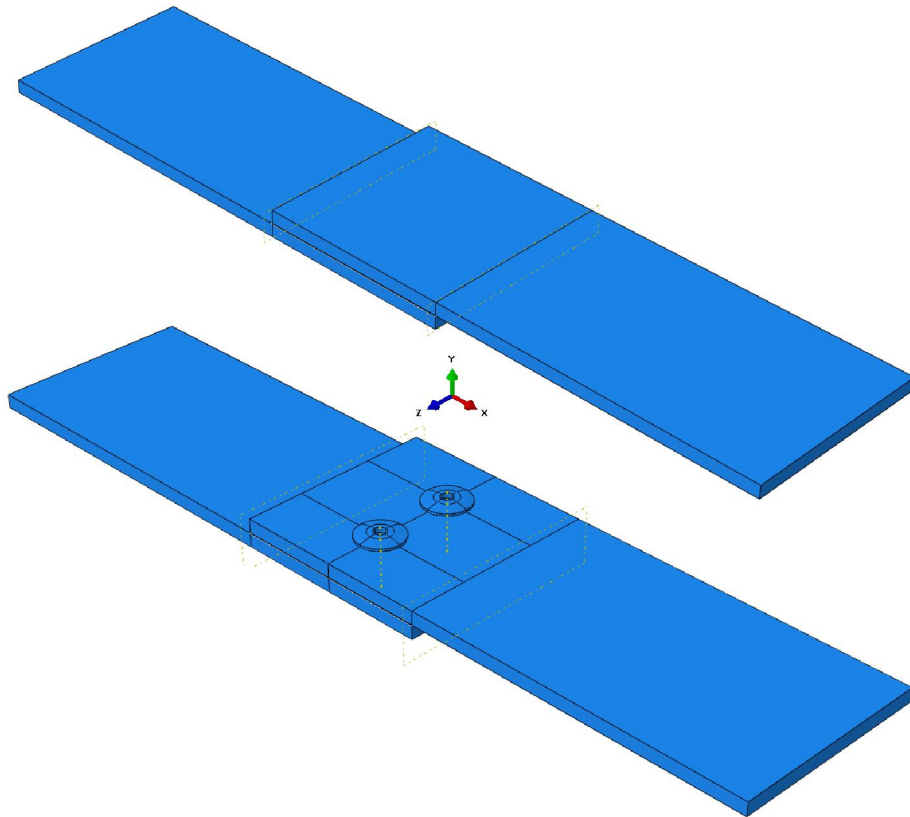
Uygulanan yüzey işlemler sonrasında oluşan yüzey morfolojilerini ve deney sonrasında hasar yüzeylerini incelemek amacıyla numune yüzeylerinin SEM (Scanning Electron Microscope) fotoğrafları çekilmiştir. Görüntüsü alınması

düşünülen numunelerin deneylerinin yapılmasından hemen bir gün sonra, numuneler Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (T.U.A.M.) götürülerek numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır.

3.2 Sayısal Çalışmalar

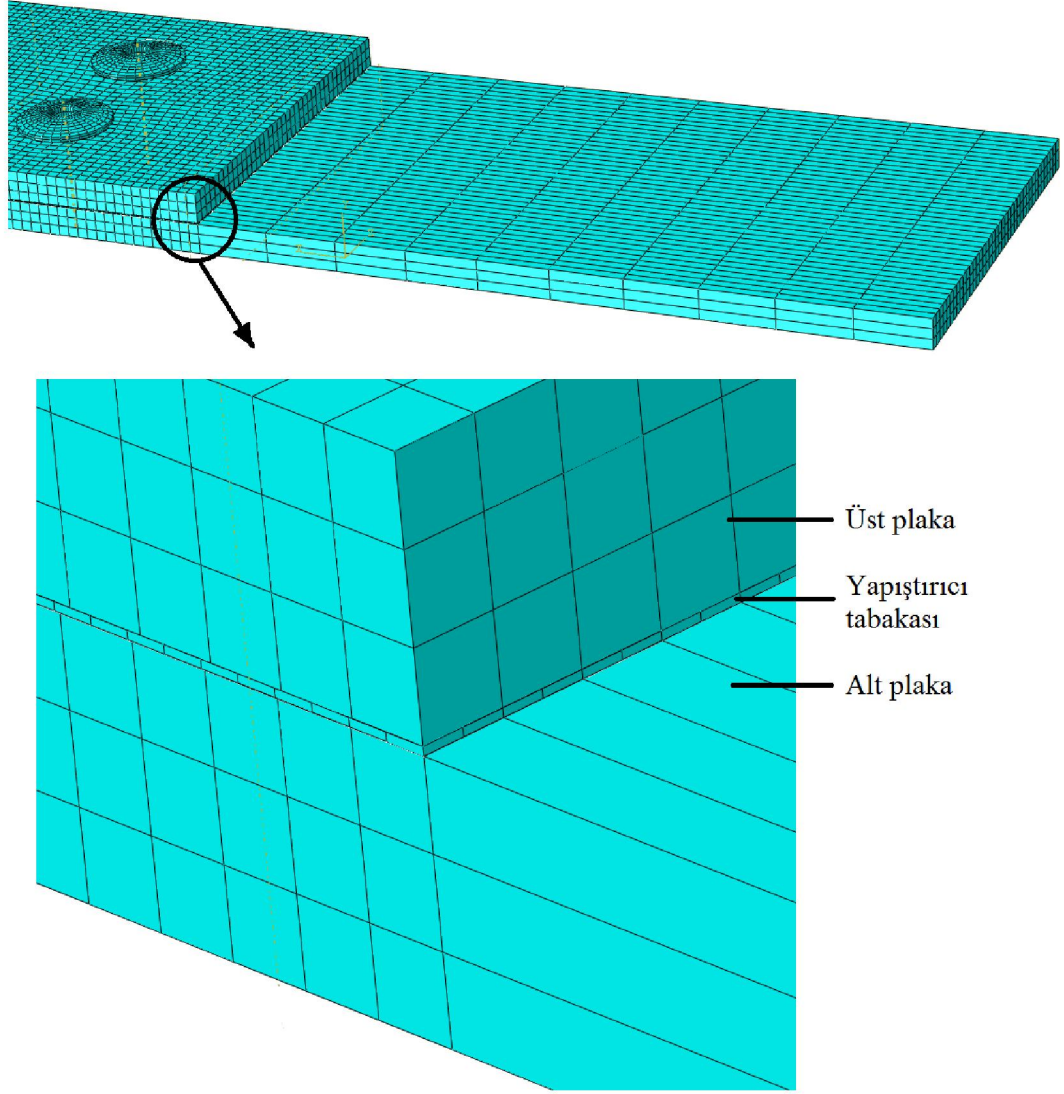
Yapılan deneysel çalışmaları sayısal olarak da desteklemek amacıyla bilgisayar ortamında modelleme ve çözüm çalışmaları da yapılmıştır. Böylelikle bir kısım deneysel çalışmaların doğrulanması yapılmış. Sayısal çalışmalarda Abaqus 6.11 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır.

Deneysel olarak incelenen, yapıştırma bağlantısı, 2 perçinli bağlantı ve 2 perçinli hibrit bağlantıların bire bir modelleri oluşturulmuştur. Modellere ait boyutlar, deneysel çalışmalarda kullanılan numune boyutlarının verildiği Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Modellemeler 3 boyutlu katı model olarak yapılmıştır ve kuvvet birimi olarak N, boyut birimi olarak mm kullanılmıştır. Şekil 3.18'de Abaqus'da modellenmiş yapıştırma ve hibrit bağlantılar görülmektedir.



Şekil 3.18 : Yapıştırma ve hibrit bağlantıların Abaqus modeli.

Katı modellerin oluşturulmasından sonra, modeller sonlu elemanlara bölünmüştür. Gerilme dağılımları açısından kritik olan yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölgeler, yapıştırıcı ve perçinler daha küçük elemanlara bölünerek daha hassas bir ağ örgüsü oluşturulmuştur.



Şekil 3.19 : Hibrit bağlantıya ait ağ yapısı.

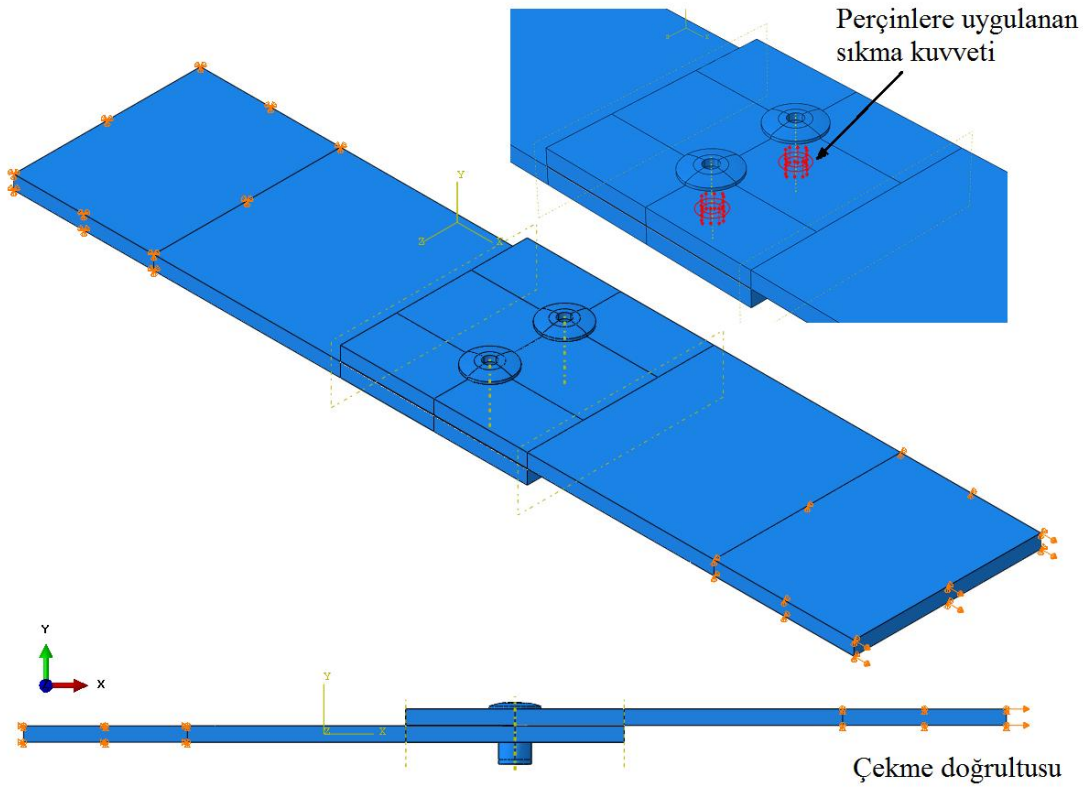
Plakaların çözüm ağı oluşturma işlemlerinde ilk olarak plakaya genel eleman boyutu atanarak, çözüm ağı oluşturma algoritması tanımlanmıştır. Yüksek geometri bozulmasının sayısal analizlerde hatalara neden olması nedeniyle plakalarda kalınlık boyunca üç sıra eleman tanımlanarak çözüm ağı oluşturulabilmiştir. Yapıştırıcı tabakası için ise aynı işlemler uygulanmıştır ancak yapıştırıcı tabakası plakalara göre oldukça ince olduğundan (0,1 mm) yapıştırıcı tabakası kalınlık boyunca tek katlı eleman olarak bırakılmıştır. Perçinler için çözüm ağı oluşturulurken daha düzgün bir

ağ yapısı elde etmek için ilk olarak birkaç bölme işlemi yapılmıştır. Bölme işlemlerinden sonra perçinlerin çözüm ağı plakalar için bahsedilen şekilde oluşturulmuştur. Model parçalarında ayrıklaştırma yöntemi olarak sweep (süpürerek) örgüleme kullanılmıştır. Şekil 3.19’da hibrit bağlantıya ait ağ yapısı görülmektedir.

Modelleme yapılırken yine deneysel çalışmalar sonucu elde edilen Tablo 3.2, 3.3 ve 3.5’de verilen malzeme ve yapıştırıcı özellikleri kullanılmıştır.

Perçin ve plakaların modellenmesinde üç boyutlu ve üç serbestlik dereceli sonlu eleman malzeme tipi C3D8R (8-node linear brick, reduced integration) kullanılmıştır. Yapıştırıcı tabakası için, Abaqus tarafından sunulan, yapıştırıcı, conta modelleri, kompozit ara yüzeyleri için kullanılan karakteristik bir malzeme türü olan kohosiv eleman tipi COH3D8 (8-node three-dimensional cohesive element) kullanılmıştır.

Modellerde sınır koşulları girilirken deneylerde olduğu gibi çekme yükü doğrultusundaki sadece bir yönde (X yönünde) harekete izin verilmiş diğer noktalarda (çekme deney cihazı çeneleri içinde kaldığı düşünülen yerler) yer değiştirmesine izin verilmemiştir.



Şekil 3.20 : Hibrit bağlantının yükleme ve sınır koşulları.

Hibrit ve perçinli bağlantılarda analiz, iki çözüm adımıyla oluşturulmuştur. İlk çözüm adımı perçinlere sıkma kuvveti uygulanmış, ikinci çözüm adımı da plakalardan biri çekilmiştir. Yapıştırma bağlantısında ise sadece plakaya çekme uygulanmıştır. Yükleme koşulları deneysel çalışmalarda olduğu gibi modellerin X doğrultusunda 2mm/min hızla çekilmesiyle oluşturulmuştur Şekil 3.20’de hibrit bağlantının yükleme ve sınır koşulları görülmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Deneysel Bulgular

Bu bölümde perçin bağlantıları, yapıştırma bağlantıları ve hibrit bağlantılar için yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilecektir. Yapıştırma ve hibrit bağlantılara uygulanan yüzey işlemlerinin bağlantı dayanımları üzerine etkileri ve bağlantı türlerinin değişken sıcaklık değerlerinde ve nemde nasıl davranış sergiledikleri yorumlanmaya çalışılmıştır.

4.1.1 Perçin bağlantıları

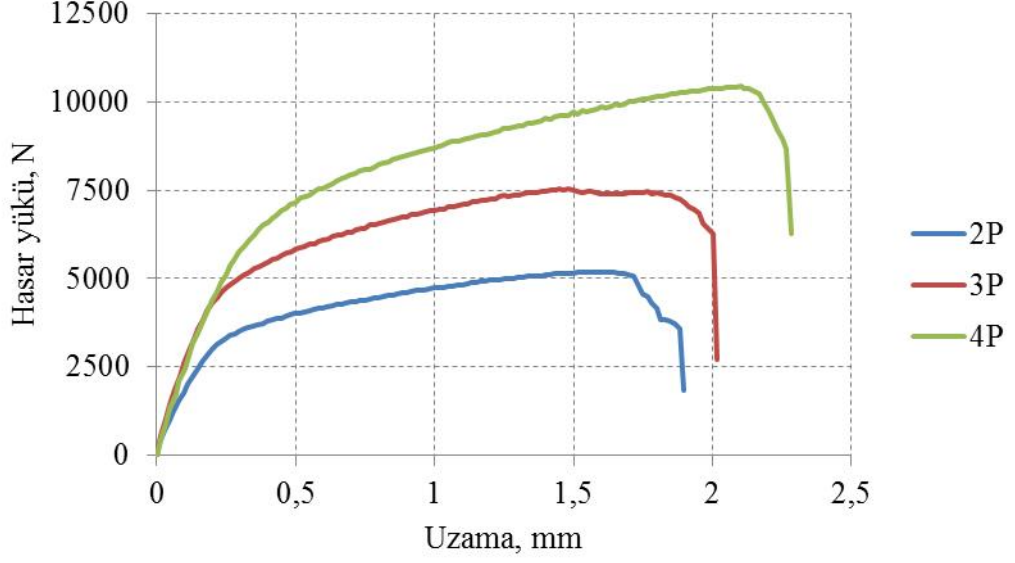
Deneysel yapılandırma bağlantılarına perçin ilave edilmesiyle oluşturulacak hibrit bağlantılarda, perçin etkisini değerlendirebilmek için sadece perçinli bağlantılar oluşturulmuş ve çekme deneyleri yapılmıştır.

Her bağlantı türünden dört adet deney numunesi test edilmiştir. Bu bağlantı türlerine herhangi bir yüzey işlem ve koşullandırma işlemi uygulanmamıştır. Bağlantıların çekme deneylerinden elde edilen hasar yükü değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 : Perçinli bağlantılara ait deney sonuçları.

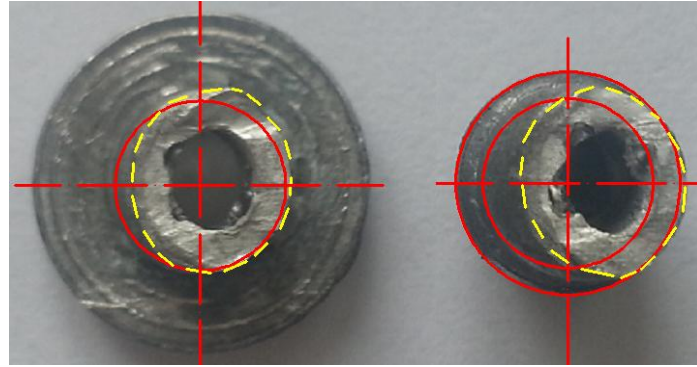
Bağlantı türü	Hasar yükü değerleri, N			
	1	2	3	4
2 perçinli bağlantı	5140	5190	5144	5386
3 perçinli bağlantı	7613	7395	7452	9022
4 perçinli bağlantı	10330	10660	10267	10420

Şekil 4.1’de perçinlenmiş numunelerin çekme kuvveti altındaki hasar yükü ve uzama diyagramları görülmektedir. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre her bir perçin yaklaşık 2500 N yük taşıyabilmektedir. Perçin sayısının artırılmasıyla bağlantının taşıyabildiği yük değeri de aynı oranda artmıştır.



Şekil 4.1 : Perçin bağlantılarına ait çekme deneyi sonuçları.

Bağlantılardaki tüm hasarlar perçinlerde oluşmuştur. Perçinler çekme yükü altında ortasından kesilerek hasara uğramıştır. Plakalarda ciddi bir hasar görülmemiştir. Sadece delik önünde çekme doğrultusunda ezilme neticesinde bir miktar şişme olmuştur, herhangi bir kesilme, yırtılma oluşmamıştır. Perçin sayısının değişmesi oluşan hasar şeklini değiştirmemiştir. Şekil 4.2’de deney sonrasında hasara uğramış perçin görülmektedir.



Şekil 4.2 : Perçinlerde oluşan hasar şekli.

4.1.2 Yapıştırma bağlantıları

Yapıştırma bağlantılarının çevresel koşulların değişmesiyle davranışlarının nasıl değişeceğini ve bağlantı yüzeylerine uygulanabilecek yüzey işlemleri ile nelerin değişebileceğini görmek amacıyla deneyler yapılmıştır. Bu amaçla bağlantılar dört farklı sıcaklık değerlerinde koşullandırılmıştır. 50°C sıcaklıklarda ise standart gereği bağlantılar % 95 neme maruz bırakılmış ve bu ortamda 30, 60, 90 gün süreyle bekledikten sonra deneyleri yapılmıştır. Malzeme yüzeyleri, mekanik aşındırma yanında iki farklı dağlama yöntemi ile işlenmiştir. Her bir ortam koşulu ve yüzey işlem için dörder adet deney numunesi hazırlanarak deneyleri yapılmıştır. Bağlantıların çekme deneylerinden elde edilen hasar yükü değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 : Yapıştırma bağlantılarına ait deney sonuçları.

Ortam şartları	Yüzey işlem türü	Hasar yükü değerleri, N			
		1	2	3	4
-20°C 30 gün	Aşındırma	19650	18814	18099	---
	FPL dağ.	25936	24821	23953	25975
	P2 dağ.	26322	27146	27421	24211
0°C 30 gün	Aşındırma	22088	17372	16468	15839
	FPL dağ.	27972	25032	25059	27336
	P2 dağ.	23611	25172	25734	17639
20°C 30 gün	Aşındırma	19858	19056	18274	16891
	FPL dağ.	24026	23393	25266	22287
	P2 dağ.	24750	24737	25259	24879
50°C % 95 nem 30 gün	Aşındırma	18723	19805	19482	---
	FPL dağ.	23753	23415	22200	21731
	P2 dağ.	20177	19416	17771	---
50°C % 95 nem 60 gün	Aşındırma	14131	17616	16900	---
	FPL dağ.	22624	21883	23193	22163
	P2 dağ.	17843	15449	18733	---
50°C % 95 nem 90 gün	Aşındırma	21639	21576	19879	---
	FPL dağ.	20109	22949	22639	22235
	P2 dağ.	19705	16242	18678	---

4.1.2.1 Yapıştırma bağlantılarına uygulanan yüzey işlemlerinin etkisi

Şekil 4.3 ve Şekil 4.8 arasında malzeme yüzeylerine uygulanan üç farklı yüzey işleminin aynı ortam şartlarında yapıştırma bağlantılarının dayanımına olan etkisini gösteren, çekme deneylerinden elde edilen, hasar yükü – uzama eğrilerinden oluşan grafikler görülmektedir. Deneyin başlaması ile birlikte grafikte doğrusal bir artış

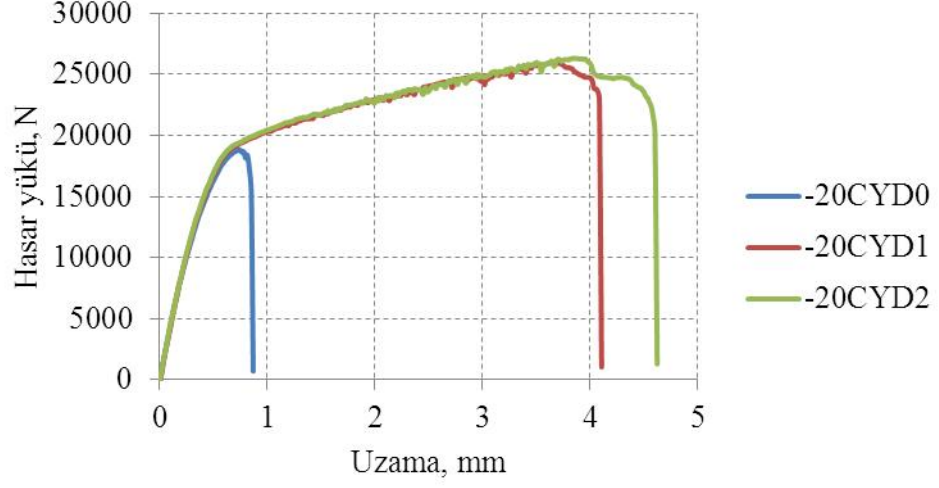
görülmektedir. Belirli bir yük değerine ulaşıldığında ise yapıştırıcının hasara uğraması sebebiyle yükün boşaldığı görülmüştür.

Şekillerden de görüleceği üzere bağlantılara uygulanan yüzey işlemlerinin etkisi ortam koşullarına göre farklılıklar göstermiştir. Ama tüm şekillerde bariz bir şekilde FPL ve P2 dağlamalarının bağlantı dayanımını artırdığı görülmektedir.

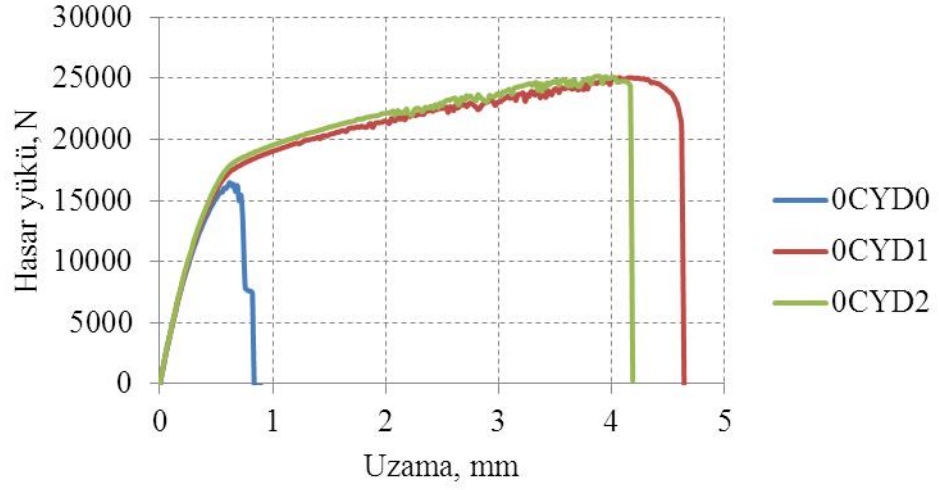
Yüzeyi aşındırılarak oluşturulmuş bağlantılarda hasar yükü yaklaşık olarak 18000 N dolaylarında iken asitle yüzeyi dağlanmış bağlantılar 24000 N dolaylarında yük taşımaktadır. Asitle dağlama ile bağlantıların taşıyabileceği yük değeri yaklaşık % 30 - % 40 dolaylarında artırmıştır. Asitle dağlama ve mekanik aşındırma işlemleri karşılaştırıldığında asit dağlamaları sonrasında daha gözenekli bir yapı elde edilmiştir. Prensipte olarak daha gözenekli ve homojen bir yüzey temas alanını artırmakta ve yüzey ile yapıştırıcı arasındaki mekanik kilitlenmeyi iyileştirmektedir. Dolayısıyla bu durum bağlantı dayanımlarına olumlu olarak yansımaktadır.

Üçüncü bölümde Şekil 3.7 ve Şekil 3.9 arasında verilen, sırasıyla mekanik aşındırılmış, FPL ve P2 dağlanmış numune yüzeylerine ait SEM fotoğrafları incelendiğinde FPL ve P2 dağlanmış numune yüzeylerinin daha homojen bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Yine aynı bölümde Şekil 3.11'de yüzeylere ait pürüzlülük grafiği verilmiştir. Dağlanmış yüzeylere ait grafiklere bakıldığında mekanik aşındırılmış yüzeye göre aynı mesafede girinti ve çıkıntıların daha sık olduğu yani daha homojen ve ince bir yüzeyin oluştuğu görülmektedir. FPL ve P2 dağlaması ile yapıştırılacak malzeme yüzeylerindeki zayıf oksit tabakasının kaldırılarak yapıştırıcının daha iyi nüfuz edebileceği, homojen ve mekanik kilitlenmeyi iyileştirecek olan yeni bir oksit tabakasının elde edilmesi, bağlantılardaki bu dayanım artışının nedeni olarak söylenebilir.

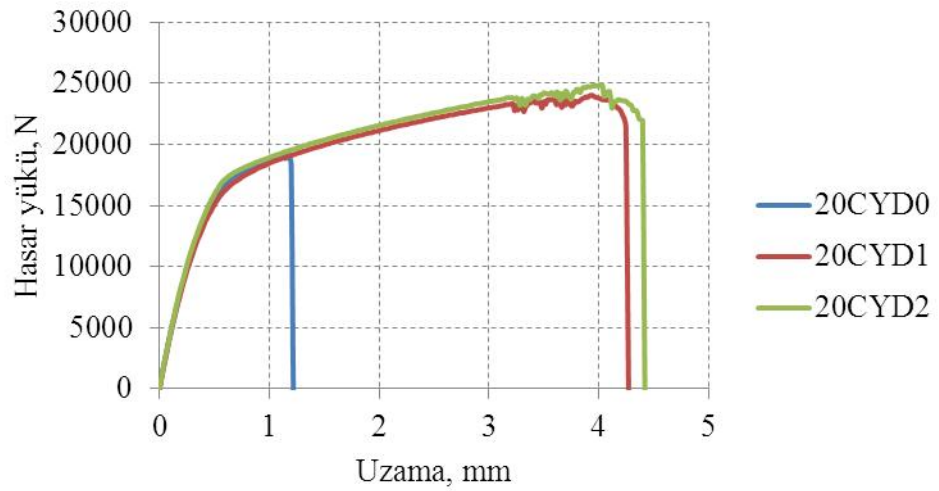
FPL ve P2 dağlaması ile bağlantı dayanımı artarken bağlantıların kopma uzamaları da artmıştır. Mekanik aşındırma ile bağlantılar 1 mm civarında bir uzama sergilerken, dağlanmış numunelerde uzama 4 mm dolaylarına kadar artmıştır. Bu durum nihai hasar süresini uzatması açısından da önemli bir avantajdır.



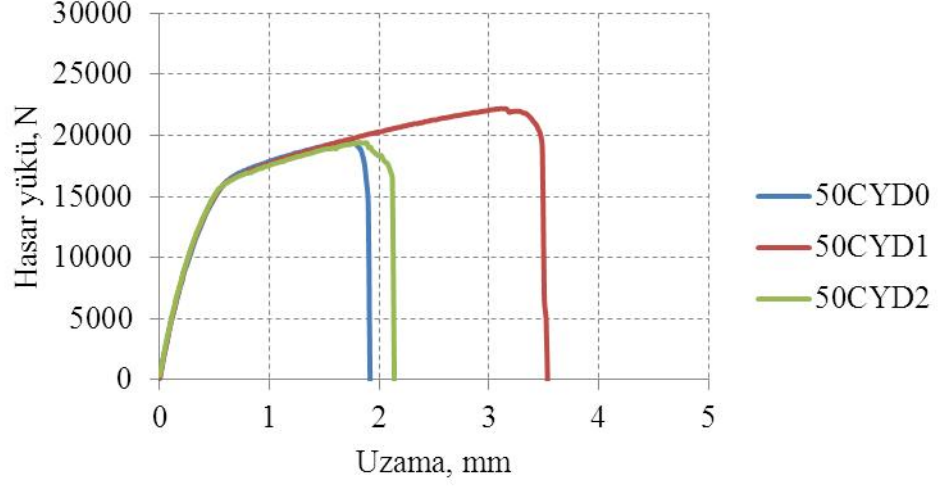
Şekil 4.3 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (-20°C, 30 gün)



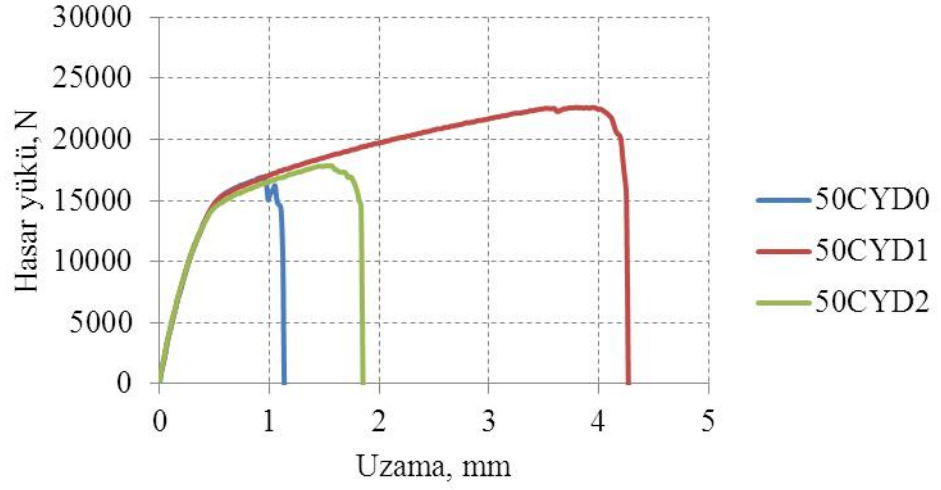
Şekil 4.4 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (0°C, 30 gün)



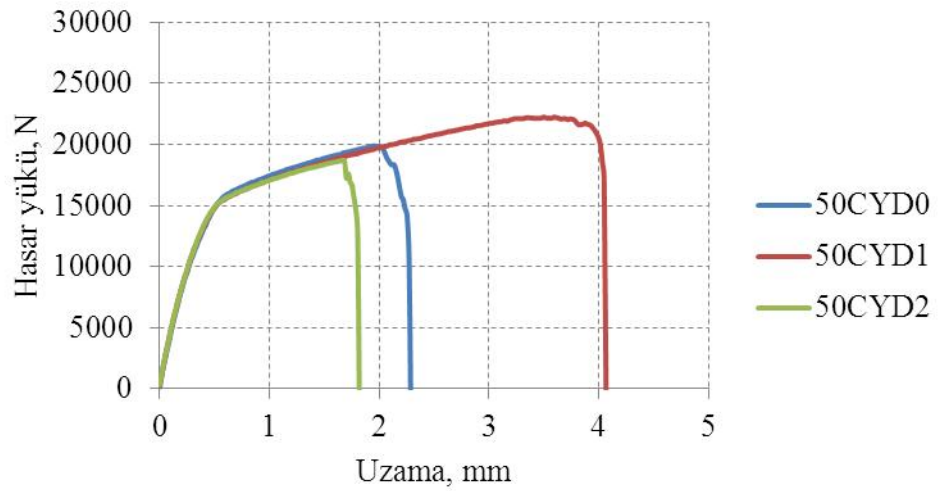
Şekil 4.5 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (20°C, 30 gün)



Şekil 4.6 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 30 gün)



Şekil 4.7 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 60 gün)

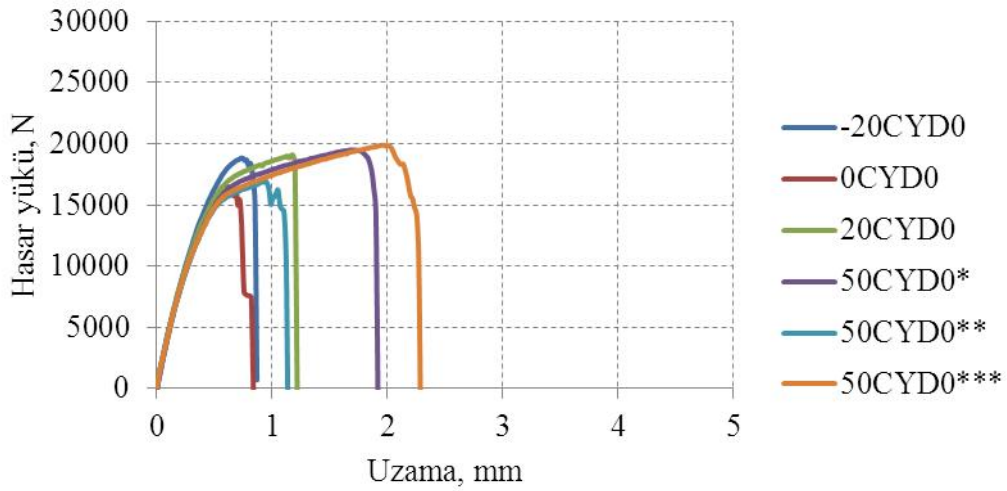


Şekil 4.8 : Yapıştırma bağlantılarında yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 90 gün)

4.1.2.2 Yapıştırma bağlantılarına sıcaklığın ve yaşlandırma işleminin etkisi

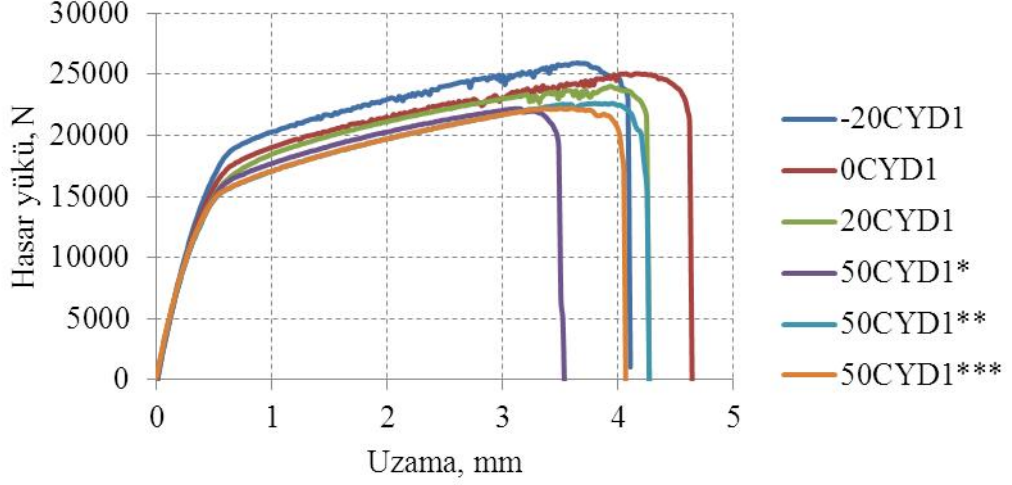
Şekil 4.9 ve Şekil 4.11 arasında yapıştırma bağlantılarının dayanımlarına farklı ortam şartlarının (sıcaklık, nem), aynı yüzey işlemi üzerindeki etkilerini gösteren, çekme deneylerinden elde edilen, hasar yükü – uzama eğrilerinden oluşan grafikler görülmektedir.

Yüzeyi mekanik olarak aşındırılmış numuneler, yük taşıma kapasitesi açısından değerlendirildiğinde, ortam koşullarına göre bağlantılarda ortalama 18000 N dolaylarında bir hasar yükü oluşmuştur. Sıcaklığın 50°C’lerde olduğu durumlarda bağlantının kopma uzaması 2 mm değerlerine kadar çıkmıştır. Bu sıcaklıklarda yapıştırıcı bir miktar süneklik kazanmıştır.

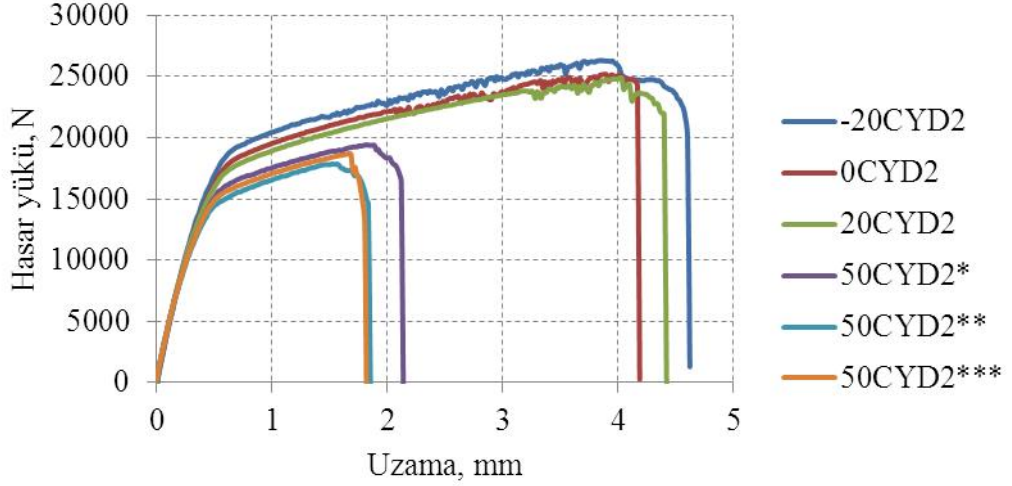


Şekil 4.9 : Yüzeyi aşındırılmış yapıştırma bağlantılarında ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün, % 95 nem; ***90 gün, % 95 nem).

FPL dağlaması ile farklı ortam koşullarında dahi istikrarlı bir sonuç elde edilmiştir. Numuneler 23000 ile 26000 N arasında yük taşıyabilmiştir. En düşük değerler 50°C sıcaklıklarda görülmüştür. P2 dağlamasında ise 50°C ve % 95 nemde bağlantının taşıyabildiği yük değerleri düşük sıcaklıklara göre azalmıştır. Hasar yükü 25000 N’lardan 18000 N’lara kadar düşmüştür. Bunun nedeni olarak P2 dağlaması ile FPL dağlanmış yüzeye göre daha sık ve ince pürüzlü bir yüzeyin elde edilmesi neticesinde, bağlantının kenar bölgelerindeki mikro girintiler içerisine sıkışmış havanın, nemin 50°C sıcaklıklarda genişerek bağlantı dayanımını olumsuz etkilediği söylenebilir.



Şekil 4.10 : FPL dağılması yapılmış yapıştırma bağlantılarında ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün, % 95 nem; ***90 gün, % 95 nem).



Şekil 4.11 : P2 dağılması yapılmış yapıştırma bağlantılarında ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün, % 95 nem; ***90 gün, % 95 nem).

4.1.3 Hibrit bağlantılar

Deneylerde yapıştırma bağlantılarına perçin ilave edilmesiyle iki, üç ve dört perçinli hibrit bağlantılar oluşturulmuştur. Yapıştırma bağlantılarına perçin ilavesinin katkısı, avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmek ve yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi çevresel koşulların değişmesinin ve yüzey işlemlerinin hibrit bağlantı davranışlarını nasıl değiştirebileceğini görmek amacıyla hibrit bağlantılar oluşturularak çekme deneyleri yapılmıştır. Her bir ortam koşulu ve yüzey işlemi için dörder adet deney numunesi hazırlanarak deneyleri yapılmıştır. Bağlantıların çekme deneylerinden elde edilen hasar yükü değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3 : Hibrit bağlantılara ait deney sonuçları.

Bağlantı türü	Ortam şartları	Yüzeysel işlem türü	Hasar yükü değerleri, N			
			1	2	3	4
2 perçinli hibrit bağlantı	-20°C 30 gün	Aşındırma	20271	19365	19145	---
		FPL dağ.	24043	24330	23825	---
		P2 dağ.	23776	24653	23796	22324
	0°C 30 gün	Aşındırma	16482	18948	21438	18446
		FPL dağ.	24925	23556	21847	---
		P2 dağ.	26284	25474	24519	23019
	20°C 30 gün	Aşındırma	20420	18355	20878	---
		FPL dağ.	22116	20659	23373	23619
		P2 dağ.	23727	23692	23823	21651
	50°C % 95 nem 30 gün	Aşındırma	17620	20036	18456	16870
		FPL dağ.	19393	19360	21695	20590
		P2 dağ.	18350	21438	20141	20566
50°C % 95 nem 60 gün	Aşındırma	15933	17817	17017	15436	
	FPL dağ.	20022	21951	23147	21549	
	P2 dağ.	17814	19052	19987	20305	
50°C % 95 nem 90 gün	Aşındırma	16358	20212	15908	21034	
	FPL dağ.	17151	18524	20147	19917	
	P2 dağ.	20107	19199	20447	---	
3 perçinli hibrit bağlantı	-20°C 30 gün	Aşındırma	20618	20813	21255	18808
		FPL dağ.	26254	23137	23010	24320
		P2 dağ.	23014	22856	21129	23823
	0°C 30 gün	Aşındırma	18933	18932	18669	20192
		FPL dağ.	21402	23646	18863	20612
		P2 dağ.	22928	23087	22378	20953
	20°C 30 gün	Aşındırma	19673	19259	18234	18814
		FPL dağ.	22801	22953	20497	21836
		P2 dağ.	20877	19490	20284	21217
	50°C % 95 nem 30 gün	Aşındırma	16406	14754	16926	15500
		FPL dağ.	14600	17481	13998	16107
		P2 dağ.	15803	16677	16745	17125
4 perçinli hibrit bağlantı	-20°C 30 gün	Aşındırma	22916	21035	20837	20078
		FPL dağ.	23814	22824	22362	22689
		P2 dağ.	23701	23430	22223	21827
	0°C 30 gün	Aşındırma	21195	17086	20466	21086
		FPL dağ.	22758	23748	22512	22385
		P2 dağ.	21636	22118	21168	23440
	20°C 30 gün	Aşındırma	19794	20680	19115	---
		FPL dağ.	20358	21361	21374	21664
		P2 dağ.	20377	20063	20051	20463
	50°C % 95 nem 30 gün	Aşındırma	15783	16596	16865	19918
		FPL dağ.	14915	16390	15176	---
		P2 dağ.	17417	17584	18346	18653

4.1.3.1 Hibrit bağlantılara uygulanan yüzey işlemlerinin etkisi

Şekil 4.12 ve Şekil 4.21 arasında malzeme yüzeylerine uygulanan üç farklı yüzey işleminin aynı ortam şartlarında iki, üç, dört perçinli hibrit bağlantıların dayanımına olan etkisini gösteren, çekme deneylerinden elde edilen, hasar yükü – uzama eğrilerinden oluşan grafikler görülmektedir. Üç ve dört perçinli hibrit bağlantılar aynı şekil üzerinde, 2 perçinli hibrit bağlantılar ise ayrı şekiller üzerinde gösterilmiştir.

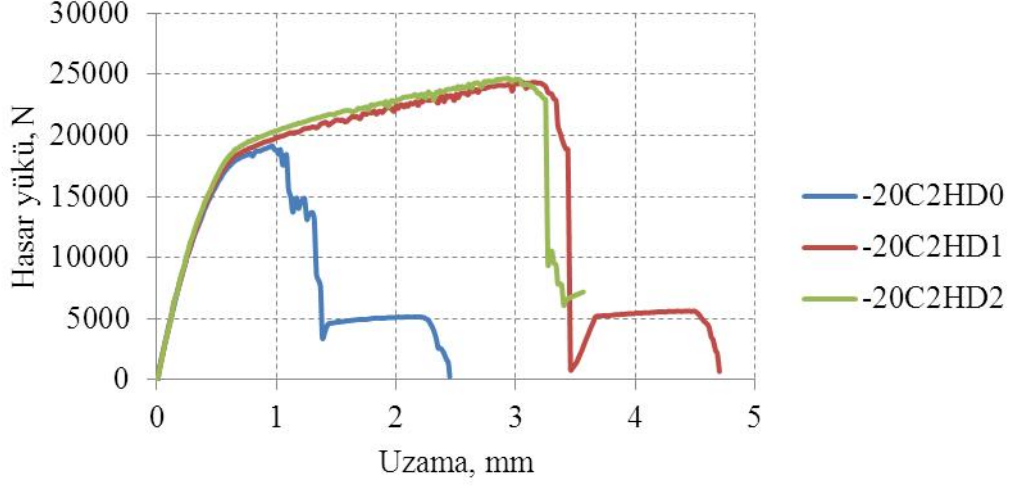
Deneyin başlaması ile birlikte grafikte doğrusal bir artış görülmektedir. İlk olarak yük yapıştırıcı tarafından maksimum taşıma kapasitesine kadar taşımaktadır. Bu noktadan sonra yapıştırıcının hasara uğraması sebebiyle yükte ani bir düşüş meydana gelmektedir. Ani düşüşün ardından yük, bağlantının son hasar anına kadar perçinler tarafından taşınmıştır. Üç farklı hibrit bağlantı türünde de hasar bu şekilde gerçekleşmiştir.

Hibrit bağlantılarda yüzeye yapılan dağlamaların etkisi, yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi benzer sonuçlar vermiştir. Şekillerden de görüleceği üzere bağlantılara uygulanan yüzey işlemlerinin etkisi ortam koşullarına göre farklılıklar göstermiştir. Fakat tüm şekillerde FPL ve P2 dağlamalarının mekanik olarak aşındırılmış numunelere göre bağlantı dayanımını artırdığı görülmektedir. Dağlama yapılmasıyla dayanımın artmasını, yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi daha gözenekli ve homojen pürüzlülüğe sahip yüzeylerin elde edilmesine bağlanabilir.

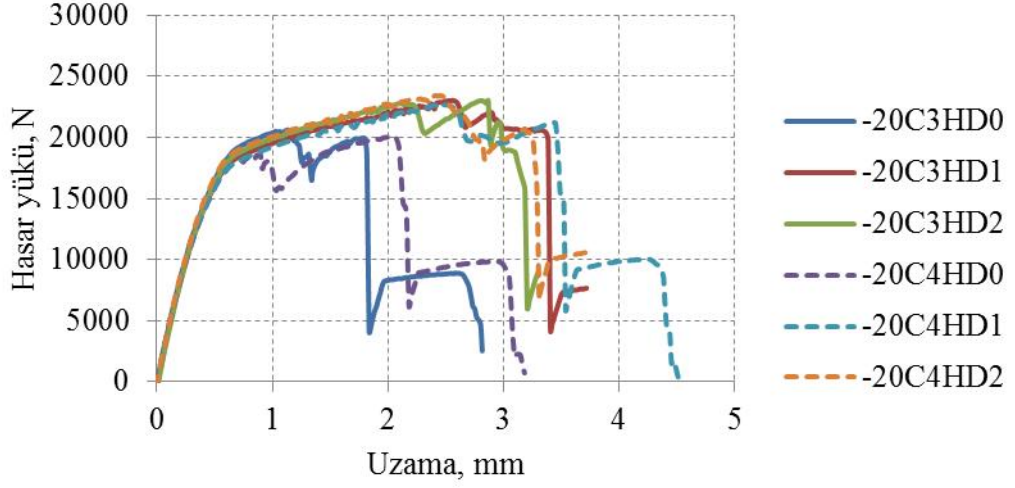
İki perçinli hibrit bağlantılar 50°C altı sıcaklıklarda 24000 N dolaylarında yük taşımaktadır. 50°C sıcaklıklarda bağlantıların taşıyabildiği yük 20000 N'lara kadar düşmüştür. 50°C sıcaklıkta ortamda % 95 nemin bulunması ve bu ortamda numunelerin 30, 60, 90 gün süreyle kalmaları dolayısıyla ortamdaki nemin bu süreçte perçin deliklerinden de yapıştırıcı içine difüze olması dayanım düşüşünün sebebi olabilir. Üç ve dört perçinli hibrit bağlantılarda da benzer durum gözlenmiştir.

Şekillerde iki perçinli hibrit bağlantıların dayanım değerleri üç ve dört perçinli hibrit bağlantılara göre kısmen daha yüksek çıktığı görülmektedir. Perçin sayısına göre değişen sonuçlara yüzey işleminin etkisinin çok etken olduğunu söylemek çok doğru olmayacaktır. Bunun sebebi bağlantı türlerinin karşılaştırılacağı bölümde anlatılmaya çalışılacaktır.

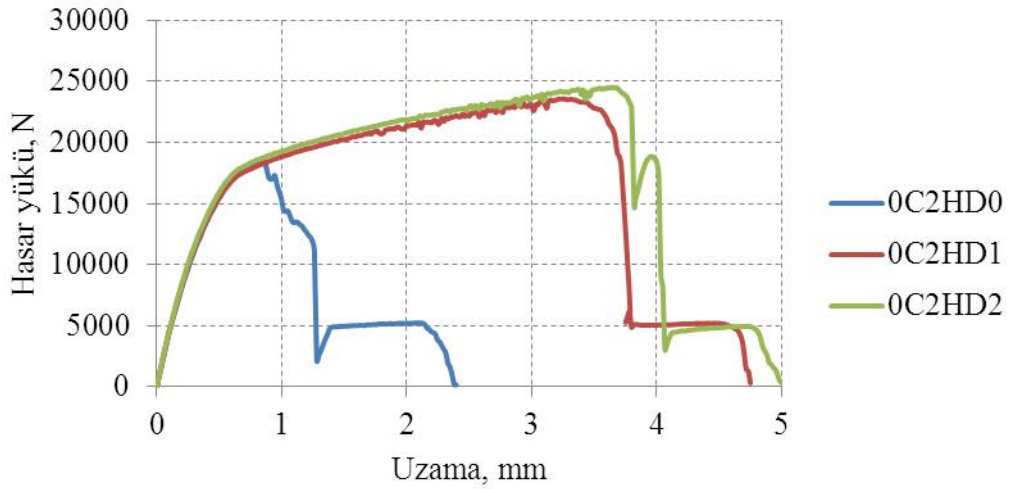
Yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi hibrit bağlantılarda da kopma uzaması değerlerinde de genellikle artış görülmektedir.



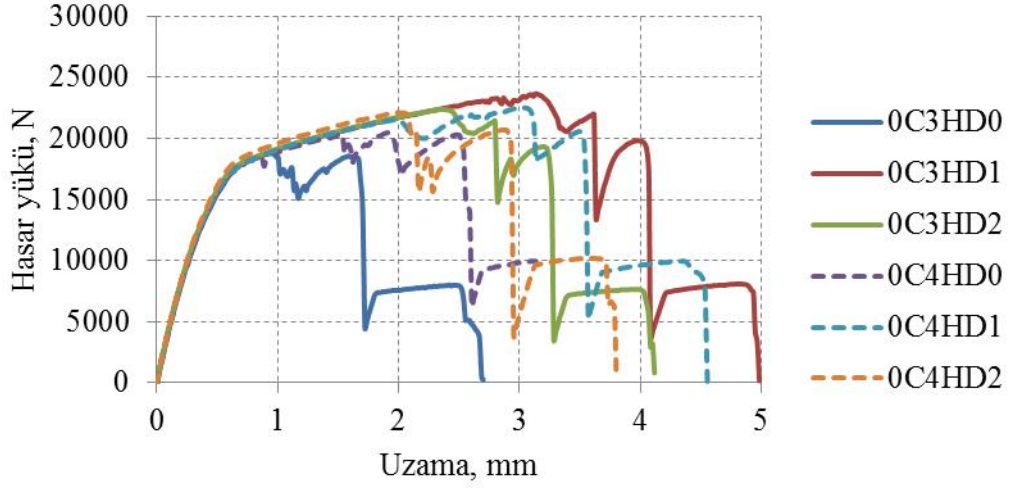
Şekil 4.12 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (-20°C, 30 gün).



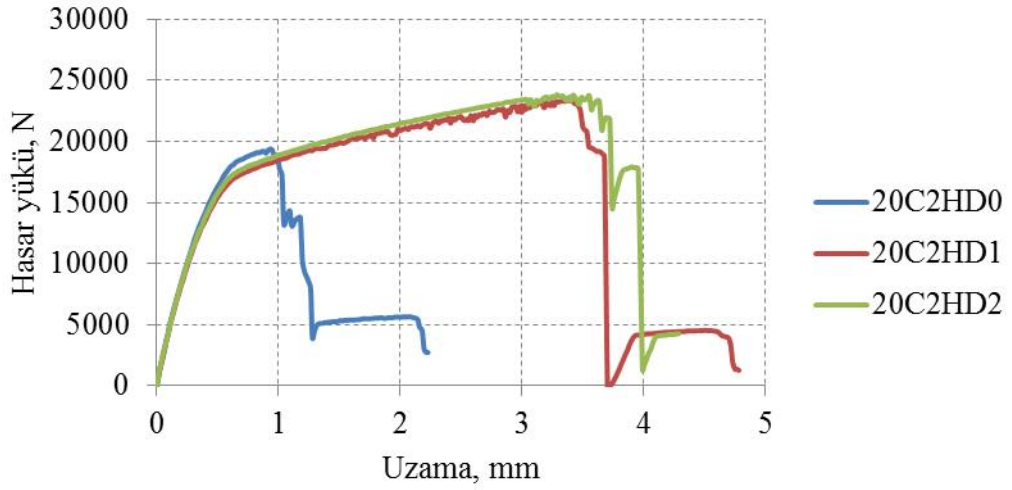
Şekil 4.13 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (-20°C, 30gün).



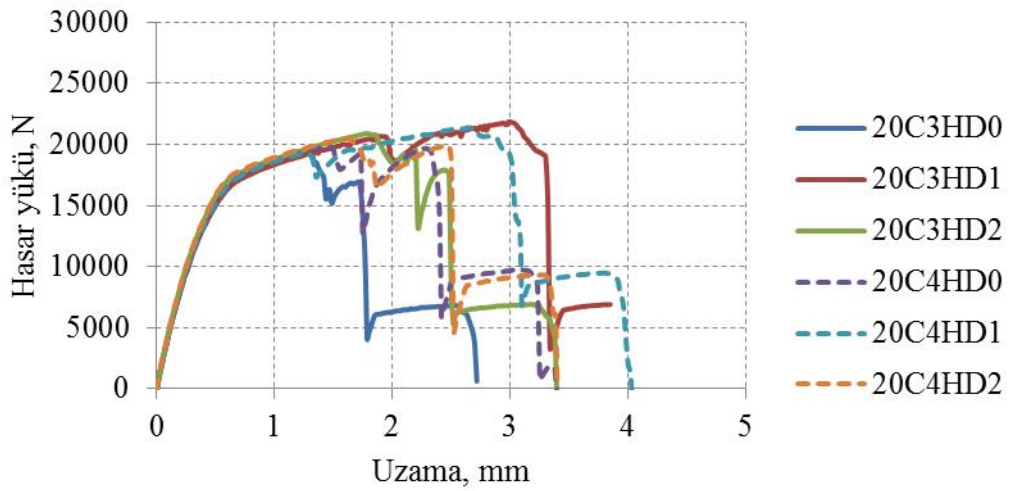
Şekil 4.14 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (0°C, 30 gün).



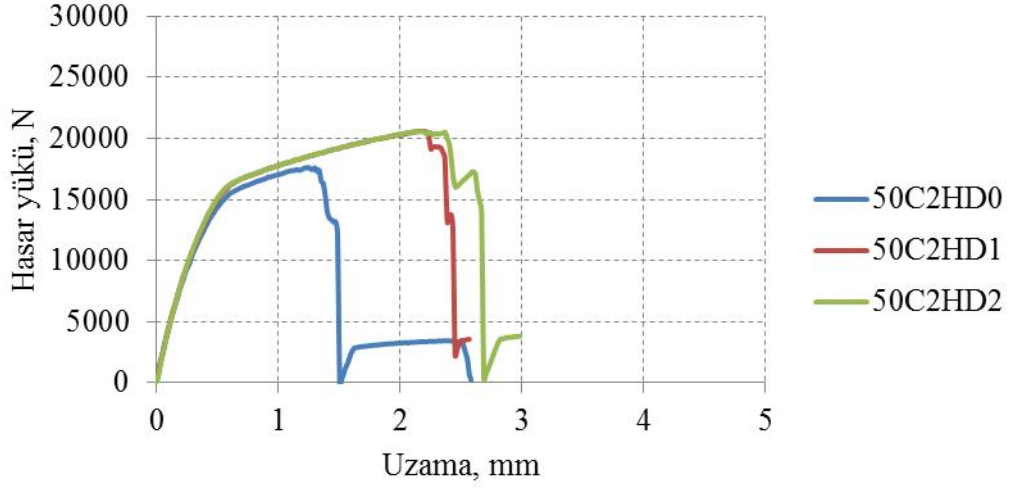
Şekil 4.15 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (0°C, 30 gün).



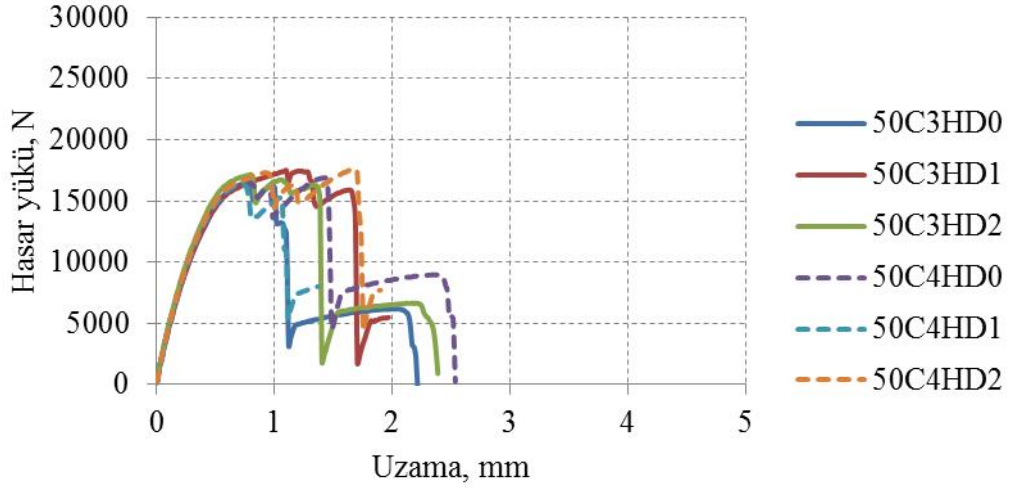
Şekil 4.16 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (20°C, 30 gün).



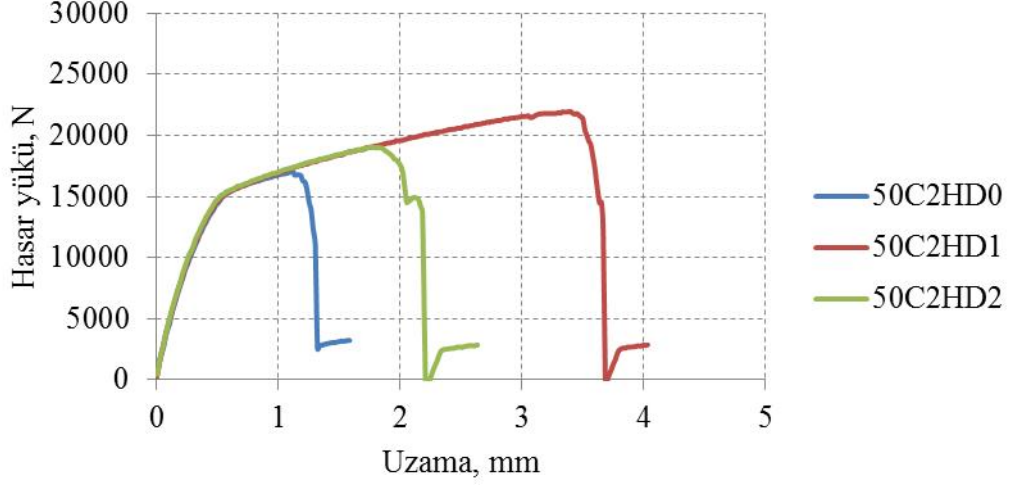
Şekil 4.17 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (20°C, 30 gün).



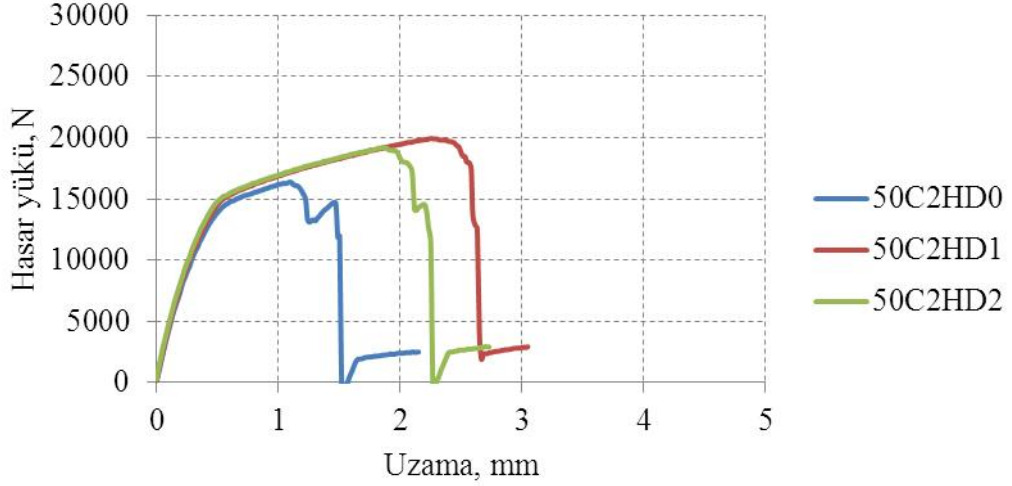
Şekil 4.18 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 30 gün).



Şekil 4.19 : 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 30 gün).



Şekil 4.20 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 60 gün).



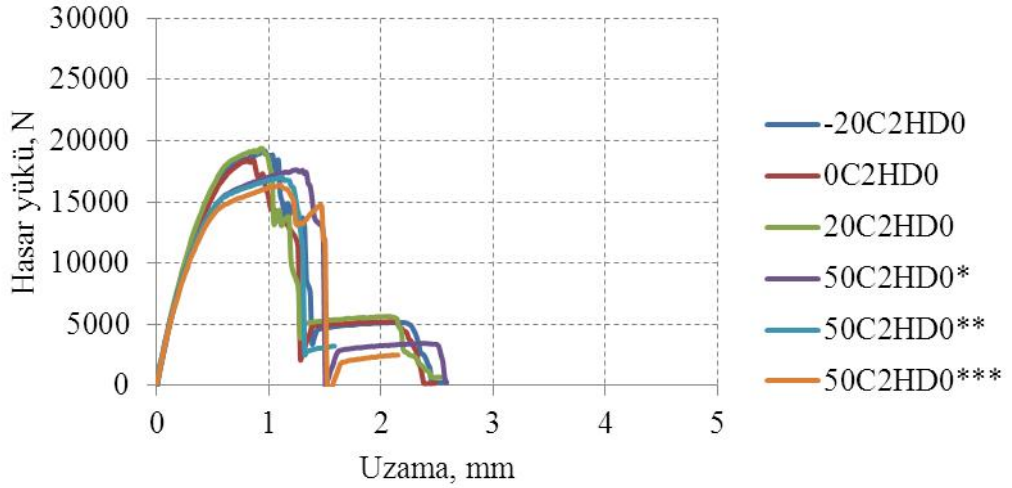
Şekil 4.21 : 2 perçinli hibrit bağlantılarda yüzey işleminin etkisi (50°C, % 95 nem, 90 gün).

4.1.3.2 Hibrit bağlantılara sıcaklığın ve yaşlandırma işleminin etkisi

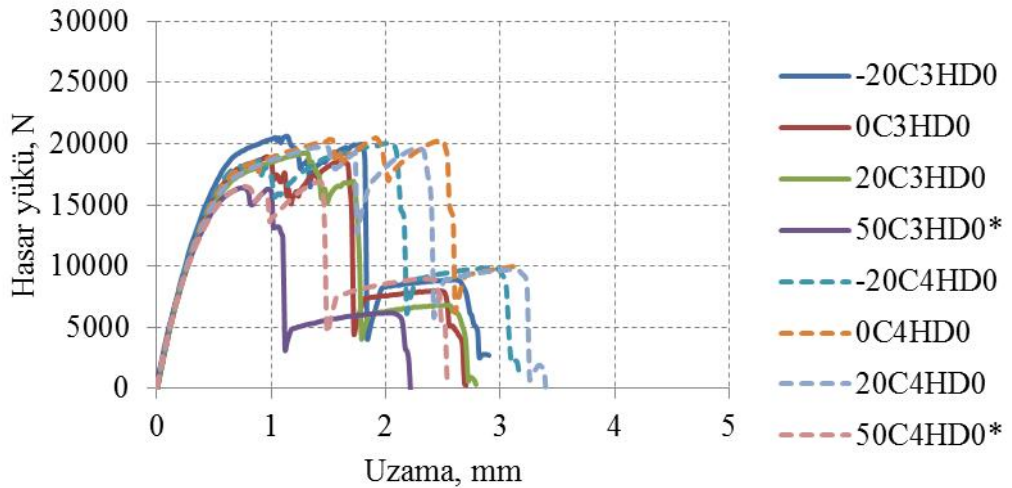
Şekil 4.22 ve Şekil 4.27 arasında hibrit bağlantıların dayanımlarına farklı ortam şartlarının (sıcaklık, nem), aynı yüzey işlemi üzerindeki etkilerini gösteren, çekme deneylerinden elde edilen, hasar yükü – uzama eğrilerinden oluşan grafikler görülmektedir. Üç ve dört perçinli hibrit bağlantılar aynı şekil üzerinde, 2 perçinli hibrit bağlantılar ise ayrı şekiller üzerinde gösterilmiştir.

Mekanik olarak yüzeyi aşındırılmış 2 perçinli hibrit bağalantılarda oluşan hasar yüklerine bakıldığında 50°C sıcaklığın altındaki ortamlarda 18500 N dolaylarında yük taşınabilmişken sıcaklığın 50°C ve nemin olduğu ortamlarda bağlantıların

taşıyabildiği yükler 17000 N değerlerine kadar bir miktar düşmüştür ve bunun yanında kopma uzamaları da az miktarda artmıştır. Üç ve dört perçinli hibrit bağlantılar da iki perçinli bağlantılara benzer davranış göstermiştir. Yük taşıma kapasitesi açısından çok farklılık görülmemiştir. En az yükü 50°C sıcaklıklarda taşımışlardır. Bağlantıların kopma uzaması değerlerinde perçinlerin etkisiyle artış görülmüştür. Dört perçinli bağlantılar üç perçinli bağlantılara göre daha büyük bir kopma uzaması göstermiştir.

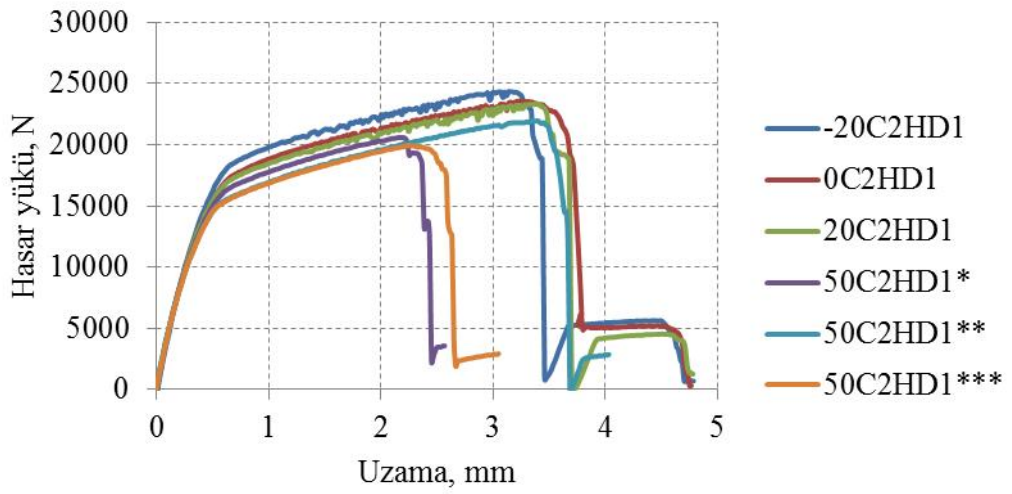


Şekil 4.22 : Yüzeyi aşındırılmış 2 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem, **60 gün, % 95 nem, ***90 gün, % 95 nem).

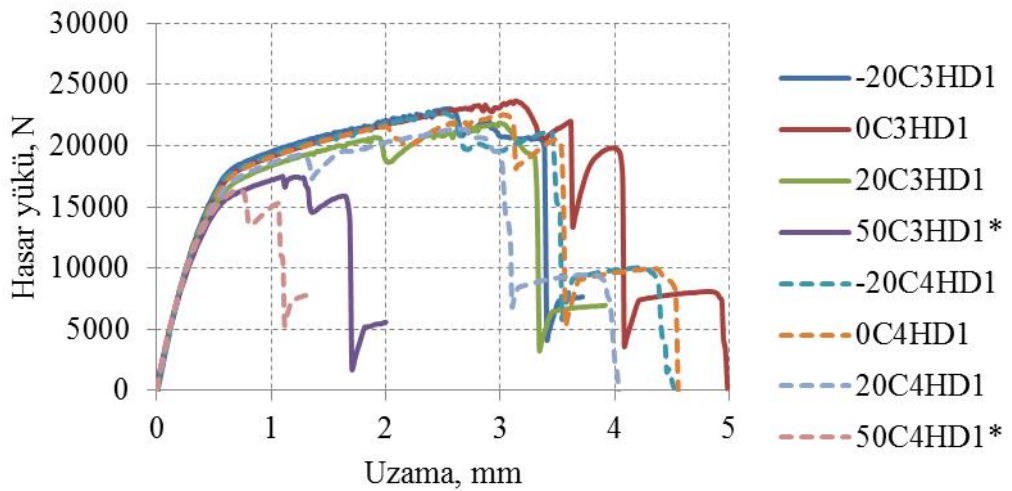


Şekil 4.23 : Yüzeyi aşındırılmış 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (* 30 gün, % 95 nem).

FPL dağılması yapılmış iki perçinli hibrit bağlantılarda 50°C'nin altındaki sıcaklıklarda farklı ortam koşullarında dahi yük taşıma ve kopma uzaması açısından birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Numuneler 22000 ile 24000 N arasında yük taşıyabilmiştir. Kopma uzamaları da 3,5 mm dolaylarındadır. Fakat 50°C sıcaklıkta nem ortamında bağlantı dayanımlarında ve uzama değerlerinde düşüşler görülmektedir. Bu ortamda malzemelerin bekleme sürelerinin daha uzun olması ve ortamda %95 nemin bulunması perçinler için açılan deliklerden de nemin yapıştırıcı ara yüzeyine difüzyon imkanı bulması dayanım düşüşlerinin sebebi olabilir. Üç ve dört perçinli bağlantılarda da en düşük dayanım 50°C sıcaklıklarda görülmüştür.

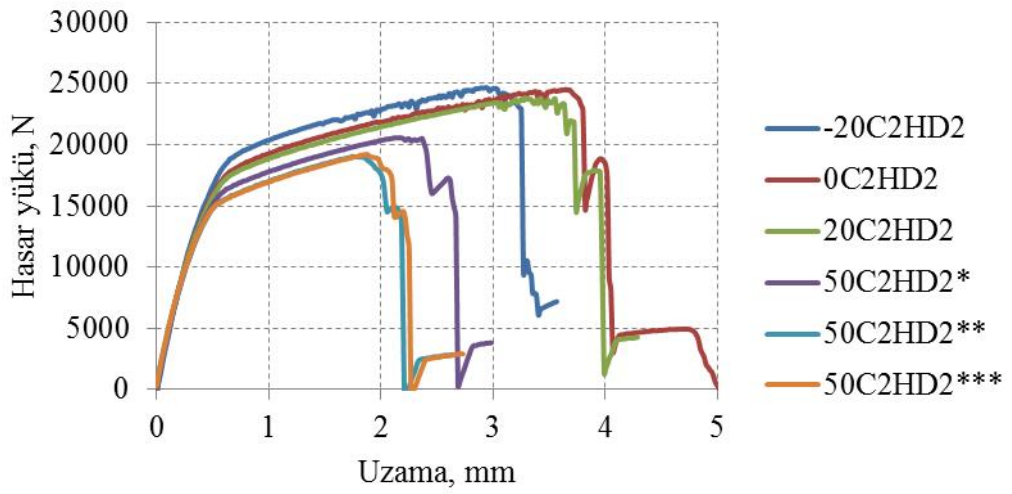


Şekil 4.24 : FPL dağılması yapılmış 2 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (*30 gün, % 95 nem; **60 gün % 95 nem; ***90 gün % 95 nem).

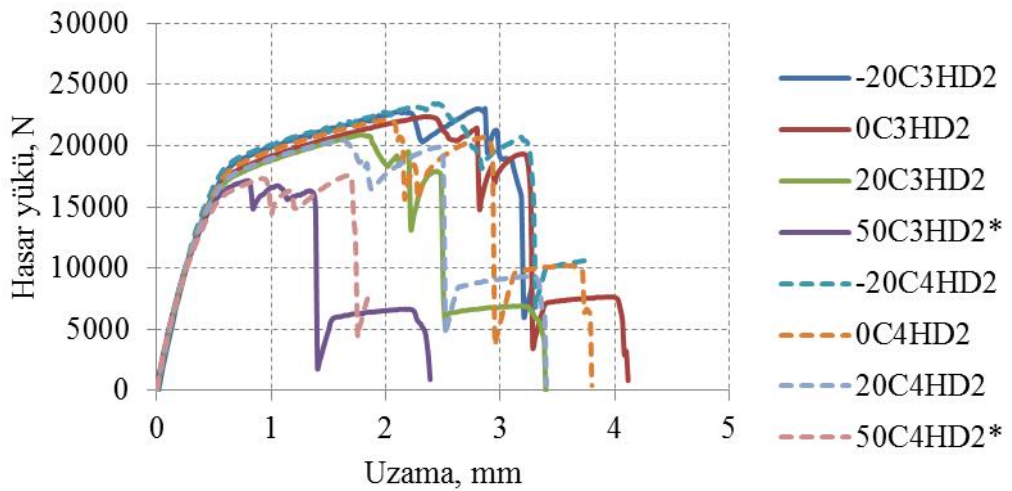


Şekil 4.25 : FPL dağılması yapılmış 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (* 30 gün, % 95 nem)

P2 dađlaması yapılmıř bađlantılarda ise diđer hibrit bađlantılarda olduđu gibi 50°C sıcaklıkta ve % 95 nemde bađlantının tařıyabildiđi ylık deđerleri dűřuk sıcaklıklara gůre azalmıřtır. Hasar ylık 25000 N'lardan 20000 N'lara kadar dűřműřtűr. Burada da nemin perçin deliklerinden yapıřtırıcı içerisine difűze olması ve P2 dađlaması ile elde edilen yűzeyin daha sık ve ince pűrűzlű bir yűzey olması dolayısıyla yűzeydeki mikro girintiler içerisine sıkıřmıř havanın, nemin 50°C sıcaklıklarda genleřerek bađlantı dayanımını olumsuz etkilediđi sůylenebilir. P2 dađlaması yapılmıř űç ve dűrt perçinli numunelerde de benzer sonuçlar gůrűlműřtűr. Hatta perçin sayısının artmıř olmasıyla bađlantıların dayanım deđerleri daha da azalmıřtır.



řekil 4.26 : P2 dađlaması yapılmıř 2 perçinli hibrit bađlantılarda ortam kořullarının etkisi (*30 gűn, % 95 nem; **60 gűn, % 95 nem; ***90 gűn, % 95 nem).

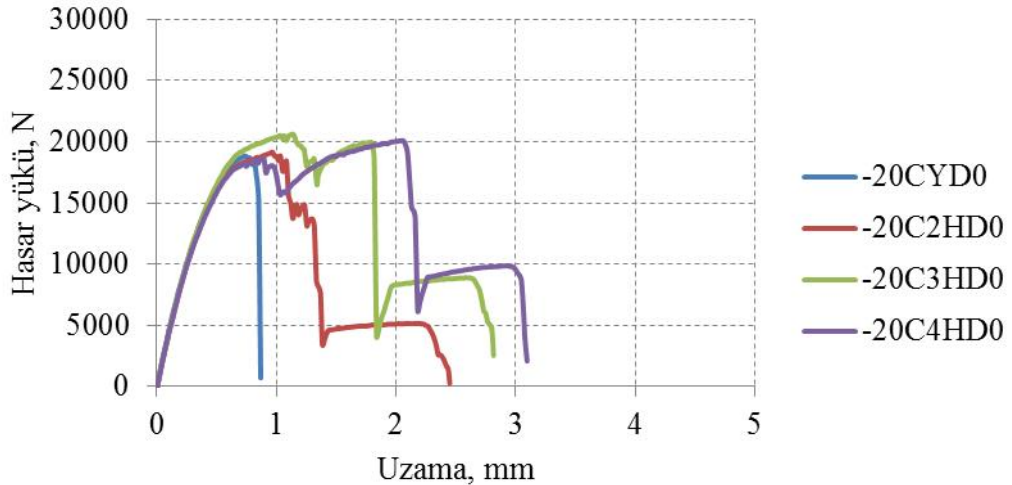


şekil 4.27 : P2 dağlaması yapılmış 3 ve 4 perçinli hibrit bağlantılarda ortam koşullarının etkisi (*30 gűn, % 95 nem).

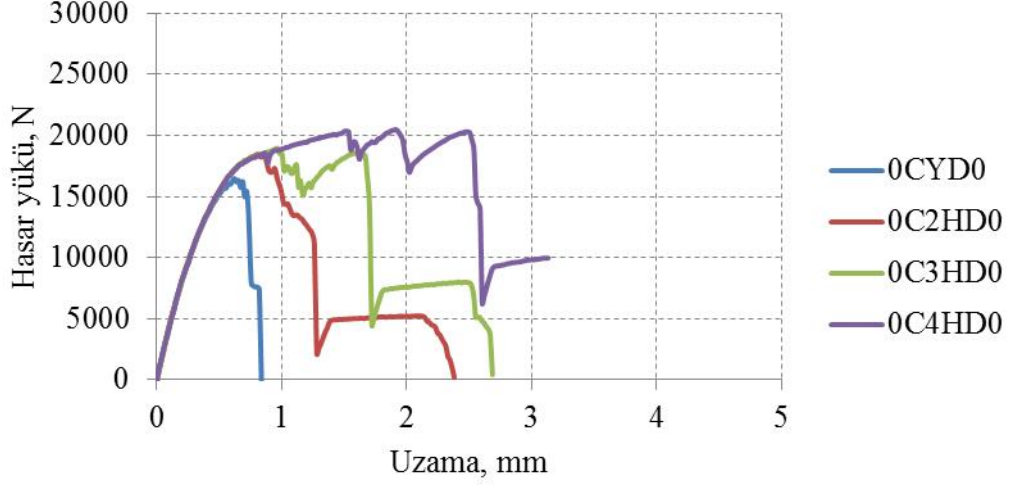
4.1.4 Yapıştırma ve hibrit bağlantıların karşılaştırılması

Yüzeyi mekanik olarak aşındırılmış yapıştırma bağlantılarının, iki, üç ve dört perçinli hibrit bağlantıların aynı ortam şartlarında yapılan deney sonuçlarına ait hasar yükü – uzama eğrileri aynı grafik üzerinde Şekil 4.28 ve Şekil 4.31 arasında verilmiştir.

-20, 0 ve 20°C sıcaklık değerlerindeki şekillerde, hibrit bağlantıların yük taşıma kapasitesinin yapıştırma bağlantılarına nazaran bir miktar üzerinde olduğu görülmektedir. Yapıştırma bağlantılarına perçin ilavesi yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Ancak artan yük değerinin perçin sayısı ile doğru orantılı olmadığı görülmektedir. Kopma uzaması ise perçin sayısı ile doğru orantılı olarak artmıştır. En fazla uzama ve uzun kopma süresi dört perçinli hibrit bağlantılarda görülmüştür. Yapıştırma bağlantılarında 1 mm'ye yakın kopma uzaması görülürken, hibrit bağlantılarda 2 mm'yi geçtiği görülmektedir. 50°C sıcaklıkta durum yukarıda bahsedildiği gibi gelişmemiştir. Yaşlandırma işlemi gereği bu ortamda %95 nemin bulunması durumu değiştirmiştir. Ortamdaki nemin, hibrit bağlantılarda yapıştırma bağlantılarının kenarlarına ilaveten perçin deliklerinden de yapıştırıcı ara yüzeyine difüze olma imkanı bulduğu söylenebilir. Nemin bu difüzyonu, yapıştırıcıyı bu bölgelerde olumsuz etkilemiş ve bağlantının yükten düşmesine sebep olmuştur. Yapıştırıcı diğer test koşullarına göre nispeten sıcak ortam nedeniyle sünekleşmiş ve kopma uzaması da buna bağlı olarak artarak 3 mm'ye kadar yaklaşmıştır.

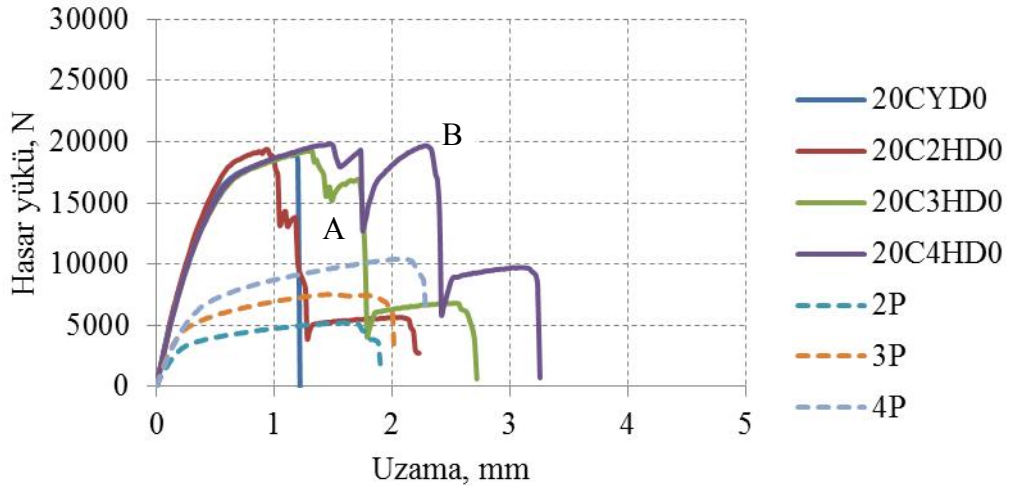


Şekil 4.28 : Yüzeyi aşındırılmış yapıştırma ve hibrit bağlantıların yük uzama eğrileri (-20°C, 30 gün).

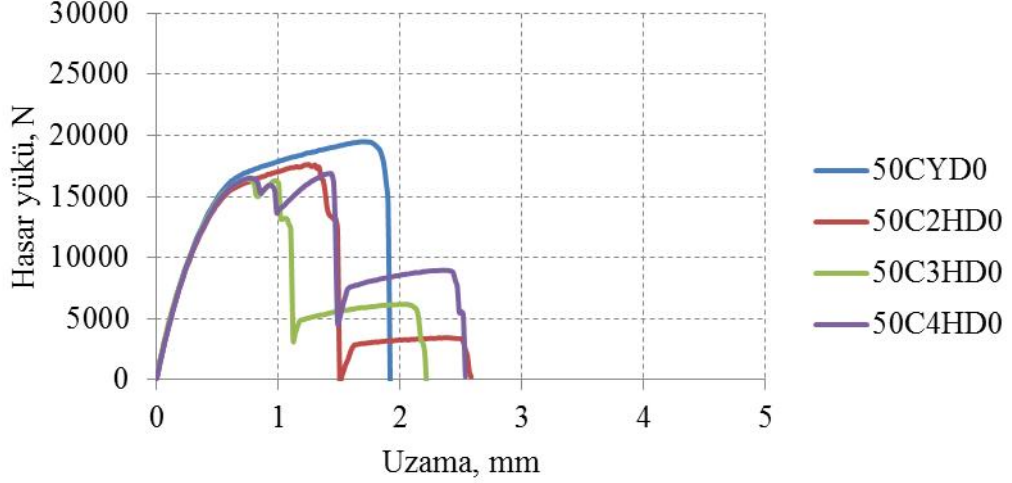


Şekil 4.29 : Yüzeyi aşındırılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (0°C, 30 gün).

Şekil 4.30'daki yapıştırma ve hibrit bağlantılara ait eğriler üzerine ilaveten iki, üç ve dört perçinli bağlantılara ait deney sonuçları da çizilmiştir. Eğrilerden de görüleceği üzere hibrit bağlantılarda yapıştırıcı hasara uğramasından sonra yük perçinlere binmiştir. Sistemde kaç perçin varsa yük o nispette taşınmaktadır. İki perçinli bağlantıda yapıştırıcı hasarı sonrası perçinlerin taşıyabildiği yük değeri, 2 perçinli bağlantının taşıyabildiği yük değeriyle hemen hemen aynıdır. Bu durum üç ve dört perçinli bağlantılar için de aynı şekildedir.



Şekil 4.30 : Yüzeyi aşındırılmış perçin, yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (20°C, 30 gün).

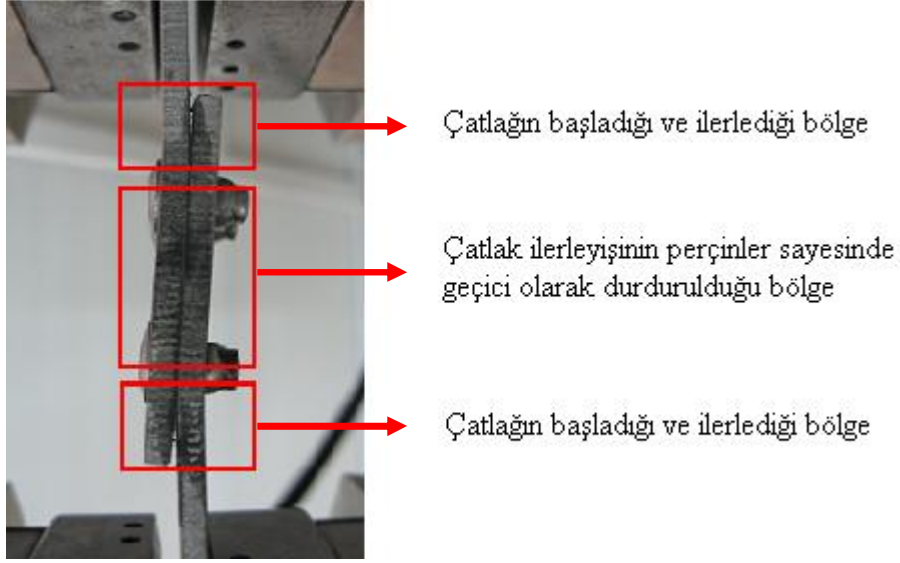


Şekil 4.31 : Yüzeği aşındırılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (50°C, %95 nem, 30 gün).

Yapıştırma bağlantılarında ve hibrit bağlantılarda numuneler, test cihazında yükün uygulanması ile birlikte bir miktar eğilme gerilmesine de maruz kalmaktadır. Bu sebeple hasar (çatlak), bağlantıların uç kısmından başlamaktadır.

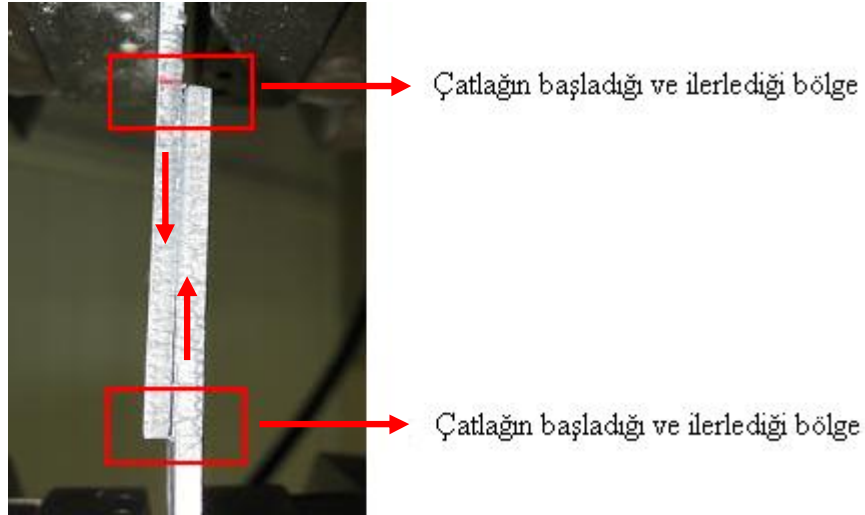
Hibrit bağlantılarda çatlak bağlantının uç kısımlarından başlayarak perçinlerin oluşturduğu düzlem yüzeye kadar engelsiz bir şekilde devam eder. Çatlağın ilerleyişi perçinler tarafından bir süre durdurulur. Böylece çatlağın oluşması ve ilerlemesi ile oluşan bağlantı dayanımındaki azalma (Şekil 4.30, A noktası), perçinlerin çatlak ilerlemesini durdurması ve oluşturdukları düzlemsel yapıştırma alanı sayesinde tekrar artmaktadır (Şekil 4.30, B noktası). Perçinlerin bağlantı üzerindeki bu etkisi, toplam uzamayı ve nihai hasar süresini uzattığından bir avantaj olarak görülebilir. Bu durum 4 perçinli hibrit bağlantılarda daha açık olarak görülmektedir. Şekil 4.32'deki fotoğrafta bu durum görsel olarak anlatılmıştır.

Ayrıca yapıştırma bağlantılarında hasar sonrasında bağlantı iki parçaya ayrılmaktadır ve yapısal bütünlük bozulmaktadır. Hibrit bağlantılarda ise yapıştırıcı hasara uğramasından sonra yük perçinler tarafından taşındığından ve yapısal bütünlük perçinler sayesinde bozulmadığından, güvenlik açısından bu durum avantaj olarak kabul edilebilir.



Şekil 4.32 : Hibrit bağlantılarda çatlak başlangıcı ve ilerlemesi

Yapıştırma bağlantılarında da eğilme gerilmesi etkisiyle çatlak, genellikle bağlantıların bindirme uzunluğunun her iki ucundan başlamaktadır. Bindirme uzunluğu boyunca zıt yönlere ilerleyen çatlak sonunda yapıştırma merkezinde buluşarak bağlantıyı hasara uğratmaktadır. Şekil 4.33’de yapıştırma bağlantısında çatlak başlangıcı ve ilerleyişi görülmektedir.



Şekil 4.33 : Yapıştırma bağlantılarda çatlak başlangıcı ve ilerlemesi

Yüzeyi FPL dağlaması yapılmış yapıştırma bağlantılarının ve iki, üç, dört perçinli hibrit bağlantıların aynı ortam şartlarında yapılan deney sonuçlarına ait hasar yükü – uzama eğrileri aynı şekil üzerinde Şekil 4.34 ve Şekil 4.37 arasında verilmiştir.

Şekillerden de görüleceği üzere buradaki tüm ortam şartlarında, mekanik olarak aşındırılmış numunelerin deney sonuçlarının aksine en yüksek dayanımı ve kopma

uzamasını saf yapıştırma bağlantıları vermiştir. Taşınan yük ve kopma uzaması değerleri tüm bağlantı türlerinde mekanik olarak aşındırılmış numunelere göre artmış olmasına rağmen hibrit bağlantılar, yapıştırma bağlantılarının gerisinde kalmıştır.

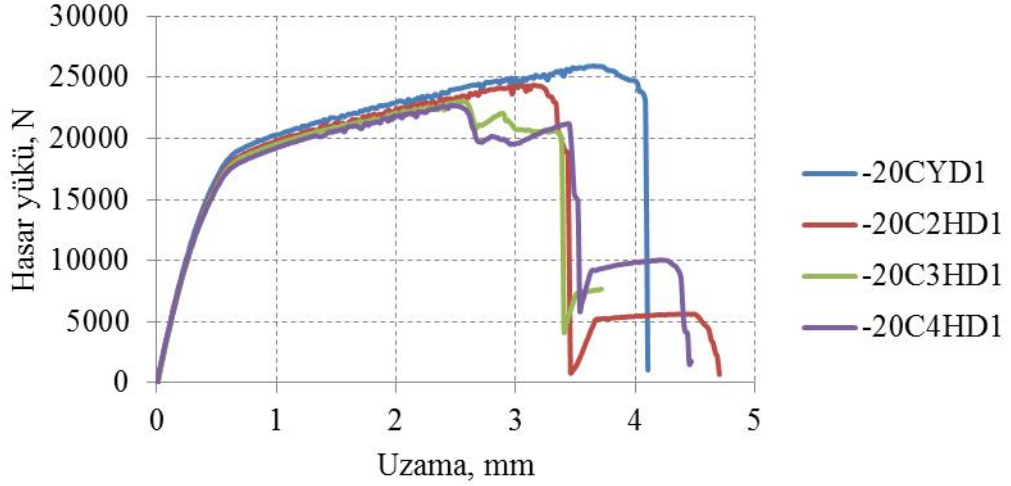
FPL dağlaması yapılmış yapıştırma bağlantılarına perçin ilavesi dayanımı olumsuz etkilemiştir. Perçin ilavesiyle yapıştırma alanındaki düzlem yüzeyin bozulması ve perçin deliklerinin çentik etkisi oluşturması, bağlantı dayanımlarındaki azalmanın sebebi olabilir. Ayrıca yapıştırma bağlantılarında yapıştırma alanı çok önemlidir. Hibrit bağlantılar için perçin deliklerinin açılması alan kaybına neden olacağından bağlantının taşıyabileceği yük değeri azalacaktır. Bu durum mekanik olarak aşındırılmış numuneler için de geçerlidir. Orada hibrit bağlantılar, perçin ilavesiyle yük taşıma kapasitesini bir miktar artırmış ve bu alan kaybının dezavantajını bertaraf etmişlerdir. FPL dağlanmış numunelerin deney sonuçlarında ise dağlamanın etkisi bağlantı dayanımını ve kopma uzamasını çok önemli derecede arttırmıştır. Bu artış perçin ilavesinin dayanıma olan olumlu etkisinin çok üzerindedir. Perçin ilavesinin olumlu etkisi dağlama işleminin olumlu etkisinin gerisinde kalarak yük taşıma kapasitesi açısından dezavantaj oluşturmuştur. Perçinler için açılan delikler hem alan kaybı hemde çentik etkisi oluşturması nedeniyle FPL dağlaması yapılmış numunelerde hibrit bağlantılar saf yapıştırma bağlantılarının bir miktar gerisinde kalmıştır.

FPL dağlaması yapılmış numunelere ait şekiller (Şekil 4.34 - Şekil 4.37) incelendiğinde de yukarıdaki yorumu destekleyici nitelikte sonuçlar görülecektir. Perçin sayısının artmasıyla bağlantıların yük taşıma kapasiteleri de düşmektedir. En düşük hasar yükü dört perçinli bağlantılarda oluşmuştur. Daha fazla perçin deliğinin oluşturduğu çentik etkisi ve alan kaybı bu durumun sebebidir.

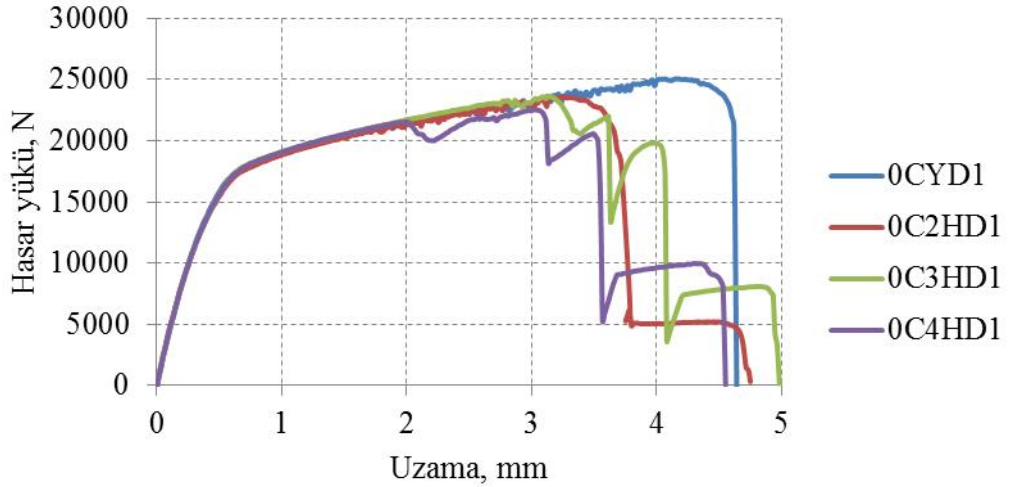
Gerilme açısından durum değerlendirildiğinde, dört perçin için delik alanı yaklaşık olarak toplam yapıştırma alanının %5'ine tekabül etmektedir. Bu alan kaybı, FPL dağlaması ile sağlanan yük taşıma kapasitesindeki artış oranının yanında küçük kalmaktadır.

-20, 0 ve 20°C sıcaklık değerlerindeki deneylerde bağlantılar benzer davranışlar sergileyerek yakın değerlerde sonuç vermişlerdir. 50°C sıcaklıkta ortamda %95 nemin de bulunması durumu değiştirmiştir. Ortamdaki nemin, hibrit bağlantılarda yapıştırma bağlantılarının kenarlarına ilaveten perçin deliklerinden de yapıştırıcı ara

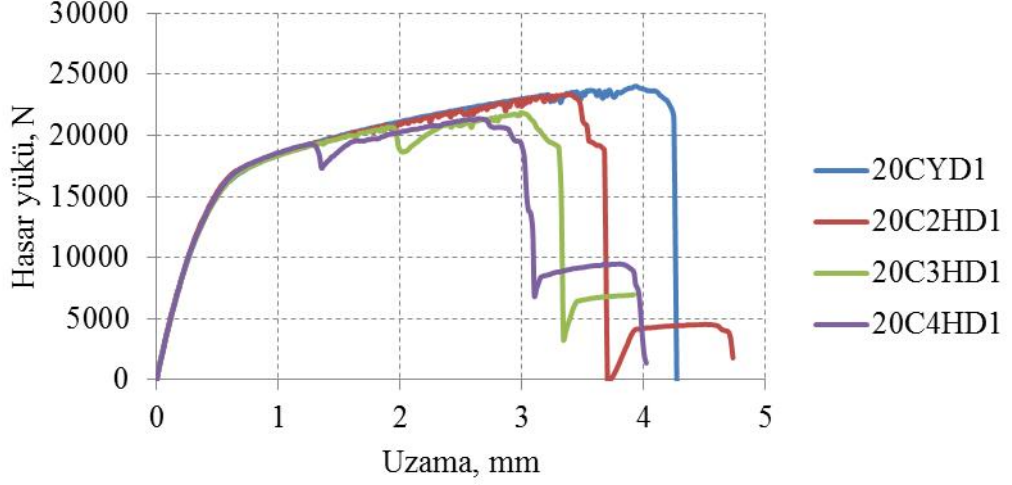
yüzeyine difüze olma imkanı bulduğu söylenebilir. Nemin bu difüzyonu, yapıştırıcıyı bu bölgelerde olumsuz etkilemiş ve perçin deliklerinin diğer olumsuz etkilerine ilaveten bağlantının daha fazla yükten düşmesine neden olmuştur.



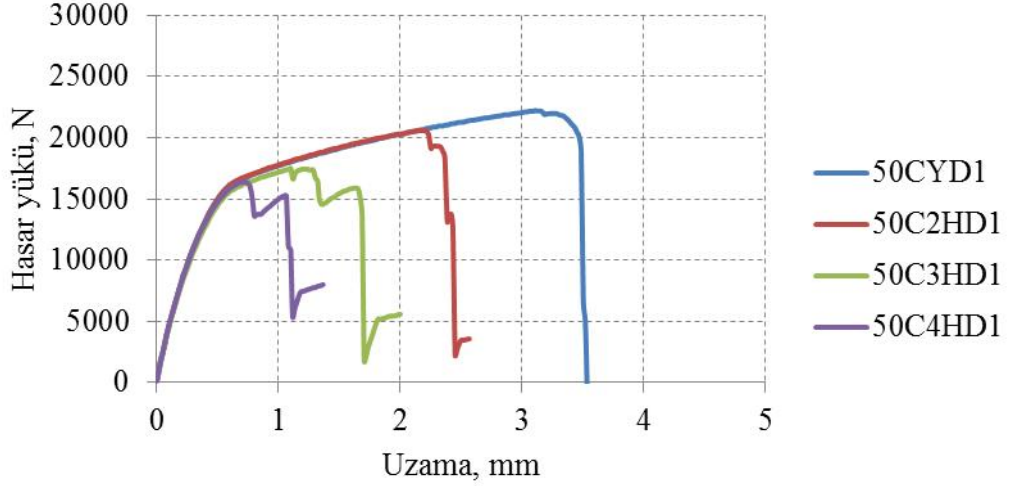
Şekil 4.34 : FPL dağılması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (-20°C, 30 gün).



Şekil 4.35 : FPL dağılması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (0°C, 30 gün).



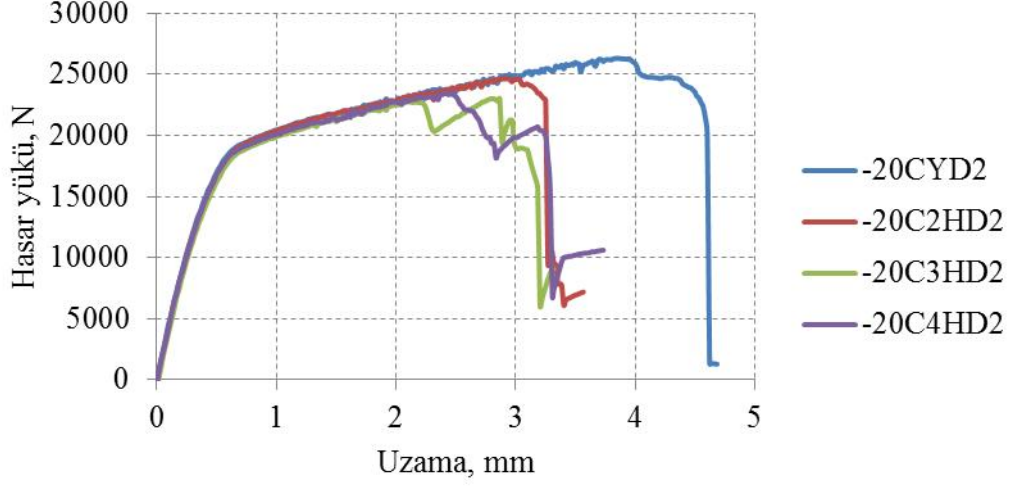
Şekil 4.36 : FPL dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (20°C, 30 gün).



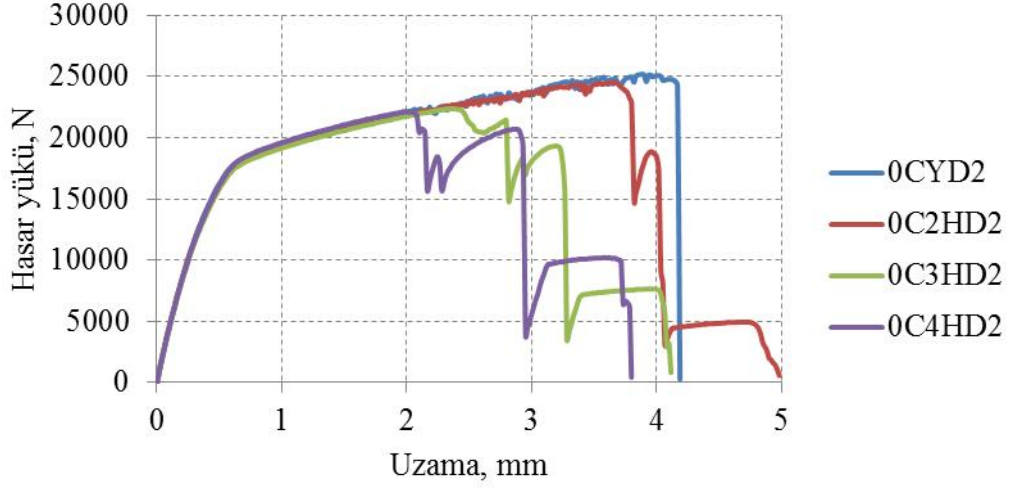
Şekil 4.37 : FPL dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (50°C, %95 nem, 30 gün).

Yüzeyi P2 dağlaması yapılmış yapıştırma bağlantılarının ve iki, üç, dört perçinli hibrit bağlantıların aynı ortam şartlarında yapılan deney sonuçlarına ait hasar yükü – uzama eğrileri aynı şekil üzerinde Şekil 4.38 ve Şekil 4.41 arasında verilmiştir.

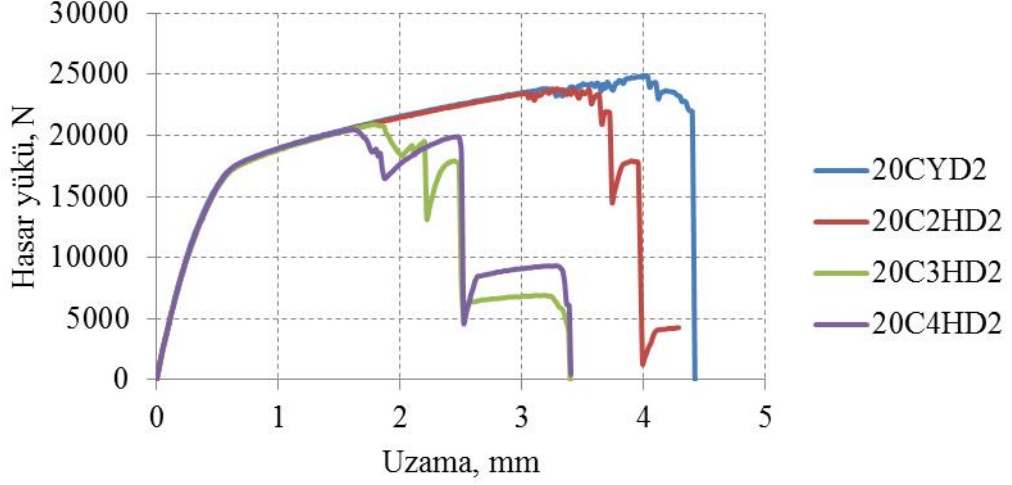
P2 dağlaması yapılmış numunelere ait deney sonuçları, FPL dağlaması yapılmış numunelere ait deney sonuçlarına paralellik göstermektedir. Burada da en fazla yük saf yapıştırma bağlantıları ile taşınmıştır. Bağlantılara perçin ilavesi bağlantı dayanımına olumlu etkide bulunmamıştır. Hatta yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı yük taşıma kapasitesini düşürmüştür.



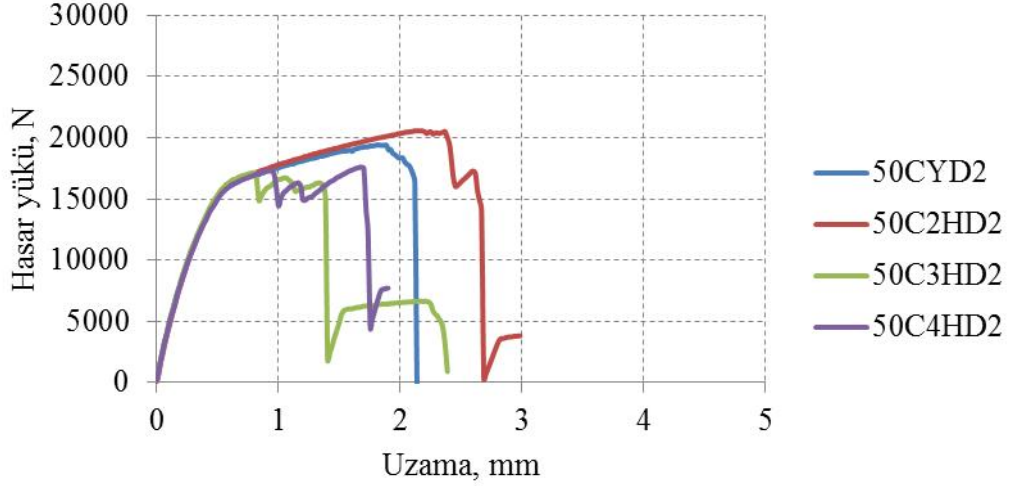
Şekil 4.38 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (-20°C, 30 gün).



Şekil 4.39 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (0°C, 30 gün).

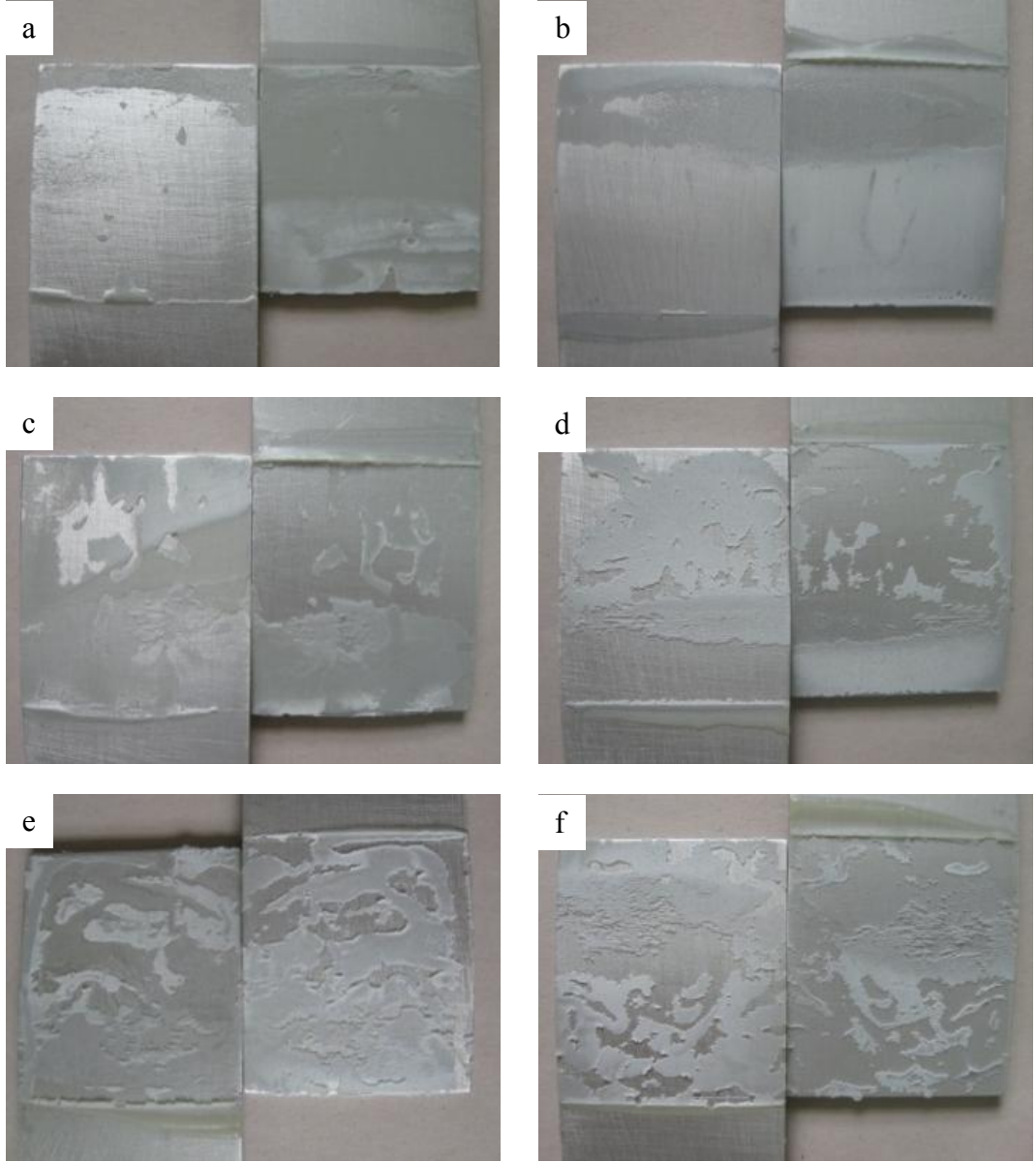


Şekil 4.40 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (20°C, 30 gün).



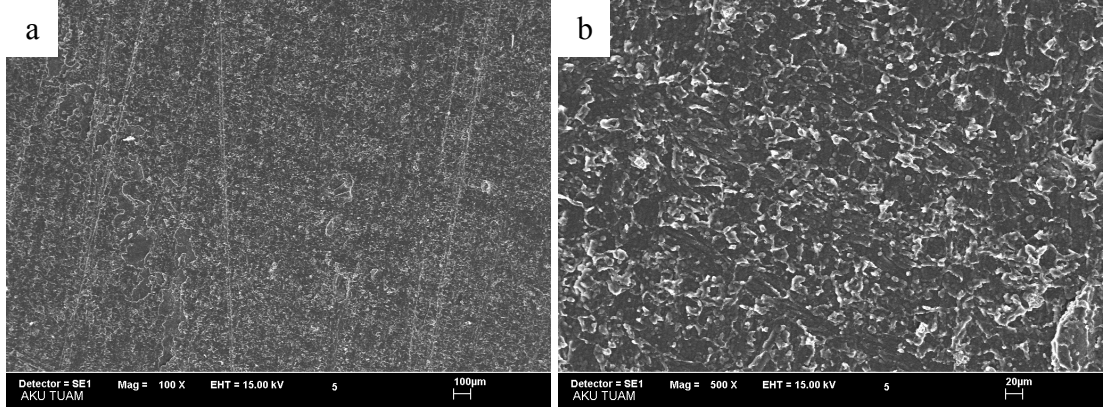
Şekil 4.41 : P2 dağlaması yapılmış yapıştırma ve hibrit bağlantılarının yük uzama eğrileri (50°C, % 95 nem, 30 gün).

Yapıştırma bağlantılarına ait hasar sonrası kırılma yüzeyleri Şekil 4.42’de verilmiştir. Bağlantıların çoğunda kohezyon hasarı görölmektedir. Yapıştırıcı kalıntıları her iki yüzeyde de bulunmaktadır. Fakat kırılma yüzeyleri sıcaklığın değişimi ile birlikte değişmektedir. Düşük sıcaklıklardaki hasar yüzeylerinde yapıştırıcının daha az deforme olduğu görölmektedir. Bu durum yapıştırıcının daha gevrek olduğunun göstergesidir (Şekil 4.42 a, b). Sıcaklık arttıka kırılma yüzeylerinde daha fazla deformasyon görölmektedir ki bu durum yapıştırıcının sünek hale geldiğine işaret etmektedir. (Şekil 4.42. c, d, e, f).

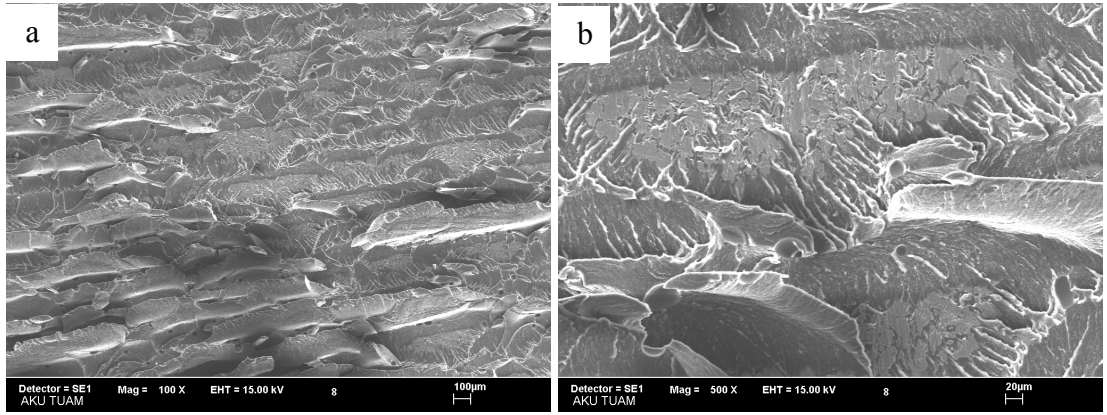


Şekil 4.42 : Yapıştırma bağlantılarının kırılma yüzeyleri a) -20°C; b) 0°C; c) 20°C; d) 50°C, 30 gün; e) 50°C, 60 gün; f) 50°C, 90 gün.

Şekil 4.43’de 0°C’deki Şekil 4.44’de ise 50 °C’de %95 nemde yaşlandırılmış yapıştırma bağlantılarına ait hasar sonrası kırılma yüzeylerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir. İki resimde aynı oranda büyütülerek alınmıştır. Yaşlandırma işlemi sonucunda yapıştırıcı yumuşamış ve çekme yönünde şekillenmiştir, yani yapıştırıcı plastikleşmiştir. Şekil 4.44’de yapıştırıcı yüzeyinde oluşan oyuklar kırılmanın sünek olduğunu göstermektedir. Taneler oldukça plastikleşmiş ve çekme yönünde yönelmiştir. Şekil 4.43’de ise soğuk ortam şartları neticesinde yapıştırıcının herhangi bir doğrultuda yönelmediği ve gevrek kırılmanın gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.43 : 0°C’de yapıştırma bağlantılarına ait hasar sonrası SEM görüntüleri a) 100X b) 500X.

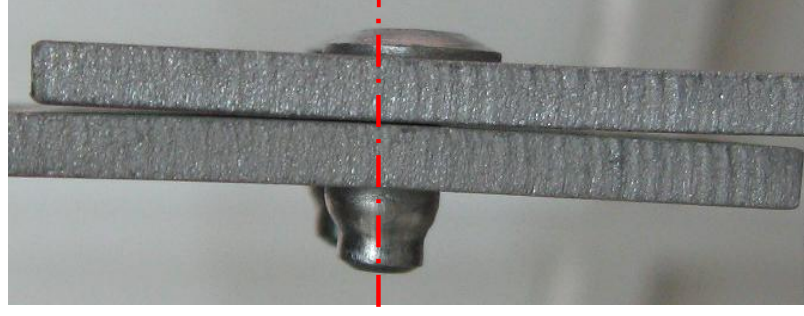


Şekil 4.44 : 50 °C ve %95 nemde yaşlandırılmış yapıştırma bağlantılarına ait hasar sonrası SEM görüntüleri a) 100X b) 500X.

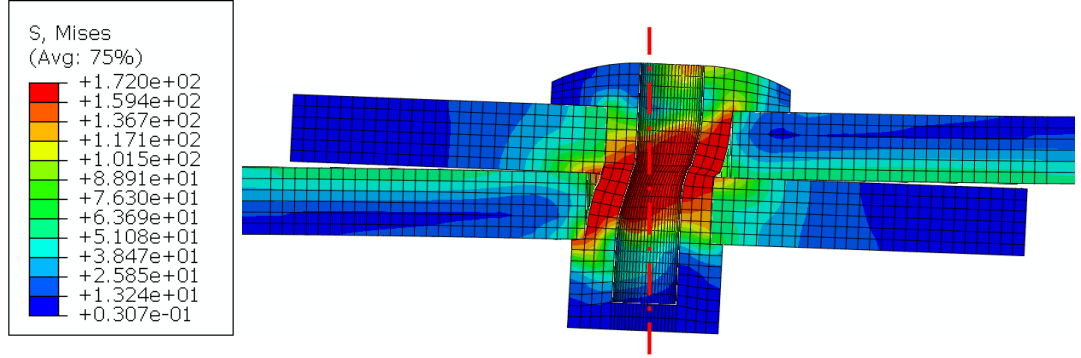
4.2 Sayısal Bulgular

Bu bölümde, yapıştırma bağlantılarının ve iki perçinli hibrit bağlantıların, sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar aynı tür bağlantıların, daha önceki deneysel çalışmaları neticesindeki sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmalarda Abaqus 6.11 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır.

Perçinli bağlantıların sınır ve yükleme koşulları Şekil 3.21’de hibrit bağlantılar için verilen koşullar ile aynıdır. Bir ucu ankastre, diğer ucu serbest olan numune 2mm/min hızla çekilmiştir. Perçinler taşıyabileceği maksimum yüke ulaştığında program sonlandırılmıştır. Perçinli bağlantıda elasto-plastik bölgede sonuçlar alınmıştır. Şekil 4.45’de iki perçinli bağlantının deney sonrasındaki hasar görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.46’da ise bağlantının Abaqus programında yapılan çözümünden elde edilen gerilme değerleri ve bağlantının hasar durumu görülmektedir.

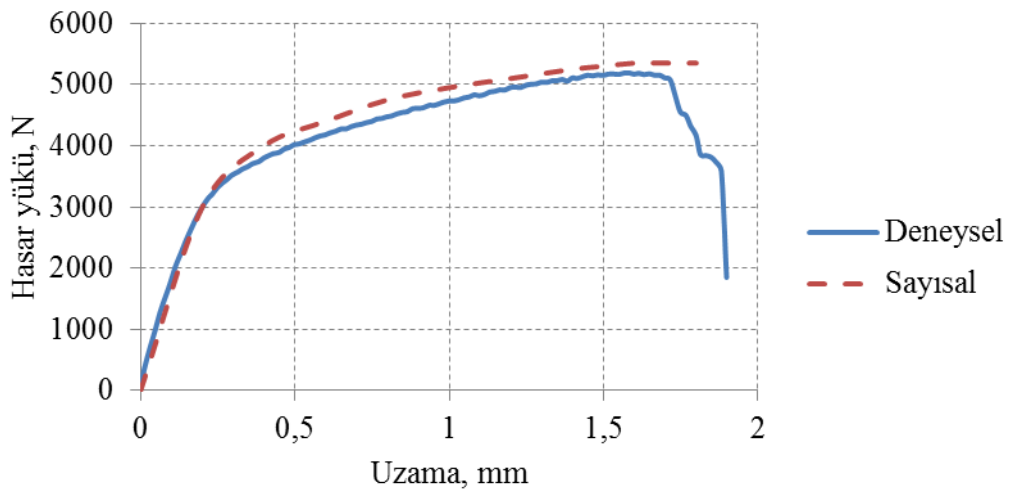


Şekil 4.45 : Perçinli bağlantının deney sonrası hasar görüntüsü.



Şekil 4.46 : Plaka ve perçindeki gerilmeler ve hasar durumu.

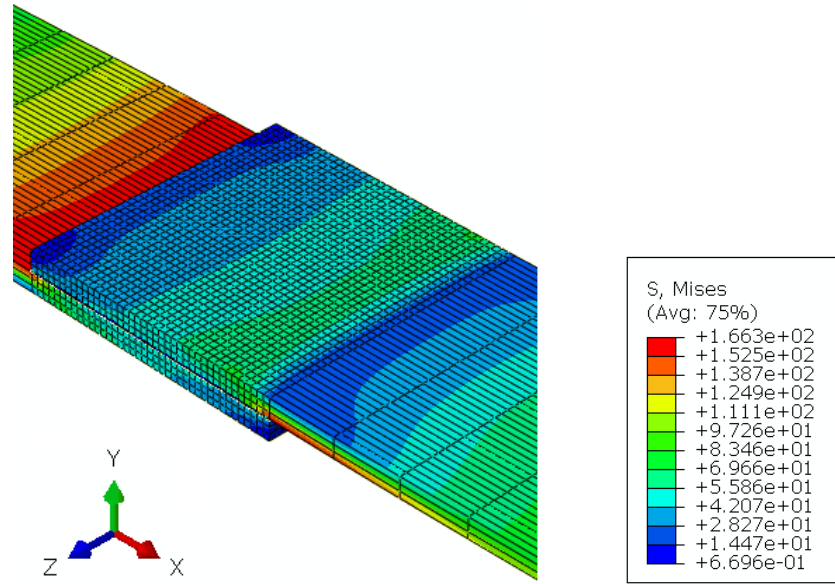
Deneysel olarak olduğu gibi hasar perçinlerde oluşmuştur. Plakalarda herhangi bir deformasyon meydana gelmemiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda 2 perçinli bağlantı ortalama 5200 N değerinde yük taşımıştır. Sayısal çalışmalarda ise 5335 N değerine kadar yük taşınabilmektedir. Her iki çalışmada da uzama miktarları birbirine yakın değerlerde çıkmıştır. Şekil 4.47’de iki perçinli bağlantının deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.47 : İki perçinli bağlantıya ait sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Sayısal analizi yapılan yapıştırma bağlantısı ve iki perçinli hibrit bağlantıdan alınan değerler, 20°C sıcaklıkta, yüzeyine işlem yapılmamış aynı bağlantı türlerinin deneysel çalışmalarından alınan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde de sınır şartları ve yükleme koşulları deneysel çalışmalardakiler ile aynıdır.

Şekil 4.48’de yapıştırma bağlantısında oluşan gerilmeler görülmektedir. En yüksek gerilmeler alüminyum plakalar üzerinde, yapıştırma bölgesinin bitiminde oluşmuştur. Deneysel çalışmalarda da bu bölgelerin en fazla zorlandığı gözlemlenmiştir. Çekme işleminin başlamasıyla birlikte bu bölgeler bir miktar eğilme gerilmesine maruz kalmaktadır ve bu gerilmenin etkisinde plakalar bu bölgelerde eğilerek plastik deformasyona uğramaktadır.



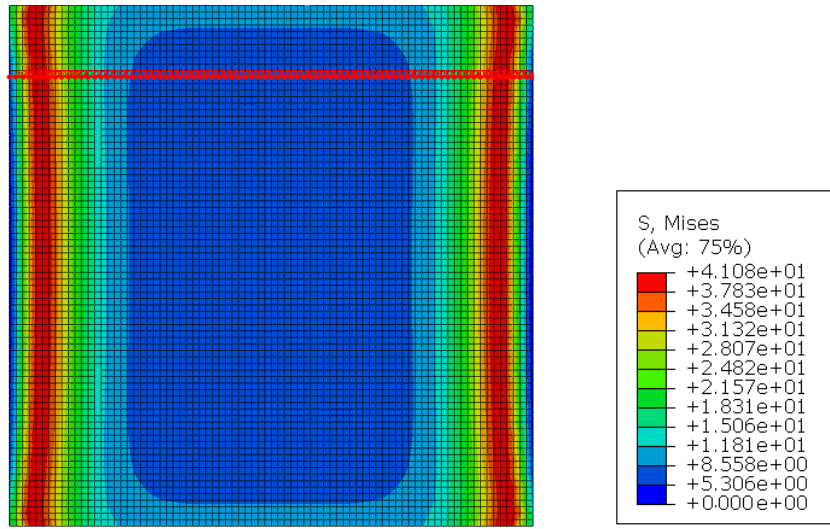
Şekil 4.48 : Yapıştırma bağlantısında oluşan gerilme dağılımı.

Şekil 4.49’da yapıştırma bağlantısındaki yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan gerilme dağılımı görülmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcı fiziksel olarak sıvı haldedir. Ancak sayısal çalışmalarda, yapıştırıcının kurlaştıktan sonraki hali düşünülerek, yapıştırıcı tabaka şeklinde modellenmiştir. Bu tabakaya deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcıya ait özellikler atanarak sayısal çalışmalarda kullanılmıştır.

Yapıştırıcı tabakasında en yüksek gerilmeler yapıştırma alanının bindirme uzunluğu boyunca başlangıç ve bitiş hatlarında oluşmuştur. Çekme işleminin başlamasından sonra, bu bölgelerde alt ve üst plakaların eğilmeye başlamasıyla birlikte yapıştırıcıda da gerilmeler oluşmaya başlamaktadır. Oluşan bu eğilme gerilmeleri ve kayma gerilmeleri neticesinde en yüksek gerilmeler bu bölgede oluşmaktadır. Oluşan

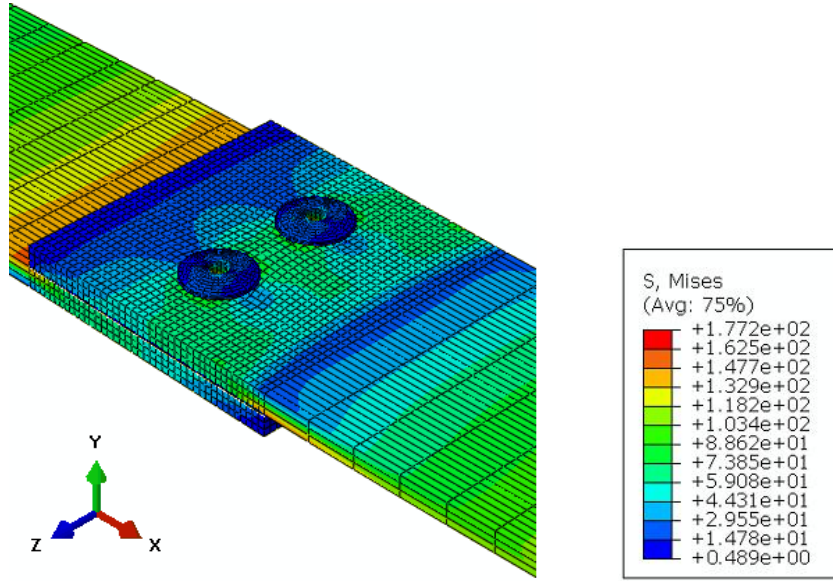
gerilmeler yapıştırıcının taşıyabileceği değeri aştıktan sonra çözüm durmaktadır. Şekil 4. 49 çözüm durduktan sonraki durumda yapıştırıcı tabakasındaki gerilmeleri göstermektedir.

Deneysel çalışmalarda da hasar, yapıştırıcı taşıyabileceği maksimum değere ulaştıktan sonra bağlantılardaki bindirme alanının uç kısımlarından başlayıp zıt yönlerde ilerleyerek yapıştırıcı merkezine sonlanmaktadır. Sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen gerilme dağılımı incelendiğinde de uç kısımlarda yüksek gerilmelerin oluştuğu ve yapıştırıcının merkezine doğru gerilmelerin azaldığı görülmektedir.



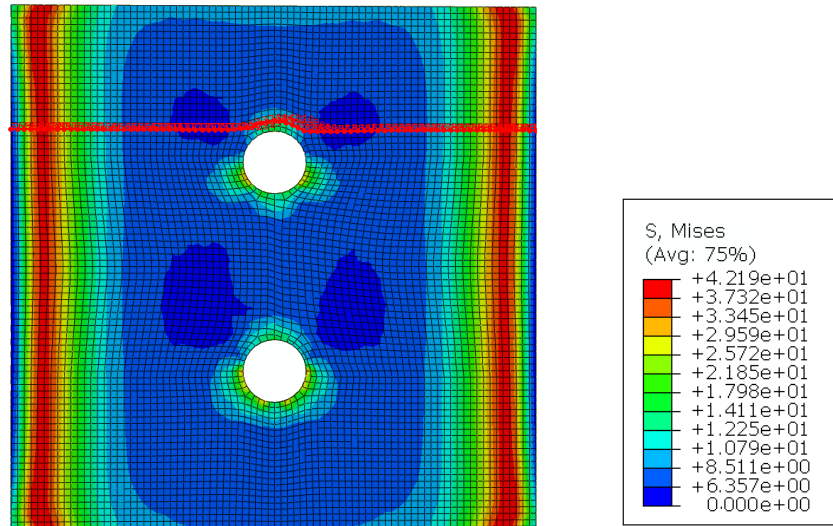
Şekil 4.49 : Yapıştırma bağlantısındaki yapıştırıcı tabakada oluşan gerilme dağılımı.

Şekil 4.50'de iki perçinli hibrit bağlantıda oluşan gerilme dağılımı görülmektedir. Burada en yüksek gerilmeler perçinler üzerinde oluşmuştur. Üst plakaya çekme hareketinin verilmesiyle birlikte perçinler de hareket etmek istemektedir. Fakat ankastre olan alt plakadan dolayı ve plakaların yapıştırılmış olmasından dolayı perçinler hareket edememekte, eğilme ve kayma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Plakalar üzerindeki en yüksek gerilmeler ise yapıştırma bağlantısında oluştuğu gibi yapıştırma bölgesinin bitiminde oluşmuştur. Bu bölgelerin deneylerde de eğilerek plastik şekil değiştirdiği görülmüştür.



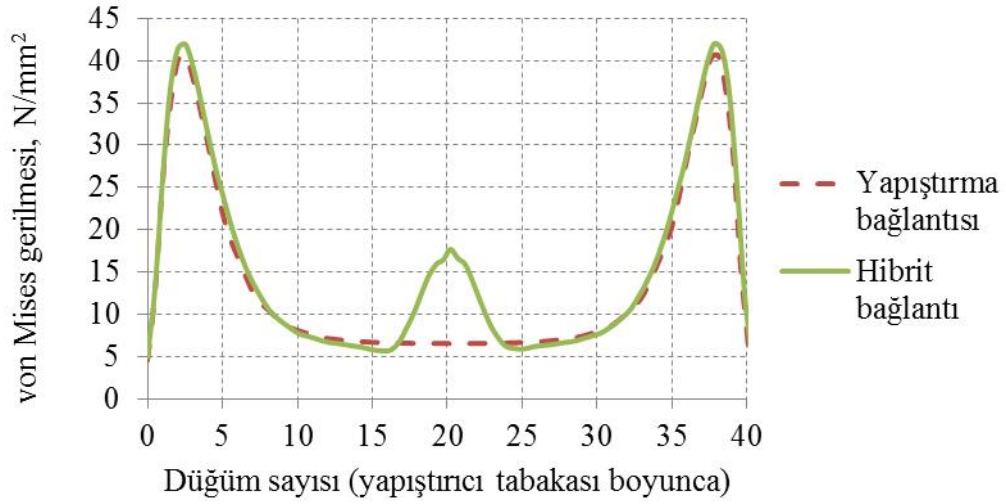
Şekil 4.50 : Hibrit bağlantısında oluşan gerilme dağılımı.

Şekil 4.51’de hibrit bağlantıdaki yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan gerilme dağılımı görülmektedir. Bu gerilmeler çözüm durduktan sonra alınan değerlerdir. Yapıştırıcı tabakasında en yüksek gerilmeler yapıştırma alanının bindirme uzunluğu boyunca uç kısımlarında oluşmuştur. Çekme işleminin başlamasıyla birlikte, plakaların yapıştırma alanlarının bitiş kısımlarından eğilmeye zorlanmasıyla birlikte bu bölgede yapıştırıcı tabakası kayma gerilmesine ilaveten eğilmeye de zorlandığından gerilme değerleri uç kısımlarda yüksek çıkmaktadır. Bu bölgede oluşan gerilmeler yapıştırıcının taşıyabileceği değeri aştıktan sonra sayısal çözüme son verilmiştir.



Şekil 4.51 : Hibrit bağlantıdaki yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımı.

Yapıştırma bağlantısındaki ve hibrit bağlantıdaki yapıştırma tabakalarında oluşan gerilme dağılımları birbirlerine benzemektedir. Şekil 4.52’de yapıştırma bağlantısı ve iki perçinli hibrit bağlantıdaki yapıştırıcı tabakasında oluşan von Mises gerilmeleri verilmiştir. Şekildeki eğrilerden de görüleceği üzere hemen hemen aynı noktalarda eş değer gerilmeler oluşmuştur. Yalnızca Hibrit bağlantıda, perçin sıkma kuvveti dolayısıyla ve perçinler için yapıştırma tabakasına açılan deliklere çekme anında perçinlerin teması neticesinde delik kenarlarında gerilmeler artmıştır.

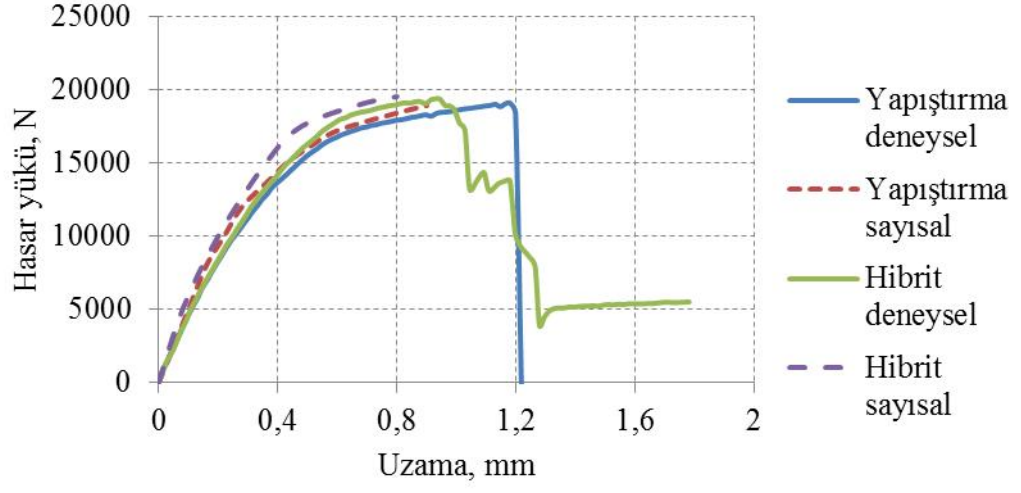


Şekil 4.52 : Bağlantılardaki yapıştırıcı tabakasında oluşan von Mises gerilmeleri.

Şekil 4.53’de yapıştırma bağlantısının ve iki perçinli hibrit bağlantının hasar yükü-uzama eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan alınan hasar yükü değerleri incelendiğinde yapıştırma bağlantılarının ve 2 perçinli hibrit bağlantıların yük taşıma kapasitelerinin yüzey işlemsiz şartlarda ve oda şartlarında birbirine yakın değerlerde olduğu görülecektir. Tablo 4.4’de deneylerden alınan hasar yükü değerleri ve sayısal çözümler sonrasında oluşan hasar yükü değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4 : Yapıştırma bağlantısının ve iki perçinli hibrit bağlantının deneysel çalışma ve sayısal analiz neticesinde elde edilen hasar yükleri.

Bağlantı türü	Hasar yükü değerleri, N					Sayısal
	Deneysel					
	1	2	3	4	Ortalama	
Yapıştırma bağlantısı	19858	19056	18274	16891	18519	18910
Hibrit bağlantı	20420	18355	20878	---	19884	19520



Şekil 4.53 : Yapıştırma bağlantısının ve iki perçinli hibrit bağlantının hasar yükü-uzama eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının ve yapıştırma bağlantısına perçin takviye edilerek oluşturulan hibrit bağlantıların, yapıştırılacak yüzeylerine uygulanan ön yüzey işlemlerinin bağlantıların dayanımını nasıl etkilediği, bu bağlantıların farklı sıcaklık değerleri ve nem gibi çevresel etkenler altında dayanımlarının nasıl değişeceği araştırılmıştır. Bu amaçla;

- Yapıştırma bağlantılarına perçin ilavesinin katkısı, avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmek amacıyla, yapıştırma bağlantıları perçin ile takviye edilerek iki, üç ve dört perçinli hibrit bağlantılar oluşturulmuştur.
- Bağlantı dayanımlarını artırmak amacıyla, yapıştırma yüzeyleri mekanik aşındırmanın yanında, sülfürik asit – sodyum dikromat çözeltisi (FPL) ve sülfürik asit – ferrik sülfat çözeltisi (P2) ile dağlanmıştır.
- Çevresel etkilerin bağlantılar üzerindeki etkilerini görmek amacıyla, test numuneleri -20°C, 0°C, 20°C sıcaklıkta 30 gün, 50°C sıcaklıkta ve % 95 bağıl nemde 30, 60, 90 gün şartlandırılarak çekme deneyleri yapılmıştır.

Çalışma, deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları olmak üzere iki bölümden meydana gelmiştir. Yukarıda bahsedilen tüm koşullar deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal modelleme olarak ise ön yüzey işlem uygulanmamış, 20°C sıcaklıkta yapıştırma ve 2 perçinli hibrit bağlantıların çözümü yapılmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Uygulanan FPL ve P2 asitle dağlama işlemleri ile yapıştırma yüzeyinde daha gözenekli ve homojen bir oksit tabakası oluşmuştur. Yapıştırıcının daha iyi nüfuz edebileceği ve mekanik kilitlemeyi iyileştiren bu oksit tabakası bağlantıların dayanımını sadece aşındırma işlemine göre önemli ölçüde arttırmıştır.
- -20°C, 0°C, 20°C sıcaklıklarda yapıştırma bağlantılarının taşıyabileceği yük değeri % 30 – 40 dolaylarında artmıştır. Mekanik aşındırma ile bağlantılar 1

mm civarında uzama sergilerken dağlanmış numunelerde uzama 4 mm dolaylarına kadar çıkmıştır. 50°C sıcaklıkta ve % 95 nem altında, FPL dağlaması yapılmış bağlantılarda yaklaşık % 6'lık bir dayanım dūřmesi varken P2 dağlaması yapılmış numunelerde yük kaybı % 35'lere ulaşmıştır. Bu dūřüř değerinde dahi P2 dağlanmış numunelerin dayanımları mekanik aşındırılmış numuneler ile yaklaşık olarak aynı değerlerdedir.

- Hibrit bağlantılarda da ön yüzey işlemlerinin bağlantı dayanımlarına olan etkisi yapıştırma bağlantılarına benzer şekildedir. 50°C'nin altındaki sıcaklıklarda iki perçinli bağlantıların dayanımları % 30 kadar artmıştır. Üç ve dört perçinli bağlantılarda dayanım artışı bu oranda olmamıştır. 50°C sıcaklıkta ve % 95 nemde dayanım dūřüřü hem FPL hem de P2 dağlaması yapılmış numunelerde görülmüştür. FPL dağlaması yapılmış 2 perçinli hibrit bağlantılardaki dayanım dūřüřü yapıştırma bağlantılarına nazaran daha yüksektir. Bağlantının taşıyabildiği yük % 20 oranında azalmıştır. P2 dağlaması yapılmış hibrit bağlantılarda ise dayanım dūřüřü ve kopma uzamasındaki azalış FPL dağlanması yapılmış numunelere göre oldukça dūřüktür. Üç ve dört perçinli bağlantılarda her iki dağlama türü için bu dūřüř oranları daha yüksektir.
- Yüzeyi mekanik olarak aşındırılmış numunelerin yük taşıma kapasiteleri sıcaklığa bağlı olarak çok fazla değişmemiştir. Yalnızca kopma uzaması değerleri 50°C sıcaklık altında 1 mm civarında iken 50°C sıcaklıktaki üç bekleme süresinde de 2 mm dolaylarındadır.
- 50°C'nin altındaki sıcaklık değerlerinde yüzeyi mekanik olarak aşındırılmış yapıştırma bağlantılarına perçin ilavesi yük taşıma kapasitesini çok az artırmıştır. Ancak artan yük değerleri perçin sayısıyla doğru orantılı değerildir. Kopma uzaması ise perçin sayısıyla doğru orantılı olarak artmıştır. En fazla uzama ve uzun kopma süresi dört perçinli hibrit bağlantılarda görülmüştür. 50°C sıcaklıkta ise hibrit bağlantıların yük taşıma kapasitesi yapıştırma bağlantısının gerisinde kalmıştır.

- Yüzeyi dağlanmış numunelerde yapıştırma bağlantısına perçin ilavesi mekanik aşındırılmış numunelerde olduğu gibi dayanımı artırmamış, azaltmıştır. Dağlama ile yüzeyin birim alanda taşıyabileceği yük değeri, perçinin yük taşımaya katkısına olan değerinin üzerinde olduğundan, hibrit bağlantılar için perçin deliklerinin açılması nedeniyle oluşan alan kaybından dolayı hibrit bağlantıların taşıyabileceği yük değeri azalmıştır. Hatta perçin sayısının artmasıyla birlikte bağlantının taşıyabildiği yük değeri azalmıştır.
- Yapıştırma bağlantılarında hasar sonrasında bağlantı iki parçaya ayrılmaktadır ve yapısal bütünlük bozulmaktadır. Hibrit bağlantılarda ise yapıştırıcının hasara uğramasından sonra yük perçinler tarafından taşındığından ve yapısal bütünlük perçinler sayesinde bozulmadığından, güvenlik açısından bu durum önemli bir avantajdır.
- Yapılan sayısal analizlerden alınan sonuçlar aynı şartlardaki deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırıldığında birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Genel olarak bir değerlendirme yapılacak olursa; hem yapıştırma bağlantılarında hem de hibrit bağlantılarda yapıştırılacak yüzeylere uygulanan ön yüzey işlemlerinin, bağlantıların yük taşıma kapasitelerini ve kopma uzamalarını artırmış olmasından dolayı malzeme yüzeylerine yapıştırma öncesinde bir ön yüzey işleminin (FPL veya P2 dağlaması) yapılması uygun olacaktır.

Yapıştırma bağlantıları dayanımlarını -20°C ile 50°C altındaki sıcaklıklarda koruyabilmiştir. Fakat 50°C sıcaklıklarda bağlantı dayanımlarında düşüşler gözlemlenmiştir. Ancak genel itibariyle yüzeyi dağlanmış bağlantılarda dayanımda meydana gelen düşüşe rağmen taşınabilen yük değeri, yüzeyi mekanik olarak aşındırılmış bağlantıların en iyi yük taşıma durumuna göre daha fazladır. Dolayısıyla yapıştırma bağlantılarının değişken ortam koşullarında dayanımlarını koruyabilmeleri açısından malzeme yüzeylerine yapıştırma öncesinde bir ön yüzey işleminin (FPL veya P2 dağlaması) yapılması uygun olacaktır.

Yapıştırma bağlantılarına perçin ilavesi, yüzeyi aşındırılmış ve dağlanmış bağlantılarda yük taşıma kapasitesi açısından farklı sonuçlar vermiştir. Bağlantıların yük taşıma kapasitelerini çok belirgin olarak değiştirmemiştir. Dolayısıyla yapıştırma bağlantılarına perçin ilavesinin etkisi, dayanıma olan katkısı açısından değerlendirilmemelidir. Bağlantılarda kopma uzamasını artırması ve hasar

sonrasında bağlantıların iki parçaya ayrılmasını ve yapısal bütünlüğün bozulmasını engellediği için güvenlik açısından yapıştırma bağlantılarının perçinler ile takviye edilmesi avantajlar sağlayacaktır.

Genel olarak yapılan deneylerde, yapıştırma bağlantılarının perçin bağlantılarına göre 3-4 kat daha fazla yük taşıyabildiği görülmüştür. Perçin kullanılarak montajı yapılan ürünlerde yapıştırıcı kullanılarak perçin sayısı azaltılabilir. Özellikle tır dorselerinin imalatı gibi yerlerde montaj çok büyük oranda perçinler ile yapılmaktadır ve bu perçinler ithal edilmektedir. Perçinlerin deliklere yerleştirilmesi el ile yapıldığından bu durum ciddi vakit almaktadır. Yapılan deneylerin sonuçları ışığında, perçinlemenin yapısal bütünlüğü koruduğu düşünülerek, perçin sayısı yaklaşık olarak %50 azaltılabilecektir. Dolayısıyla bağlantılar, yapıştırıcı ile birleştirilerek ve belirli noktalarda perçinler ile takviye edilerek kullanılabilir.

Bu çalışma kapsamına alınmayan farklı yüzey işlemlerinin, bağlantıların dayanımları ve yaşlanma davranışları üzerine olan etkileri çalışılabilir. Ayrıca farklı ortam şartlarının (tuzlu su ortamı, sıvı yakıtlar vb.) yapıştırma bağlantıları ve hibrit bağlantılar üzerindeki etkileri incelenebilir. Sayısal modellemede hibrit bağlantıların çevresel etkenler (sıcaklık, nem) altındaki davranışları çalışılabilir. Komple bir sistem modellenerek yapıştırma ve hibrit bağlantıların davranışları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Adams, R., D.**, 2005. Adhesive bonding science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited, Abington Cambridge CB1 6AH, England.
- Aidun, D.K. and Bennett, R.W.**, 1985. Effect of resistance welding variables on the strength of spot welded 6061 T6 aluminum alloy. *Welding Journal*, Vol. 64, pp. 15–26
- Al-Samhan, A. and Darwish, S. M. H.**, 2003a. Strength prediction of weld-bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Vol. 23, No. 1, pp. 23-28.
- Al-Samhan, A., Darwish, S. M., H.**, 2003b. Finite element modeling of weld-bonded joints. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 3, pp. 587–598.
- ASTM D 907**, 2004. Standard terminology of adhesives, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- ASTM D 1002**, 2001. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal), *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- ASTM D 2651-01**, (Reapproved 2008). Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- ASTM D 3165**, 2000. Standard Test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- ASTM D 3933-98**, (Reapproved 2004). Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing), *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- Balawender, T., Sadowski, T. and Golewski, P.**, 2010. Experimental and numerical analysis of hybrid: clinched–adhesive joint. *In: ACE-X conference*, 8-9 July, Paris.
- Bikerman, J. J.**, 1967. Causes of poor adhesion. *Indus. Eng. Chem.*, Vol. 59, No. 9, pp. 40-44.
- Booth, G.S., Olivier, C.A. and Westgate, S.A.**, 2000. Self-piercing riveted joints and resistance spot welded joints in steel and aluminium. Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2000-01-2681.
- Borsellino, C., DiBellab, G. and Ruisi, V.F.**, 2009. Adhesive joining of aluminum AA6082: The effects of resin and surface treatment. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 29, No. 1, pp. 36-44.

- Ceylan, D.**, 2005. Cıvatalı ve kompozit bağlantılarda gerilme analizi” *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Cognard, P.**, 2005. Handbook of Adhesives and Sealants, Vol. 1, Elsevier.
- Critchlow, G. W. and Brewis, D. M.**, 1996. Review of surface pre-treatment's for aluminum alloys. *International Journal of Adhesion&Adhesives*, Vol. 16, No. 4, pp. 255-275.
- Critchlow, G. W., Yendall, K. A., Bahrani, D., Quinn, A. and Andrews, F.**, 2006. Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminum alloys. *International Journal of Adhesion&Adhesives*, Vol. 26, No. 6, pp. 419-453.
- Cross, J. A.**, 1979. Surface contamination: its genesis, Detection and Control (*K.L. Mittal, ed.*), Vol. 2, pp. 89, Plenum Press, New York.
- Digby, R. P. and Packham, D. E.**, 1995. Pretreatment of aluminum: topography, surface chemistry and adhesive bond durability. *International Journal of Adhesion&Adhesives*, Vol. 15, No.2, pp. 61-71.
- Ebnesajjad, S.**, 2006. Surface treatment of materials for adhesion bonding, William Andrew Publishing, U.S.A.
- Ebnesajjad, S.**, 2008. Adhesives technology handbook. 2 Prerss
- Ergun, S., Karakaya, S., Tarakçılar, A. R. and Ergun, E.**, 2011. Effects of geometric parameters on failure behavior in joined-rivet and single lap laminated composite plate under bending moment. *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 26, pp. 5475-5485.
- Fongsamootr, T., Sutcharikul, T. and Rubin, C. A.**, 2004. Distortion analyses of combined adhesive-riveted lap joints. *Strength, Fracture and Complexity*, Vol. 2, No. 4, pp. 137-147.
- Gomez, S., Onoro, J. and Pecharroman, J.**, 2007. A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint. *International Journal of Adhesives & Adhesives*, Vol. 27, No. 4, pp. 263-267.
- Griffen, C. and Askins, D. R.**, 1998. Non-chromate surface preparation of aluminum, AFRL Wright-Patterson AFB, Report no. AFWAL-TR-88-4135, Ohio.
- Hahn, O., Meschut, G. and Peetz, A.**, 1999. Mechanical Properties of Punch-Riveted and Adhesive Bonded Aluminium Sheets. *Welding and Cutting.*, Vol. 51, No. 7, pp. 130-135.
- Haraga, K., Taguchi, K., Yoda, K. and Nakashima, Y.**, 2003. Assembly technique for control panel enclosures with the combined use of adhesive and rivets and the reduction of energy consumption. *International Journal of Adhesives & Adhesives*, Vol. 23, No. 5, pp. 371-376.
- He, X.**, 2010. Recent development in finite element analysis of clinched joints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 48, No. 5-8, pp. 607-612.
- Houwink, R. and Salomon, G.**, 1965. Adhesion and Adhesives, 2nd edition, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.

- ISO 4587**, 2003. Adhesives-Determination of tensile lap-shear strength of rigid to rigid bonded assemblies
- Kachlik, P. and Klement, J.**, 2005. Influence of ageing on rivet-bonded joint properties. *Aviation*, Vol. 9, No. 2, pp. 24-28.
- Kelly, G.**, 2005. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures*, Vol. 69, pp. 35-43.
- Kinloch, A.J.**, 1980. The science of adhesion. Part 1-Surface and interfacial aspects. *Journal of Materials Science*, Vol. 15, pp. 2141-2166.
- Lee, M. H., Kim, H. Y. and Oh, S. I.**, 2006. Crushing test of double hat-shaped members of dissimilar material with adhesively bonded and self-piecing riveted joining methods. *Thin-walled structure*, Vol. 44, No. 4, pp. 381-386.
- Liu, J. and Sava, T.**, 2001. Stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints combined with rivets under external bending moments. *J. Adhesio Sci.Technol*, Vol. 15, No.1, pp. 43-61.
- Liu, L., Wang, H., Song, G. and Ye, J.**, 2006. Microstructure characteristics and Mechanical properties of laser weld bonding of magnesium and aluminum alloy. *J. Mater. Sci.*, Vol. 42, pp. 565-572.
- Liu, J., Chaudhury, M. K., Berry, D. H., Seebergh, J. E., Osborne, J. H. and Blohowiak, K. Y.**, 2006. Effect of surface morphology on crack growth at a sol-gel reinforced epoxy/aluminum interface. *The Journal of Adhesion*, Vol. 82, No. 5, pp. 487-516.
- Loctite Corporation**, 1998, Loctite worldwide design handbook. Loctite Company, 2. Press.
- Matz, C. W., Hilling, B., Kelm, W., Kock, E.**, 1996. Phosphoric sulphuric acid anodizing (psa), a heavy metal free alternative for high quality surface pretreatment of aluminum, 83rd Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel, Florence, Italy.
- Mazza, J. J., Gaskin, G. B., Piero, W. S. D. and Blohowiak, K. Y.**, 2004. Sol-gel technology for low-VOC, nonchromated adhesive bonding applications, Report No. AFRL-ML-WP-TR-2004-4063, AFRL Wright-Patterson AFB, Ohio.
- Moroni, F. and Pirondi, A.**, 2011. Technology of Rivet: Adhesive Joints. *Advanced Structured Materials*, Vol. 6, pp 79-108.
- Moroni, F., Pirondi, A. and Kleiner, F.**, 2010. Experimental analysis and comparison of the strength of simple and hybrid structural joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 30, pp. 367-379.
- Macbain W. and Hopkins D. G.**, 1925. *J. Phys. Chem.* 29, 88.
- MIL-A-8625**, Anodic Coatings for Aluminum and Aluminum Alloys.
- Munro, S.**, 2008. Laser Weld Bonding of Aluminum Alloy 6013-T6. *PhD Thesis*, Lawrence Technological University.

- Özenç M. and Şekercioğlu, T.**, 2008. Experimental and computational investigation of adhesive joints subjected to impact loads, *Kovove Mater.* Vol. 46, No. 3, pp. 133–138.
- Özenç, M.**, 2007. Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Park, S. Y., Choi, W. J., Choi, H. S., Kwon, H. and Kim, S. H.**, 2010. Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995-2008). *The Journal of Adhesion*, Vol. 86, No. 2, 192-221.
- Petrie, E.M.** 2000. Handbook of adhesives and sealants. McGraw-Hill, New York.
- Petrie, E.M.**, 2002. Plastics and adhesives as adhesives. Handbook of Plastics and Elastomers (C.A. Harper, ed.), 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Pirondi, A. and Moroni, F.**, 2009. Clinch bonded and rivet bonded hybrid joints: application of damage models for simulation of forming and failure. *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 23, No. 10-11, pp. 1547-1574.
- Pocius, A. V.**, 2002. Adhesion science and engineering II, Surfaces Chemistry and Applications, Elsevier.
- Possart, W.**, 1988. Experimental and theoretical description of the electrostatic component of adhesion at polymer/metal contacts, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 8, No. 2, pp. 77-83.
- Prolongo, S. G. and Urena, A.**, 2009. Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminum joints. *International Journal of Adhesion&Adhesives*. Vol. 29, No. 1, pp. 23-31.
- Rider, A.**, 2001. Bond durability of grit-blast and silane treated metallic adherents bonded with room temperature curing adhesives, Defence Science and Technology Organisation, Report no. DSTO-TR-1187, Australia.
- Sadowski, T. and Balawender, T.**, 2011. Technology of clinch-adhesive joints. *Advanced Structured Materials*. Vol. 6, pp 149-176.
- Sadowski, T., Kneć, M. and Golewski, P.**, 2010. Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 30, No. 5, pp. 338–346.
- Sadowski, T., Golewski, P. and Zarzeka-Raczkowska, E.**, 2011. Damage and failure processes of hybrid joints: Adhesive bonded aluminium plates reinforced by rivets. *Computational Materials Science*, Vol. 50, No. 4, pp. 1256–1262.
- Silva, L. F. M., Pirondi, A. and Öchsner, A.**, 2011. Hybrid Adhesive Joints, Springer, Berlin; New York.
- Song, G., Liu L. and Wang, P.**, 2006. Overlap welding of magnesium AZ31B sheets using laser arc hybrid process. *Materials Science and Engineering:A*, Vol. 429, No. 1-2, pp.312-219.

- Sun, P. C. C.**, 2008. Hybrid joining of lightweight vehicle structures. *Doktora Tezi*, Oakland Üniversitesi, Rochester, Michigan.
- Sun, X., Stephens, E. V. and Khaleel, M. A.**, 2007. Fatigue behaviors of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals. *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No. 2, pp. 370-386.
- Şekercioğlu, T.**, 2001. Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi. *Doktora Tezi*, Pamukkale üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Şekercioğlu, T., Rende, H., Gülsöz, A., Meran, C.**, 2003, The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 82-86.
- Şekercioğlu, T.**, 2013. Makina Elemanları Hesap Şekillendirme, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- TS EN 2243-1**, 2006. Havacılık serisi-metalik olmayan malzemeler-Yapısal yapıştırıcılar-Deney metodu_bölüm 1: Tek katlı kayma, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 10002**, 2004 Metalik malzemelerin çekme deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 13887**, 2007. Yapısal Yapıştırıcılar-Metallerin ve Plastiklerin Yapıştırma Öncesi Yüzey Hazırlama Kılavuzu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN ISO 10365**, 2001. Yapıştırıcılar-başlıca kusurların gösterilmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Url-1**, <<http://www.twi-global.com>>, 15/05/2013
- Url-2**, <<http://www.aluminyumsanayi.com>>, 10/08/2012
- Url-3**, <<http://www.metalast.com>>, 10/06/2012
- Varis, J.P.**, 2003. The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, No. 1-3, pp. 242-249.
- Voyutskii. S. S.**, 1963. Autohesion and adhesion of high polymers, Wiley-Interscience, New York.
- Wake, W.C.**, 1986. Adhesion and the Formulation of Adhesives, Structural Adhesives in Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE, C151/86, pp 161-168.
- Yang, S., Gu, L. and Gibson, R. F.**, 2001. Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures. *Composite Structures*, Vol. 51, No. 1, pp. 63-71.
- Zuo, Y., Zhang, J., Zhao, X. and Xiong, J.**, 2008. The bonding strength and corrosion resistance of aluminum alloy by anodizing treatment in a phosphoric acid modified boric acid/sulphuric acid bath. *Science&Technology*, Vol. 202, No. 14, pp. 3149-3156.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Murat ÖZENÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : İzmit, 12/01/1982
Adres : Yunus Emre Mahallesi 6413. Sokak No:9 Kınıklı
Pamukkale / DENİZLİ
Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Yayın Listesi:

- ÖZENÇ, M., and SEKERCİOĞLU, T., 2014: Effect of surface pre-treatment and temperature on the adhesive strength of hybrid aluminum joints. *Kovove Metalic Material*, vol. 52, pp. 1 - 10
- ÖZENÇ, M., ve SEKERCİOĞLU, T., 2013: Yapıştırma ve perçin hibrit bağlantılarının çevresel etkiler altındaki davranışlarının incelenmesi. *Makina İmalat Teknolojileri Kongresi (MATİT)*, Aralık 6-7, 2013 Bursa, Türkiye.
- ÖZENÇ, M., ve SEKERCİOĞLU, T., 2012: Alüminyum Alaşımlarının Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi, *14th International Materials Symposium (IMSP)*, October, 10-12, 2012 Denizli, Turkey.
- ÖZENÇ, M., ve SEKERCİOĞLU, T., 2012: Metallerin Yapıştırılmasında yüzey hazırlama yöntemlerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 53, sayı 627 s: 43-50
- ÖZENÇ, M., and SEKERCİOĞLU, T., 2008: Experimental and computational investigation of adhesive joints subjected to impact loads. *Kovove Metalic Material*, vol. 46, pp. 133 - 138
- ÖZENÇ, M., ve SEKERCİOĞLU, T., 2007: Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışları. *Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi (MATİT)*, Kasım 24-25, 2007 Konya, Türkiye.