

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

**NANO KARBON KATKILI DÖNEN KOMPOZİT DİSKLERDE
HASAR ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UĞUR GEZGİNCİ

DENİZLİ, OCAK - 2016

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



**NANO KARBON KATKILI DÖNEN KOMPOZİT DİSKLERDE
HASAR ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UĞUR GEZGİNCİ

DENİZLİ, OCAK - 2016

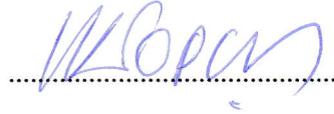
KABUL VE ONAY SAYFASI

Uğur GEZGİNCİ tarafından hazırlanan “Nano Karbon Katkılı Dönen Kompozit Disklerde Hasar Analizi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 16.12.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

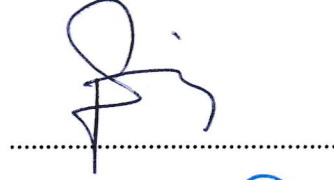
Jüri Üyeleri

İmza

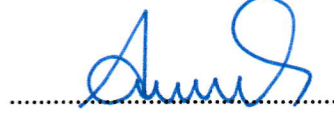
Danışman
Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU



Üye
Doç. Dr. Emin ERGUN
Pamukkale Üniversitesi



Üye
Doç. Dr. Ayşe Öndürücü
Süleyman Demirel Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13.01.2016 tarih ve ..02/23.. sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinatörlüğü tarafından 2014FBE056 nolu proje ile desteklenmiştir.**

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.



Uğur GEZGİNCİ

ÖZET

NANO KARBON KATKILI DÖNEN KOMPOZİT DİSKLERDE HASAR ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UĞUR GEZGİNCİ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MUZAFFER TOPÇU)

DENİZLİ, ARALIK - 2015

Bu tez çalışması kapsamında, karbon nanotüp (KNT) katkı (% 0.5, % 1 ve % 2) ve katkısız cam elyaf takviyeli epoksi bazlı kompozit diskin analizi analitik ve nümerik olarak hesaplanmıştır. Tabakalı kompozit levhalar, el yatırması yöntemiyle pre-preg şeklinde üretilmiştir. Üretilen levhalardan elde edilen numunelerle, kompozit disk analizinde kullanılmak üzere gerekli mekanik özellikler belirlenmiştir. Farklı iç basınç ve açısız hız altında kompozit diskte oluşan radyal ve teğetsel gerilmeler nümerik olarak ANSYS® programı yardımıyla incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, KNT'li kompozit diske etkiyen dış kuvvetlerin etkisi altında teğetsel ve radyal yöndeki gerilmeler ile radyal yerdeğiştirmelerde önemli ölçüde etki ettiği tespit edilmiştir. Oluşan gerilmeler doğrultusunda farklı oranlardaki KNT'nin etkisi, kompozit disk için yapılan hasar analizinde açıkça görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Karbon nanotüp, pre-preg, kompozit disk

ABSTRACT

FAILURE ANALYSIS OF NANO CARBON DOPED ROTATING COMPOSITE DISCS

MSC THESIS

UĞUR GEZGİNCİ

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR:PROF. DR. MUZAFFER TOPCU)

DENİZLİ, DECEMBER 2015

In the scope of this thesis, analysis of carbon nanotube (CNT) doped (0.5%, 1% and 2%) and pure glass fiber reinforced epoxy-based composite disc were calculated analytically and numerically. Laminated composite plates were produced as hand lay-up method of pre-preg. The required mechanical properties to be used in the composite disc analysis were determined by obtained samples from produced plates. Radial and tangential stresses of the composite disc under different internal pressure and angular velocity have been investigated as numerically with the help of the ANSYS® program. As a result of the analysis, tangential-radial stresses and radial displacements under the influence of the external forces acting of composite disc with CNT were observed to be change substantially. Accordance with the consisting stresses, failure analysis of composite disc was made and the effect of different rates CNTs was seen.

KEYWORDS: Carbon nanotube, pre-preg, composite disc

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|-----------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | iv |
| TABLO LİSTESİ..... | vi |
| SEMBOL LİSTESİ..... | vii |
| KISALTMALAR | viii |
| ÖNSÖZ..... | ix |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Literatür Çalışması | 4 |
| 2. MATERYAL VE METOD | 8 |
| 2.1 Polimer Kompozitler | 8 |
| 2.1.1 Polimer Reçineler | 8 |
| 2.1.2 Fiberler..... | 9 |
| 2.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemi..... | 11 |
| 2.2.1 Vakum yardımcı reçine transferi yöntemi..... | 11 |
| 2.2.2 El yatırması yöntemi ve pre-preg prosesi | 12 |
| 2.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları ve Zayıf Yönleri | 13 |
| 2.4 Katkı Malzemeleri | 14 |
| 2.5 Karbon Nanotüpler | 16 |
| 2.6 Karbon Nanotüplerin Polimer İçerisinde Dağıtılması..... | 21 |
| 2.6.1 Fiziksel dağıtma yöntemleri..... | 22 |
| 2.6.2 Kimyasal dağıtma yöntemleri..... | 23 |
| 3. MALZEME ÜRETİMİ..... | 26 |
| 3.1 Katkılı Kompozit Malzemelerin Üretimi | 26 |
| 3.2 Kompozit Disk İçin Gerekli Mekanik Özelliklerin Tespiti..... | 31 |
| 4. KOMPOZİT DİSKTE ELASTİK GERİLME ANALİZİ | 36 |
| 4.1 Analitik Genel Elastik Çözüm..... | 36 |
| 4.1.1 Dönmeye Maruz Kompozit Diskin Analitik Çözümü | 41 |
| 4.1.2 İç Basınca Maruz Kompozit Diskin Analitik Çözümü..... | 45 |
| 4.1.3 İç Basınca ve Dönmeye Maruz Kompozit Diskin Analitik Çözümü | 49 |
| 4.2 Nümerik Analiz | 53 |
| 4.3 Hasar Analizi..... | 58 |
| 4.3.1 Tsai-Wu Gerilme Teorisi'ne Göre Diskteki Hasar Analizi | 58 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER | 65 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 67 |
| 7. ÖZGEÇMİŞ | 77 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: Epoksi diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı | 9 |
| Şekil 2.2: Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan farklı türlerde fiber yapıları | 10 |
| Şekil 2.3: Vakum yardımcı reçine transferi yöntemiyle üretilen KNT katkıli kompozit levha | 11 |
| Şekil 2.4: VARTM ile kompozit parça üretiminin genel olarak şematik gösterimi | 12 |
| Şekil 2.5: El yatırması olarak pre-preg kompozit parça üretiminin şematik gösterimi | 13 |
| Şekil 2.6: FTP kompozitlerdeki genel takviye türleri/geometrileri ve yüzey alanı/hacim oranları | 16 |
| Şekil 2.7: Grafit tabakanın yuvarlanması sonucu oluşan TDKNT yapısı | 17 |
| Şekil 2.8: ÇDKNT yapısı | 17 |
| Şekil 2.9: Polikarbonat matris içinde ağırlıkça %1 ÇDKNT'lerin dağılım çeşitleri a) polimer matris içinde ÇDKNT kümelenmeleri b) homojen dağılım | 20 |
| Şekil 2.10: KNT'lerde matris içerisindeki rastlanabilecek hasar şekillerinin şematik gösterimi a) başlangıç hali, b) Zayıf ara yüzey yapışması nedeniyle KNT'lerin sıyrılması, c) KNT'lerin güçlü ara yüzey yapışması ile yüksek ve hızlı şekil değişikliği nedeniyle kırılması, d) Teleskopik sıyrılma: KNT'lerin dış yüzeyinin yüksek ara yüzey yapışması sonucu kırılması ile iç çeperlerin sıyrılması e) KNT'lerin çeperlerinin bir kısmının matristen ayrılması fakat kalan yüzeylerin mükemmel ara yüzey yapışması ile yük transferinin etkin bir biçimde gerçekleşmesi | 21 |
| Şekil 2.11: Karbon nanotüplerin polimer matris içerisinde dağıtılmasında kullanılan bazı fiziksel ve kimyasal yöntemler | 22 |
| Şekil 2.12: KNT'lerin yüzeylerinin kuvvetli asitler ile yıkanması ile oluşan fonksiyonel grupların şematik gösterimi | 24 |
| Şekil 2.13: Yüzey aktifleyici madde ile sarılmış karbon nanotübe ait şematik gösterim | 25 |
| Şekil 3.1: 125x125 cm ebatlarındaki cam elyaf kumaş | 27 |
| Şekil 3.2: Epoksi ile KNT'nin karıştırılması | 28 |
| Şekil 3.3: Epoksi reçine karışımının cam elyaf kumaşlara emdirilmesi | 29 |
| Şekil 3.4: 40x40 cm ebatlarındaki cam elyaf-reçine karışımı | 29 |
| Şekil 3.5: Katmanlanan pre-preg kumaşların 120 °C ye ısıtılmış hidrolik preste kurlenmesi | 30 |
| Şekil 3.6: Hidrolik presten çıkarılan kurlenmiş kompozit plakalar | 30 |
| Şekil 3.7: Çekme ve basma test cihazı | 31 |
| Şekil 3.8: Çekme deney numunesi | 32 |
| Şekil 3.9: Çekme deney numunesi | 33 |
| Şekil 3.10: Basma deney numunesi | 34 |
| Şekil 3.11: Kayma modülü deney numunesi | 35 |
| Şekil 4.1: Kompozit disk | 36 |
| Şekil 4.2: Açılmalı hıza maruz kompozit disk | 41 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.3: 900 d/dk açısal hızla dönen diskte oluşan gerilme dağılımı a) radyal ve b) teğetsel | 44 |
| Şekil 4.4: 900 d/dk açısal hızla dönen diskte oluşan radyal yöndeki yerdeğiştirmeler..... | 45 |
| Şekil 4.5: İç basınca maruz kompozit disk..... | 46 |
| Şekil 4.6: 100 MPa iç basınca maruz diskte oluşan gerilme dağılımı a) radyal ve b) teğetsel | 48 |
| Şekil 4.7: 100 MPa iç basınca maruz diskte oluşan radyal yöndeki yerdeğiştirmeler..... | 49 |
| Şekil 4.8: İç basınç ve açısal hızla maruz kompozit disk..... | 50 |
| Şekil 4.9: 100 MPa iç basınca ve 900 d/dk açısal hızla maruz diskte oluşan gerilme dağılımı a) radyal ve b) teğetsel..... | 52 |
| Şekil 4.10: 100 MPa iç basınca ve 900 d/dk açısal hızla maruz diskte oluşan radyal yöndeki yerdeğiştirmeler..... | 53 |
| Şekil 4.11: ANSYS’de malzeme tanımlamalarının yapılması..... | 55 |
| Şekil 4.12: Sonlu eleman ağının oluşturulması..... | 56 |
| Şekil 4.13: 100 MPa iç basınca maruz % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşan gerilme analizi a) teğetsel ve b) radyal | 56 |
| Şekil 4.14: 900 d/dk açısal hızla maruz % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşan gerilme analizi a) teğetsel ve b) radyal | 57 |
| Şekil 4.15: 100 MPa iç basınca ve 900 d/dk açısal hızla maruz % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşan gerilme analizi a) teğetsel ve b) radyal..... | 57 |
| Şekil 4.16: 100, 200, 300 ve 400 MPa iç basınca maruz diskte oluşan gerilme dağılımı a) teğetsel ve b) radyal..... | 60 |
| Şekil 4.17: Farklı İç basınçlara maruz kompozit disk için hasar analizi..... | 61 |
| Şekil 4.18: % 0.5 KNT katkıli 600, 900, 1200 ve 1500 d/dk açısal hızla maruz kompozit diskte oluşan gerilme dağılımı a) teğetsel ve b) radyal..... | 62 |
| Şekil 4.19: Farklı açısal hızlara maruz kompozit disk için hasar analizi | 64 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1: Karbon nanotüplerin önemli bazı özellikleri | 18 |
| Tablo 3.1: Karbon nanotüp özellikleri | 26 |
| Tablo 3.2: Cam elyaf ve Epoksi reçinenin mekanik özellikleri | 26 |
| Tablo 3.3: Üretilen kompozitlerin çekme deneyi sonuçları | 33 |
| Tablo 3.4: Üretilen kompozitlerin çekme deneyi sonuçları | 34 |
| Tablo 3.5: Üretilen kompozitlerin kayma modülü deney sonuçları | 35 |
| Tablo 4.1: Farklı açısal hızlara maruz kompozit diskte oluşan teğetsel gerilmeler (MPa) | 63 |
| Tablo 4.2: Farklı açısal hızlara maruz kompozit diskte oluşan radyal gerilmeler (MPa) | 63 |

SEMBOL LİSTESİ

| | | |
|-----------------|---|-------------------------------|
| E_1 | : | 1 yönündeki elastisite modülü |
| E_2 | : | 2 yönündeki elastisite modülü |
| ν_{12} | : | Poisson oranı |
| X_t | : | X yönündeki kopma mukavemeti |
| Y_t | : | Y yönündeki kopma mukavemeti |
| X_c | : | X yönündeki basma mukavemeti |
| Y_c | : | Y yönündeki basma mukavemeti |
| G_{12} | : | Kayma modülü |
| S | : | Kayma mukavemeti |
| ρ | : | Yoğunluk |
| ω | : | Açısal hız |
| P | : | İç basınç |
| σ_r | : | Radyal gerilme |
| σ_θ | : | Teğetsel gerilme |
| u_r | : | Radyal yer değiştirme |
| r | : | Yarıçap |
| r_i | : | İç yarıçap |
| r_o | : | Dış yarıçap |

KISALTMALAR

| | | |
|--------------|---|---|
| KNT | : | Karbon nanotüp |
| TDKNT | : | Tek duvarlı karbon nanotüp |
| ÇDKNT | : | Çok duvarlı karbon nanotüp |
| FTP | : | Fiber takviyeli polimer |
| VARTM | : | Vakum yardımcı reçine transferi yöntemi |
| KBY | : | Kimyasal buhar yoğunlaştırma |

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda rehberliğinden, sabrından ve bana da aşladığı şevkinden dolayı danışman hocam Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU'ya teşekkür eder, öğrencisi olmaktan dolayı duyduğum mutluluğu ifade etmek isterim.

Doç. Dr. Emin ERGUN hocama tez çalışmam boyunca değerli öngörülerini ve desteği nedeniyle minnetlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen; kompozit malzemelerin üretiminde ve mekanik özelliklerin belirlenmesindeki destekleri için Arş. Gör. Furkan TEKİN'e, Necati ÜZÜMCÜ'ye ve Berkant DİNDAR'a, her türlü destek ve anlayışlarından dolayı oda arkadaşlarım Arş. Gör. Osman YELER ve Arş. Gör. M. Alper SARIİPEK'e, ayrıca bölümümüzdeki diğer kıymetli hocalarıma katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında finansal desteklerini 2014FBE056 nolu proje ile sunan Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve maddi desteklerinden dolayı Türkiye Bilimler Akademisi'ne (TÜBA) teşekkür ederim.

114M405 numaralı projeye yaptığı finansal desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 'a teşekkür ederim.

Karbon nanotüpleri temin eden ve kompozit levhaların üretimindeki yardımlarından dolayı FİBERMAK firmasına ve çekme-basma numunelerinin kesimini yapan ZÜMRÜT CAM firmasına teşekkür ederim.

Son olarak, gösterdiği anlayış, sabır ve desteğinden dolayı eşime ve her daim manevi desteklerini eksik etmeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Teknoloji, malzemeler üzerine yapılan çalışmalar ve bu yöndeki ilerlemelerle gelişme göstermiştir. Malzemeler tek başlık altında değil organikler, inorganikler, kompozitler, metaller, ametaller ve polimerler gibi birçok alt dallara ayrılarak incelenmektedir. Bu dallar içerisinde günümüzde en yaygın kullanılanlardan birisi kompozit malzemelerdir. Endüstriyel olarak otomotiv, havacılık ve tekstil sektörlerinde kompozit malzemeler hakettiği önemi kazanmış ve gelişen günümüz teknolojisine adapte edilmiştir.

Kompozitler genel olarak, makro düzeyde kimyasal ve fiziksel özellikleri birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu yeni malzemelerdir. Kompozit yapılar fiber ve matris denilen iki farklı ana yapıya sahiptir. Fiberler kompozit yapının mekanik mukavemetini sağlarken, matris ise fiberleri bir arada tutar ve fiberler arasında gerilmenin aktarılmasını sağlar. Ayrıca matris, fiberleri fiziksel ve kimyasal dış etkenlerden muhafaza ederek kompozit malzemenin yapısal olarak oluşmasını sağlayan kısımdır. Uygun metal alaşımları matris malzemesi olarak kullanılabileceği gibi günümüzde daha çok reçineler kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin, metal malzemelere nispeten tercih edilmelerinin nedenleri aşağıda sıralanan maddeler halinde verilmiştir:

- Ağırlık oranının düşük olması
- Korozyon probleminin olmaması
- Yorulma dirençlerinin oldukça yüksek olması
- Durabilite
- Ham malzeme temin kolaylığı
- Kopma uzamasının metallere göre daha yüksek olması.

Son yıllarda nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımını artmıştır. Nanopartiküller, fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde uygulanabilecek en uygun dolgu malzemeleri arasındadır. Ayrıca, nanopartiküllerin türlerine ve uygulanma şekillerine bağlı olarak

Üretilen nanokompozit malzemelerin elektriksel ve ısıl özelliklerine de katkıda bulunulabilir. Dolgu malzemesi olarak kullanılabilir nanotkller arasında sahip oldukları benzersiz özellikleri sayesinde karbon nanotüpler (KNT) büyük öneme sahiptirler (Iijima 1991; Oberlin ve Endo 1976; Thostenson ve diğ. 2001). KNT'ler yüksek rijitliğe ve mukavemete (Thostenson ve Chou 2003; Yu ve diğ. 2000^a; Yu ve diğ. 2000^b; Li ve Chou 2003), 1300 m²/g'a kadar ulaşabilen spesifik yüzey alanı (Peigney 2001) ve birkaç binlere ulaşabilen boy/çap oranları ile polimer kompozitlere takviye olarak kullanılabilir önemli yapılarıdır. Aynı zamanda KNT'ler sahip oldukları grafitik yapıları sayesinde yüksek ısıl iletkenliğe, yarı-metal veya metal gibi davranabilen elektriksel iletkenliğe sahiptirler.

Bu zellikler ele alındığında, KNT'ler polimerler içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılması ile mekanik özellikleri iyileştirilmiş polimerler ve hasar analizi yapabilen çok fonksiyonlu malzemeler elde edilebilir. Bunun için öncelikle dikkat edilmesi gereken nokta, KNT'lerin polimer reçineler içerisinde düzgün bir şekilde dağıtılmasıdır. Fakat KNT'ler büyük yüzey alanları nedeniyle birbirlerini güçlü Van der Waals bağları ile çektikleri için polimer içerisindeki dağılımları zordur. Öte yandan, KNT'lerin yüzey alanlarının büyük olması etkin bir gerilme aktarımının gerçekleştirilebilmesi için önemli bir avantajdır. KNT'lerin yüzey alanlarının büyüklüğü, çaplarına ve duvar sayılarına bağlı olup en büyük yüzey alanı tek duvarlı karbon nanotüplerde (TDKNT) görülmektedir. Buna ek olarak, TDKNT'ler çok duvarlı karbon nanotüplere (ÇDKNT) nispeten daha büyük boy/çap oranlarına sahiptir. TDKNT'ler yüzey alanlarını aza indirmek için genellikle kümeler veya yönlenmiş demetler halindedirler (Gojny ve diğ. 2005^a).

ÇDKNT'ler eş merkezli duvarlardan meydana gelmiş olup yüzey alanları 200 m²/g veya daha azdır. Bu sebeple, ÇDKNT'lerin dağıtılabilirliği daha kolaydır. Fakat düşük yüzey alanına sahip oldukları için reçine içerisinde gerilme aktarımı açısından etkinlikleri de azdır. Bunun dışında, eş merkezli duvarlar arasındaki gerilme aktarımı nispeten zayıf olan van der Waals bağları ile gerçekleştiği için ÇDKNT'ler ayrıca bir dezavantaja sahiptirler (Gojny ve diğ. 2005^b).

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda KNT'leri polimerler içerisinde etkin bir şekilde fiziksel olarak dağıtılabilmek için ultrasonikasyon, kayma karıştırması ve silindir arasından geçirme yöntemleri gibi birçok yöntem kullanılmıştır (Ma ve diğ.

2010). Fakat bu yöntemlerin çoğunluğu ya küçük kapasitelere sahip oldukları ya da yeterince güçlü olmadıkları için etkinlikleri istenilen düzeylerde değildir. KNT'leri epoksi reçineler içinde dağıtmak için kullanılan en yaygın metot sonikasyon işlemidir. Sonikasyon işlemi ile ses dalgaları sayesinde KNT kümeleri dağıtılır ve epoksi içerisinde düzgün bir dağılım elde edilebilir. Fakat bu metot, küçük hacimli epoksi reçineler içerisine KNT'lerin dağıtılmasında etkilidir. Ayrıca, literatürde ses dalgaların KNT'lerin kırılmalarına sebebiyet vermek suretiyle boy/çap oranlarının düştüğüne dair çalışmalar vardır (Lu ve diğ. 1996; Shelimov ve diğ. 1998; Zhang ve diğ. 2001). KNT'lerin düşük boy/çap oranlarına sahip olmaları etkili bir yük aktarımını sağlayacağı için, polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Karbon nanotüp katkılı nanokompozitlerin geliştirilmesinde bir diğer önemli nokta ise KNT'ler ile matris arasındaki ara yüzey yapışma dayanımıdır. Matristen KNT'lere yeterli gerilme aktarımının sağlanması durumunda KNT'lerin sahip olduğu mükemmel mekanik özellikler devreye sokulabilir. KNT'ler ve matris arasındaki ara yüzey bağlanması KNT'lerin fonksiyonelleştirilmesi ile sağlanabilir. KNT'lerin yüzeylerinde oluşturulan fonksiyonel gruplar (amino-, karboksil-, glisidil-) epoksi reçine ile kovalent bağlar kurarak ara yüzey gerilme aktarımını iyileştirir. Nanokompozitin mekanik özelliklerine KNT'lerin fonksiyonelleştirilmesinin etkisi simülasyonlar ile tahmin edilmiş (Frankland ve diğ. 2002) ve deneysel olarak da çalışılmıştır (Gojny ve diğ. 2004; Gojny ve diğ. 2003, Bai ve Alloui 2003).

Mekanik özellikler açısından geleneksel kompozitlerde yapılan malzeme tasarımında fiber doğrultuları değiştirilerek istenilen doğrultularda yüksek mekanik özellikler elde edilir. Fiber takviyeli polimer (FTP) kompozitlere KNT'lerin takviye edilmesi konusu detaylı olarak düşünüldüğünde, FTP kompozitlerin "zayıf halkası" olarak bilinen tabakalar arası bölgede takviyenin etkisi önem kazanmaktadır. FTP kompozitlerde tabakalar arası bölge fiber takviyesinin olmadığı bölge olup, kompozit malzemenin servis ömrü sırasında matris çatlaması veya tabaka ayrılması gibi çeşitli nedenlerle hasara uğrayarak kompozit malzemenin işlevini yitirmesine neden olabilir (Wicks ve diğ. 2010). Nispeten zayıf tabakalar arası bölge özellikleri, tabakalı kompozit sistemlerin genel performansını kısıtlar. Bu bağlamda, yukarıda bahsedilen spesifikasyonları sebebiyle KNT'ler tabakalı kompozit malzemelerin "zayıf halkası"

olarak adlandırılan tabakalar arası dayanımının iyileştirilmesi ve tabakalı kompozit malzemeleri hasara uğratmadan servis performansının arttırılması hususunda önemli bir dolgu malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmanın ana amacı, iç basınca ve/veya açısal hıza maruz cam elyaf takviyeli kompozit disklerle, farklı oranda KNT eklenerek, KNT'lerin radyal ve teğetsel gerilmelere, ayrıca radyal yöndeki yerdeğiştirmeye etkisini incelemektir. Bu kapsamda, KNT'lerin cam fiber yüzeylerine kimyasal olarak bağlanabilmesi için fonksiyonel KNT'ler kullanılmış ve epoksi reçinelerle sonikatör yardımıyla fiziksel olarak karıştırılmıştır. Ayrıca diskler, tabakalı kompozit levhalardan su jeti yardımı ile disk şeklinde üretilmiştir. Tabakalı kompozit levhalar, el yatırması yöntemiyle pre-preg şeklinde üretilmiştir. Üretilen levhalardan elde edilen numunelerle, kompozit disk analizinde kullanılmak üzere gerekli mekanik özellikler belirlenmiştir. Farklı iç basınç ve açısal hız altında kompozit diskte oluşan radyal ve teğetsel gerilmeler nümerik olarak ANSYS 14.5[®] programı yardımıyla incelenmiştir. Bu doğrultuda, farklı iç basınç ve açısal hızlar sonucunda oluşan gerilmelerle kompozit diskin hasar analizi de yapılmıştır.

1.1 Literatür Çalışması

Sürekli fiber takviyeli polimer (FTP) kompozitler uçaklar, botlar, otomobiller, rüzgâr türbinleri ve spor donanımları gibi birçok yüksek performanslı yapılarda ana malzeme olarak tercih edilirler. Tabakalı kompozit malzemeler, fiber tabakalarının uygun reçineler ile birleştirilmesi sonucunda yapının tamamının yüksek dayanıma sahip olması için tasarlanırlar.

Khan ve Kim (2011), FTP kompozitlerin kendi yüksek spesifik mukavemet ve sertlikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında geniş bir yelpazede kullanılmaya başladığını belirtmişlerdir. Ancak uzay araçları ve askeri bileşenleri gibi yapısal uygulamaları için zorlu fiziksel ve mekanik özellik gereksinimlerini tam olarak karşılamadığını ifade etmişlerdir. Karbon nanotüplerin mükemmel mekanik, termal ve elektrik özellikleri nedeniyle, FTP kompozitlerin zayıf özelliklerini geliştirmek ve işlevsellik kazandırılmasının mümkün olmasından bahsetmişlerdir. Yaptıkları çalışmada bugüne kadar yapılan ilerlemeyi gözden geçirip, FTP kompozitlere KNT

entegrasyonu için geliştirilen teknikleri araştırmışlardır. Önemli zorluklar ve gelişmiş uygulamalar için büyük ölçüde KNT-FTP kompozitlerin gelişiminde geleceği de vurgulanmıştır.

Ma ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, karbon nanotüplerin olağanüstü mekanik ve işlevsellik özelliklerini sunmakta olduğunu belirtmişlerdir. Polimer nanokompozitlerdeki etkili takviye, uygun dağılımı ve KNT'ler ve polimer matris arasında uygun yüzey yapışması gibi faktörlerin olumlu etkisinden bahsetmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında KNT ve KNT/polimer nanokompozitler için önemli iki belirli konuya dikkat çekilmiştir. Bunlardan ilki KNT'lerin fonksiyonelleştirilmesi ve reçinedeki dağılımlarına dair teknikler, ikincisi ise KNT/polimer nanokompozitlerin özelliklerine KNT dispersiyonu ve işlevsel etkileridir.

Gkikas ve diğ. (2012) çalışmalarında, ultrasonik karıştırıcıyla %0,5 ve %1 KNT oranlarına sahip polimer reçine karıştırarak nanokompozitin termomekanik özelliklerini incelemişlerdir. Karışımı farklı sürede sonikasyona tabi tutarak optimum sonikasyon süresini ve genliğini de belirlemeyi amaçlamışlardır.

Siddiqui ve diğ. (2011), KNT içeren karbon FTP kompozitleri solventsiz pre-preg olarak üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada KNT'nin yüksek hızlı kayma karıştırması yapılmasının ve fonksiyonelleştirmenin, KNT-epoksi nanokompozitinin viskozitesinin azalmadaki etkisi görülmüştür.

Takviye elemanı olarak KNT'lerin kullanıldığı birçok çalışmanın sonuçları arasında farklılıklar vardır (Alloui ve diğ. 2002; Montazeri ve diğ. 2010; Lau ve Hui 2002). Elastisite modülünün bir çalışmada iki katına çıkarıldığı gösterilirken (Alloui ve diğ. 2002), başka bir çalışmada ise azaldığı belirtilmiştir (Lau ve Hui 2002). Ara yüzey kayma dayanımı için de benzer sonuçlara literatürde rastlanabilir (Böger ve diğ. 2008). Kompozitlerin makroskobik özellikleri sadece fiber ve matris tarafından belirlenmez. Bu iki bileşen arasındaki ara yüzey özellikleri de makroskobik özelliklerin belirlenmesinde önemli rol oynar (Zhang 2000). Kompozite uygulanan kuvvet fiber ve matris arasındaki ara yüzeyden aktarılır. Bu sebeple fiber/matris ara yüzey kayma dayanımı kompozitlerde tokluk ve dayanımı etkileyen önemli bir faktördür (Dirand ve diğ. 1996). ÇDKNT'lerin ilavesi ile mekanik özelliklerin

literatürde farklılık göstermesi, matris, karbon nanotüp ve fiberler arasındaki karmaşık ilişkilerin bir göstergesi olabilir (Eskizeybek 2012).

KNT'nin bu muhteşem özelliklerinin buhar ve gaz türbin rotorlarında, turbo jeneratörlerde, içten yanmalı motorlarda, turbo jet motorlarda, pistonlu ve santrifüj kompresörlerde ve bunun gibi birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan disklerde değerlendirilmesi kullanım yeri ve amacına göre birçok avantaj sağlayabilir. Diskler, kullanım yerlerine göre aksel gerilmelere, titreşime ve yorulmaya maruz kalırlar. Buna bağlı olarak disklerin daha güvenli ve optimum ebatlarda olmasını sağlamak, mühendislik tasarımında önemli bir konudur. Geometrik parametreleri ve fiziksel özellikleri uygun bir şekilde değiştirilerek optimum ebatlar ve daha güvenilir bir tasarım elde edilebilir. Optimizasyon sürecindeki geometrik parametrelere örnek olarak çap ve kalınlık, malzeme özelliklerine örnek olarak ise yoğunluk, elastisite modülü ve poisson oranı gösterilebilir. Bu sebeple tezin asıl amacı, disklere nano ölçüde katkı yapıp, kompozit bir yapı elde ederek optimizasyon parametrelerinin de göz önünde bulundurulmasıyla, daha mukavim ve hafif disklerin elde edilmesidir.

Topçu ve diğ. (2008), alüminyum kompozit bir diskin lineer azalan termal yük dağılımı altında elastik-plastik termal gerilme analizini yapmıştır. Ortotropik ve ortasında delik bulunan alüminyum metal matrisli kompozit bir diskin elastik-plastik termal gerilme analizi analitik olarak yapılmıştır. Eğrisel olarak çelik fiberle güçlendirilmiş alüminyum kompozit disk hidrolik preste üretilmiştir. Mekanik özellikleri gerinim ölçerlerle tespit edilmiştir. Termal yük altında gerilmeleri hesaplayan bilgisayar programları geliştirilmiştir. Oluşan radyal, teğetsel ve artık gerilmeler incelenmiştir.

Karakaya (2012), kompozit disk yayların farklı kesit alanlarında ve hibrit tip olarak, yük kapasitesi, kütle, hibritleşme karakteristiği ve maliyet açısından incelemesini yapmıştır. Disk yaylar Abaqus sonlu elemanlar programıyla iki rijit kütle arasında sıkıştırılarak analiz edilmiş, yük altında flambaj karakteristikleri, analitik ve deneysel çalışmalar karşılaştırılarak elde edilmiştir. Daha sonra farklı kesitlerdeki hibrit kompozit diskler modellenmiştir. Trapez A tipindeki yayın yük kapasitesi ve kütle bakımından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak karbon epoksi katmanlı dış tabakalı kompozitler daha avantajlıdır. Dış kabuk kuvvete maruz kalacağından bu tabaka özellikle güçlenmelidir.

Çallıoğlu (2004) yaptığı çalışmada, ortotropik dönen delikli disklerde termal elastik gerilme analizini analitik olarak yapmış ve çözümü için polinom fonksiyonları kullanmıştır. Disk, rg cam elyaf kompozitten imal edilmiştir, bu sebeple kartezyen koordinatlarda işlem yapılmıştır. Diskin i yüzeyinden dış yüzeyine radyal kesit boyunca parabolik değişen sıcaklıklar seçilmiş ve çözümler elde edilmiştir. Radyal ve teğetsel gerilme bileşenleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Bu çalışmada, yukarıdaki literatüre ek olarak el yatırması yöntemiyle pre-preg sürecine maruz kalan kompozit diskteki reçineye belirli oranlarda KNT ilave edilmiştir. Böylece vakum yardımlı reçine transferi yöntemi (VARTM) gibi yöntemlerde görülen kompozitte hava kabarcığı kalması, KNT'nin rijit dağılmaması ve dolayısıyla ortaya çıkan yükün eşit bir şekilde iletilmemesi sorunlarıyla karşılaşılmamıştır. Ayrıca çalışmanın amacı, el yatırması yöntemiyle pre-preg olarak üretilen tabakalı nanokompozitlerde gerekli mekanik özellikleri belirleyerek, değişik çaplardaki dönen disklerde, i basınçlı disklerde ve dönen aynı zamanda iç basınca sahip disklerdeki gerilme durumunu hem analitik olarak hem de ANSYS  paket programı kullanılarak nümerik olarak incelemek ve karşılaştırmasını yapmaktır.

Sonuç olarak, KNT'lerin kompozit disklerde elastik gerilmeye etkisi malzeme ve mekanik bilimleri açılarından daha detaylı incelenmesi gereken konulardan biridir. Üretim yönteminin etkisi, malzemelerin çeşitliliği, fonksiyonelleştirme, matris özellikleri, cam fiber/matris ara yüzey özelliklerinin anlaşılmaya çalışılması bu tezin hedefleri olup, hibrit kompozitlerin farklı uygulamalar için nasıl tasarlanması gerektiği hususunda fikir vermeye çalışılacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Polimer Kompozitler

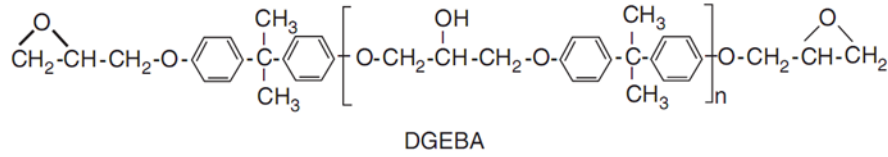
Polimer matrisli kompozitler, takviye elemanı olan fiberler ile polimer bir matrisden meydana gelmektedir. Takviye elemanı olarak kullanılan fiberler genellikle karbon, cam ve polimerlerden üretilir. Polimer reçine ise termoplastik veya termoset olabilir.

2.1.1 Polimer Reçineler

Polimer reçineler kompozit malzemelerin matris yapısını meydana getirirler ve malzemeyi bir arada tutarken yapısal olarak da basma ve kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerde belirleyici rol oynarlar. Polimerler, yüksek moleküler ağırlığa sahip organik bileşiklerdir ve monomer adı verilen birimin sürekli tekrarlanmasından meydana gelirler. 10^3 ila 10^6 monomer, kimyasal reaksiyonlar sonucu bir araya gelerek polimerleri oluştururlar. Polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanlarını bir arada tutan matris malzemeleri termoset veya termoplastik olabilir. Termoplastikler, uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşur ve bu moleküller birbirlerine mekanik kilitlenmeler ve zayıf van der Waals bağları ile bağlıdır. Bu bağlar, kovalent bağlara göre oldukça zayıftır, bundan dolayı termoplastikler kolaylıkla eritilebilirler. Öte yandan sıcaklığın artması durumunda mekanik kilitlenme etkisi de azalacağı için termoplastik reçinelerin viskoziteleri kolaylıkla azaltılabilir. Yani termoplastikler sıcaklıkla tekrar şekil verilebilen plastik türüdür. Termosetler de yine uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşmuştur. Fakat termosetlerde uzun molekül zincirleri de birbirlerine kovalent bağlar ile bağlanmıştır. Bu durum, termosetler ile termoplastikleri birbirinden ayıran en önemli farklılıktır. Bu sebeple termosetler üç boyutlu karmaşık katı yapıya sahiptir ve termoplastiklere göre daha rijit, mukavim ve daha az sünek davranış gösterirler (Sheikh-Ahmad 2009). Günümüzde en yaygın kullanılan termosetler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir. Epoksi reçineler iyi termomekanik, elektriksel ve kimyasal direnç özelliklerine sahiptir (Sinha 2006). Ayrıca epoksi reçineler, daha dayanıklı ve daha rijit olduğu için kompozit yapılar ve

yapıştırıcılarda kullanılır. Bu ve benzeri sebeplerden dolayı epoksi, en çok kullanılan reçinelerden biridir.

Bu çalışmada da epoksi matrisli kompozit tercih edilmiş ve kullanılmıştır. Epoksi reçine, termoset bir polimerdir ve epoksid monomerinin poliamid sertleştiriciler ile reaksiyonu sonucunda oluşur. Epoksi reçineler fiber takviyeli kompozitler üretmenin yanı sıra, genel amaçlı olarak yapıştırıcı veya kaplama olarak ta kullanılabilir. Epoksi reçineleri diğer polimerlerden ayıran en önemli özellikleri, çevresel bozunmaya karşı olan yüksek dirençleri ve mekanik özelliklerinin yüksek oluşudur. Birçok çözücü ve kimyasala karşı olan dirençleri ve çok çeşitli yüzeylere kolaylıkla bağlanabilmesi, epoksi reçineleri önemli yapıştırıcılardan biri olmasında etkin rol oynar. Ayrıca, epoksi reçineler kurlenme esnasında düşük büzülme eğiliminde olduklarından iç gerilme oluşumu minimize edilir (Biron 2004). Şekil 2.1'de bu çalışmada kullanılan doymamış bir epoksi türü olan diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı verilmektedir.



Şekil 2.1: Epoksi diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı (Kim ve diğ. 2009)

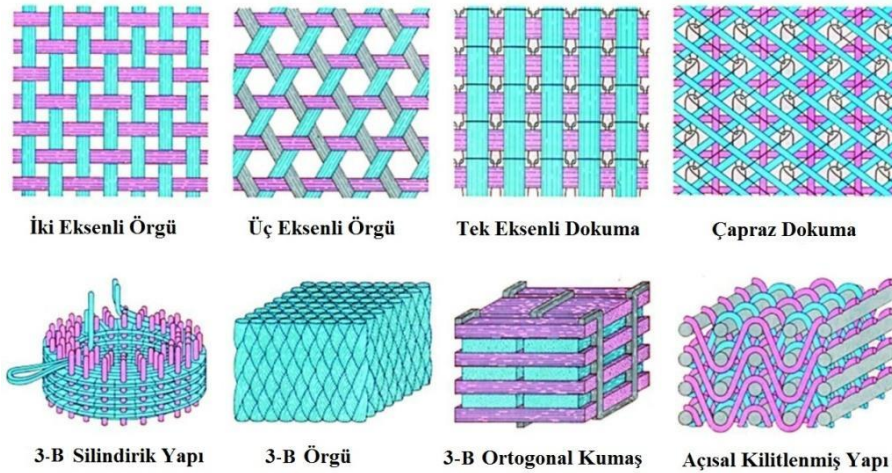
2.1.2 Fiberler

Fiberler, takviye elemanları olup kompozit malzemelerin çekme dayanımı ve rijitlik gibi özelliklerinin belirlenmesinde etkin rol oynarlar. Fiberler genellikle bir çözelti veya eriyiğin eğrilmesi yöntemi ile elde edilir. Fiberler karbon, cam ve polimerlerden imal edilebilirler ve sürekli olabildikleri gibi kırılmış da olabilirler. Kırılmış elyaflar içeren kompozitler, elyafların boy/çap oranına bağlı olarak uzun fiber veya kısa fiber takviyeli olarak sınıflandırılır. Eğer boy/çap oranı 100'den büyük ise uzun fiber takviyeli, küçük ise kısa fiber takviyeli kompozitler olarak adlandırılır. Sürekli fiberlerden oluşan kompozitlerde fiberler iplik, fitil, demet veya tel şekillerinde kullanılır. Kumaşlar, sürekli fiber ağlarından elde edilir. Demetler genellikle eliptik kesite sahiptir ve 100 ila 48000 adet fiberin bir araya gelmesi ile

oluşur. Demetlerin istenilen şekilde örülmesi veya dokunması ile de kumaşlar elde edilir.

Demetlerin kalınlıkları veya kesit alanları milimetrik boyutlardadır. Demetler çok farklı şekillerde bir araya getirilerek kumaş türlerini meydana getirirler. Bu farklı kumaş türlerinden bazıları Şekil 2.2'de verilmiştir.

Bu çalışmada örgü cam fiberler takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Cam fiberler, polimer kompozitlerde kullanılan toplam takviye elemanlarının %95 ini oluşturmaktadır. Cam fiberler, yüksek termal dirence, yalıtım özelliklerine, polimer fiberlere oranla daha yüksek elastisite modülüne (ancak karbon fiberlerden daha düşüktür), düşük termal uzama katsayısına ve mükemmel performans/fiyat oranına sahiptir. Cam fiberler, eriyik camın eğrilmesi ile üretilirler. Daha sonra bir araya getirilir ve organik çapraz bağlayıcılar ile kaplanırlar.



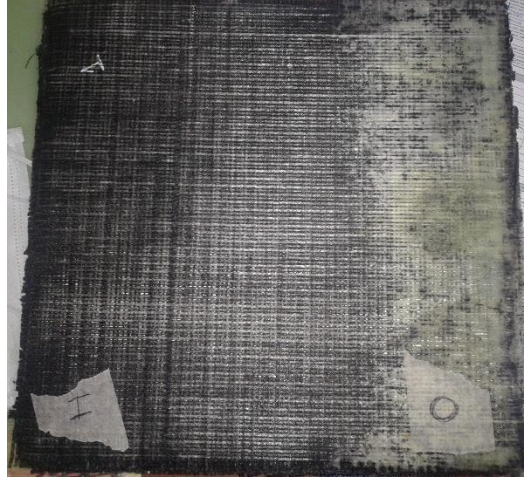
Şekil 2.2: Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan farklı türlerde fiber yapıları (Chou ve diğ. 1986)

Cam fiberlerin yüzeylerine uygulanan organik çapraz bağlayıcıların aslında iki amacı vardır. Birincisi fiber ile matris arasında bir duvar oluşturarak kompozitin neme karşı olan duyarlılığını iyileştirmek, ikincisi ise fiber ile matris arasındaki bağlantıyı iyileştirerek yük aktarma kapasitesini arttırmaktır (Ishida ve Miller 1984). Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik performansı, fiberlerin dayanımına ve elastisite modüllerine, matrisin dayanımına ve kimyasal kararlılığına ve fiber-matris ara yüzünün yük aktarımındaki etkinliğine dayanır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemi

Kompozit malzemelerin üretiminde, üretim yöntemi kullanılan fiberlerin türüne, uzun veya kısa oluşuna, sürekli veya süreksiz oluşuna, yönlü olup olmamasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca kullanılan reçinenin termoset veya termoplastik oluşu da üretimi etkilemektedir. Parçanın geometrisi ve kaç adet üretileceği de ayrıca üretim parametrelerindedir.

Günümüzde kompozit plaka üretiminde yaygın olarak el yatırması ve vakum yardımcı reçine transferi yöntemi kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında KNT katkılı kompozit levhalar, KNT'nin vakum yardımcı reçine transferi yönteminde Şekil 2.3' de görüldüğü gibi topaklanma sorunu yaşamamasından dolayı el yatırması yöntemi kullanılarak üretilmiştir.



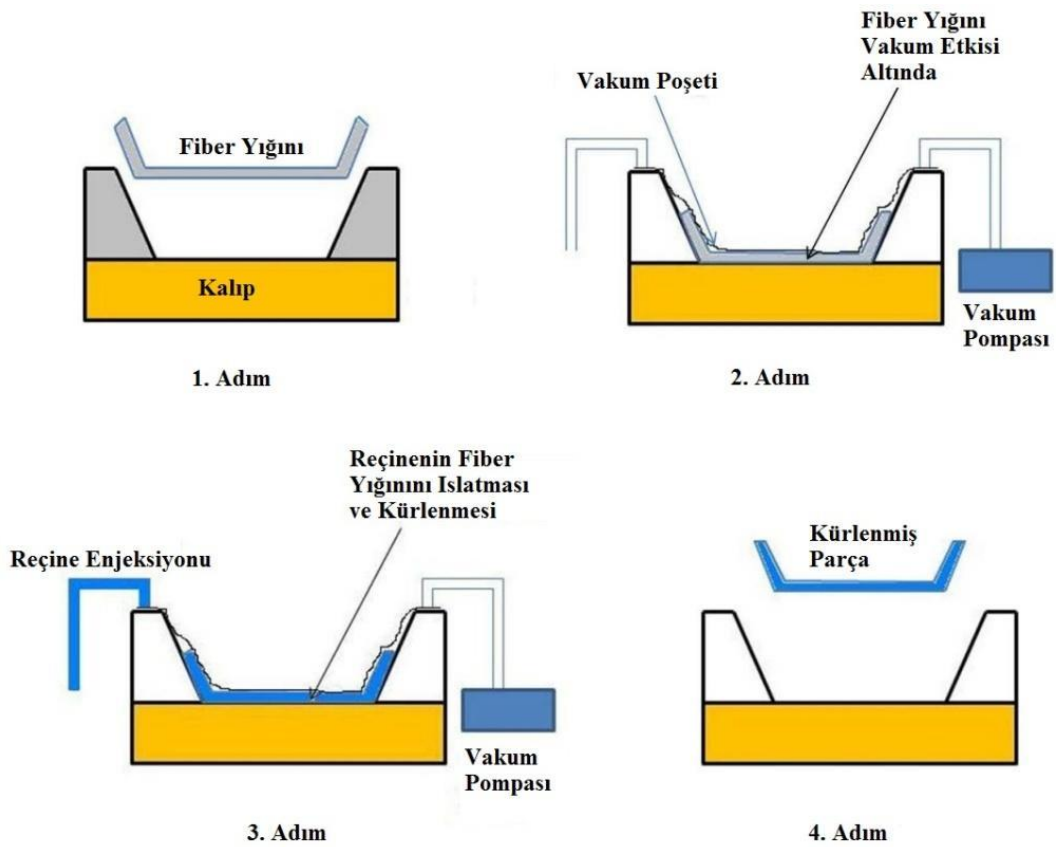
Şekil 2.3: Vakum yardımcı reçine transferi yöntemiyle üretilen KNT katkılı kompozit levha

2.2.1 Vakum yardımcı reçine transferi yöntemi

Reçinenin fiber yığınlarına aşılması prensibine dayanan vakum yardımcı reçine transferi yöntemi (VARTM), bir sıvı kalıplama yöntemidir (bu yöntem vakum infüzyon yöntemi de denilmektedir). Bu yöntemde, kalıp içerisinde oluşturulan vakum sayesinde reçine kalıp içerisine çekilmektedir. VARTM, düşük maliyetli, zaman tasarrufu sağlayan, tek yüzeyli bir kalıp ile gerçekleştirilebilen ve oda sıcaklığında da üretim yapılmasına imkân sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı, fiberler

arasındaki boşlukların sıvı reçine katılaşmadan önce reçine ile doldurulmasıdır (Advani ve Sozer 2003). Şekil 2.4'te VARTM yönteminin aşamaları şematik olarak verilmiştir. Bu aşamalar;

1. Kalıbın hazırlanması ve fiberlerin kalıp üzerine serilmesi
2. Kalıbın vakum çantası ile kaplanması ve vakum oluşturulması
3. Reçinenin kalıp içine enjekte edilmesi
4. Üretilen parçaların kurlenmesi

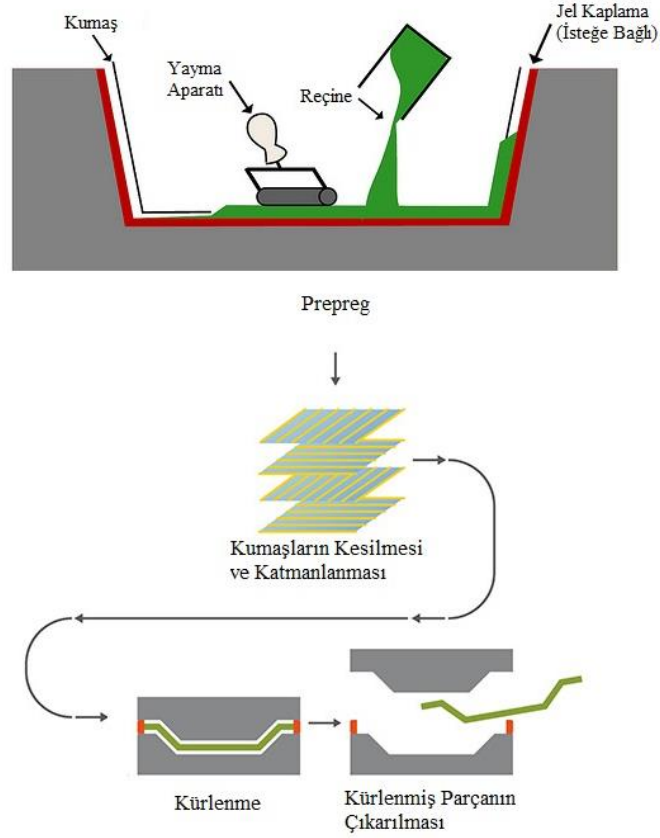


Şekil 2.4: VARTM ile kompozit parça üretiminin genel olarak şematik gösterimi (Chandrasekaran 2011)

2.2.2 El yatırması yöntemi ve pre-preg prosesi

Bu çalışmada da faydalanılan el yatırması yöntemi, temel olarak elyafların reçine ile bir yayma aparatı ile birleşmesine dayanır. Bu şekilde önceden reçine emdirilmiş elyaflara pre-preg (pre-impregnated) denir. Fiberlere emdirilmiş bu

reçineler kısmen sertleştirirler ve rulolara sarılarak özel soğutma merkezlerinde belirli derecelerde stoklanırlar. Rulo halinde bulunan pre-preg malzemeden önceden belirlenen açığı ve istenilen kat kadar kesilerek imalata hazır hale getirilir. Ardından bu pre-pregler katmanlanıp belirlenen ısıtmalı kalıpta kürlenerek parça elde edilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: El yatırması olarak pre-preg kompozit parça üretiminin şematik gösterimi
(URL 1)

2.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları ve Zayıf Yönleri

Kompozit malzemeler, mükemmel fiziksel özellikleri ve yüksek rijitlik/yoğunluk oranlarının yanı sıra anizotrop özellik gösterebilmektedir. Bu özellikler kompozitlerin havacılık, otomotiv, uzay, haberleşme, deniz, yapı, rüzgâr enerjisi ve spor endüstrileri için ilgi çekici hale gelmesinde etkin rol oynamaktadır.

Bu kadar geniş uygulama alanları bulmalarına rağmen termoset matrisli kompozitler, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda yüksek gevreklikleri nedeniyle sınırlı kullanıma sahiptir.

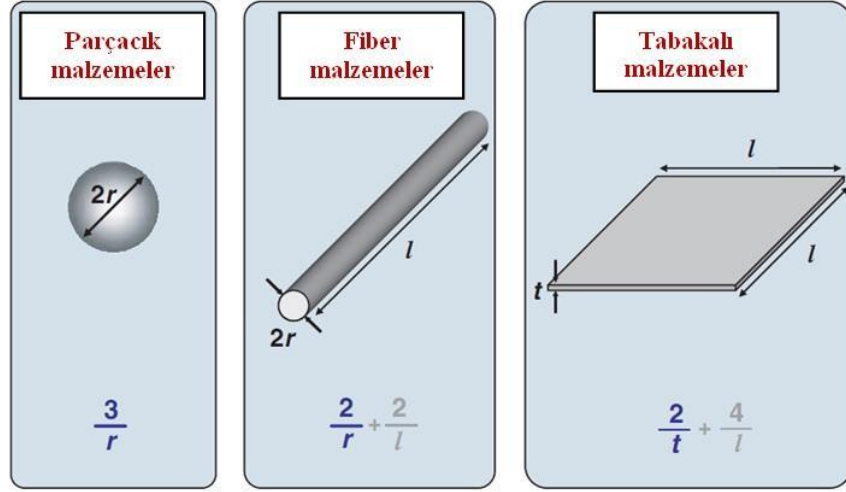
2.4 Katkı Malzemeleri

Günümüzde organik veya inorganik katkılarla üretilen polimer kompozitlerin sayısı oldukça hızlı bir şekilde artmaktadır. Polimer kompozitler havacılıkta, otomobil sanayisinde, uzay endüstrisinde ve spor malzemeleri sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Son çeyrek asırda polimer nanokompozitlerin üretilerek geliştirilmesi konusunda araştırmacılar arasında ortak bir heyecan oluşmuştur. Araştırmacılar özellikle 1980'lerde keşfedilen taramalı tünelleme mikroskobu ve taramalı prob mikroskoplarının bu alanda kullanılması ile atomik boyutta yüzey yapısını inceleme olanağı kazanmışlardır. Öte yandan, bilgisayar teknolojisinde yaşanan hızlı ilerlemeler neticesinde nano boyutta karakterizasyon ve tahmin yapabilen modelleme ve simülasyon programları, araştırmacıların işini epey kolaylaştırmıştır. Genel olarak, eşsiz mekanik özelliklere sahip nanomalzemeler ile polimerlerin bir araya getirilerek karakterize edilebilirliğinin sağlanması ile araştırmacılar nanokompozitler üzerine yoğunlaşmışlardır. Ayrıca birçok nanokompozit, geleneksel kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler kullanılarak üretilbildiği için, üretim noktasından bakıldığında bu konunun çekiciliği günden güne daha da artmaktadır.

Nanokompozitlerin üretimi ve kullanımı konusunda doğa, her zaman olduğu gibi araştırmacıların en büyük ilham kaynağıdır. 1998'deki bir araştırmada "Doğa inanılmaz yetenekli usta bir kimyacı" (Oriakhi 1998) ifadesi kullanılarak araştırmacıların esin kaynağı net olarak belirtilmiştir. Karbonhidratlı polimerler, doğal reaktifler, lipitler ve proteinler kullanarak, kemikler, kabuklar veya ağaçlar doğada mükemmel bir şekilde üretilmektedir. 1990'ların başlarında Toyota Merkezi Araştırma Laboratuvarı tarafından yapılan bir açıklamada, çok küçük miktarlardaki nanomalzemelerin Naylon-6 polimerine ilavesi ile ısı ve mekanik özelliklerde olumlu açıdan büyük gelişmelerin olduğu bildirilmiştir (Usiki ve diğ. 1993).

Amerika Birleşik Devletleri Federal Destekleme Fonu tarafından nanoteknolojinin sahip olduğu potansiyel dikkate alınmış ve Ulusal Nanoteknoloji Girişim teşvikleri her yıl katlanarak arttırılmıştır. Dolayısıyla bu destekler nanoteknoloji araştırmalarının gelişimine katkı sağlamış, yeni ve gelişmiş özelliklere sahip ürünlerin ortaya çıkmasını ve daha verimli üretim yöntemlerinin bulunmasını sağlamıştır.

Mikro boyuttan nano boyuta geçildiğinde parçacıklarda fiziksel anlamda etkileyici değişiklikler gözlenir. Nano boyuttaki malzemeler, sahip oldukları hacme oranla oldukça büyük yüzey alanlarına sahiptir (Luo ve Daniel 2003). Birçok önemli kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin yüzey ve yüzey özellikleri tarafından kontrol edildiği bilindiğine göre, nano yapıdaki bir parçacık aynı bileşime sahip olan mikro boyutlardaki parçacıklardan farklı özelliklere sahip olacaktır. Bu duruma parçacıklar ve fiberler boyutundan bakıldığında, birim hacim için yüzey alanının malzemenin çapı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Bu sebeple, küçük çaplardaki malzemeler birim hacim için daha büyük yüzey alanlarına sahiptir (Luo ve Daniel 2003). Kompozitlerdeki dolgu malzemelerine ait genel geometriler ve yüzey alanı hacim oranları Şekil 2.6'te verilmiştir. Fiber ve tabakalı malzemeler için, yüzey alanı/hacim oranı denklemlerdeki birinci terim tarafından belirlenir. İkinci terim ($2/l$ ve $4/l$) çok küçük bir etkiye sahiptir ve bu yüzden genellikle ihmal edilir. Dolayısıyla, sayısal olarak bakıldığında parçacığın çapında, fiberin çapında ve tabakanın kalınlığında mikro boyuttan nano boyuta bir azalma sağlandığında, yüzey alanı/hacim oranı küp derecesinde $(\text{alan/hacim})^3$ değişecektir (Thostenson ve diğ. 2005). Günümüzde nanomalzemeler özellikle nanopartiküller, nanotüpler, nanofiberler, fullerenler ve grafen halen detaylı bir şekilde araştırılmaktadır. Genel olarak bu nanomalzemeler geometrilerine göre sınıflandırılır ve en genel halde parçacıklar, fiberler ve tabaka yapıları olarak üç ayrı gruba ayrılırlar (Schimidt ve diğ., 2002). Örneğin karbon siyahı ve silika nanopartikülleri parçacıklar grubunda sayılabilirken, nanofiberler ve karbon nanotüpler fiber malzemeler grubundadır.

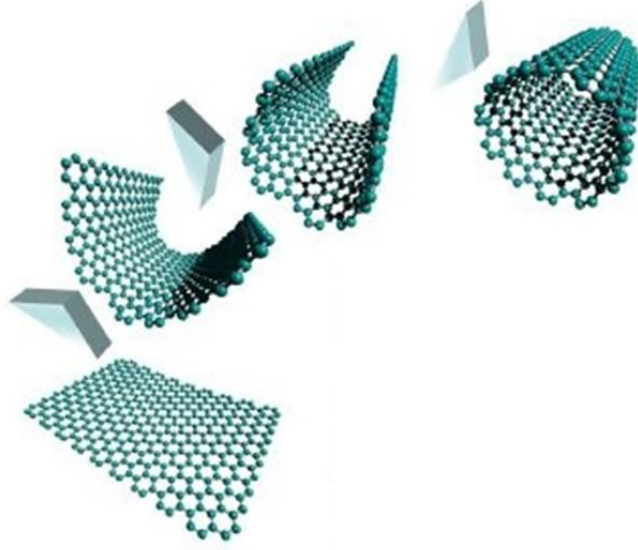


Şekil 2.6: FTP kompozitlerdeki genel takviye türleri/geometrileri ve yüzey alanı/hacim oranları (Thostenson ve diğ. 2005)

Polimer matrislerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmeye yönelik nanopartiküllerin dolgu malzemesi olarak kullanılması fikri yakın zamanda bilim adamları tarafından oldukça ilgi gören araştırma konularındandır. Bu parçacıkların nanometre boyutundaki yüzey alanları $1000 \text{ m}^2/\text{g}'ı$ bulabilmektedir (Gojny ve diğ. 2005^a). Yükün matristen nanoparçacığa transferi, bu büyük yüzey alanları nedeni ile kolaylaşacak ve neticede matrisin mekanik özellikleri arttırılmış olunacaktır (Njuguna ve diğ. 2007). Bu yük transferini gerçekleştirmek için en uygun dolgu malzemeleri karbon nanofiberler, nanokiller ve nanotüplerdir.

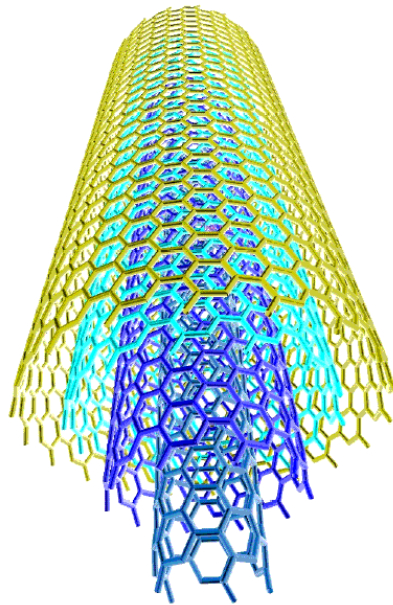
2.5 Karbon Nanotüpler

KNT'ler, tüp haline gelecek biçimde yuvarlatılmış bir grafen levha olarak düşünülebilir (Şekil 2.7). KNT, grafit C-C sp^2 bağlarına sahiptir ve bu bağlar elmasın sahip olduğu C-C sp^3 bağlarından daha güçlüdür. Çünkü C-C sp^2 bağlarının boyları C-C sp^3 bağlarının boylarından daha kısadır. Fakat grafit tabakaları arasındaki nispeten çok zayıf olan van der Waals bağları, grafit tabakalarının birbirleri üzerlerinden kolaylıkla kaymasına olanak sağlar.



Şekil 2.7: Grafit tabakanın yuvarlanması sonucu oluşan TDKNT yapısı (URL 2)

Yapılan çalışmalarda duvar sayılarına göre üç çeşit karbon nanotüp tanımlanmıştır; TDKNT'ler, iki duvarlı karbon nanotüpler ve ÇDKNT'ler (Şekil 2.8). TDKNT'ler, sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılması ile oluştuğu için ÇDKNT'lere göre daha dayanıklıdır (Fan, 2007). ÇDKNT'ler ise iç içe geçmiş eş merkezli tüplerden oluşur ve bu tüplerin birbirleri içinden kayabilme ihtimalleri dayanımlarını düşürür (Lordi ve Yao 1999).



Şekil 2.8: ÇDKNT yapısı (URL 3)

KNT'ler, dayanıklı, hafif, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip ve boy/çap oranları büyük olan nanomalzemelerdir. KNT'lerin özellikleri, boylarına, çaplarına, yönlendirmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır (Fan, 2007). KNT'lerin özellikleri, Tablo 2.1'de geleneksel mühendislik malzemeleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

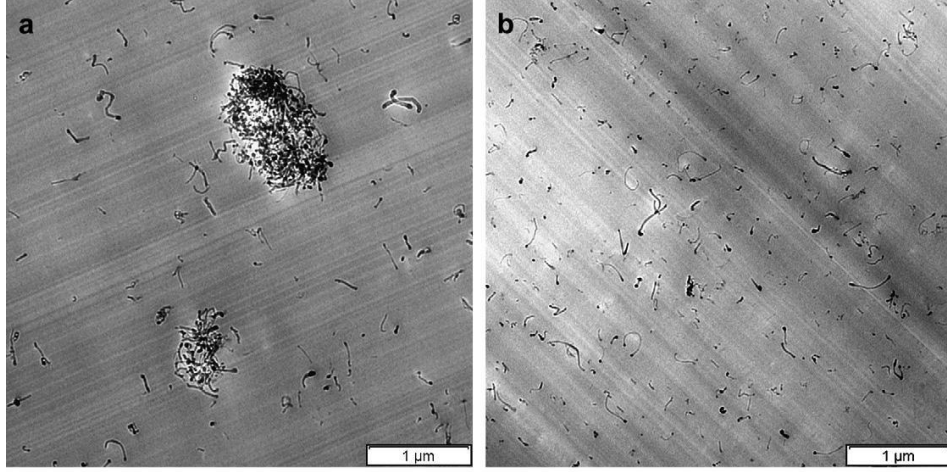
Tablo 2.1: Karbon nanotüplerin önemli bazı özellikleri (Chandrasekaran 2011)

| Özellikler | Karbon nanotüpler | Yorumlar |
|-------------------------|--|---|
| Elastisite modülü | 270 GPa-1 TPa (Krishnan ve diğ. 1998) | En güçlü çelikten 10-100 kat daha büyüktür. |
| Çekme dayanımı | 11-63 GPa (Yu 2000) | Yüksek dayanımlı çelikten 150900 kat daha büyüktür. |
| Termal iletkenlik | 2000 W/(mK) (Kim ve diğ. 2001) | Elmasın iki katıdır. |
| Maksimum akım yoğunluğu | 10 A/m ² (Frank 1998) | Bakır tellerden 1000 kat daha büyüktür. |

Günümüzde, KNT'lerin büyük miktarlarda üretimi için kimyasal buhar yoğunlaştırma (KBY), ark-deşarj ve lazer buharlaştırma gibi yöntemler kullanılmaktadır. Adı geçen yöntemlerin çoğu vakum altında veya çeşitli gaz ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Ark deşarj yöntemi, ilk büyük miktarda KNT üretiminin gerçekleştiği yöntemdir (Ebbesen ve Ajayan 1992). Halen günümüzde KNT üretiminde en çok tercih edilen yöntemler arasındadır. Grafit elektrotlar arasında oluşan ark boşalması ile açığa çıkan yüksek sıcaklıklar sebebiyle grafit elektrot buharlaşır. KNT içeriği yeniden oluşan yapılarda ağırlıkça %30 civarındadır (Collin, 2000). Lazer buharlaştırma yönteminde grafit kaynağı, yüksek sıcaklıklara ısıtılır ve asal gaz ile doldurulmuş bir reaktör içerisine yerleştirilip lazer ile buharlaştırılır. KNT'lerin toplanabilmesi için reaktör duvarlarının suyla soğutulması gerekmektedir. TDKNT üretimi, kobalt ve nikel gibi katalizörler kullanılarak gerçekleştirilebilir (Guo ve diğ. 1995). Günümüzde KBY ticari amaçlı KNT üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Nikel, kobalt ve demir gibi katalizörler ile kaplanmış yüzeyler kuartz bir tüp fırın içerisinde ön ısıtma ile yaklaşık 700°C ye kadar ısıtılır. Karbon kaynağı içeren asetilen, etanol, etilen ve metilen gibi gazlar, tüp fırın içerisinden amonyak, azot veya hidrojen gibi taşıyıcı gazlar ile birlikte geçirilir. Metal katalizler üzerinde karbon içeren gazın bozunması ile nanotüpler büyütülürler (Pinila ve diğ. 2007).

Her ne kadar KNT'ler mükemmel mekanik özelliklere sahip olsalar da, bu özelliklerinden takviye elmanı olarak etkin bir şekilde yararlanabilmek için bazı zorlukların üstesinden gelmek gerekir. KNT'lerin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanotüplerin matris tarafından ıslatılabilmesi, adezyon gibi etkenler, karbon nanotüplerin dolgu malzemesi olarak gösterdiği performansı etkileyen en önemli konulardır (Njuguna ve diğ. 2007).

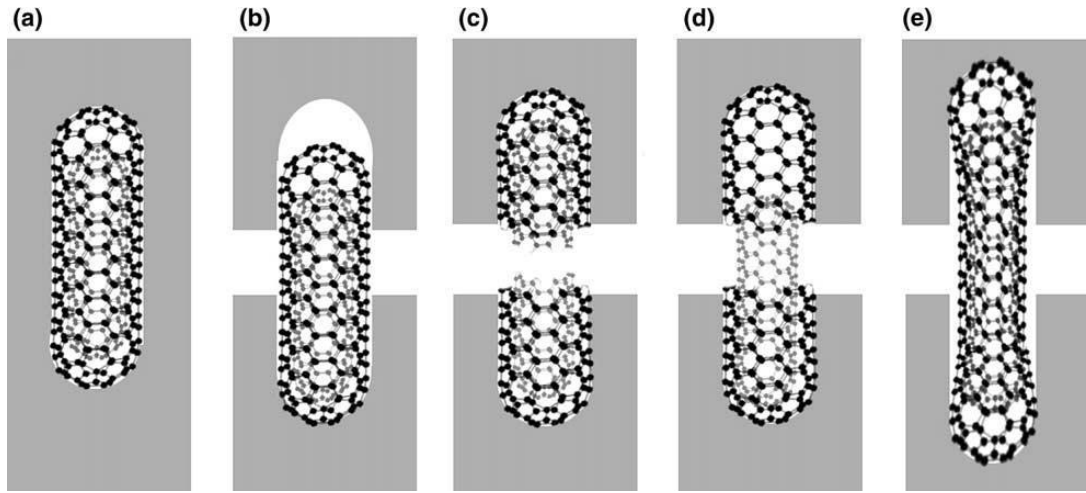
Matris ile karbon nanotüp ağı arasında KNT'lerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, etkin olarak yük aktarımının yapılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca karbon nanotüplerin matris içerisinde iyi bir şekilde dağıtılmış olması ile homojen gerilme dağılımı da elde edilir ve gerilme konsantrasyonu oluşturan bölgelerin azalması sağlanmış olunur (Eskizeybek 2012). Polikarbonat matris içerisine homojen olan ve olmayan durumlarda dağıtılmış KNT'lere ait geçirimli elektron mikroskobu fotoğrafları Şekil 2.9'de verilmiştir. Saf KNT'leri matris içerisinde homojen olarak dağıtmanın zorluğu, büyük yüzey alanlarından oluşan van der Waals kuvvetlerinin KNT'leri bir arada tutmasından kaynaklanmaktadır. KNT'lerin matris içerisinde kümelenmesi ve yetersiz dağılımı, karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesinin en önemli sebebi olarak karşımıza çıkmaktadır (Andrews ve Weisenberger 2004; Song ve Youn 2005). Birçok fiziksel ve kimyasal yöntem bu dağılım problemini çözmek için geliştirilmiştir. Bunlar, ultrasonikasyon (Shaffer ve Windle 1999), yüzey aktifleştiren madde (surfactant) kullanma (Gong ve diğ. 2000), kayma etkisi ile karıştırma, karbon nanotüp yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi (Olek ve diğ. 2005), plazma polimerizasyon (Shi ve diğ. 2005) olarak örneklendirilebilir. KNT'lerin polimer içerisinde dağıtılmasında kullanılacak yöntem temel olarak kullanılan polimerin türüne ve viskozitesine bağlıdır.



Şekil 2.9: Polikarbonat matris içinde ağırlıkça %1 ÇDKNT'lerin dağılım çeşitleri a) polimer matris içinde ÇDKNT kümelenmeleri b) homojen dağılım (Pegel 2008)

Matris ile KNT'ler arasındaki yük aktarımının etkinliği, KNT'lerin ilavesi ile polimerin dayanımının artırılmasında bir diğer önemli faktördür. KNT'ler ve matris arasındaki ara yüzey bağlanması bu mekanizmanın etkin bir şekilde çalışması için çok önemlidir. KNT'lerin ilavesi ile matrisin dayanımının beklenenin altında kalmasını birçok araştırmacı bu etkene bağlamıştır (Weisenberger ve diğ. 2003; Nan 2003). KNT'lerin grafen tabakasından oluştuğu düşünülürse, grafenin de zayıf düzlemler arası etkileşime sahip oluşu ve kimyasal kararlılığı, matris ile KNT'ler arasındaki yapışmanın oluşmamasındaki önemli etkenlerdendir (Khare ve Bose 2005). KNT'lerin matris ile etkileşebilmesi için üç yol vardır. Bunlar; elektrostatik ve van der Waals kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak mekanik kilitlenme ve kimyasal bağlanmadır. Mekanik kilitlenme ve kimyasal bağlanma ile kıyaslandığında van der Waals kuvvetleri oldukça zayıf kuvvetlerdir. Bu sebeple diğer iki bağlanma çeşidi KNT'ler ile matris arasındaki yapışmada önemli bir etkidir. Matris ile KNT'ler arasındaki bağlanma, KNT'lerin yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi ile artırılabilir. KNT'lerin yüzeylerinin matris ile etkileşim kuracak biçimde uygun fonksiyonel gruplar ile fonksiyonelleşmesi, (Weisenberger ve diğ. 2003; Nan 2003; Khare ve Bose 2005; Jia ve diğ. 1999; Zhu ve diğ. 2003; Zhu ve diğ. 2004; Barrera ve diğ. 2005; Gao ve diğ. 2005; Liu ve diğ. 2005; Park ve diğ. 2005; Ramanathan ve diğ. 2005; Chen ve diğ. 2006) matris ile KNT'ler arasında güçlü kimyasal bağların oluşmasını sağlar. Matristen KNT'lere yükün aktarılmasında bu fonksiyonel gruplar köprü görevi görürler. Ayrıca fonksiyonelleştirme KNT'lerin matris içerisinde de kolay dağılmasını sağlar.

Frankland ve diğ. (2002) moleküler dinamik simülasyonlar ile karbon atomlarının %1'inin dahi matris ile etkileşerek köprü vazifesi görmesi malzemenin dayanımına pozitif yönde etki göstermiştir. Fonksiyonel grupların kovalent bağlar ile KNT'lerin yüzeylerine bağlanabilmesi için KNT'ler agresif kimyasal işlem görürler. Bu kimyasal müdahaleler KNT'lerin kısalmasına ve yüzeylerinin hasar görmesine neden olarak KNT'lerin dayanımlarının azalmasına sebebiyet verebilir (Fan 2007). Şekil 2.10'da KNT'lerin yük etkisi altında matris içerisindeki yük aktarımı ve hasar mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.10: KNT'lerde matris içerisindeki rastlanabilecek hasar şekillerinin şematik gösterimi a) başlangıç hali, b) Zayıf ara yüzey yapışması nedeniyle KNT'lerin sıyrılması, c) KNT'lerin güçlü ara yüzey yapışması ile yüksek ve hızlı şekil değişikliği nedeniyle kırılması, d) Teleskopik sıyrılma: KNT'lerin dış yüzeyinin yüksek ara yüzey yapışması sonucu kırılması ile iç çeperlerin sıyrılması e) KNT'lerin çeperlerinin bir kısmının matristen ayrılması fakat kalan yüzeylerin mükemmel ara yüzey yapışması ile yük transferinin etkin bir biçimde gerçekleşmesi (Gojny ve diğ. 2005)

2.6 Karbon Nanotüplerin Polimer İçerisinde Dağıtılması

KNT'lerin dağıtım yöntemlerinin amacı ideal olarak KNT'leri birbirinden ayrılmış şekilde reçine içerisinde homojen bir şekilde dağıtmaktır. KNT'ler reçine içerisinde gerilme yığılmalarına neden olabilecek kümelenmeler oluşturmamalıdır. Polimer reçine içerisinde KNT'lerin dağıtılması için kullanılan yöntemler en genel haliyle fiziksel ve kimyasal yöntemler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Karbon nanotüplerin polimer matris içerisinde dağıtılmasında kullanılan bazı fiziksel ve kimyasal yöntemler (Eskizeybek 2012).

2.6.1 Fiziksel dağıtma yöntemleri

KNT'ler, fiziksel dağıtım yöntemlerinde mekanik kuvvetler ile reçine içerisine karıştırılırlar. Özellikle termosetler gibi yüksek viskoziteli polimerler ile KNT'leri karıştırabilmek için KNT'leri birbirinden ayıracak büyük kayma kuvvetlerine ihtiyaç vardır. Ekstrüzyon bu gibi durumlarda en çok kullanılan yöntemdir. KNT'ler, ekstrüder besleyicisinin içine dökülür ve ekstrüder yardımıyla polimer ile karıştırılır. Polimerin ayrıca sıcaklığı artırılarak viskozitesi düşürülür. Tae ve diğ. (2010), karışımın homojenliğinin ekstrüder hızının artmasıyla arttığını göstermişlerdir.

Ultrasonikasyon veya silindir arasından geçirme yöntemleri, karbon nanotüpleri düşük veya orta düzeyde viskoziteye sahip reçineler ile karıştırmak için kullanılır. Ultrasonikasyon işleminde, basınç dalgaları sıvı ortam içinde yayılır. Bu yayılım sırasında alçak ve yüksek basınç bölgeleri oluşur. Bu bölgelerin oluşma sıklığı ses frekansı ile alakalıdır. Yüksek şiddetli ses dalgaları, düşük basınç bölgelerinde küçük vakum baloncuklarının veya boşluklarının oluşmasına neden olabilir. Bu baloncuklar kritik hacme ulaştıklarında daha fazla enerji absorbe edemezler ve yüksek basınç bölgesinde sesli bir şekilde patlarlar. Bu duruma ultrasonik kavitezyon

denilmektedir.. Bu patlama sonucu yüksek sıcaklık ve basınç meydana gelir. Ayrıca bu ultrasonik kavitasyon, yüksek hızlı sıvı jetlerinin oluşmasına neden olur (Suslick 1990). Meydana gelen sıvı jet akımları yeterince enerjiye sahip olabilirse karbon nanotüpleri bir arada tutan kuvvetleri yenebilir ve reçine içerisinde dağılmasını sağlayabilir.

Ultrasonikasyon, ultrasonik dalga yayabilen bir metal çubuğun içine karbon nanotüp atılmış bir sıvı içeren kabın içine daldırılması ile veya ultrasonik banyoya bu kabın koyulması ile sağlanabilir (Gibson ve diğ. 2007). İlk yöntem literatürde uçlu ultrasonikasyon olarak adlandırılırken diğer yöntem banyo ultrasonikasyonu olarak adlandırılır.

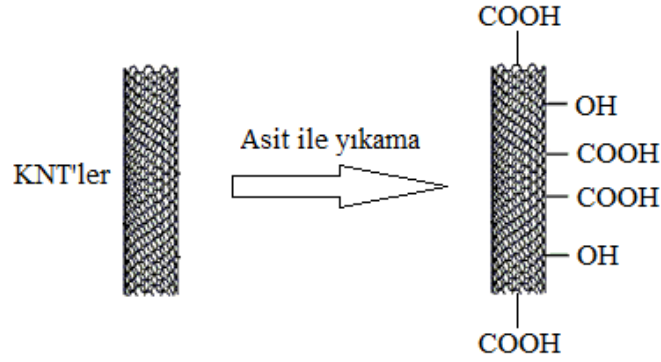
Liao ve diğ. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, KNT'lerin uçlu sonikasyon ile epoksi içerisine dağıtılmasıyla elastisite modülünün %50 arttırıldığı belirtilmiştir. Herhangi bir kimyasal işlem uygulanmaksızın KNT'ler, polistiren (Safadi ve diğ. 2002) ve poliamid (Park ve diğ. 2002) reçineler içerisinde uçlu sonikasyon ile dağıtıldıktan sonra mekanik özellikleri incelenmiş ve sonuçların makro-mekanik beklentiler ile uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Uzun süre sıvı içerisine daldırılan uçlu sonikasyon, yüksek enerjili bir karıştırma tekniği olduğu için, karbon nanotüplerin hasar görmesine sebebiyet verebilir. Ramasetty ve diğ. (2005), nano partikül katkılı kompozit üretim parametrelerinden ultrasonikasyon süresi, banyolu ve uçlu karıştırma teknikleri, KNT'lerin yüzde ağırlığı, yüzey aktifleyici madde tipi ve çözücü tipi gibi etkenlerin TDKNT'lerin epoksi içerisindeki dağılımını incelemiş ve elastisite modülünün ağırlıkça %0,1 TDKNT ilavesi ile arttırıldığını gözlemlemiştir. KNT'ler uçlu sonikasyon dağıtılmış ve çözücü olarak aseton kullanılmıştır.

2.6.2 Kimyasal dağıtma yöntemleri

Mekanik yöntemler ile KNT'lerin dağıtılması her zaman istenilen sonuçları vermeyebilir ve mekanik yöntemler kullanılarak dağıtılan KNT'lerin reçine içerisindeki kararlılığı da tartışılmaktadır. KNT'lerin kimyasal yöntemler ile dağıtılması, kovalent ve kovalent olmayan yöntemler olarak ayrılabilir.

Kovalent yöntemde, KNT'lerin yüzeyine çeşitli kimyasal gruplar kovalent bağlar ile bağlanır ve bu grupların birbirlerini sterik olarak itmesiyle dağılım

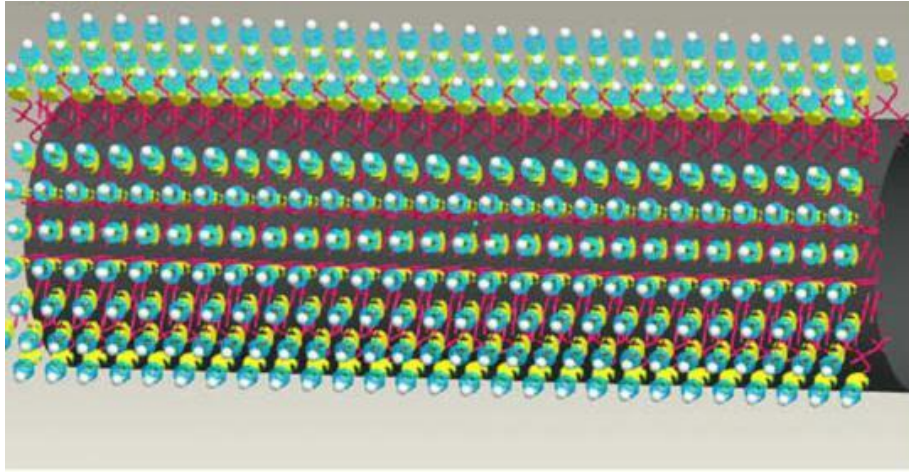
iyileştirilir. Farklı kimyasal gruplar, KNT'lerin yüzeylerine bağlanabilir (Zhang ve Chen 2004; Chen 1998; Tagmatarchis ve Prato 2004; Kim ve diğ. 2002; Unger ve diğ. 2002; Holzinger ve diğ. 2003; Stevens ve diğ. 2003; Touhara ve diğ. 2002). En iyi bilinen kovalent fonksiyonelleştirme yöntemi güçlü asitler içinde KNT'lerin yıkanması ile gerçekleştirilir. Bunun için nitrik asit, sülfürik asit veya bunların karışımları kullanılabilir. Böylece KNT'lerin asit ile yıkanması sırasında safsızlıklar giderilir, KNT'lerin uçları açılır ve bu bölgelere COOH⁻ gibi gruplar bağlanır (Şekil 2.12). Meydana gelen karboksilik gruplar ile KNT'lerin su, aseton ve polimerler içerisinde dağılımı kolaylaştırılır. Çünkü KNT'lerin kümelenmesini negatif yüklü gruplar van der Waals bağlarına karşı koyarak engeller. Fakat aynı zamanda asidik muamele, özellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilirse boy/çap oranlarının azalmasına ve KNT'lerin hasar görmesine sebebiyet verebilir.



Şekil 2.12: KNT'lerin yüzeylerinin kuvvetli asitler ile yıkanması ile oluşan fonksiyonel grupların şematik gösterimi

Kovalent olmayan yöntemde, KNT'lerin yüzeylerine kimyasal gruplar tutunur. Bunun için de π - π etkileşimleri veya kulomb çekiminden yararlanılır (Rostogi ve diğ. 2008). KNT'lerin dağıtılmasında kullanılan kimyasal dağıtma yöntemlerinden yüzey aktifleyici maddeler ve karbon nanotüp etrafına polimer sarılması yöntemleri, kovalent olmayan yöntemler olarak adlandırılabilir. KNT'lerin yüzeylerine yüzey aktifleyici maddeler adsorbe olurlar ve yüzey gerilimini düşürerek KNT'lerin sıvı içerisinde daha kolay dağıtılmasına yardımcı olurlar (Ma ve diğ. 2010). Ayrıca KNT'ler arasında sterik itme kuvvetleri meydana getiren yüzey aktifleyici maddeler, van der Waals bağlarını yenebilirler (Gong ve diğ. 2000). KNT'lerin dağıtılmasında çok çeşitli yüzey aktifleyici madde kullanılmıştır. Örnek olarak, oktil fenol etoksalat (Triton X 100) (Wang ve diğ. 2004), sodyum dodesilbenzen sülfonat (Islam ve diğ. 2003), dodesil

trimetilamonyum bromid (Whitsitt ve Barron 2003), hegzadisil trimetilamonyum bromid (Ryabenko 2004) ve sodyum dodesil sülfat (Yu ve diğ. 2007) gösterilebilir. Uygulanan yüzey aktifleyici madde türünün yanı sıra karbon nanotüp ile yüzey aktifleyici madde miktarının oranı da optimum dağılma için önemli bir parametredir (Rostogi ve diğ. 2008). Kolay uygulanması ve dağılma kararlılığını arttırması, yüzey aktifleyici maddelerin avantajları arasındadır. Fakat yüzey aktifleyici madde kullanıldığında matris ile karbon nanotüpler arasındaki ara yüzey bağları oluşmayabilir. Şekil 2.13'de yüzey aktifleyici madde ile sarmalanmış bir karbon nanotübün şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Yüzey aktifleyici madde ile sarmalanmış karbon nanotübü için şematik gösterim (Geng ve diğ. 2008)

3. MALZEME ÜRETİMİ

Bu çalışma kapsamında 2 mm kalınlıkta, üç farklı oranda (% 0.5-1-2) karbon nanotüp katkılı ve katkısız kompozit diskler kompozit plakalardan kesilerek üretilmiştir. Katkısız kompozit plakalar, katkılı kompozit plakaların etkisini daha iyi görebilmek için referans olarak üretilmiştir. Kullanılan ÇDKNT'nin fiziksel özellikleri Tablo 3.1 verilmiştir.

Tablo 3.1: Karbon nanotüp özellikleri

| -OH İçeriği | Dış Çap | İç Çap | Uzunluk | Yüzey Alanı | Renk | Yoğunluk | Safılık |
|---------------------|----------|---------|------------------------|------------------------|-------|------------------------|---------|
| Ağırlıkça % 1.76 | 10-20 nm | 5-10 nm | 0.5-2 μm | >200 m ² /g | Siyah | 0.22 g/cm ³ | >% 95 |

Kompozit plakalar el yatırması yöntemi kullanılarak pre-preg olarak üretilmiştir. Kullanılan fiber woven örgülü cam elyaf kumaşlar, 200 gr/m² ağırlığına sahiptir. Karbon nanotüp katkılı kompozit diskin ortalama ağırlıkça oranı % 40 matris, % 60 fiberden oluşmaktadır. Kullanılan cam elyafın ve epoksinin yoğunluğu, kumaşın ağırlığı ve ağırlıkça oranına göre hacimce yaklaşık % 43 matristen ve % 57 fiberden oluşan kompozit malzemenin yoğunluğu,

$$\rho_{komp.} = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m = (0.57)(2.6) + (0.43)(1.1) \cong 1.93 \text{ g/cm}^3 \quad (3.1)$$

olarak hesaplanır. Kompozit plakaların üretimi İzmir'de faaliyet gösteren Fibermak firmasında yapılmıştır. Kompozit üretiminde kullanılan cam elyaf ve epoksi reçinenin firmadan edinilen mekanik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

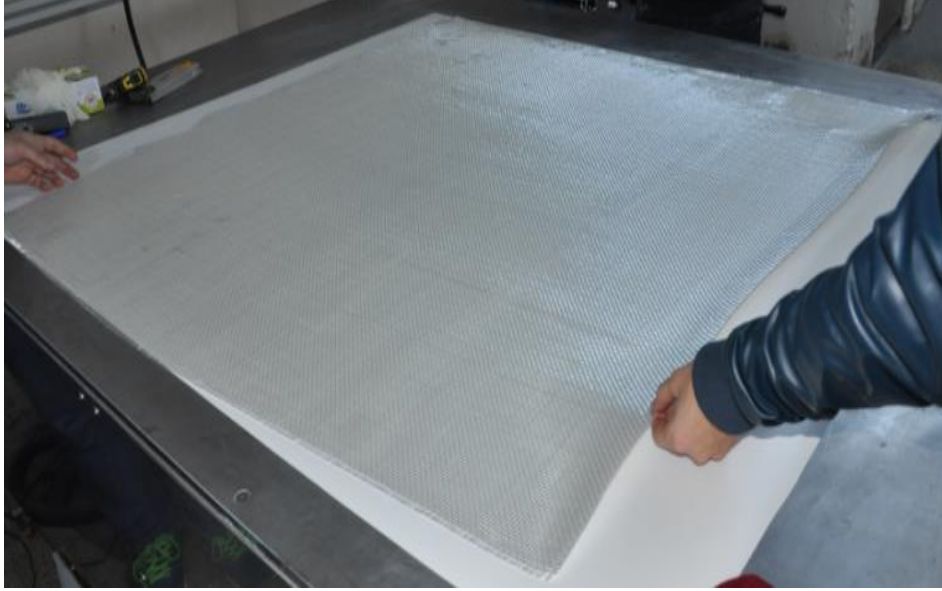
Tablo 3.2: Cam elyaf ve Epoksi reçinenin mekanik özellikleri

| Mekanik Özellikler | Cam elyaf | Epoksi |
|-------------------------------|-----------|--------|
| Elastisite Modülü (MPa) | 81500 | 3300 |
| Kopma Mukavemeti (MPa) | 2306 | 80 |
| Yoğunluk (g/cm ³) | 2.6 | 1.1 |

3.1 Katkılı Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit plakaların üretimi için kullanılan cam elyaflar öncelikle 125x125 cm boyutlarında kesilmiştir. Bu boyutlarda kesilmesinin sebebi kullanılan cam elyaf

rulunun eninin 125 cm olmasıdır. Kesilen kumaş, reçine emdirilmek üzere ısıtılmalı pres altında sıcaklığa dayanıklı ve reçine ile etkileşime girmeyen mumlu bir kağıt üzerine Şekil 3.1’de görüldüğü gibi serilmiştir.



Şekil 3.1: 125x125 cm ebatlarındaki cam elyaf kumaş

KNT’lerin epoksi reçine içerisinde dağıtılmasında kullanılan fiziksel yöntemlerden biri olan ultrasonikasyon işlemi Hielscher UP400S ultrasonik karıştırıcı ile yapılmıştır. Ağırlıkça % 60 fiber ve % 40 reçine olacak şekilde epoksi reçine hassas terazi ile tartılmış ve epoksi içerisine Fibermak katalizör sistemi katılmıştır. Bu katalizör oda sıcaklığında yaklaşık 1 yıl raf ömrü sağlamaktadır. Her bir KNT oranı için tartılıp ayrı kaplara konulan reçinelerin üzerine sırasıyla ağırlıkça % 0.5, % 1 ve % 2 olacak şekilde karbon nanotüp ilave edilerek ultrasonik karıştırıcıda 45 dk boyunca ayrı ayrı karıştırılmıştır (Şekil 3.2). Karıştırma boyunca sıcaklığın artmasından dolayı kürlenme olmaması için reçinenin bulunduğu kap, buzlu su içeren daha büyük bir soğutucu kap içerisine alınarak karıştırma işlemi yapılmıştır.



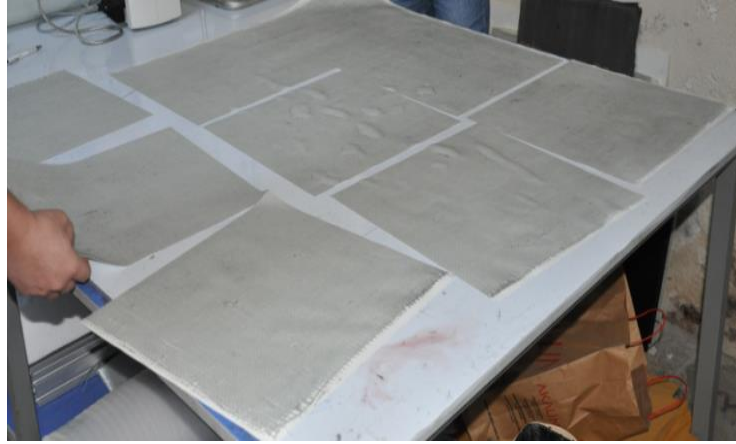
Şekil 3.2: Epoksi ile KNT'nin karıştırılması

Ultrasonik karıştırıcıda hazırlanan üç farklı KNT oranına sahip reçine karışımları, daha önceden her bir karışım için masaya serilen mumlu cam elyaf kumaşlar üzerine sürülerek emdirilmiştir (Şekil 3.3). Pre-preg işlemi kısaca, kumaşa reçinenin kurlenme esnasında değil önceden emdirilmesidir. Özel katalizörler katılarak elde edilen KNT'li reçine emmiş pre-preg kumaşlar, iki hafta kumaşların içindeki hava kabarcıklarının uzaklaştırılması ve iyi bir şekilde jelleşme olması için bekletilmiştir.



Şekil 3.3: Epoksi reçine karışımının cam elyaf kumaşlara emdirilmesi

İki hafta bekletilen pre-preg kumaşlar, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi 40x40 cm boyutlarında kesilmiştir. Kürlemenin yapılacağı ısıtmalı hidrolik preste maksimum 40x40 cm ebatlarında malzeme preslenebildiği için belirtilen boyutlarda kesilen pre-preg kumaşlar mumlu kağıttan ayrılarak 15 kat olacak şekilde üst üste serilmiştir.



Şekil 3.4: 40x40 cm ebatlarındaki cam elyaf-reçine karışımı

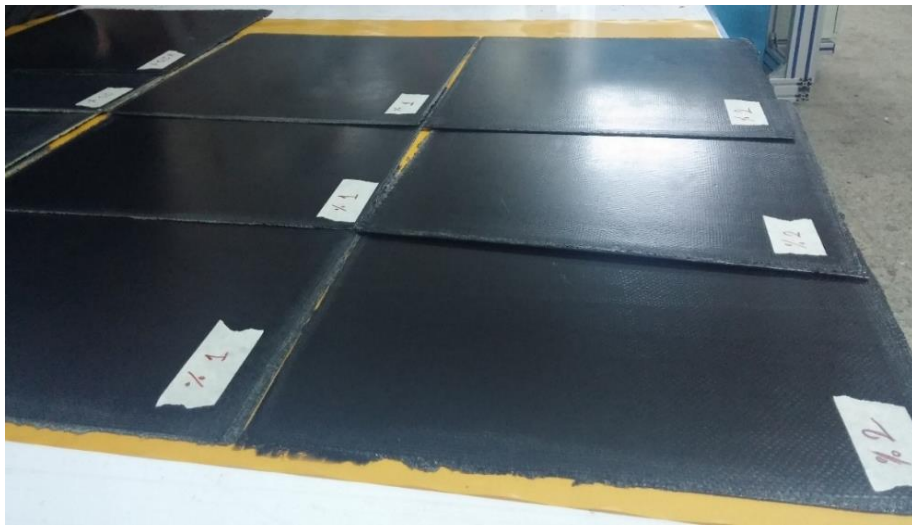
Üst üste serilen pre-preg kumaşlar, kenarlarından reçinenin sızması için kağıt bantla bantlanıp yanmaz silikonlu kağıt ile sarılmıştır. Kompozit plaka kalınlığının 2 mm'den farklı kalınlıkta olmaması için preste katmanlanan pre-preg kumaşların etrafına gelecek şekilde 2 mm kalınlığında metal destekler konulmuştur. 120°C'ye kadar ısıtılan hidrolik preste yanmaz silikonlu kağıtla sarılan kumaşlar Şekil 3.5'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Kompozit plaka hidrolik preste 5 bar basınçta iki saat boyunca kürlenmiş. 2 saat sonunda hidrolik presteki ısıtıcılar kapatılarak üç

saat hidrolik presin kapalı olarak, malzeme içerisinde iken soğuması için beklenilmiştir.



Şekil 3.5: Katmanlanan pre-preg kumaşların 120 °C ye ısıtılmış hidrolik preste k rleşmesi

Kompozit diskte gerilme analizi için gerekli mekanik özellikleri elde etmek amacıyla katkısız ve karbon nanotüp katkılı (% 0.5, % 1 ve % 2) kompozit plakalar Şekil 3.6'da g r ld ğu gibi elde edilmiştir..



Şekil 3.6: Hidrolik presten çıkarılan kürlenmiş kompozit plakalar

3.2 Kompozit Disk İçin Gerekli Mekanik zelliklerin Tespiti

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için ASTM standartlarına uygun olarak deneyler yapılmış ve bunun sonucunda farklı karbon nanotüp oranlarında üretilen kompozit disklerin mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

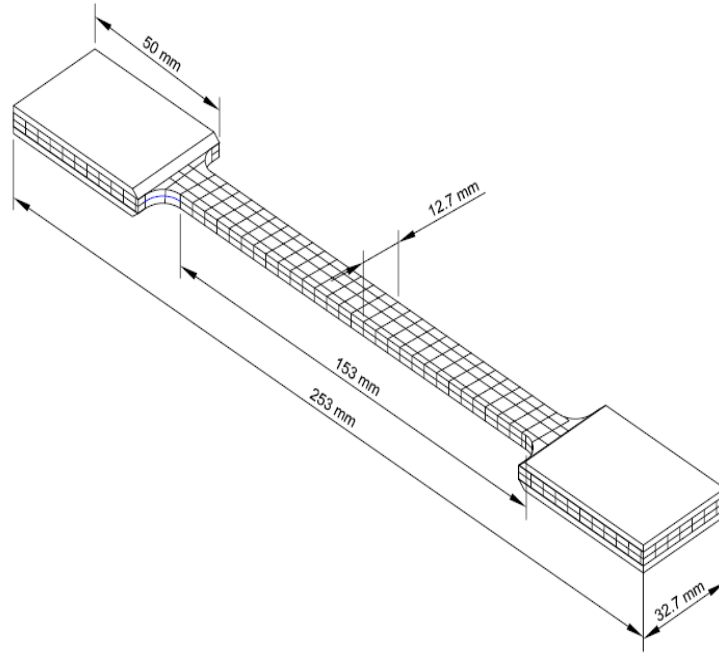
3.2.1 Çekme deneyi

Bu çalışmada üretilen katkılı ve katkısız kompozit disklerin tek eksenli çekme deneyi ASTM D3039 standartlarına göre kesilen çekme numunelerinden yapılmıştır. Çekme deneyleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik A.B.D. de bulunan 50 kN kapasiteli Instron 8081 ekme basma cihazında gerçekleştirilmiş olup numunelerin uzamaları ise video ektansiyometre ile llmştr. Bu deneyler neticesinde E_1 , E_2 , ν_{12} , X_t ve Y_t parametreleri tespit edilmiştir (şekil 3.7).



şekil 3.7: Çekme ve basma test cihazı

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi E_1 , X_t ve ν_{12} ’nin tespiti için numunelerin eni (w) 12,7 mm ve boyu (l) 253 mm olacak şekilde kesilmiştir. Ayrıca fiberlerin yönüne dik olan doğru 2 indisi ile gösterilmek üzere, fiber yönüne dik doğrultudaki elastisite modülü E_2 ve kopma mukavemeti Y_t ’nin tespiti için kullanılan cam elyaf woven örgülü tip olduğu için fiber yönü ile fibere dik doğrultuda elde edilen mekanik özellikler eşittir. Bu çekme deneyi ile numunelerde kopma meydana gelene kadar çekme yükü uygulanmış ve bu çekme hasar yüklerinin (F_{max}) numune kalınlığı ve enine bölünmesiyle de kopma mukavemetleri olan X_t ve Y_t elde edilmiştir.



Şekil 3.8: Çekme deney numunesi

Fibermak firması tarafından kontrol altında üretilen katkısız ve karbon nanotüp katkılı cam elyaf takviyeli kompozit disklerin elastisite modülü σ - ϵ diyagramının eğiminden elde edilmektedir. Gerilme değeri kuvvetin, numunenin kesit alanına bölümünden, % uzama ise cihaz üzerine bağlanan video extansiyometreden elde edilmiştir. Poisson oranının tespiti; enine iki, boyuna iki nokta işaretlemesi yapılarak ölçülmüştür.

Enine iki noktanın test esnasında birbirine yaklaşması ile video enine daralmayı % olarak hesaplarken, benzer şekilde boyuna konulan iki noktanın

birbirinden uzaklaşması ile boyuna uzama hesaplanmıştır. Bu iki değerin birbirine bölünmesi ile poisson oranı elde edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Çekme deney numunesi

Çekme deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.3’de verilmiştir. Tablo 3.3’de görüleceği gibi maksimum elastisite modülü % 0.5 KNT katkılı kompozit malzemede elde edilmiştir. Diğer karbon oranlarında ve katkısızda elastisite modülünün daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Matris içerisine ağırlıkça % 0.5 KNT’den daha fazla KNT katıldıkça, kompozitin elastisite modülünün azaldığı görülmektedir. Bu durum nano karbon partiküllü cam elyaf kompozit plakalar için literatürde de benzer şekilde bulunmuştur (Montazeri 2011; Chandrasekaran ve diğ. 2011).

Tablo 3.3: Üretilen kompozitlerin çekme deneyi sonuçları

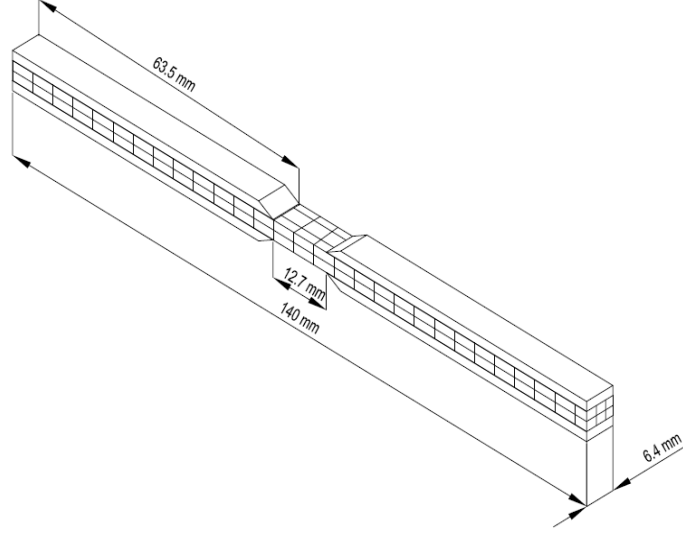
| Mekanik Özellikler | % 0 KNT | % 0.5 KNT | % 1 KNT | % 2 KNT |
|---------------------------------------|---------|-----------|---------|---------|
| Elastisite Modülü, $E_1=E_2$ (MPa) | 25200 | 29850 | 28250 | 26100 |
| Poisson Oranı, ν_{12} | 0.115 | 0.165 | 0.159 | 0.139 |
| Kopma Mukavemeti, $X_t= Y_t$ (MPa) | 402 | 476 | 440 | 418 |

Katkılı ve katkısız kompozit malzemelerin kopma mukavemetleri de elastisite modüllerine benzer şekilde elde edilmiştir. En yüksek değer yine % 0.5 KNT katkılı kompozit malzemede bulunmuştur.

Tüm bunlardan anlaşılmaktadır ki; kullanılan cam elyaf fiber için kritik katkı değeri % 0.5 KNT’dir. Daha fazla katkı negatif etki yapmakta, ancak bu negatif etki katkısız göre daha iyi olmaktadır. Katkısız kompozite göre % 0.5 KNT katkılı kompozitin elastisite modülünde % 18.45 gibi oldukça iyi bir yükselme görülürken, % 1 KNT katkılıda % 12.1 ve % 2 KNT katkılıda % 3.57 gibi bir yükselme görülmüştür. Kopma mukavemetinde ise yine katkısız göre % 0.5 KNT katkılı kompozit % 18.4 gibi bir yükselme gösterirken, % 1 KNT katkılı kompozit % 9.45 ve % 2 KNT katkılı kompozit % 3.98 gibi bir yükselme göstermiştir.

3.2.2 Basma deneyi

Üretilen karbon nanotüp katkılı ve katkısız kompozit malzemelerin bası yükü altındaki mukavemet özellikleri ASTM D3410 standardına göre belirlenmiştir. Bu standarda göre deney numunelerinin geometri ve boyutları Şekil 3.10'da görüldüğü gibidir.



Şekil 3.10: Basma deney numunesi

Kompozit malzemelere ait basma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesinde basma yüklemeleri numunelerde hasar meydana gelene kadar uygulanmıştır. Sonuç olarak da kompozitleri hasara uğratan bası yükleri (F_{max}) numune kesit alanına bölünerek kompozit malzemelere ait basma mukavemetleri X_c ve Y_c belirlenmiştir.

Basma deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.4'de verilmiştir. Tablo 3.4'de görüleceği gibi % 2 KNT'nin basma mukavemeti en yüksek bulunmuştur. Karbon katkısı arttıkça birim alandaki partikül miktarı arttığından basma mukavemetinde artma gözlenmiştir.

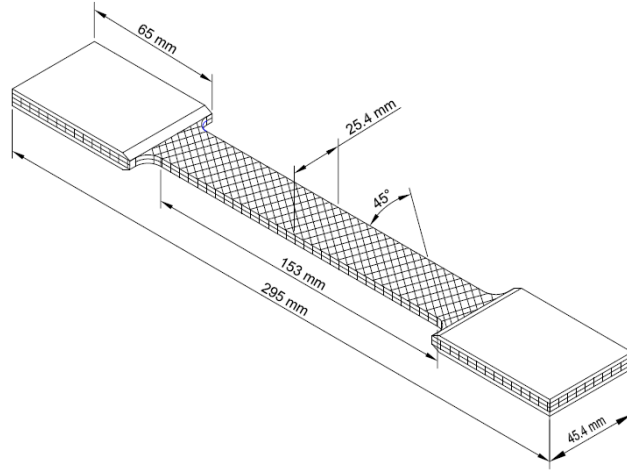
Tablo 3.4: Üretilen kompozitlerin çekme deneyi sonuçları

| Mekanik Özellik | % 0 KNT | % 0.5 KNT | % 1 KNT | % 2 KNT |
|--|---------|-----------|---------|---------|
| Basma Mukavemeti, $X_c = Y_c$ (MPa) | 210 | 242 | 260 | 278 |

3.2.3 Kayma modülü deneyi

Kompozit malzemelere ait kayma modülleri G_{12} 'nin belirlenmesi için de çekme deneyleri yapılmıştır. Böylece woven örgülü disklerden fiber yönü 45° olacak şekilde kesilen deney numunelerine, numunelere hasar meydana gelene kadar çekme cihazında çeki yükü uygulanmıştır.

Deney numuneleri için geometri ve boyutlar Şekil 3.12'de görülmektedir. Numunelere çeki yükünün uygulanması esnasındaki gerilme ve şekil değiştirme verilerinden kompozite ait E_{45° modülü tespit edilmiştir. Bu modül daha önceden belirlenen E_1 , E_2 ve ν_{12} değerleri ile birlikte Denklem (3.1)'de yerine konularak kompozit malzemelere ait G_{12} kayma modülleri elde edilmiştir.



Şekil 3.11: Kayma modülü deney numunesi

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}} \quad (3.1)$$

Tablo 3.5'de görüldüğü gibi numunelerdeki kayma modülleri, KNT katkısına göre farklılıklar göstermiştir. Kritik değer olan % 0.5 KNT katkılı numunede kayma modülü en yüksek değerde elde edilmiştir. Ayrıca sırasıyla % 1 ve % 2 KNT katkılı numunelerin kayma modülü katkısız numuneden yüksek bulunmuştur.

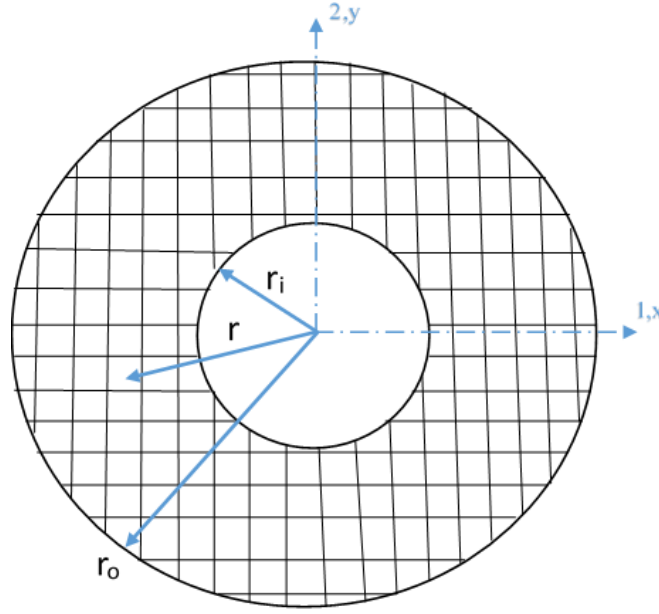
Tablo 3.5: Üretilen kompozitlerin kayma modülü deney sonuçları

| Mekanik Özellik | % 0 KNT | % 0.5 KNT | % 1 KNT | % 2 KNT |
|------------------------------|---------|-----------|---------|---------|
| Kayma Modülü, G_{12} (MPa) | 3650 | 4350 | 4050 | 3800 |

4. KOMPOZİT DİSKTE ELASTİK GERİLME ANALİZİ

4.1 Analitik Genel Elastik Çözüm

Problemde düzlem gerilme durumu göz önüne alınmıştır. Öncelikle incelenen kompozitteki fiberler 0-90 örgü yapısına sahip olduğu için kartezyen koordinatlarda iki boyutlu düzlem gerilme durumu için denge denklemleri,



Şekil 4.1: Kompozit disk

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (4.1a)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \quad (4.1b)$$

şeklinindedir. Burada kütle kuvvetinin fonksiyonu,

$$U = -\frac{1}{2} \rho \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (4.2)$$

şeklindedir. Buradaki ρ ve ω sırasıyla ortotropik malzemenin yoğunluk ve açılma hızını ifade etmektedir. Ayrıca Şekil 4.1’de görülen r_i iç yarıçap, r_o dış yarıçap ve r ise diskte incelenen noktanın diskin merkezine olan uzaklığını sembolize etmektedir.

Ortotropik malzeme için şekil değiştirme bileşenleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = S_{12}\sigma_x + S_{22}\sigma_y \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = S_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Buradaki $S_{11} = 1/E_1$, $S_{22} = 1/E_2$, $S_{12} = -\nu/E_1$, $S_{66} = 1/G_{12}$ olarak tanımlanır. Bu bileşenler arasındaki ilişkiyi ifade eden uygunluk denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial y \partial x} \quad (4.4)$$

(4.1a) ve (4.1b) denklemleri sırasıyla x ve y ye türevlenip düzenlenirse aşağıdaki kayma gerilmesi ifadesi elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (4.5)$$

Şekil değiştirme bileşenleri denklem (4.5) ifadesindeki τ_{xy} kullanılarak uygunluk denkleminde yerine konularak ana diferansiyel denklem olan denklem (4.6) elde edilmiş olunur. Denklem (4.6)' da elde edilen diferansiyel denklem, mekanik yükler altında diskte oluşan, elastik gerilme dağılımlarının tayin edilmesinde kullanılır.

$$S_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + (2S_{12} + S_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + S_{11} S_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = -(S_{12} + S_{22}) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - (S_{11} + S_{12}) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (4.6)$$

Buradaki F, (4.1a) ve (4.1b) denklemlerini sağlayan gerilme fonksiyonudur ve Denklem (4.6) dördüncü dereceden sabit katsayılı homojen olmayan bir kısmi diferansiyel denklemdir çözümü, homojen ve özel çözüm olarak yapılmaktadır. Genel zm ise homojen çözümle özel çözümün toplamıdır.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + U \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + U \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Denklem (4.6), F gerilme fonksiyonunun çözümüne olanak sağlar. (4.6) nolu denklemini sağlayan özel çözümü aşağıdaki gibi elde edilebilir (Chang 1975).

$$F_1 = C_1 (x^2 + y^2)^2 \quad (4.8)$$

C_1 , denklem (4.6)' dan aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$C_1 = \frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} \quad (4.9)$$

Denklem (4.6)'ya ait homojen çözümü elde etmek oldukça zordur (Genta ve Gola 1981). Düzlem gerilme durumu için mekanik özellikler vasıtasıyla (4.10) uygunluk denklemi sağlandığı için,

$$S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - S_{66} = 0 \quad (4.10)$$

homojen denklem çözümü aşağıdaki gibi alınmaktadır (Genta ve Gola 1981).

$$F_2 = C_2(x^2 + y^2) + C_3 \ln(x^2 + y^2) \quad (4.11)$$

Genel gerilme fonksiyonu ise,

$$F = F_1 + F_2 \quad (4.12)$$

$$F = C_1(x^2 + y^2)^2 + C_2(x^2 + y^2) + C_3 \ln(x^2 + y^2) \quad (4.13)$$

şeklinde elde edilir. Kartezyen koordinatlarda gerilme bileşenleri denklem (4.14)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 4C_1(3y^2 + x^2) + 2C_2 + 2C_3 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{1}{2} \rho\omega^2(x^2 + y^2) \\ \sigma_y &= 4C_1(3y^2 + x^2) + 2C_2 - 2C_3 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{1}{2} \rho\omega^2(x^2 + y^2) \\ \tau_{xy} &= 4xy \left(-2C_1 + \frac{C_3}{(x^2 + y^2)^2} \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Bu gerilme bileşenleri kutupsal koordinat sistemine aşağıdaki gibi dönüştürülebilir (Callioğlu 2004).

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_x m^2 + \sigma_y n^2 + 2\tau_{xy} mn \\ \sigma_\theta &= \sigma_x n^2 + \sigma_y m^2 - 2\tau_{xy} mn \\ \tau_{r\theta} &= -(\sigma_x - \sigma_y)mn + \tau_{xy}(m^2 - n^2)\end{aligned}\quad (4.15)$$

Buradaki σ_r , σ_θ ve $\tau_{r\theta}$ sırasıyla radyal, teğetsel ve kayma gerilmeleridir. Ayrıca $m=x/r$, $n=y/r$ ve $r^2=x^2+y^2$ şeklinde tanımlanmıştır. Sonuç olarak gerilme bileşenleri denklem (4.16)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 4C_1 r^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r^2} - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2 \\ \sigma_\theta &= 12C_1 r^2 + 2C_2 - \frac{2C_3}{r^2} - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2 \\ \tau_{r\theta} &= 0\end{aligned}\quad (4.16)$$

C_1 denklem (4.9)'dan bulunabilir. C_2 ve C_3 ise sınır koşullarının belirlenmesiyle elde edilir. Kayma gerilmesi bileşeni $\tau_{r\theta}$ dolaylı olarak sınır koşullarını sağlar, çünkü o daima sıfırdır. Kutupsal koordinatlarda gerilme bileşenleri denklem (4.16)'de verildiği gibi sadece r 'nin bir fonksiyonudur. Bunun bir sonucu olarak, şekil değiştirme bileşenleri de r 'nin bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} = S_{11}\sigma_r + S_{12}\sigma_\theta \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} = S_{12}\sigma_r + S_{22}\sigma_\theta \quad (4.18)$$

Radyal yerdeğiştirme u ise denklem (4.18)'den,

$$u_r = 4C_1 r^3 (S_{12} + 3S_{22}) + 2C_2 r (S_{12} + S_{22}) + \frac{2C_3}{r} (S_{12} - S_{22}) - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^3 (S_{12} + S_{22}) \quad (4.19)$$

şeklinde elde edilir.

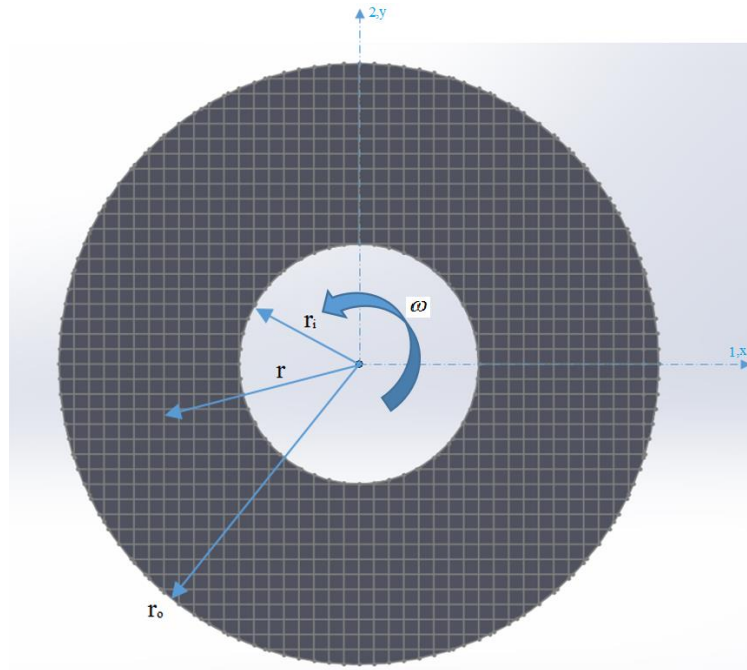
4.1.1 Dönmeye Maruz Kompozit Diskin Analitik Çözümü

Dönen diskin en iç ve en dış kısmında radyal gerilme olmadığı için sınır koşulları buna göre alınarak C_2 ve C_3 bulunabilir.

$$\sigma_r(r_i) = 0, \quad \sigma_r(r_o) = 0 \quad (4.20)$$

$$4C_1 r_i^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r_i^2} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r_i^2 = 0 \quad (4.21)$$

$$4C_1 r_o^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r_o^2} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r_o^2 = 0 \quad (4.22)$$



Şekil 4.2: Açısal hıza maruz kompozit disk

r_i ve r_o sırasıyla iç ve dış yarıçap olmak üzere (4.21) ve (4.22) nolu denklemlerden C_2 ve C_3 çekilirse,

$$C_2 = \left(-2C_1 + \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) \quad (4.23)$$

$$C_3 = \left(2C_1 - \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) r_i^2 r_o^2$$

sonuçları elde edilir. Denklem (4.9)'dan C_1 ifadesi denklem (4.23)'de yerine konularak,

$$C_2 = \left(-\frac{2\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} + \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) \quad (4.24)$$

$$C_3 = \left(\frac{2\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} - \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) r_i^2 r_o^2$$

sabitleri elde edilmiş olunur. Elde edilen C sabitleri denklem (4.16) ve denklem (4.19)'de yerine konulduğunda sırasıyla gerilmeler ve radyal yerdeğişmeler bulunur.

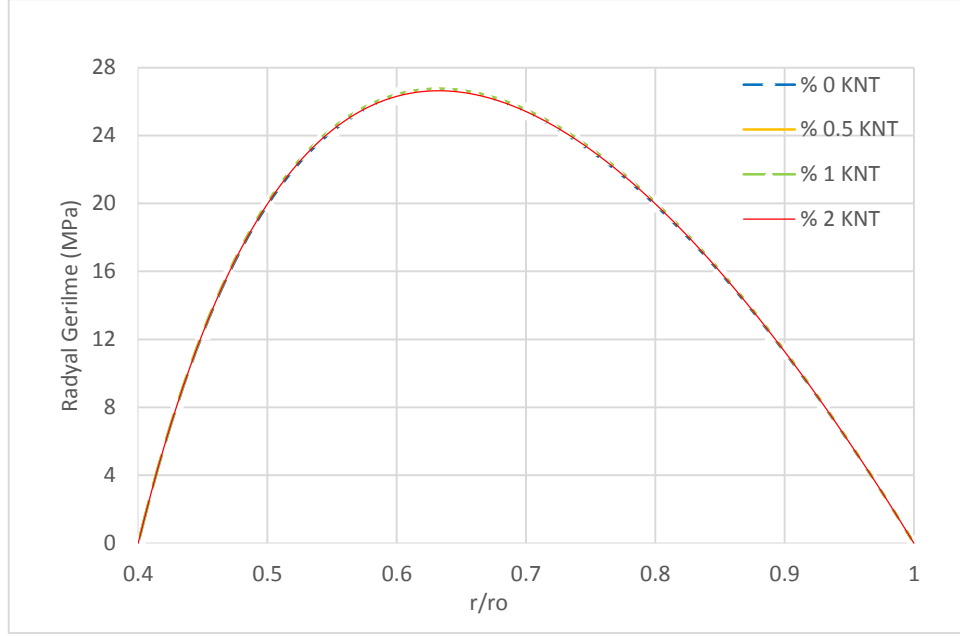
$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} r^2 + \left(-\frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) + \left(\frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \\ \sigma_\theta &= 3 \frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} r^2 + \left(-\frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) - \left(\frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

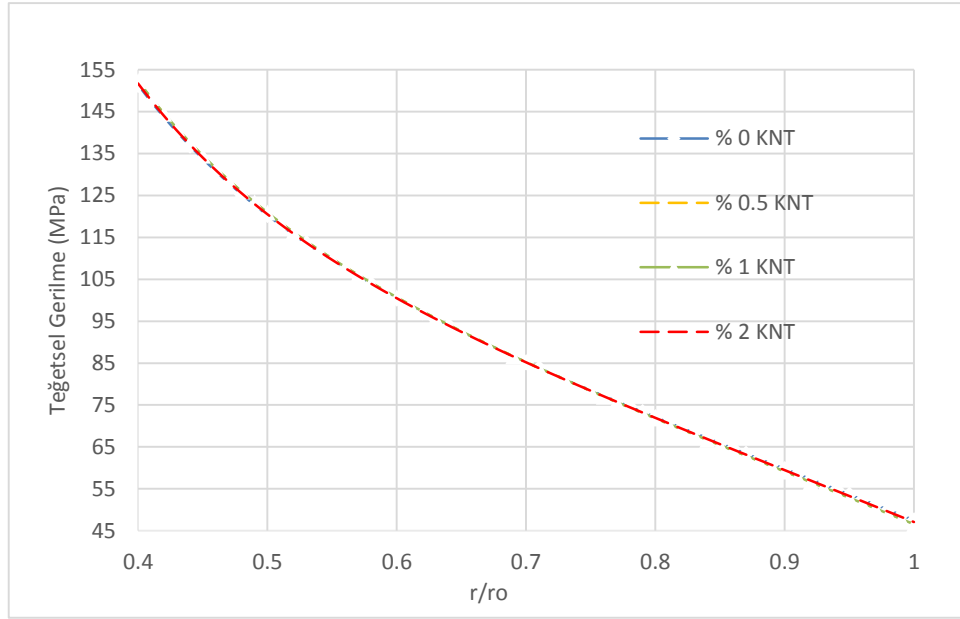
$$\begin{aligned}
u_r = & \frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} r^3(S_{12} + 3S_{22}) + \left(-\frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} \right. \\
& + \frac{1}{2}\rho\omega^2 \left. \right) (r_i^2 + r_o^2) r(S_{12} + S_{22}) + \left(\frac{\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{6(S_{11} + S_{22}) + 2(2S_{12} + S_{66})} \right. \\
& \left. - \frac{1}{2}\rho\omega^2 \right) \frac{r_i^2 r_o^2}{r} (S_{12} - S_{22}) - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^3 (S_{12} + S_{22})
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Dönmeye maruz kompozit diskte oluşan radyal ve teğetsel gerilme dağılımları Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Literatürde ele alınan ve endüstride kullanılan disklerde genellikle r/r_o oranının minimum 0.4 olması ve ele alınan yarıçapın en fazla dış çapa eşit olabilmesi sebebiyle yapılan analizlerde r/r_o oranı 0.4-1 aralığında alınmıştır. Şekil 4.3a'da görüldüğü gibi radyal gerilme bileşenleri diskin iç kısmında ve dış kısmında yaklaşık sıfırdır. Radyal gerilme bileşenleri diskin her yerinde daima çeki durumundadır. Radyal gerilme bileşenleri teğetsel gerilme bileşenleri ile yarı çap boyunca karşılaştırıldığında radyal gerilme bileşenlerinin küçük olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum radyal gerilme değeri r/r_o oranı 0.63 olduğunda % 0.5 KNT oranına sahip diskte, daha sonra sırasıyla % 1, % 2 KNT katkılı ve katkısız diskte olduğu görülmüştür.

Şekil 4.3b'de ise teğetsel gerilme bileşenlerinin yarıçap boyunca dağılımı gösterilmiştir. Teğetsel gerilme bileşeninin en büyük değerinin diskin iç yüzeyinde % 0.5 KNT oranına sahip diskte, daha sonra sırasıyla % 1, % 2 KNT katkılı ve katkısız kompozit diskte olduğu görülmüştür. Diskin iç yüzeyinde oluşan gerilme değerleri dış yüzeyinde oluşan gerilme değerlerinden daha büyüktür. Uygulanan yükün artmasıyla gerilme bileşenlerinin değerleride artmaktadır. Teğetsel gerilme bileşenleri radyal gerilme bileşenlerinden daha büyüktür.



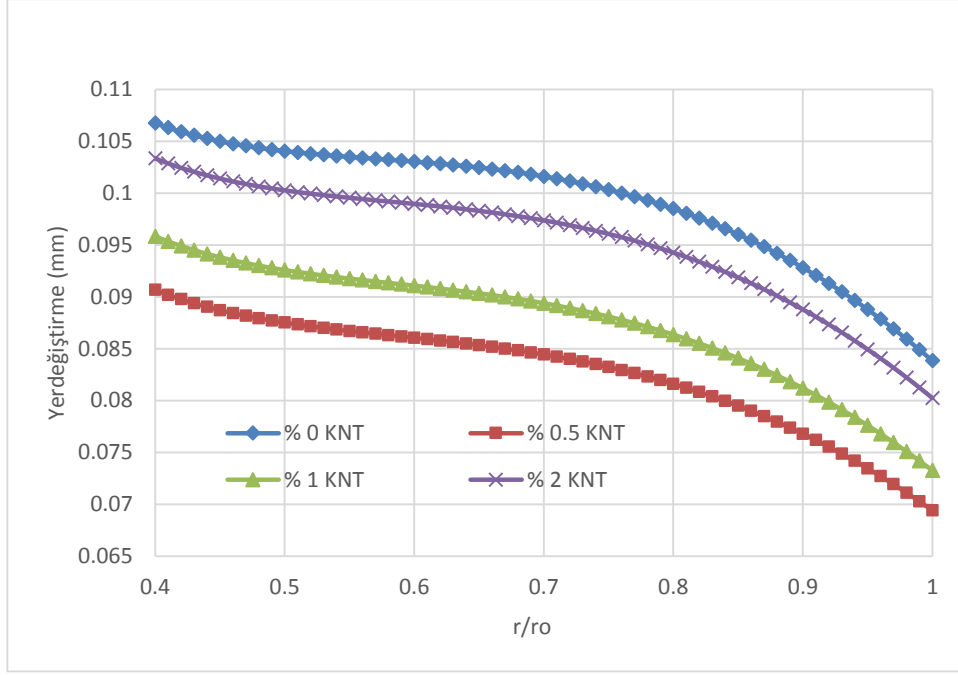
a)



b)

Şekil 4.3: 900 d/dk açılal hızla dönen diskte oluşlan gerilme dağılımı a) radyal ve b) teğetsel

Şekil 4.4'de dönen bir diskte oluşlan radyal yöndeki yer değıştirmeler gösterilmiştir. Diskin iç yüzeyinde oluşlan radyal yöndeki yer değıştirme değeri dış yüzeyinde oluşlan yer değıştirme değeriyle daha büyüktür. Elastisite modülünün yüksek olmasının da etkisiyle mukavemetinin artmasıyla % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte, radyal yöndeki yerdeğıştirmenin en az değeri olduğu gözükmektedir. Ayrıca en fazla yerdeğıştirmenin katkısiz kompozit diskte, daha sonra sırasıyla % 2 ve % 1 KNT katkıli diskte meydana geldiği görülmektedir.



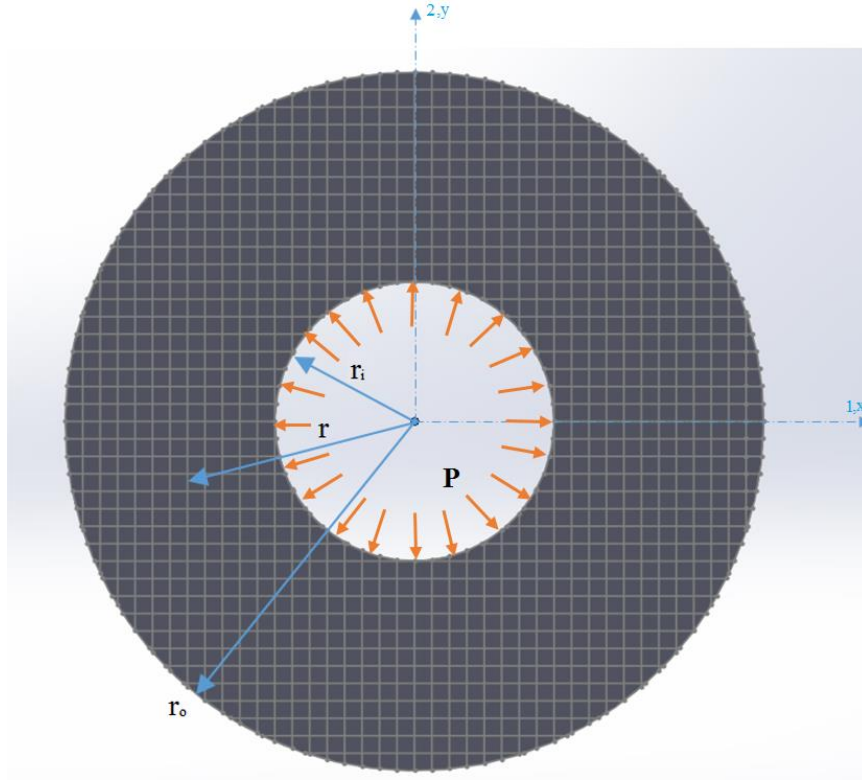
Şekil 4.4: 900 d/dk açısal hızla dönen diskte oluşan radyal yöndeki yerdeğiştirmeler

4.1.2 İç Basınca Maruz Kompozit Diskin Analitik Çözümü

İç basınçlı diskte herhangi bir dönme olmadığından dolayı gerilmelerin tayini için denklem (4.27) kullanılabilir.

$$\sigma_r = 2C_2 + \frac{2C_3}{r^2} \quad (4.27)$$

$$\sigma_\theta = 2C_2 - \frac{2C_3}{r^2}$$



Şekil 4.5: İç basınca maruz kompozit disk

Sınır koşulları aşağıdaki gibi alınarak C_2 ve C_3 bulunabilir.

$$\sigma_r(r_i) = -P, \quad \sigma_r(r_o) = 0 \quad (4.28)$$

$$\sigma_r(r_i) = 2C_2 + \frac{2C_3}{r_i^2} = -P \quad (4.29)$$

$$\sigma_r(r_o) = 2C_2 + \frac{2C_3}{r_o^2} = 0$$

$$C_2 = -\frac{r_i^2 P}{2(r_i^2 - r_o^2)} \quad (4.30)$$

$$C_3 = \left(\frac{P}{2(r_i^2 - r_o^2)} \right) r_i^2 r_o^2$$

Elde edilen C sabitleri denklem (4.16) ve denklem (4.19)'de yerine konulduğunda sırasıyla gerilmeler ve radyal yerdeğiştirmeler bulunur.

$$\sigma_r = -\frac{r_i^2 P}{(r_i^2 - r_o^2)} + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} \left(\frac{P}{(r_i^2 - r_o^2)} \right) \quad (4.31)$$

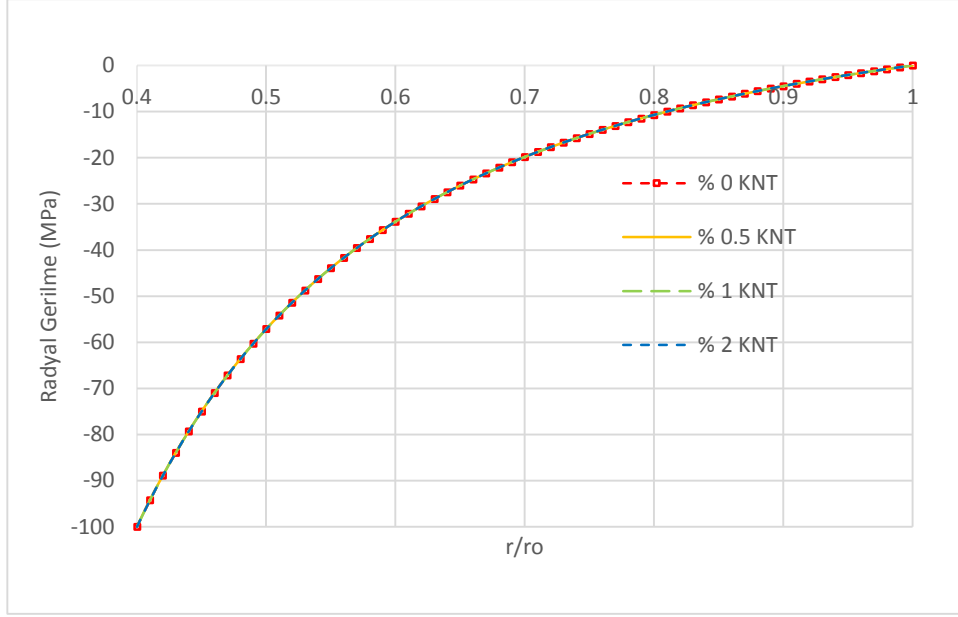
$$\sigma_\theta = -\frac{r_i^2 P}{(r_i^2 - r_o^2)} - \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} \left(\frac{P}{(r_i^2 - r_o^2)} \right)$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

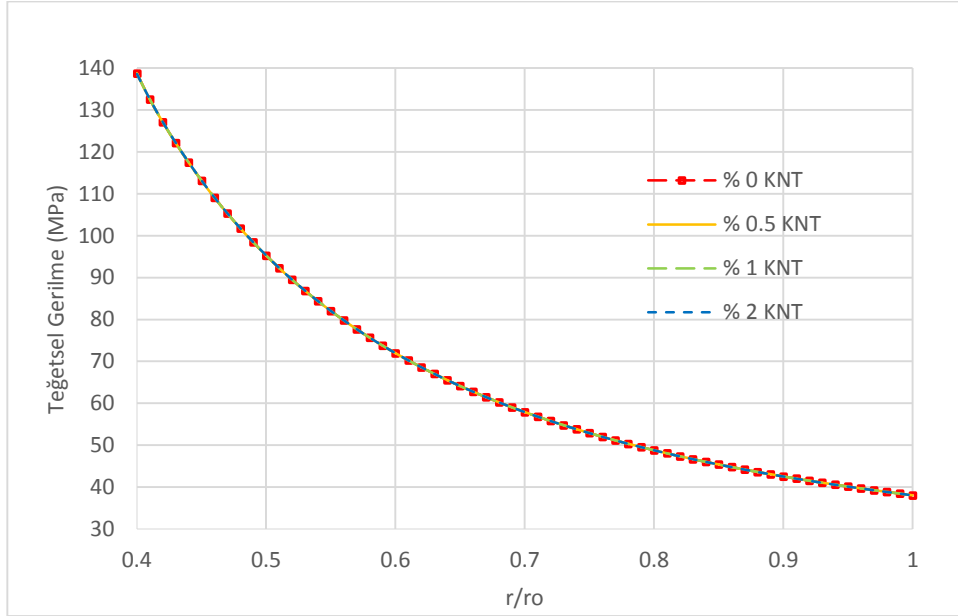
$$u_r = -\frac{r_i^2 P}{(r_i^2 - r_o^2)} r (S_{12} + S_{22}) + \frac{r_i^2 r_o^2}{r} \left(\frac{P}{(r_i^2 - r_o^2)} \right) (S_{12} - S_{22}) \quad (4.32)$$

İç basınca maruz kompozit diskteki teğetsel ve radyal gerilmelerin yarıçap boyunca dağılımları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Katkısız, % 0.5, % 1 ve % 2 KNT katkılı disk için yapılan analizde iç basınçlı diskte gerilme değerleri, formülasyondan da anlaşılacağı üzere mekanik özelliklere değil sadece geometriye bağlı olduğu için değişimin olmadığı görülmektedir. Şekil 4.6a'da görüldüğü gibi radyal gerilme bileşenleri her bir KNT oranı için kompozit diskin iç kısmında yaklaşık olarak uygulanan iç basınca dış kısmında ise sifıra yakın bir değerde bulunmuştur. Radyal gerilme bileşenleri diskin her yerinde daima bası durumundadır. İç basınçlı disk için radyal gerilme bileşeni maksimum iç yüzeyde elde edilmiştir.

Şekil 4.6b'de ise teğetsel gerilme bileşenlerinin yarıçap boyunca dağılımı her bir KNT oranı için teğetsel gerilme bileşeni en büyük değerine diskin iç yüzeyinde ulaşmıştır. Diskin iç yüzeyinde oluşan gerilme değerleri dış yüzeyinde oluşan gerilme değerlerinden daha büyüktür. Uygulanan yükün artmasıyla gerilme bileşenlerinin değerleri de artmaktadır.



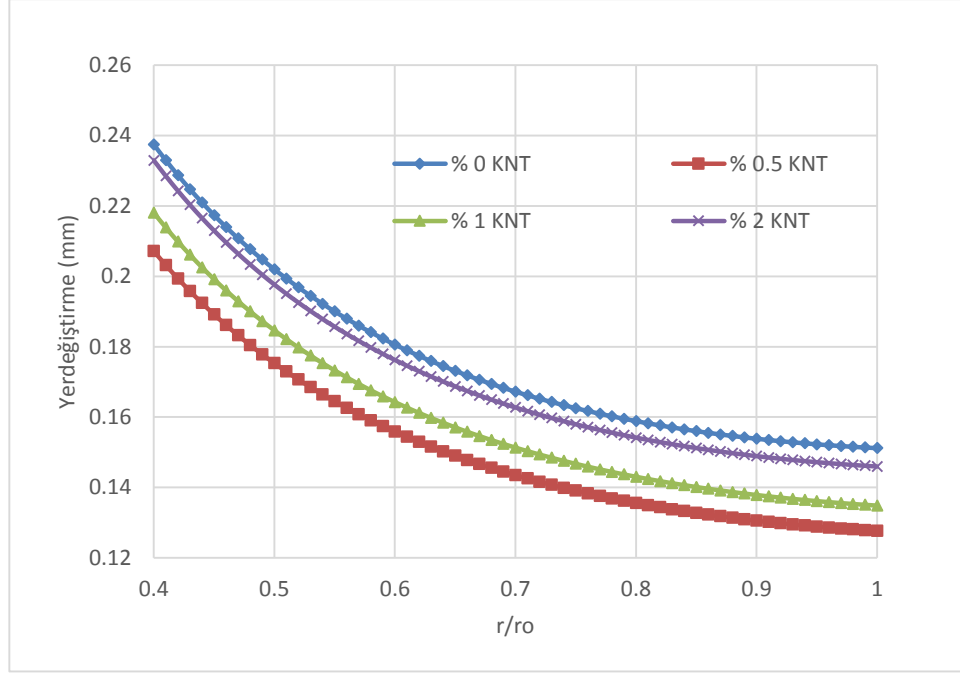
a)



b)

Şekil 4.6: 100 MPa iç basınca maruz diskte oluşan gerilme dağılımı a) radyal ve b) teğetsel

Şekil 4.7’de iç basınca maruz kompozit diskte oluşan radyal yöndeki yer değiştirmeler gösterilmiştir. Diskin iç yüzeyinde oluşan radyal yöndeki yer değiştirme değerleri dış yüzeyinde oluşan yer değiştirme değerlerinden daha büyüktür. Elastisite modülünün yüksek olmasının da etkisiyle mukavemetinin artmasıyla % 0.5 KNT katkılı kompozit diskte, radyal yöndeki yerdeğiştirmenin en az değerinde olduğu gözükmektedir. Ayrıca en fazla yerdeğiştirmenin katkısız kompozit diskte, daha sonra sırasıyla % 2 ve % 1 KNT katkılı diskte meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.7: 100 MPa iç basınca maruz diskte oluşan radyal yöndeki yerdeğiştirmeler

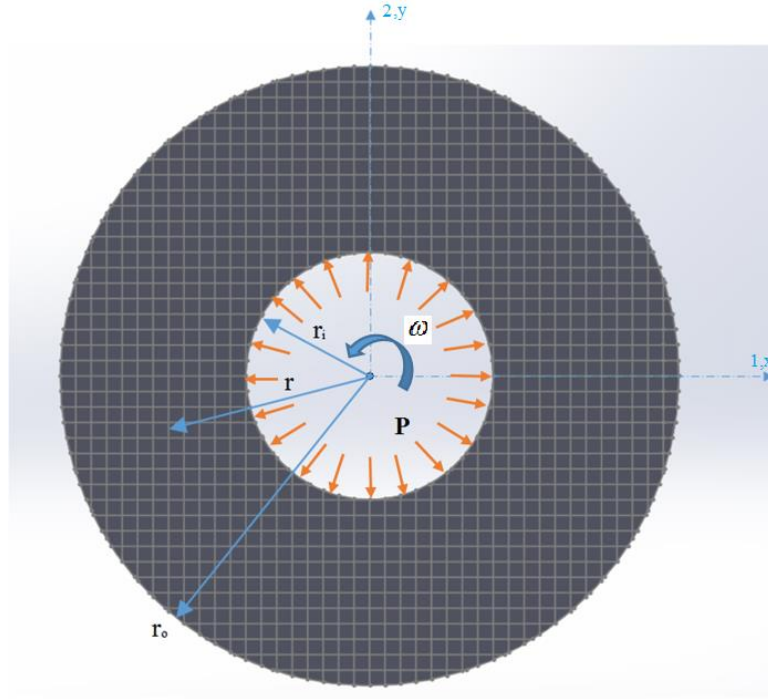
4.1.3 İç Basınca ve Dönmeye Maruz Kompozit Diskin Analitik Çözümü

İç basınçlı dönen disk için sınır koşulları aşağıdaki gibi alınarak C_2 ve C_3 bulunabilir.

$$\sigma_r(r_i) = -P, \quad \sigma_r(r_o) = 0 \quad (4.33)$$

$$4C_1r_i^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r_i^2} - \frac{1}{2}\rho\omega^2r_i^2 = -P \quad (4.34)$$

$$4C_1r_o^2 + 2C_2 + \frac{2C_3}{r_o^2} - \frac{1}{2}\rho\omega^2r_o^2 = 0 \quad (4.35)$$



Şekil 4.8: İç basınç ve açısal hız maruz kompozit disk

(4.34) ve (4.35) nolu denklemlerden C_2 ve C_3 çekilirse,

$$C_2 = \left(-2C_1 + \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) - \frac{r_i^2 P}{2(r_i^2 - r_o^2)} \quad (4.36)$$

$$C_3 = \left(2C_1 + \frac{P}{2(r_i^2 - r_o^2)} - \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) r_i^2 r_o^2$$

sonuçları elde edilir. Denklem (4.9)'dan C_1 ifadesi denklem (4.36)'de yerine konularak,

$$C_2 = \left(-\frac{2\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} + \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) - \frac{r_i^2 P}{2(r_i^2 - r_o^2)} \quad (4.37)$$

$$C_3 = \left(\frac{2\rho\omega^2(S_{11} + 2S_{12} + S_{22})}{24(S_{11} + S_{22}) + 8(2S_{12} + S_{66})} + \frac{P}{2(r_i^2 - r_o^2)} - \frac{1}{4} \rho \omega^2 \right) r_i^2 r_o^2$$

sabitleri elde edilmiş olunur. Elde edilen C sabitleri denklem (4.16) ve denklem (4.19)'de yerine konulduğunda sırasıyla gerilmeler ve radyal yerdeğiştirmeler bulunur.

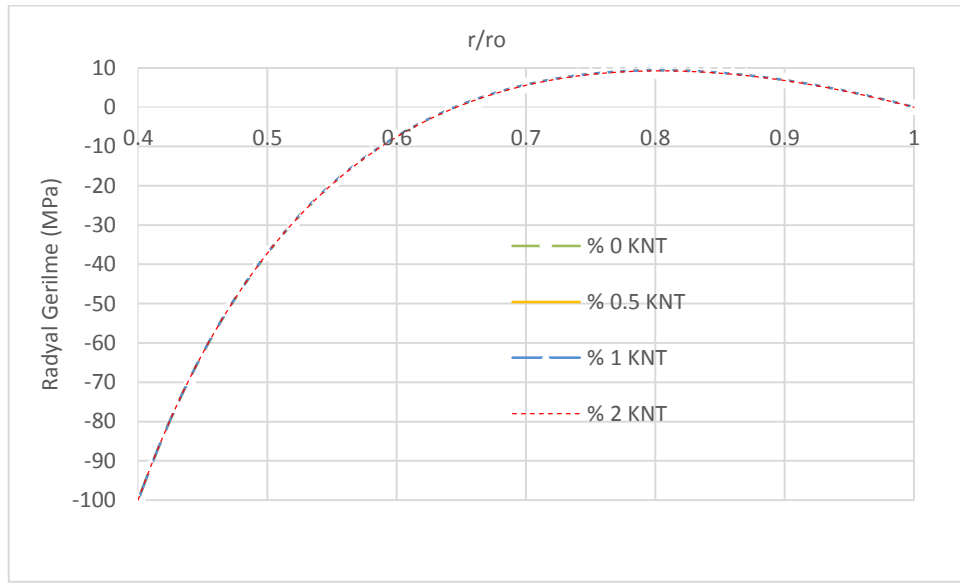
$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{6(S_{11}+S_{22})+2(2S_{12}+S_{66})}r^2 + \left(-\frac{2\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{12(S_{11}+S_{22})+4(2S_{12}+S_{66})} + \frac{1}{2}\rho\omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) \\ &- \frac{r_i^2 P}{(r_i^2 - r_o^2)} + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} \left(\frac{2\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{12(S_{11}+S_{22})+4(2S_{12}+S_{66})} + \frac{P}{(r_i^2 - r_o^2)} - \frac{1}{2}\rho\omega^2 \right) - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2 \\ \sigma_\theta &= 3\frac{\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{6(S_{11}+S_{22})+2(2S_{12}+S_{66})}r^2 + \left(-\frac{2\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{12(S_{11}+S_{22})+4(2S_{12}+S_{66})} + \frac{1}{2}\rho\omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) \quad (4.38) \\ &- \frac{r_i^2 P}{(r_i^2 - r_o^2)} - \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2} \left(\frac{2\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{12(S_{11}+S_{22})+4(2S_{12}+S_{66})} + \frac{P}{(r_i^2 - r_o^2)} - \frac{1}{2}\rho\omega^2 \right) - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2\end{aligned}$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

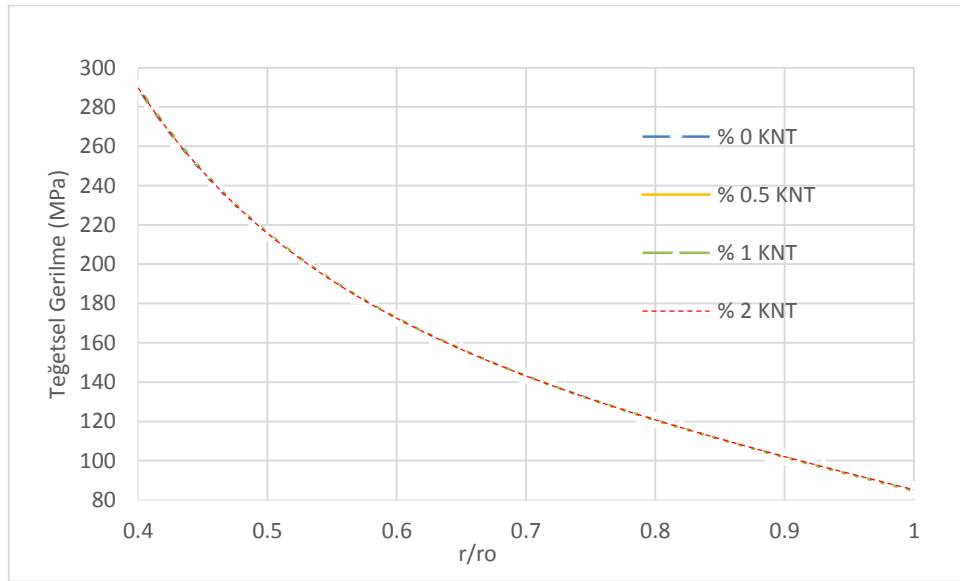
$$\begin{aligned}u_r &= \frac{\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{6(S_{11}+S_{22})+2(2S_{12}+S_{66})}r^3(S_{12}+3S_{22}) \quad (4.39) \\ &+ \left(\left(-\frac{2\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{12(S_{11}+S_{22})+4(2S_{12}+S_{66})} + \frac{1}{2}\rho\omega^2 \right) (r_i^2 + r_o^2) - \frac{r_i^2 P}{(r_i^2 - r_o^2)} \right) r(S_{12} + S_{22}) \\ &+ \frac{r_i^2 r_o^2}{r} \left(\frac{2\rho\omega^2(S_{11}+2S_{12}+S_{22})}{12(S_{11}+S_{22})+4(2S_{12}+S_{66})} + \frac{P}{(r_i^2 - r_o^2)} - \frac{1}{2}\rho\omega^2 \right) (S_{12} - S_{22}) - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^3 (S_{12} + S_{22})\end{aligned}$$

İç basınçlı dönmeye maruz kompozit diskteki teğetsel ve radyal gerilmelerin yarıçap boyunca dağılımları Şekil 4.9'de gösterilmiştir. Şekil 4.9a'da görüldüğü gibi radyal gerilme bileşenleri her bir KNT oranı için kompozit diskin iç kısmında yaklaşık olarak uygulanan iç basınca dış kısmında ise sıfıra yakın bir değer olarak bulunmuştur. Radyal gerilme bileşenleri diskin çoğu yerinde daima bası durumundadır. Radyal gerilme bileşenleri teğetsel gerilme bileşenleri ile yarı çap boyunca karşılaştırıldığında radyal gerilme bileşenlerinin küçük olduğu gözlemlenmektedir. İç basınçlı dönen disk için radyal gerilme bileşeni maksimum iç yüzeyde elde edilmiştir. Maksimum radyal gerilme değeri % 0.5 KNT oranına sahip diskte, daha sonra sırasıyla % 1, % 2 ve katkısız % 0 KNT oranına sahip diskte olduğu görülmüştür.

Şekil 4.9b’de ise teğetsel gerilme bileşenlerinin yarıçap boyunca dağılımı her bir KNT oranı için ayrı ayrı gösterilmiştir. Teğetsel gerilme bileşeninin en büyük değeri diskin iç yüzeyinde % 0.5 KNT oranına sahip diskte, daha sonra sırasıyla % 1, % 2 KNT katkılı ve katkısız kompozit diskte olduğu görülmüştür. Diskin dış yüzeyinde oluşan gerilme değerleri iç yüzeyinde oluşan gerilme değerlerinden daha küçüktür. Uygulanan yükün ve açısal hızın artmasıyla gerilme bileşenlerinin değerleri de artmaktadır. Teğetsel gerilme bileşenleri radyal gerilme bileşenlerinden daha büyüktür.



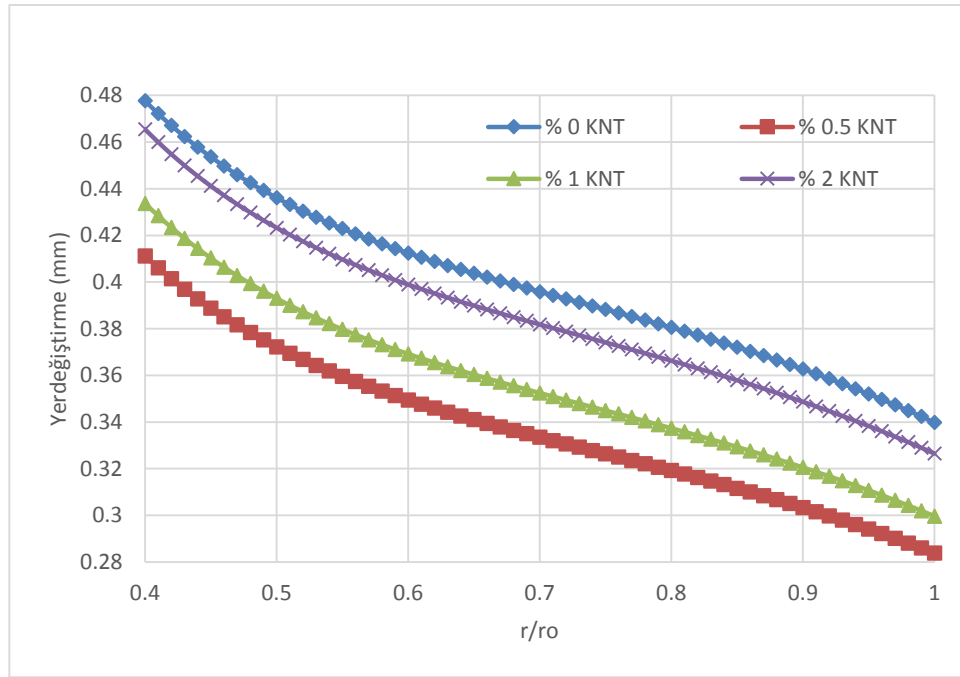
a)



b)

Şekil 4.9: 100 MPa iç basınca ve 900 d/dk açısal hıza maruz diskte oluşan gerilme dağılımı a) radyal ve b) teğetsel

Şekil 4.10’da iç basınçlı dönen bir diskte oluşan radyal yöndeki yer değiştirmeler gösterilmiştir. Diskin iç yüzeyinde oluşan radyal yöndeki yer değiştirme değerleri dış yüzeyinde oluşan yer değiştirme değerlerinden daha büyüktür. Elastisite modülünün yüksek olmasının da etkisiyle mukavemetinin artmasıyla % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte, radyal yöndeki yerdeğiştirmenin en az değerinde olduğu gözükmektedir. Ayrıca en fazla yerdeğiştirmenin katkısız kompozit diskte, daha sonra sırasıyla % 2 ve % 1 KNT katkıli diskte meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.10: 100 MPa iç basınca ve 900 d/dk açısız hıza maruz diskte oluşan radyal yöndeki yerdeğiştirmeler

4.2 Nümerik Analiz

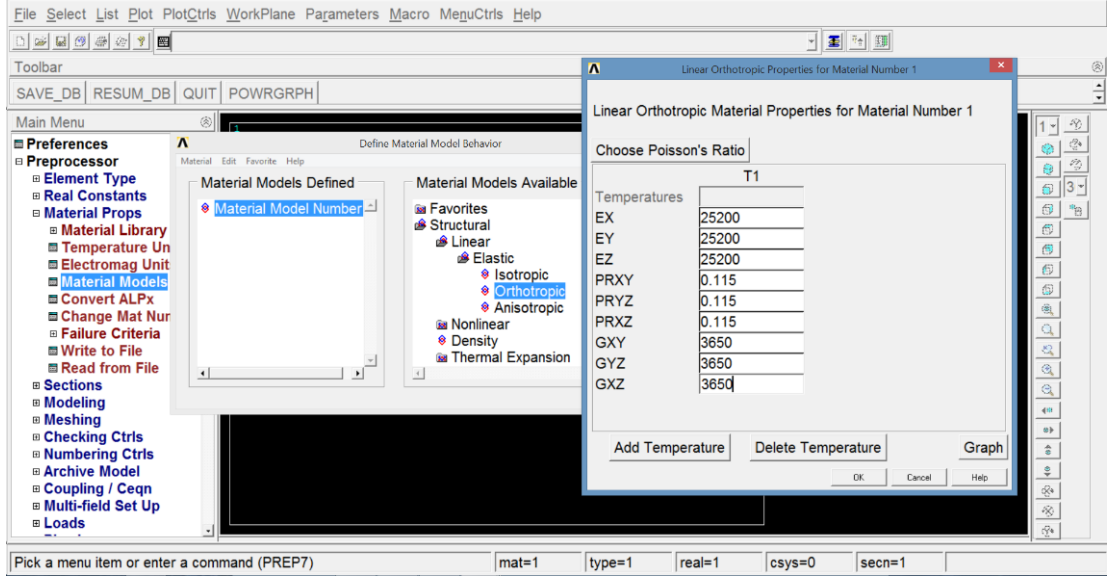
Kompozit diskın nümerik analizi sonlu elemanlar metodu ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu (SEM), mühendislik ve fizik alanındaki karmaşık problemin çözümünde kullanılan en etkili ve yaygın sayısal yöntemlerdendir. Metot, karmaşık yapıya sahip problemin çözümünde tanımlanmış sonlu sayıda eleman kullanılarak yeterli bir modelleme esasına dayanır. Böyle problemler “sonlu” olarak adlandırılır. Cisim sonlu sayıdaki elemanlarla birbirine bağımlı gibi düşünülür. Sonlu sayıdaki bu bağlantı noktaları ne kadar çoğaltılırsa, bu metotla yapılan çözümlerdeki hata oranı da o kadar küçülür. Sonlu elemanlar metodunun önemli bir özelliği, tüm problemi

temsil etmek üzere elemanları bir araya getirmeden önce, her bir elemanın ayrı ayrı formüle edilebilmesidir.

Çoğunlukla tasarlanan bir sistemin yada yapının deney şartlarını sağlamak, modelini oluşturmak mümkün olmamaktadır. Mümkün olsa da elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olmak adına başka metotlarla da desteklemek gerekmektedir. Günümüzde bilgisayar teknolojilerinin ve bu doğrultuda ortaya çıkan paket programların artması ve hızla gelişmesi yapılan hesapların nümerik yöntemlerle yapılabilmesini sağlayacak bir çok etkili yöntemi insanlığın hizmetine sunmaktadır. Bu konuda da en yaygın faydalanılan metotlardan biri olan SEM'le bilgisayar ortamında iyi bir modelleme yapılması, gerçek verilere en yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

SEM ile yapıların nümerik çözümünün yapılmasına olanak sağlayan bir çok paket program bulunmaktadır. ANSYS programı en yaygın kullanılanlardan biridir. % 0.5, % 1, % 2 KNT katkılı ve katkısız cam elyaf takviyeli epoksi bazlı kompozit levhalardan tasarlanan disklerin nümerik analizi ANSYS 13.0[®] programının Mechanical APDL modülünde yapılmıştır. Analizler, her bir KNT oranına sahip disk için ayrı yapılmıştır. Ayrıca diskte sadece dönme, sadece iç basınç ve hem dönme hem iç basıncın olduğu durumlar ele alınmıştır.

Program kapsamında kompozit disk için Solid Shell eleman seçilerek gerekli malzeme özellikleri, sırasıyla Preprocessor, Material Properties, Material Models, Structural, Linear, Elastic ve Orthotropic sekmeleri takip edilerek çıkan ekranda malzeme özellikleri girilmiştir. Şekil 4.11'de örnek olarak katkısız kompozit diske ait malzeme özellikleri görülmektedir.

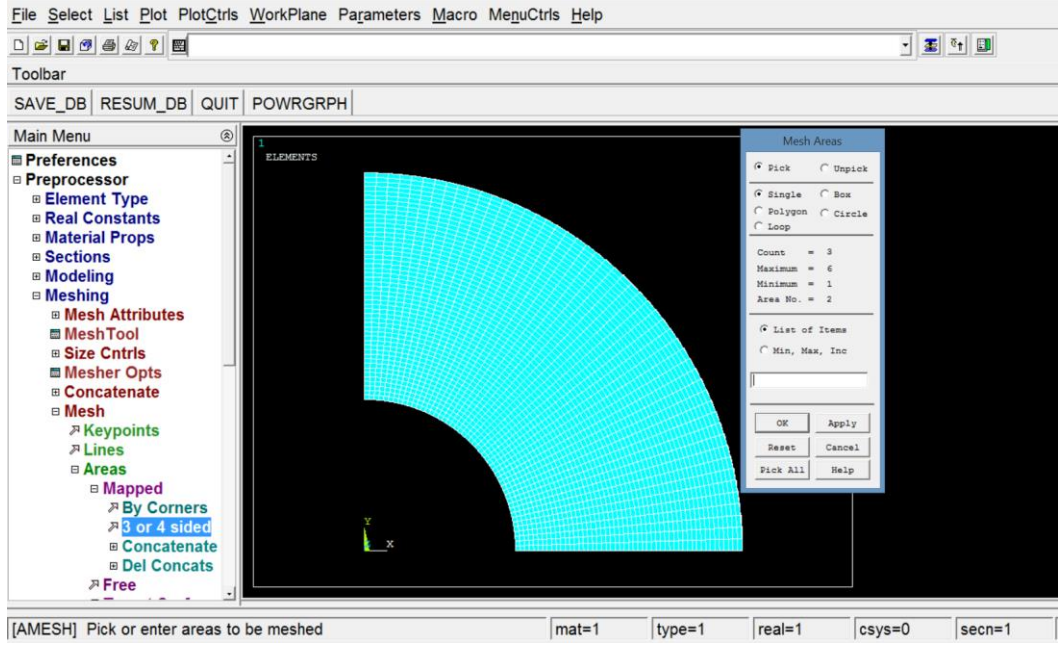


Şekil 4.11: ANSYS’de malzeme tanımlamalarının yapılması

Geometri için Preprocessor ve modeling sekmeleri kullanılarak, daha az mesh olması ve işlemlerin bilgisayarda çözümünde kolaylık sağlanması için uygulanan kuvvetleri tamamına olduğu gibi yansıtan diskin dörtte biri modellenmiştir.

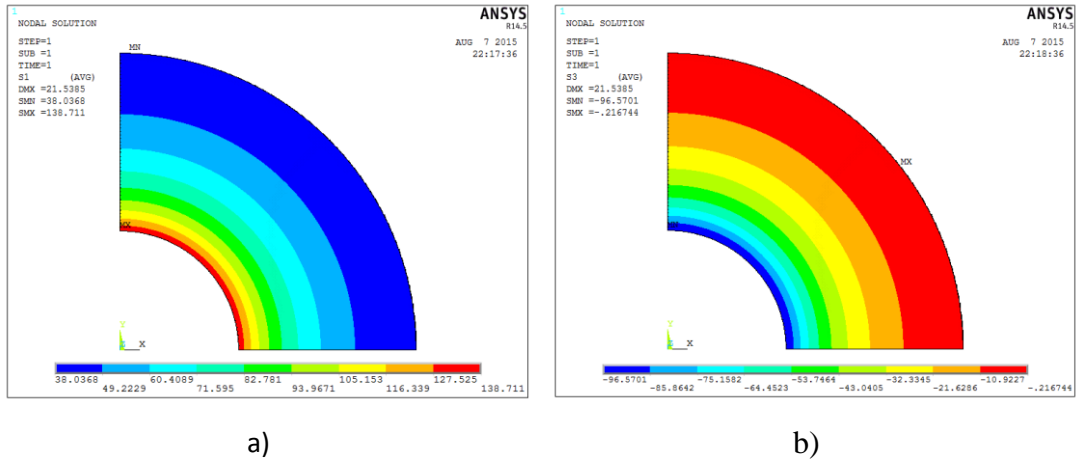
Sonlu elemanlar metoduyla modelleme yapılırken, yapı küçük temel elemanlara ayrılıp, yani ağ işlemi yapılmaktadır. Her bir elemanın köşesinde düğümler bulunur. Yapılan hesaplamalar, bu düğüm noktaları üzerinden gerçekleştirilir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, düğüm noktalarındaki değerlerden oluşmaktadır.

Yapılan ağ işlemi elde edilen elemanların geometrisini ve devamında analiz sonucunu etkileyeceğinden, disk için en düzgün geometri ve eleman dağılımı elde edilen mapped mesh uygulanmıştır (Şekil 4.12). Ağ işlemi sonucunda kompozit çeyrek diskin sonlu eleman ağı oluşturulduğunda, toplam 10000 adet eleman ve 13005 adet düğüm noktası oluşmaktadır.



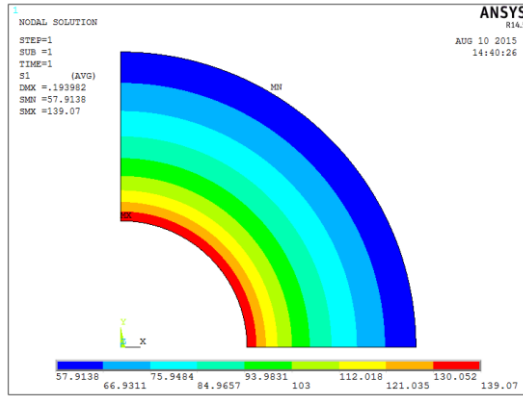
Şekil 4.12: Sonlu eleman ağının oluşturulması

Çeyrek diski tam diske tamamlayıcı kenarlarına simetriklik şartı verilerek çözüm genelleştirilmiştir. Yani çeyrek diskte yapılan her işlem ve analiz sonuçları diskin tamamıyla ilgili bilgi vermektedir. Bu sınır şartı altında iç basınç ve Z ekseninde açılma hızı verilerek General Postprocessor sekmesinden elde edilen teğetsel ve radyal gerilmeler her bir KNT oranı için bulunmuştur.

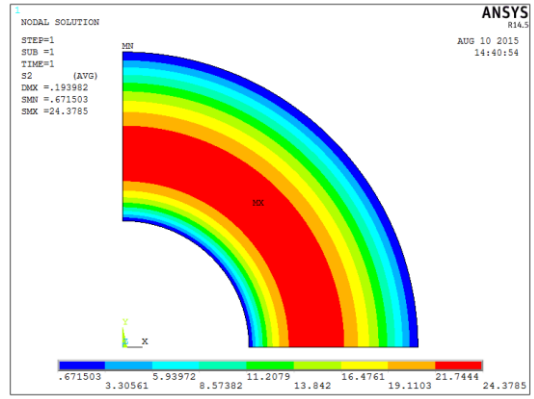


Şekil 4.13: 100 MPa iç basınca maruz % 0.5 KNT katkılı kompozit diskte oluşan gerilme analizi a) teğetsel ve b) radyal

İç basınca maruz kompozit diskte gerilmelerin değişmediği nümerik analiz sonuçlarında da görülmüştür. Kompozit diskte iç basınçla oluşan teğetsel ve radyal gerilme nümerik analiz sonuçları Şekil 4.13’de görülmektedir.



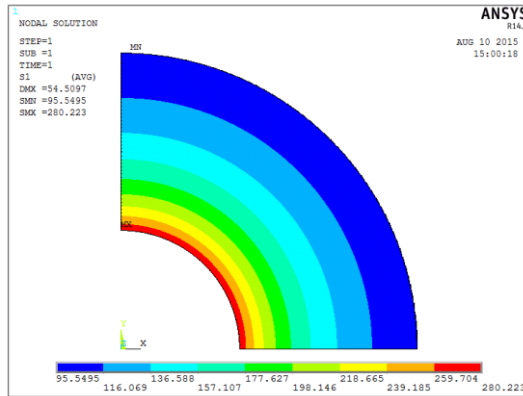
a)



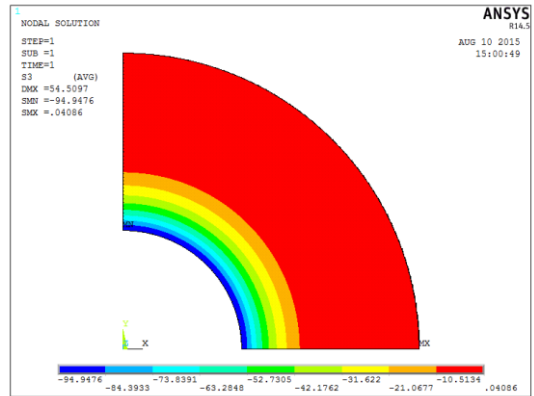
b)

Şekil 4.14: 900 d/dk açısız hızı maruz % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşun gerilme analizi a) teğetsel ve b) radyal

Açısız hızı maruz % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşun teğetsel ve radyal gerilmelerin, katkısiz, % 1 ve % 2 katkı oranlarına kıyasla daha yüksek olduğun nümerik analiz sonuçlarında da görülmüştür. % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşun gerilmelerin nümerik analiz sonuçları Şekil 4.14'de görülmektedir.



a)



b)

Şekil 4.15: 100 MPa iç basınca ve 900 d/dk açısız hızı maruz % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşun gerilme analizi a) teğetsel ve b) radyal

İç basınca ve açısız hızı maruz % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşun teğetsel ve radyal gerilmelerin, katkısiz, % 1 ve % 2 katkı oranlarına kıyasla daha yüksek olduğun nümerik analiz sonuçlarında da görülmüştür. % 0.5 KNT katkıli kompozit diskte oluşun gerilmelerin nümerik analiz sonuçları Şekil 4.14'de görülmektedir.

4.3 Hasar Analizi

Kompozit malzemelerin elastiklik özellikleri gibi dayanımları da anizotropiktir. Ortotrop malzemeler için çok eksenli gerilme durumlarında değişik hasar kriterleri (Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hoffman vb.) kullanılmaktadır.

Kompozit diskte her bir KNT oranı için farklı iç basınca ve açısal hıza maruz durumlardaki hasar analizi için bütün gerilmeleri ihtiva eden en yaygın kullanılan kriterlerden biri olduğu için Tsai-Wu Gerilme Teorisi kullanılmıştır.

4.3.1 Tsai-Wu Gerilme Teorisi'ne Göre Diskteki Hasar Analizi

Tsai-Wu gerilme teorisi, kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en yaygın kullanılan teorilerinden biridir. Kompozit disk için uyarlanmış Tsai-Wu Hasar Kriteri kullanılmaktadır (Mohammadi ve diğ. 2010). Bu gerilme teorisine göre hasar indeksi 1'den büyük ise hasar meydana gelmektedir.

Eğer denklem (4.40) sağlanmazsa kompozit disk hasara uğrar.

$$f_1(\sigma_k) = \left(\frac{1}{2}X + \frac{1}{2}\sqrt{X^2 + 4Y^2} \right)^2 \leq 1 \quad (4.40)$$

Buradaki

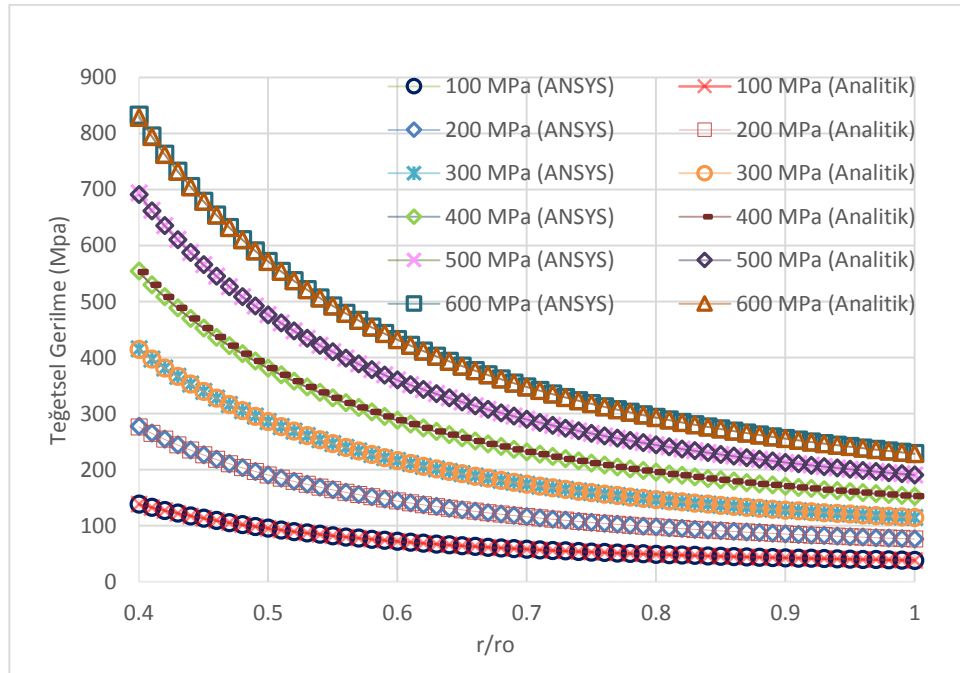
$$X = k_1\sigma_r + k_2\sigma_\theta \quad (4.41)$$

$$Y = \sqrt{k_{11}\sigma_r^2 + k_{22}\sigma_\theta^2 - k_{12}\sigma_r\sigma_\theta}$$

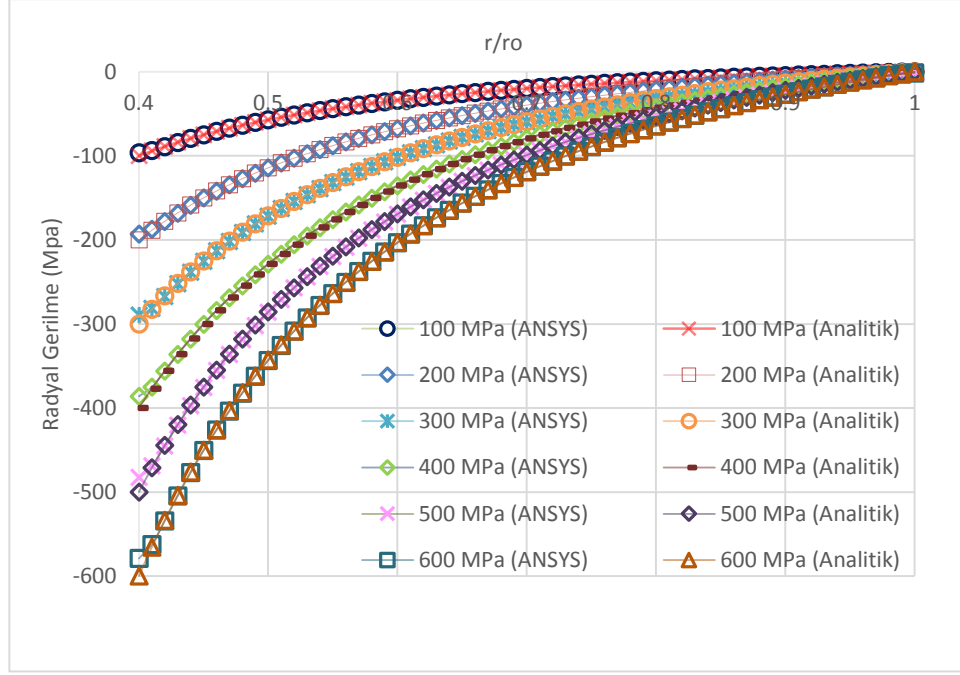
şeklindedir ve buradaki katsayılar ise denklem (4.42)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
k_2 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \\
k_{11} &= \frac{1}{X_t \cdot X_c} \\
k_1 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \\
k_{22} &= -\frac{1}{Y_t \cdot Y_c} \\
k_{12} &= -\sqrt{\frac{1}{X_t \cdot X_c} \frac{1}{Y_t \cdot Y_c}}
\end{aligned} \tag{4.42}$$

Şekil 4.16’da farklı iç basınçlara maruz diskte oluşan teğetsel ve radyal gerilme dağılımı gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sadece iç basıncın olduğu durumlarda KNT oranının değişmesiyle radyal ve teğetsel gerilmelerin değişmediği görüldüğünden radyal ve teğetsel gerilme dağılımı birer grafikte verilmiştir. ANSYS programıyla elde edilen nümerik sonuçların analitik formülasyonlar sonucu bulunan çözümlerle uyum sağladığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.16’da görüldüğü gibi kompozit diskte ilk uygulanan 100 MPa iç basınç 2, 3, 4, 5 ve 6 kat arttırıldığında teğetsel ve radyal gerilmeler de 100 MPa iç basınç sonucu oluşan gerilmelere göre aynı oranlarda artmıştır.



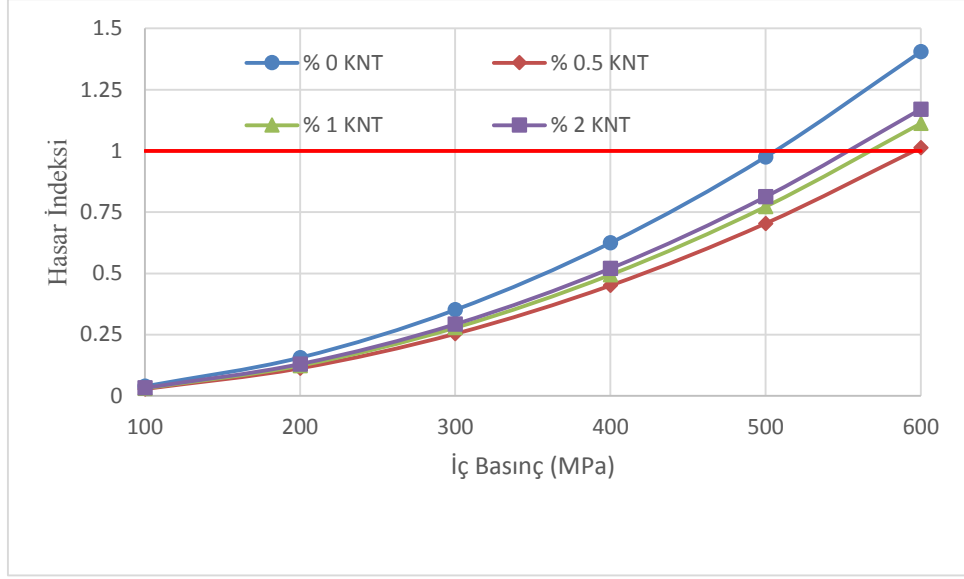
a)



b)

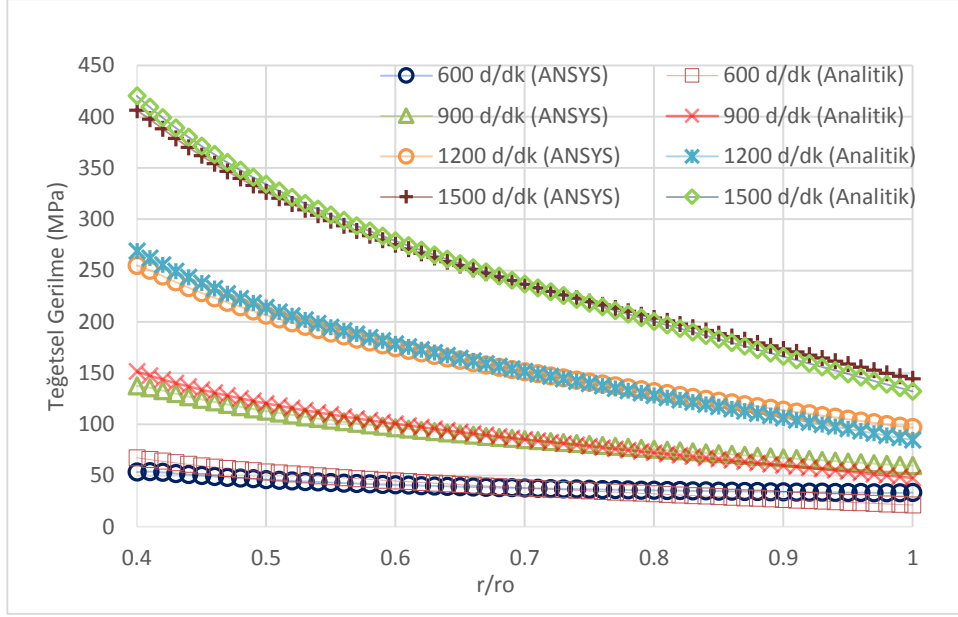
Şekil 4.16: 100, 200, 300 ve 400 MPa iç basınca maruz diskte oluşan gerilme dağılımı a) teğetsel ve b) radyal

Uygulanan farklı basınçlar altında ortaya çıkan teğetsel ve radyal gerilmeler sonucunda kompozit disk için Tsai-Wu gerilme hasar analizi analitik olarak yapılmıştır (Şekil 4.17). Katkısız kompozit disk yaklaşık 500 MPa ve üstü basınçlarda hasara uğramaktadır. % 1 ve % 2 KNT katkılı kompozit diskler ise sırasıyla yaklaşık olarak 565 MPa ve 550 MPa basınçlarda hasara uğramaktadır. Kopma mukavemetinin yüksekliğinden dolayı en iyi hasar direncinin görüldüğü % 0.5 KNT katkılı kompozit disk, yaklaşık 600 MPa basınca kadar hasara uğramamaktadır. Yapılan analiz sonucunda katkısız kompozite göre % 0.5 KNT katkılı kompozitin hasar direncinde ortalama % 38 gibi oldukça iyi bir yükselme görülürken, % 1 ve % 2 KNT katkılıda ise sırasıyla ortalama % 26 ve % 20 gibi bir yükselme görülmüştür.

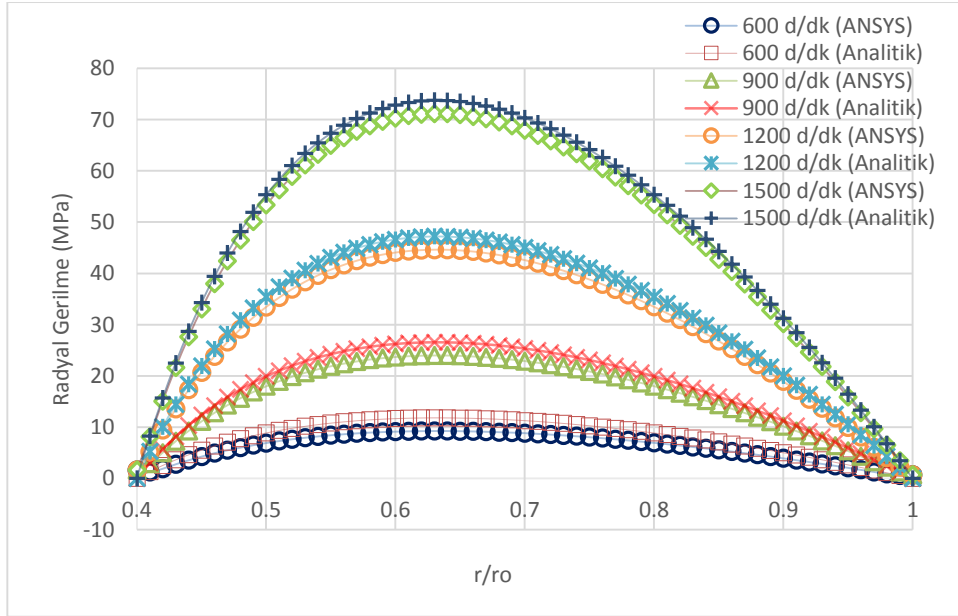


Şekil 4.17: Farklı İç basınçlara maruz kompozit disk için hasar analizi

Yapılan bir başka analizde ise farklı açısal hızlara maruz diskte oluşan gerilmeler incelenmiştir. Burada radyal ve teğetsel gerilmeler KNT oranına bağlı olarak farklılıklar göstermiştir. Disk için kritik bölge olan diskin iç kısmında nümerik analiz sonuçlarına göre teğetsel gerilme değerleri en yüksek % 0.5 KNT katkılı diskte, daha sonra sırasıyla % 1, % 2 KNT katkılı ve katkısız kompozit diskte gözlemlenmiştir. Ayrıca radyal gerilmeler ise en yüksek değerini r/r_o oranı 0.63 olduğunda, sırasıyla yine % 0.5, % 1, % 2 ve % 0 KNT oranına sahip kompozit diskte olduğu görülmüştür. Şekil 4.18'de katkısız ve diğer katkı oranlarına kıyasla en yüksek gerilme değerlerinin meydana geldiği % 0.5 KNT katkılı kompozit disk için farklı açısal hızlarda nümerik ve analitik gerilme dağılımı gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.18'den anlaşılacağı üzere kompozit diskte açısal hız lineer olarak arttırıldığında teğetsel ve radyal gerilmeler parabolik olarak artmaktadır. ANSYS programıyla elde edilen nümerik sonuçların analitik formülasyonlar sonucu bulunan çözümlerle uyum sağladığı görülmektedir. Analitik çözümde yapılan bazı kabuller ve nümerik çözümde şekilden kaynaklanan ağ yapılarının standart olmaması, analitik ve nümerik sonuçlar arasında ortalama % 5 gibi kabul edilebilir bir fark oluşturmaktadır.



a)



b)

Şekil 4.18: % 0.5 KNT katkılı 600, 900, 1200 ve 1500 d/dk açısai hıza maruz kompozit diskte oluşun gerilme dağılımı a) teğetsel ve b) radyal

KNT'lerin ve farklı açısai hızların gerilmeye etkisini sayısal olarak daha net görebilmek ve hasar analizi için analitik çözüme dayalı Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 hazırlanmıştır.

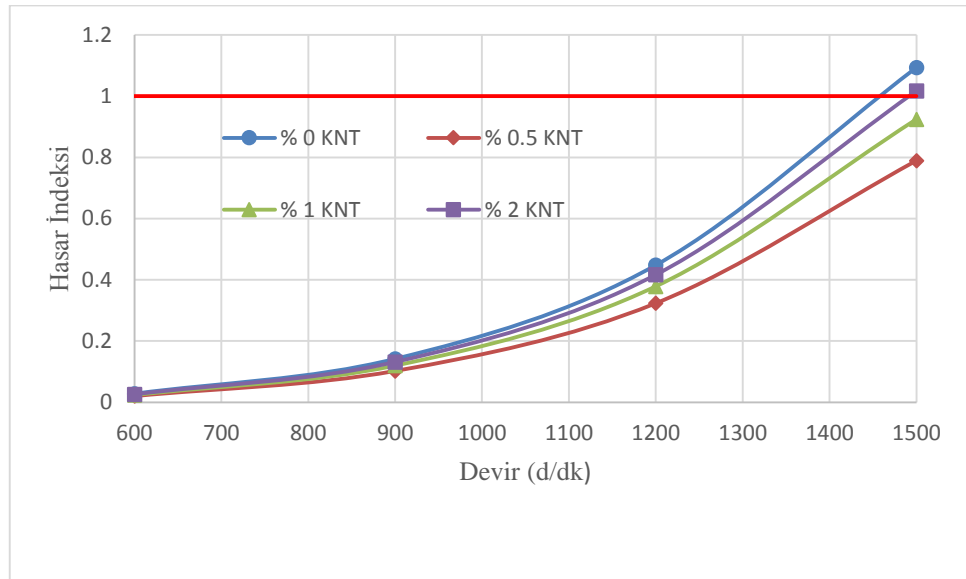
Tablo 4.1: Farklı açısızlı hıza maruz kompozit diskte oluşın teğetsel gerilmeler (MPa)

| Devir (d/dk) | KNT oranı | $r/ro=0.4$ | $r/ro=0.5$ | $r/ro=0.6$ | $r/ro=0.7$ | $r/ro=0.8$ | $r/ro=0.9$ | $r/ro=1$ |
|--------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 600 | 0 | 67.2551 | 53.4634 | 44.6189 | 37.8765 | 32.0478 | 26.5650 | 21.1292 |
| | 0.5 | 67.6882 | 53.7341 | 44.7541 | 37.8808 | 31.9163 | 26.2885 | 20.6960 |
| | 1 | 67.6645 | 53.7193 | 44.7467 | 37.8806 | 31.9235 | 26.3037 | 20.7197 |
| | 2 | 67.4397 | 53.5788 | 44.6766 | 37.8784 | 31.9918 | 26.4472 | 20.9446 |
| 900 | 0 | 151.3240 | 120.2927 | 100.3926 | 85.2222 | 72.1076 | 59.7714 | 47.5406 |
| | 0.5 | 152.2985 | 120.9018 | 100.6968 | 85.3848 | 71.8118 | 59.1493 | 46.56615 |
| | 1 | 152.2451 | 120.8685 | 100.6802 | 85.2313 | 71.8279 | 59.1833 | 46.6195 |
| | 2 | 151.7393 | 120.5523 | 100.5223 | 85.2263 | 71.9815 | 59.5062 | 47.1253 |
| 1200 | 0 | 269.0204 | 213.8538 | 178.4758 | 151.5062 | 128.1913 | 106.2602 | 84.5167 |
| | 0.5 | 270.7529 | 214.9365 | 179.0116 | 151.5233 | 127.6654 | 105.1542 | 82.7843 |
| | 1 | 270.6580 | 214.8773 | 178.9870 | 151.5223 | 127.6942 | 105.2148 | 82.8791 |
| | 2 | 269.7588 | 214.3152 | 178.7063 | 151.5135 | 127.9672 | 105.7888 | 83.7783 |
| 1500 | 0 | 420.3444 | 334.1465 | 278.8684 | 236.7284 | 200.2990 | 166.0316 | 132.0574 |
| | 0.5 | 423.0514 | 335.8384 | 279.7135 | 236.7551 | 199.4772 | 164.3035 | 129.3504 |
| | 1 | 422.9032 | 335.7457 | 279.6672 | 236.7536 | 199.5222 | 164.3981 | 129.4986 |
| | 2 | 421.4981 | 334.8676 | 279.2286 | 236.7398 | 199.9487 | 165.2951 | 130.9037 |

Tablo 4.2: Farklı açısızlı hıza maruz kompozit diskte oluşın radyal gerilmeler (MPa)

| Devir (d/dk) | KNT oranı | $r/ro=0.4$ | $r/ro=0.5$ | $r/ro=0.6$ | $r/ro=0.7$ | $r/ro=0.8$ | $r/ro=0.9$ | $r/ro=1$ |
|--------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 600 | 0 | 0 | 8.8495 | 11.6538 | 11.2576 | 8.8496 | 4.9974 | 0 |
| | 0.5 | 0 | 8.9154 | 11.7404 | 11.3413 | 8.9154 | 5.0345 | 0 |
| | 1 | 0 | 8.9192 | 11.7455 | 11.3462 | 8.9192 | 5.0367 | 0 |
| | 2 | 0 | 8.8793 | 11.6929 | 11.2954 | 8.8793 | 5.0414 | 0 |
| 900 | 0 | 0 | 19.9116 | 26.2210 | 25.3297 | 19.9116 | 11.2441 | 0 |
| | 0.5 | 0 | 20.0596 | 26.4159 | 25.5180 | 20.0596 | 11.3277 | 0 |
| | 1 | 0 | 20.0682 | 26.4273 | 25.5289 | 20.0682 | 11.3325 | 0 |
| | 2 | 0 | 19.9783 | 26.3089 | 25.4146 | 19.9783 | 11.2818 | 0 |
| 1200 | 0 | 0 | 35.3984 | 46.6152 | 45.0306 | 35.3984 | 19.9895 | 0 |
| | 0.5 | 0 | 35.6616 | 46.9617 | 45.3654 | 35.6616 | 20.1381 | 0 |
| | 1 | 0 | 35.6768 | 46.9818 | 45.3848 | 35.6768 | 20.1467 | 0 |
| | 2 | 0 | 35.5171 | 46.7714 | 45.1816 | 35.5171 | 20.0565 | 0 |
| 1500 | 0 | 0 | 55.3099 | 72.8362 | 70.3603 | 55.3099 | 31.2336 | 0 |
| | 0.5 | 0 | 55.7212 | 73.3777 | 70.8835 | 55.7212 | 31.4658 | 0 |
| | 1 | 0 | 55.7450 | 73.4091 | 70.9137 | 55.7450 | 31.4792 | 0 |
| | 2 | 0 | 55.4954 | 73.0804 | 70.5962 | 55.4954 | 31.3383 | 0 |

Farklı açılal hızların uygulanmasıyla ortaya çıkan teğetsel ve radyal gerilmeler sonucunda kompozit disk için Tsai-Wu gerilme hasar analizi analitik olarak yapılmıştır (şekil 4.19). Yapılan analize göre katkısız kompozit disk 600, 900 ve 1200 d/dk açısal hıza maruz bırakıldığında hasara uğramazken açısal hız yaklaşık 1500 d/dk'ya ulaştığında hasara uğramaya başlamaktadır. % 2 KNT katkılı kompozit disklerde ise hasar indeksi, katkısız diske göre düşük olmasına rağmen 1500 d/dk ve üstündeki açısal hızlarda onlar da hasara uğramaktadır. Ancak % 0.5 ve % 1 KNT kompozit disklerin 1500 d/dk ve altı açısal hızlarda hasara uğramadığı görülmüştür. 1500 d/dk açısal hızda hasar indekslerine bakıldığında kopma mukavemetinin yüksekliğinden dolayı en iyi hasar performansının % 0.5 KNT katkılı diskte olduğu görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda katkısız kompozite göre % 0.5 KNT katkılı kompozitin hasar direncinde ortalama % 38 gibi oldukça iyi bir yükselme görülürken, % 1 ve % 2 KNT katkılıda ise sırasıyla ortalama % 18 ve % 7.5 gibi bir yükselme görülmüştür.



şekil 4.19: Farklı açısal hızlara maruz kompozit disk için hasar analizi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, farklı oranda KNT katkılı cam elyaf takviyeli kompozit plakalar el yatırması yöntemiyle pre-preg şekilde üretilmiştir. İç basınç ve açılma hızına maruz kompozit disklerde meydana gelen radyal ve teğetsel gerilmeler ve bununla birlikte radyal yöndeki yerdeğiştirmeler kompozit plakalar vasıtasıyla elde edilen mekanik özellikler kullanılarak analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik analizler ANSYS 14.5[®] programı yardımıyla yapılmış ve nümerik sonuçların analitik çözümlerle uyum sağladığı görülmüştür.

KNT'lerin, kompozit diskteki elastisite modülünü ve kopma mukavemetlerini önemli ölçüde artırdığı yapılan çekme deneyi sonucu tespit edilmiştir. % 0.5 KNT katkılı kompozitte en yüksek artış gözlemlenirken, daha fazla katkı negatif etki yapmakta, ancak bu negatif etki katkısızla göre daha iyi olmaktadır. Katkısız kompozite göre % 0.5 KNT katkılı kompozitin elastisite modülünde % 18.45 gibi oldukça iyi bir yükselme görülürken, % 1 KNT katkılıda % 12.1 ve % 2 KNT katkılıda % 3.57 gibi bir yükselme görülmüştür. Kopma mukavemetinde ise yine katkısızla göre % 0.5 KNT katkılı kompozit % 18.4 gibi bir yükselme gösterirken, % 1 KNT katkılı kompozit % 9.45 ve % 2 KNT katkılı kompozit % 3.98 gibi bir yükselme göstermiştir.

Sadece iç basınca maruz kompozit diskte radyal yerdeğiştirmelerde KNT'nin etkisi açıkça görülmektedir. Reçine içerisinde % 0.5 KNT bulunduğu durumda elastisite modülünün en yüksek değerde olması ve KNT oranı arttıkça elastisite modülünün düşmesiyle, iç basınçın etkisiyle en az yerdeğiştirme kritik değeri olan % 0.5 KNT katkılı diskte olurken ardından sırasıyla % 1, % 2 KNT katkılı ve katkısız diskte olduğu görülmüştür.

Diskte dönme olduğu durumlarda, teğetsel ve radyal gerilmelerin, en yüksek değerini sırasıyla % 0.5, % 1, % 2 KNT katkılı ve son olarak katkısız kompozit diskte meydana geldiği görülmüştür. Radyal yerdeğiştirmede ise iç basınçlı durumda olduğu gibi benzer sebeplerle en düşük değeri % 0.5 KNT katkıda görülürken ardından sırasıyla % 1, % 2 KNT katkılı ve katkısız diskte olduğu görülmüştür.

Farklı yükleme şartlarında kompozit diskte oluşan radyal ve teğetsel gerilmeler doğrultusunda kompozit diskin Tsai-Wu Gerilme Teorisi'ne göre hasar analizi de

yapılmıştır. Bu bağlamda % 0.5 KNT katkıli kompozit diskin yaklaşık 600 MPa iç basınca kadar hasara uğramadığı görülürken, katkısiz durumda ve diğer katkı oranlarında diskte sırasıyla yaklaşık olarak 500 MPa ve 550 MPa iç basınçta hasar meydana geldiği görülmüştür. Öte yandan 1500 d/dk ve altı açısız hızlar altında % 0.5 ve % 1 KNT katkıli disk hasara uğramazken, katkısiz yaklaşık 1450 d/dk ve % 2 KNT katkıda ise yaklaşık 1500 d/dk açısız hızda kompozit diskte hasar meydana geldiği görülmüştür.

Cam elyaf takviyeli epoksi bazlı kompozit diske % 0.5 KNT katkısının, katkısiz, % 1 ve % 2 katkıya göre elastisite modülünde, çekme mukavemetinde, iç basınç veya dönme sonucu oluşan radyal yerdeğiştirmede ve hasar analizinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. % 1 ve % 2 KNT katkıli kompozit diskte de katkısiz diske göre daha iyi sonuçlar alınmıştır. Araştırmacılar bu tür nanopartikül katkıli kompozit disklere uygulanan iç basınç ve rotasyonu farklı sıcaklıklar altında yaparak sıcaklığın etkisini inceleyebilir, elastoplastik gerilme analizlerini yapabilirler. Bunun dışında rotasyon sonucu oluşabilecek titreşimlerin etkisi de araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

Advani, S.G. and Sozer, E.M., *Process modeling in composites manufacturing*, NY USA, CRC Press, (2003).

Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H.M. and Bai, J.B., “ Mechanical and electrical properties of a MWNT / epoxy composite”, *Composite Science and technology*, 62, 1993-1998, (2002).

Andrews, R. and Weisenberger, M., “Carbon nanotube polymer composites”, *Current Opinion In Solid State and Materials Science*, 8, 31-37, (2004).

Bai, J.B. and Allaoui, A., “Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites – experimental investigation”, *Composites Part A*, 34, 689–694, (2003).

Barrera E.V., Zhu, J., Khabashesku, V., Imam, M.A., Crane, R. and Karen, L., “Processing and Properties of Polymer Composites Reinforced by Functionalized SWNTs”, *Materials Science Forum*, 475-479, 1059-1062, (2005).

Biron, M., *Thermosets and composites: technical information for plastics users*, Amsterdam Netherlands, Elsevier Science, (2004).

Böger, L., Wichmann, M.H.G., Meyer, L.O. and Schulte K., “Load and health monitoring in glass fibre reinforced composites with an electrically conductive nanocomposite epoxy matrix”, *Composites Science and Technology*, 68, 1886–1894, (2008).

Callioglu, H., “Stress analysis of an orthotropic rotating disc under thermal loading”, *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 23(17), 1859-1867, (2004)

Chang, C. I., "The Anisotropic Rotating Disk," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 17, 397-402, 1975.

Chanrasekaran, V.C.S., “Role of Multiwalled Carbon Nanotube in Interlaminar Shear Strength of Epoxy/Glass Fiber/Multiwalled Carbon Nanotube Hybrid Composites”, Ph.D Thesis, *University of Delaware*, New Jersey, (2011)

Chen, J., Ramasubramaniam, R., Xue, C., Liu, H. and Versatile, A., “Molecular Engineering Approach to Simultaneously Enhanced, Multifunctional

CarbonNanotube-Polymer Composites”, *Advanced Functional Materials*, 16, 114-119, (2006).

Chen, J., “Solution Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes”, *Science*, 282, 95-98, (1998).

Chou, T.W., McCullough, R.L. and Pipes, R.B., “Composites”, *Scientific American*, 255, 192-203, (1986).

Collins, P.G., “Nanotubes for electronics”, *Scientific American*, 283, 67-69, (2000)

Dirand, X., Hilaire, B., Soulief, J.P., Nardin, M., “Interfacial shear strength in glass fiber/vinylester resin composites”, *Composite Science and Technology*, 56, 533-539, (1996).

Ebbesen, T.W., Ajayan, P.M., “Largscale synthesis of carbon nanotubes”, *Nature*, 358, 220-222, (2002).

Eskizeybek, V., “Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2012)

Fan, Z., *Flow and rheology of multiwalled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites*, NJ USA, University Delaware, (2007).

Frank, S., “ Carbon Nanotube Quantum Resistors”, *Science*, 280, 1744-1746, (1998).

Frankland, S. J. V., Caglar, A., Brenner, D.W., and Griebel, M., Molecular simulation of the influence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces, *J. Phys. Chem. B*, 106, 3046-3048, (2002).

Gao, J., Itkis, M.E., Yu, A., Bekyarova, E., Zhao, B. and Haddon, R.C., “ Continuous spinning of a single-walled carbon nanotube-nylon composite fiber”, *Journal of the American Chemical Society*, 127 , 3847-3900, (2005).

Genta, G. and Gola, M. “The Stress Distribution in Orthotropic Rotating Disks”, *J. Appl. Mech.*, 48, 559–562, (1981).

Gibson, R.F., Ayorinde, E.O. and Wen, Y.F., “Vibrations of carbon nanotubes and their composites: a review”, *Composites Science and Technology*, 67, 1–28, (2007).

Gkikas, G., Barkoula, N. –M. and Paipetis, A. S., “Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy”, *Composites: Part B*, 43, 2697–2705, (2012).

Gojny, F., Wichmann, M., Fiedler, B. and Schulte, K., “Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study”, *Composites Science and Technology*, 65, 2300–2313, (2005^a).

Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Fiedler, B., Bauhofer, W., Schulte, K., “Influence of nanomodification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites”, *Composites: Part A*, 36, 1525–1535, (2005^b).

Gojny, F.H., Nastalczyk, J., Roslaniec, Z., Schulte, K., “Surface modified carbon nanotubes in CNT/epoxy-composites”, *Chem Phys Lett*, 370, 820–824, (2003).

Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Kopke, U., Fiedler, B., Schulte, K., “Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites – enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube contents”, *Compos Sci Technol*, 64, 2363–2371, (2004).

Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R.D. and Young, J.S., “Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites”, *Chemistry Of Materials*, 12, 1049–1052, (2000).

Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A.; Colbert, D., Smalley, R., “Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization”, *Chem. Phys. Lett.*, 243, 49–54, (1995).

Holzinger, M., Steinmetz, J., Samaille, D., Glerup, M., Paillet, M., Bernier, P., et Hu, H., Zhao, B., Hamon, M.A., Kamaras, K., Itkis, M.E and Haddon, R.C., “Sidewall functionalization of single-walled carbon nanotubes by addition of dichlorocarbene”, *Journal Of the American Chemical Society*, 125, 14893–14900 (2003).

Iijima, S., “Helical microtubules of graphitic carbon”, *Nature*, 354, 56–58, (1991).

Ishida, H., and Miller, J.D., “Substrate effect on the chemisorbed and physisorbed layers of methacryl silane-modified particulate minerals”, *Macromolecules*, 17(9), 1659-1666, (1984).

Islam, M.F., Rojas, E., Bergey, D.M., Johnson A.T. and Yodh, A.G., “High weight fraction surfactant solubilization of single-wall carbon nanotubes in water”, *Nano Letters*, 3, 269-273, (2003).

Jia, Z., Wang, Z., Xu, C., Liang, J., Wie, B. and Wu D., et al., “Study on poly(methyl methacrylate)/carbon nanotube composites”, *Materials Science and Engineering A*, 271, 395-400, (1999).

Karakaya, Ş., “Investigation of hybrid and different cross-section composite disc springs using finite element method”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 36(4), 399-412, (2012).

Khan, S.U. and Kim J.K., “Impact and delamination failure of multiscale carbon nanotube-fiber reinforced polymer composites: a review”, *Int J Aeronaut Space Sci*, 12, 93–111, (2011).

Khare, R. and Bose, S., “ Carbon nanotube based composites—a review”, *Journal Of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 4, 31–46, (2005).

Kim, J.T., Kim H.C., Kim, S.K., Kathi, J. and Rhee, K. Y., 3 “Aminopropyltriethoxysilane effect on thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced epoxy composites”, *J. Comp. Mater.*, 43, 2533-2541, (2009).

Kim, K., Bae, D., Kim, J., Park, K., Lim, S., Kim., J.J., et al., “ Modification of electronic structures of a carbon nanotube by hydrogen functionalization”, *Advanced Materials*, 14, 1818-1821, (2002).

Kim, J.K., Sham, M.L., and Wu, J., “ Nanoscale characterization of interphase in silane treated glass fibre composites”, *Composites Part A*, 32, 607-618, (2001).

Krishnan, A., Dujardin, E., Ebbesen, T., Yianilos, P. and Treacy, M., “ Young’s modulus of single-walled nanotubes”, *Physical Review B*, 58, 14013-14019, (1998).

Lau, K. and Hui, D., “Effectiveness of using carbon nanotubes as nano-reinforcements for advanced composite structures”, *Mechanical Engineering*, 40, 1605-1606, (2002).

- Li, C. and Chou, T.W., “Elastic moduli of multi-walled carbon nanotubes and the effect of van der Waals forces”, *Compos Sci Technol*, 263, 1517–1524, (2003).
- Liao, Y., Mariettatondin O., Liang, Z., Zhang, C. And Wang, B., “Investigation of the dispersion process of SWNTs/SC-15 epoxy resin nanocomposites”, *Materials Science and Engineering A*, 385, 175-181, (2004).
- Liu, L., Barber, A.H., Nuriel, S. and Wagner, H.D., “ Mechanical Properties of Functionalized Single-Walled Carbon-Nanotube/Poly(vinyl alcohol) Nanocomposites”, *Advanced Functional Materials*, 15, 975-980, (2005).
- Lordi, V. and Yao, N., “Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube-polymer composites”, *Journal of Materials Research*, 15, 2770-2779, (1999).
- Lu, K.L., Lago, M., Chen, Y.K., Green, M.L.H., Harris, P.J.F., Tsang, S.C., “Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound”, *Carbon*, 34, 814–816, (1996).
- Luo, J.J. and Daniel, I.M., “Characterization and Modeling of Mechanical Behavior of Polymer/Clay Nanocomposites”, *Compos. Sci. Technol.*, 63(11), 1607–1616, (2003).
- Ma, P.C., Siddiqui, N.A., Marom, G. and Kim J.K., “Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review”, *Composites: Part A*, 41, 1345–1367, (2010).
- Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A. and Mohajeri, A., “Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites”, *Materials & Design*, 31, 4202-4208, (2010).
- Mohammadi, F., Hadadian, A., and Singh Grewal J., “Analytical Solution of Pressurized Rotating Composite Disk under Thermal Loading”, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, (2010).
- Nan, C., “ A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites”, *Chemical Physics Letters*, 375, 666-669, (2003).
- Njuguna, B.J., Pielichowski, K. and Alcock, J.R., “ Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites”, *Advanced Engineering Materials*, 9(10), 835-847, (2007).
- Oberlin A. and Endo M., “Filamentous growth of carbon through benzene decomposition”, *J Cryst Growth*, 32, 335–349, (1976).

Olek, M., Kempa, K., Jurga, S. And Giersig, M., “ Nanomechanical properties of silica-coated multiwall carbon nanotubes-poly(methyl methacrylate) composites”, *Langmuir The ACS Journal Of Surfaces and Colloids*, 21, 31463197, (2005).

Oriakhi, C.O., “Nano Sandwiches”, *Chem. Br.*, 34, 59–62, (1998).

Park, J.U., Cho, S., Cho, K.S., Ahn, K.H. and Lee S.J, “ Effective in-situ preparation and characteristics of polystyrene-grafted carbon nanotube composites”, *Korea-Australia Rheology Journal*, 17, 41–45, (2005).

Park, C., Ounaies, Z., Watson, K.A., Crooks, R.E., Smith, J., et al., “ Dispersion of single wall carbon nanotubes by in situ polymerization under sonication”, *Chemical Physics Letters*,. 364, 303–308, (2002).

Pegel, S., Potschke, P., Petzold, G., Alig, I., Dudkin, S.M., Lellinger, D., “Dispersion, agglomeration, and network formation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate melts”, *Polymer*, 49, 974-984, (2008).

Peigney, A., Laurent, C.H., Flahaut, E., Bacsa, R.R., Rousset, A., Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes, *Carbon*, 39, 507–514, (2001).

Pinilla, J.L., Moliner, R., Suelves, I., Lazaro, M., Echegoyen, Y., Palacios, J., “Production of hydrogen and carbon nanofibers by thermal decomposition of methane using metal catalysts in a fluidized bed reactor”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(18), 4821-4829, (2007).

Ramanathan, T., Liu, H. and Brinson, L.C., “ Functionalized SWNT/polymer nanocomposites for dramatic property improvement”, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 43, 2269-2279, (2005).

Ramasetty, A., “ Proceedings of the American Society for Composites: Twentieth Technical Conference”, (eds: in: G.R.P. Frank K. Ko Yury Gogotsi, Albert S. d.), *Proceedings Of the American Society For Composites: Twentieth Technical Conference*, Lancaster, DEStech Publications Inc, 1-154, (2005).

Rastogi, R., Kaushal, R., Tripathi, S.K., Sharma, A.L., Kaur, I. and Bharadwaj, L.M., “Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants”, *Journal Of Colloid and Interface Science*, 328, 421-428, (2008).

Ryabenko A., “UV-VIS-NIR spectroscopy study of sensitivity of single-wall carbon nanotubes to chemical processing and Van-der-Waals SWNT/SWNT

interaction. Verification of the SWNT content measurements by absorption spectroscopy”, *Carbon*, 42, 1523-1535, (2004).

Safadi, B., Andrews, R., a Grulke, E., “Multiwalled carbon nanotube polymer composites: Synthesis and characterization of thin films”, *Journal Of Applied Polymer Science*, 84, 2660-2669, (2002).

Sandler, J., Shaffer, M.S.P., Prasse, T., Bauhofer, W., Schulte, K., Windle, A.H., Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, *Polymer*, 40, 5967–5971, (1999).

Schulte, K., Gojny, F.H., Fiedler, B., Broza, G., Sandler, J., “Carbon nanotube reinforced polymers A state of the art – review”, *Polymer-composites –from nano to macro scale*, 3–23, (2005).

Schmidt, D., Shah, D. and Giannelis, E.P., “New Advances in Polymer/Layered Silicate Nanocomposites”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6(3): 205–212, (2002).

Shaffer, M.S.P. and Windle, A.H., “ Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube/Poly(vinyl alcohol) Composites”, *Advanced Materials*. 11, 937-941, (1999).

Shelimov, K.B., Esenaliev, R.O., Rinzler, A.G., Huffman, C.B., Smalley, R.E., “Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration”, *Chem Phys Lett*, 282, 429–434, (1998).

Sheikh-Ahmad, J.Y., *Machining of polymer composites*, New York, Newyork:springer science+business media, (2009).

Shi, D., He, P., Lian, J., Chaud, X., Bud’ko, S.L., Beaugnon, E., Wang, L.M., Ewing, R.C, and Tournier, R., “ Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties”, *Journal Of Applied Physics*, 97(6), 064312/1-064312/1, (2005).

Siddiqui, N.A., Khan, S.U., Ma, P.C., Li, C.Y. and Kim J.K., “Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepregs containing carbon nanotubes”, *Composites: Part A*, 42, 1412–1420, (2011).

Sinha, P.K., *Composite Materials and Structures*, *Composite Centre of Excellence*, Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur,, AR&DB, (2006).

Song, Y.S. and Youn, J.R., “Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites”, *Carbon*, 43, 1378–1385, (2005).

Stevens, J.L., Huang, A.Y., Peng, H., Chiang, I.W., Khabashesku, V.N., Margrave, J.L., “Sidewall amino-functionalization of single-walled carbon nanotubes through fluorination and subsequent reactions with terminal diamines”, *Nano Letters*, 3, 331-336, (2003).

Suslick, K.S., “Sonochemistry”, *Science*, 247, 1439-1445, (1990).

Tae, Y.A., J.W.L. Y., Hwang, Kim, H.J., “Influence of twin screw extrusion processing condition on the properties of polypropylene/multi-walled carbon nanotube nanocomposites”, *Korea-Australia Rheology Journal*, 22, 141-148, (2010).

Tagmatarchis, N. and Prato, M., “Functionalization of carbon nanotubes via 1,3- dipolar cycloadditions”, *Journal Of Materials Chemistry*, 14, 437-439, (2004).

Thostenson, E., Li, C. and Chou, T., “Review Nanocomposites in Context”, *Journal of Composites Science & Technology*, 65, 491–516, (2005).

Thostenson, E.T. and Chou, T.W., “On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modeling and characterization”, *J Phys D: Appl Phys*, 36, 573–582, (2003).

Thostenson, E.T., Ren, Z., and Chou T.W., “Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review”, *Composites Science and Technology*, 61, 1899-1912, (2001).

Topcu, M., Altan, G., Calliogu, H., and Altan, B. D., “Thermal elastic-plastic stress analysis of an aluminium composite disc under linearly decreasing thermal loading”, *Advanced Composites Letters*, vol. 17, 87-96, (2008)

Touhara, H., Inahara, J., Mizuno, T., Yokoyama, Y., Okanao, S., Yanagiuch, K., et al., “Property control of new forms of carbon materials by fluorination”, *Journal Of Fluorine Chemistry*, 114, 181-188, (2002).

Tsai, S. W., and Wu, E. M., “A general theory of strength for anisotropic materials”, *Journal of Composite Materials*. vol. 5, 58-80, (1971).

Unger, E., Graham, A., Kreupl, F., Liebau, M., Hoenlein, W., “Electrochemical functionalization of multi-walled carbon nanotubes for solvation and purification”, *Current Applied Physics*, 2, 107-111, (2002).

URL 1, “<http://www.e90post.com/forums/showthread.php?t=432680>” ve “<https://www.hexion.com/epoxyphenoliccomposites/automotive/prepreg/>”, (2015).

URL 2, “<http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2619>”, (2015).

URL3, “<http://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/with-a-carbon-nanotube-glut-what-do-you-do-with-them>”, (2015).

Usuki, A., Kawasumi, M., Kojima, Y., Okada, A., Kurauchi, T. and Kamigaito, O.J., “Swelling behavior of montmorillonite cation exchanged for ν -amino acids by ϵ -caprolactam”, *Mater. Res.*, 8(5), 1174-1178, (1993).

Wang, H., Zhou, W., Ho, D.L., Winey, K.I., Fischer, J.E., Glinka, C.J., et al., “Dispersing single-walled carbon nanotubes with surfactants: A small angle neutron scattering study”, *Nano Letters*, 4, 1789-1793, (2004).

Weisenberger, M.C., Grulke, E.A., Jacques, D, Rantell, T. and Andrews R., “Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers”, *Journal Of Nanoscience and Nanotechnology*, 3, 535-543, (2003).

Wicks, S.S., Guzman deVilloria R., Wardle, B.L., “Interlaminar and intralaminar reinforced of composite laminates with aligned carbon nanotubes”, *Composite Science and Technology* 70, 20-28, (2010).

Whitsitt, E.A. and Barron, A.R., “Silica Coated Single Walled Carbon Nanotubes”, *Nano Letters*, 3, 775-778, (2003).

Yu, J., Grossiord, N., Koning, C., Loos, J., “Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution”, *Carbon*, 45, 618-623, (2007).

Yu, M., “ Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load”, *Science*, 287, 637-640, (2000).

Yu, M.F., et al., “Strength and breaking mechanism of multi walled carbon nanotubes under tensile load”, *Science* 287, 637-676, (2000^a).

Yu, M.F., Files, B.S., Arepalli, S., Ruoff, R.S., “Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties”, *Phys Rev Lett*, 84, 5552–5555, (2000^b).

Zhang, Q.H. and Chen D.J., “Percolation threshold and morphology of composites of conducting carbon black/polypropylene/EVA”, *Journal Of Materials Science*, 39, 1751-1757, (2004).

Zhang, M., Yudasaka, M., Koshio, A., Iijima, S., “Effect of polymer and solvent on purification and cutting of single-wall carbon nanotubes”, *Chem Phys Lett*, 349, 25–30, (2001).

Zhang, S., “A simple approach to the evaluation of fiber/matrix interfacial shear strength and fracture toughness”, *Composites Science and Technology*, 60, 145-148, (2000).

Zhu, J., Peng, H., Rodriguez-Macias, F., Margrave, J.L., Khabashesku, V.N., Imam A.M., et al., “ Reinforcing epoxy polymer composites through covalent integration of functionalized nanotubes”, *Advanced Functional Materials*, 14, 643–648, (2004).

Zhu, J., Kim, J., Peng, H., Margrave, J.L., Khabashesku, V.N. and Barrera, E.V., “Improving the Dispersion and Integration of Single-Walled Carbon Nanotubes in Epoxy Composites through Functionalization”, *Nano*, 3, 1107-1113, (2003).

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Uğur GEZGİNCİ

Doğum Yeri ve Tarihi : Aksaray 01.01.1990

Lisans Üniversite : Selçuk Üniversitesi

Elektronik posta :ugezginci@pau.edu.tr

İletişim Adresi :Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü