

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

DEĞİŞİK KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI

HAZIRLAYAN
Hayri YILDIRIM

ELAZIĞ- 2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞİK KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hayri YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez,.....tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI

Üye: Doç. Dr.

Üye: Yrd. Doç. Dr.

Üye: Yrd. Doç. Dr.

Üye: Yrd. Doç. Dr.

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.../.../.....tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR ve SEMBOLLER LİSTESİ.....	IX
ÖZET	X
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
3. KOMPOZİT MALZEMELER	13
3.1.Kompozit Malzeme Türleri	14
3.1.1.Polimer Kompozitler:.....	14
3.1.2.Metal Kompozitler (Metal Matrisli Birleşik Malzemeler MMC) :.....	15
3.1.3.Seramik Kompozitler (Seramik Matrisli Birleşik Malzemeler CMC) :.....	16
4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI.....	17
5. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ.....	18
5.1.Hafiflik:	18
5.2. Rijitlik Ve Boyut Kararsızlığı:	18
5.3. Yüksek Mekanik Özellikler:	18
5.4.Yüksek Kimyasal Direnç:	18
5.5.Yüksek Isı Dayanımı:	18
5.6.Elektriksel Özellikler:	18
6. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI:	19

7. KOMPOZİT MALZEME YAPIMINDA TEMEL MADDELER.....	20
7.1. Matris Malzemeleri:.....	20
7. 1.1. Reçineler ve Özellikleri:	21
7.2. Elyaf Çeşitleri Ve Özellikleri:	22
7.2.1. Cam Elyaf:.....	22
7.2.2. Bor Elyaf:	24
7.2.3. Silisyum Karbür Elyaf:	25
7.2.4. Alümina Elyaf:.....	25
7.2.5. Grafit (Karbon) Elyaf:.....	25
7.2.6. Aramid Elyaf:	26
8. KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIMI.....	28
8.1. Günlük Ve Ticari Hayatta Kullanım:.....	28
8.2. Uzay Ve Havacılık Sanayisinde:	28
8.3. Silah, Roket Ve Diğer Mühimmat Sanayisinde:	28
9. ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELERİN MEKANİĞİ.....	29
9.1. Poisson oranının (ν) Hesaplanması.....	29
9.2. Takviyeye Dik Doğrultudaki Elastiklik Modülünün Hesaplanması.....	30
10. SONLU ELEMANLAR.....	32
10.1. Sonlu Elemanlar Metodu.....	32
10.2. Sonlu Eleman Metodunun Gelişimi.....	32
10.3. Sonlu Eleman Metodunun Çözümü.....	33
10.4. Eleman Şeklinin Seçilmesi.....	35
10.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantajları	35

11. ANSYS PAKET PROGRAMI	36
11.1. Programın Genel Tanıtımı.....	36
11.2. Programın Genel Kullanımı	36
11.2.1. ANSYS te Ana Menüler.....	37
11.1.2. ANSYS Main Menu	37
11.2.3. ANSYS Output Window	38
12. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	38
12.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	38
12.2. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin İmalatı	41
13. DENEYLERİN YAPILIŞI	46
13.1. Sonlu Elamanlar Metoduyla Oluşturulan Şekiller.....	56
13.2. Kalınlığı 1 mm olan cam-epoksi ve kevlar-epoksi	59
13.3. Kalınlığı 3 mm Olan Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemeler	62
14. GENEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Elyaf ve Matris Malzemelerin Gerilme Uzama Diyagramı.....	27
Şekil 2. Fibere Paralel Yönde Çekme Yüküne Maruz Karma Malzeme Modeli	29
Şekil 3. Fibere dik yönde çekme yüküne maruz karma malzeme modeli.....	30
Şekil 4. Herhangi X-Y eksenlerinden malzeme asal eksenlerine pozitif yönde dönüşün şematik gösterimi.....	31
Şekil 5. çekmeye tabi tutulan numunelerin örneği.....	42
Şekil 6. Kompozit malzemeleri üretmek için kullanılan soğuk pres.	43
Şekil 7. Kompozit malzemeleri üretmek için kullanılan sıcak pres.....	43
Şekil 8. Alt ve üst tabla ile bağlanmış iki ayrı direnç	44
Şekil 9. Granül haldeki polietilen malzemesinin sıcak pres üzerine serilmesi.....	44
Şekil 10. Polietilen malzemesinden elde edilen numuneler	45
Şekil 11. Kompozit numunelerinin çekme deneylerinin yapılması	46
Şekil 12. Kalınlığı 0.30 mm olan cam-epoksi ve kevlar-epoksi gerilme-şekil değiştirme Grafiği.....	47
Şekil 13. Kalınlığı 1 mm olan kevlar-epoksi ve epoksi-cam gerilme-şekil değiştirme Grafiği.....	48
Şekil 14. Takviyesiz Numunenin Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	49
Şekil 15. İnce Kevlar Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	50
Şekil 16. Kalın Kevlar Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	50
Şekil 17. Kalın Dokuma Kevlar Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	51
Şekil 18 İnce Dokuma Kevlar Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	51
Şekil 19. Kevlar takviyeli termoplastik numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği...	52
Şekil 20. Kalın Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	53
Şekil 21. Sıralı Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	53
Şekil 22. Kırılmış Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	54

Şekil 23. İnce Dokuma Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	54
Şekil 24. Kalın Dokuma Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	55
Şekil 25. Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Numunenin Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	55
Şekil 26. Kalınlığı 0.30 mm Olan Cam – Epoksi ve Kevlar-Epoksi Şekilleri	58
Şekil 27. Kalınlığı 1 mm Olan Cam-Epoksi ve Kevlar-Epoksi Şekilleri.....	61
Şekil 28. Kalınlığı 3 mm Olan Termoplastik Matrisli Malzeme Şekilleri	63

TABLolar LİSTESİ

Tablo. 1. Pekiştirici liflerin özellikleri tabloda verilmiştir	15
Tablo.2. Lifli Kompozitlerin Özellikleri.....	15
Tablo 3. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri.....	24
Tablo 4. Karbon Ve Grafit Elyafların Karşılaştırılması	26
Tablo 5. Farklı elyaflardan oluşan kompozitlerin birim maliyetleri	27
Tablo 6. Deneylerde kullanılan kompozit malzemeler.....	39
Tablo 7. Deneyde kullanılan düşük ve yüksek yoğunluklu polietilenin bazı özellikleri	40

KISALTMALAR ve SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Alan, m ²
AA	: Alüminyum alaşımı
CMC	: Seramik Matrisli Birleşik Malzemeler
E	: Elastisite modülü
G	: Kayma modülü
M	: Moment
MMC	: Metal matriksli kompozit
N	: Tabaka bileşke kuvveti
P	: Kuvvet
S	: Kayma dayanımı
T	: Sıcaklık
X	: Boyuna akma dayanımı
Y	: Enine akma dayanımı
α	: Isıl genleşme katsayısı
γ	: Kayma şekil değişimi
ΔT	: Sıcaklık değişimi
ϵ	: Şekil değişimi
θ	: Oryantasyon açısı
ν	: Poisson oranı
Π	: Toplam potansiyel enerji
σ	: Gerilme
τ	: Kayma gerilmesi

ÖZET

(Yüksek Lisans Tezi)

DEĞİŞİK KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hayri YILDIRIM

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği

2009, Sayfa: 69

Değişik tipteki kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemedeki amaç, kompozit malzemelerin çeşitli koşullarda çekme, basma, burulma ve kesmeye karşı dayanımını tespit etmektir. Böylece hem değişik tipteki kompozit malzemelerin kendi aralarında davranışlarını hem de özellikleri bilinen diğer malzemeler arasındaki mekanik özellikleri tespit ederek imalattaki kullanılabilirliği ile yapılarıdaki davranışlarını belirlemektir. Çünkü mühendislik hesaplarında malzemeyi amacına göre yerinde ve özelliklerine göre kullanmak çok önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, Elasto-plastik gerilme, Ortotropik, Ansys ve sonlu elemanlar

ABSTRACT

(M.Sc. Thesis)

INVESTIGATION OF BEHAVIOURS MECHANIC OF THE VARIOUS COMPOSITE MATERIALS

Hayri YILDIRIM

FIRAT UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

2009, Page: 69

The purpose on determination of mechanical attributes of various type of composite materials is stabilizing composite materials on various conditions; tensile, printed, bulkcing, and cutting. So, both of various type of composite materials behaviours each other and between known behaviours of other mechanicals is determining use of manufacturing with structures. Because on the engineering calculation, the use of material on objective and attribute is very essential.

Key Words: Composite Materials, Elasto-plastic stress, orthotropic, Ansys and finite element model

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, günümüz teknolojik gelişmelerine paralel olarak her sahada kullanım alanı bulmuş ve modern teknolojinin vazgeçilmez malzemeleri arasında yer almıştır. Bu tür malzemeler, yüksek mukavemet dayanımları ve hafif olmaları sebebiyle uzay sanayi, otomobil sanayi, tıbbi cihaz ve ekipmanlarında, spor aletlerinde geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Hafif olması enerji ve yakıt tasarrufu sağlamak açısından büyük bir avantajdır.

Kompozit malzemeler, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme gurubudur. Üç boyutlu nitelikteki malzemeyi bir araya getirmedeki amaç, bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerin daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir.

Kompozit malzemedeki genelde üç koşul aranmaktadır:

- 1) Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması
- 2) Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- 3) Bileşenlerin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması.

Buna göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Odegard G.,Kumosa M. (2000) tarafından tek yönlü karbon/PMR15 kompozit malzemenin oda sıcaklığında ve 316° C sıcaklığa kadar olan oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda eksenel çekme kuvveti sonucunda, malzemenin elastik ve plastik özelliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini, sıcaklığın fonksiyonu olarak tespit edilmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonucunda polimer matrisin yumuşadığı ve kompozit malzemenin katılık değerlerinin düştüğü özellikle matrise bağlı sabitlerin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun yanında malzemeyi su jetiyle ve kobalt bant testere olmak üzere iki farklı yöntemle işleyerek deney numunesi hazırlamışlardır. Sonuç olarak kompozit malzemede sıcaklık yükseldikçe mühendislik sabitleri değerlerinin azaldıkları ve de su jetiyle işlenmiş malzemelerin daha iyi mukavemet değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir[1].

Eason T. G. ve Ochoa O. O. (2001) devamlı olmayan gelişigüzel dağılımlı cam fiber kompozitlerde termomekanik yük altında hasar başlangıcını ve hasar gelişimini temsili hacim elemanları yöntemi ile incelemişlerdir. Üretim sırasında uygulanan ısının çekme etkileri araştırılmıştır. Modellemede ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonuçta bu tür kompozitlerin meydana getirildikleri sıcaklıklar ve kullanıldıkları yerlerdeki sıcaklıklara göre çekme dayanımları önemli değişiklikler gösterdiği, bununda reçine ve matris oranındaki değişim ile ilişkisi grafiklerle gösterilmiştir. Tasarım aşaması sırasında bu özelliklere dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır[2].

Pettermann H. E.,Plankensteiner A.F., Böhm H. J.,Rammerstrofer F.G. (1999) içine sıralı termo-elastik takviye yerleştirilmiş matrisin termo-elasto-plastik mekanik davranışını artan Mori-Tanaka alan yaklaşımı metodu ile incelemişlerdir. Matris fazı davranışı, plastisite ve matrisin izotropisinin akma sırasındaki kırılması takip edilerek incelenmiştir. Oluşturdukları metot, kompozit malzemenin sonlu elemanlar yönteminde modellenip, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin bu model ile birlikte değerlendirilmesi yöntemine dayanmaktadır. Modellemede ABAQUS programı kullanılmıştır. Enine karbon fiber takviyeli magnezyum alaşım kompozit malzeme modellenmiş ve artan Mori-Tanaka metodu, sonlu elemanlar birim hücre metodu ve

dönüşüm alan metoduyla malzemenin yük altındaki davranışları incelenmiş ve bu üç metodun sonuçları karşılaştırılmıştır[3].

You L. H. (2002) iç içe geçmiş silindir modeline dayanarak, simetrik eksenli termomekanik yüke maruz kalan enine izotropik, dairesel ortotropik ve radyal ortotropik etrafı plastik ve elastik matris ile çevrili fiberlerin, yükleme sonucunda oluşan deformasyon ve gerilmeler analitik olarak incelenmiştir. Matrisin, plastisitesinin, hacim oranının fiziksel ve mekanik özelliklerinin, malzemenin termomekanik yüklere verdiği tepkiyi nasıl değiştirdiği araştırılmıştır. Matris fazı plastisitesinin, eksenel basma nedeniyle büyük miktarda düştüğü, bununla birlikte fiberdeki basma gerilmesini büyük miktarda arttırdığı gözlemlenmiştir. İncelenen kompozitlerde hacim oranının, ısı genleşme katsayısının ve young modülünün azalması sonucu, malzemenin mukavemet değerlerinin ve sertliğinin arttığı bunun sonucunda da fiberin maksimum eşdeğer geriliminin düştüğü ve matrisin eşdeğer geriliminin arttığı gözlemlenmiştir[4].

Rui Miranda Guedes, Mario A. Vaz, (2001) R teyp tipi ve dokuma tipi karbon fiber kompozit malzemelerin bükülme ve bükülme altında şekil değiştirme dirençleri incelemiş, bu iki tür malzeme üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. İncelemelerinde malzemelerin kullanılan yerde uzun dönem şekil değiştirmeden kalmalarını istenmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin uzun dönem dayanım karakteristikleri de incelenmiştir. Sonuç olarak teyp tipi kompozit plakaların dokuma tipi plakalara göre daha dirençli olduğu ortaya çıkmıştır[5].

Xu Jincheng, Zhao Liang, Deng Xiaoyan, Yu Hui (2006) çalışmalarında, deneylerde karşılaştırma yapılmak üzere karbon fiber takviyeli, nikel bazlı kompozit toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş malzemeleri hazırlanmıştır. Bu iki malzemenin yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçta yüksek sıcaklıkta %5 karbon fiber oranına sahip kompozit malzemenin 20CrNi alaşımından daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir[6].

Rupnowski P., Gentz M., Kumosa M. çalışmalarında T650-35 grafit fiberlerden oluşan tek yönlü PMR-15 reçineli kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin analitik ve nümerik yöntemlerle sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplanmış ve bu özellikler

deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta bu malzemenin oda sıcaklığında ve 315° C de birbirine yakın akma dayanımı değerleri verdiği gözlenmiştir[7].

Çiçek Özes, Mine Demirsoy (2005), çalışmalarında dokuma cam fiber takviyeli epoksi matris, tabakalı zincir taşıyıcı pim bağlantı noktasındaki gerilmeyi, uygulanan çeşitli yüklerle, deneysel ve nümerik olarak ANSYS paket programıyla incelemişlerdir. Her iki yöntemde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel ve nümerik çözüm arasında fazla bir farkın olmadığı görülmüş ve taşıyıcı parçanın tasarımında yardımcı olabilecek gerilme değerleri elde edilmiştir[8].

Nurettin Arslan, Mehmet Çelik, Nuray Arslan (2002), ortasındaki kare matrisli, simetrik ve anti simetrik dokuma fiber takviyeli polietilen termoplastik matrisli kompozit malzemenin elastik-plastik gerilme analizini incelemişlerdir. Gerilme analizi sonlu elemanlar metodu ve birinci dereceden kesme deformasyon teorisi yöntemleriyle incelenmiştir. Sonuçta kare deliğin kenarlarında gerilmelerin en yüksek seviyeye çıktığı gözlemlenmiştir[9].

Ramazan Karakuzu, Züleyha Aslan, Buket Okutan (2004) yaptıkları çalışmada örgü çelik fiber takviyeli termoplastik matrisli laminarlı kompozit plakalarda düzgün dağılmış enine yük altındaki elasto-plastik gerilme analizini ve artık gerilmeleri sayısal metot ile incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analizinde ANSYS sonlu elemanlar analiz programı kullanılmış ve sekiz düğümlü tabakalı kabuk elemanlar çözümlemede kullanılmıştır. Simetrik ve anti simetrik tabakalı plakalar için basit desteklenmiş sınır koşulları ile akma dayanımları ve gerilme yığılmaları grafiklerle gösterilmiştir[10].

Arriaga A., Lazkano, J.M., Pagaldai, R., Zaldua M.A., Hernandez, R., Atxurra, R., Chrysostomou, A., (2007) çalışmalarında iki farklı termoplastik malzemenin sehim incelemesini deneysel ve ANSYS sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlar ve bu iki yöntemi karşılaştırmışlardır[11].

Prasad, E. N., Loidl, D., Vijayakumar, M., Krommp, K (2004) çalışmalarında devamlı fiber takviyeli seramik matrisli kompozit malzemenin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda, malzemenin yüksek frekanstaki titreşimlere verdiği tepkileri inceleyerek malzemenin elastik katsayısını bulmuşlar ve bulunan özellikleri değerlendirmişlerdir[12].

Song, G., Eang, Y. , Zhou, Y. (2002), araştırmalarında tungsten matrisli %30 hacim oranlı zirkonyum parçacık içeren kompozit malzemenin imalatını gerçekleştirmişler ve bu malzemenin oda sıcaklığında ve oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda termo fiziksel ve mekanik özelliklerinin bulunması konusunda çalışmışlardır. [13].

Hasan allıoğlu, Onur Sayman, Necati Ataberk (2005) alışmalarında, elik fiber takviyeli simetrik termoplastik, tabakalı levhada termal elasto-plastik gerilmeleri incelemişlerdir. Malzemenin gerilme sertleşmesine sahip olduğu varsayılmıştır. Değişik oryantasyon açılarında Tsai-Hill hasar teorisi kriteri çözümlemede kullanılmıştır. Yukarıdaki ve aşağıdaki yüzeyle göre $+T_0$ ve $-T_0$, sıcaklık dağılımı olarak seçilmiştir. [14].

Numan B. Bektaş, Onur Sayman (2001) alışmalarında termal yük altındaki simetrik çapraz kat ve simetrik açılı kat termoplastik tabakalı levhalarda elasto-plastik gerilme analizini incelemişlerdir. Tabakalı kompozit levhalar basit desteklenmiş ve kalınlık boyunca sabit sıcaklık değişimine tabii tutulmuştur. Termo elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ve sınır koşulları küçük plastik deformasyonlar için analitik çözümde kullanılmıştır. Akma kriteri için Tsai-Hill hasar teoremi kullanılmıştır[15].

Yang, Q., Qin, Q. (2003) öbekleşmiş fiberlerden oluşan tek yönlü kompozit malzemelerde öbek içindeki fiber sayısının enine yük altında ve akma durumunda malzemedeki elasto-plastik gerilmelere etkileri, mikro mekanik analizle sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır[16].

Bölent Murat İçten, Ramazan Karakuzu (2002) pim bağlantılı karbon epoksi kompozit levhalarda rastgele seçilmiş oryantasyon açılarında hasar mukavemeti ve hasar durumunun modellenmesi ve gerilme analizi incelenmiştir.[17].

F. Şen (2006) açılı oryantasyona sahip simetrik ve anti simetrik, elik fiberler ile takviye edilmiş, tabakalı ve ortasında dairesel delik bulunan termoplastik kompozit plaklarda uniform sıcaklık etkisiyle meydana gelen gerilmeler ANSYS sonlu elemanlar yöntemi programı yardımı ile incelenmiştir[18].

Camanho ve arkadaşı, geometrik parametrelerin, bağlantı parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin fiber takviyeli plastiklerin üzerinde mekanik olarak tutturulmuş bağlantıların dayanımına etkilerini incelemişlerdir.[19]

Chen ve arkadaşı, 3 boyutlu ortogonal kompozitlerde, pim yüklü dayanımlar üzerindeki takviye tipinin, örgü yapısının ve geometrik parametrelerin etkisini incelemişlerdir.[20]

Camanho ve arkadaşı, Hashin hasar kriterini kullanılarak, karbon fiber takviyeli plastiklerde mekanik olarak tutturulmuş bağlantıların 3 boyutlu modelinin oluşturulmasını ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıyla ilgili bir çalışma yayımlamışlardır.[21]

Aktaş ve arkadaşı, Tsai-Hill ve fiber çeki-bası hasar kriterlerini kullanarak, keyfi oryantasyona sahip mekanik olarak tutturulmuş karbon fiber takviyeli epoksi kompozit plakalardaki hasar analizini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır.[22]

Dano ve arkadaşları, bağlantı yeri hasarı oluşana kadar yuva gerilmesi pim yer değiştirmesi eğrisinin tahmini için pim yüklemeli kompozit tabakaların aşamalı olarak hasar analizlerini incelemişlerdir. Çalışmanın amacı; hasar kriterlerinin etkisini, nonlinear kayma davranışının mukavemet tahminleri üzerindeki etkisini ve yük pim yer değiştirme eğrisinin etkisini belirlemektir. Yapılan deneylerden su sonuçlara varılmıştır. Fiber hasarı için maksimum gerilme kriterini kullanmak, kayma gerilmesi şekil değiştirme ilişkisi lineer vaziyetteyken, Hashin kriterinden daha da yüksek ve gerçekçi mukavemet bulunmasına neden olmuştur. Nonlinear kayma gerilmesi-uzama miktarı ilişkisini göz önüne alırsak farklı hasar analizlerinin tahminleri aynı noktada birleşme eğilimi göstermişlerdir. Yarı-izotropik $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ tabakaları için karışık hasar kriteri kullanılırken non-lineer kayma hareketinin dahiliyeti küçük bir fark meydana getirirken; $[(0/90)_6]_s$ ve $[(\pm 45)_6]_s$ tabakaları için ise mukavemet tahmininde büyük bir artışa sebep olmuştur. Geliştirilmiş modelin kullanılmasıyla tahmin edilen hasar mukavemetleri deneysel verilerin %1 - %15'ini kapsamıştır .[23]

İçten ve arkadaşı, pim ile yüklenmiş kompozit malzemenin, yük altında nasıl bir hasar dayanımı göstereceğini ve hangi hasar şekillerine maruz kalacağını incelemişlerdir. Burada hasar yükleri ve hasar şekilleri hem nümerik hem de standart numunelerle deneysel olarak incelemiştir. Hasar analizlerinde Hoffman ve Hashin hasar

kriterleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada fiber yapı örgü biçimde standart olarak üretilmekte olup, bu örgü halindeki karbon epoksi içerisine rasgele yerleştirilerek incelemeler yapılmıştır. Bu araştırmada; W/D oranı 2, 3, 4, 5, E/D oranı 1, 2, 3, 4, 5 ve açısı ise 0°, 15°, 30°, 45° değerlerini almaktadır ve bu doğrultuda deneyler ve nümerik işlemler yapılmıştır. Bu araştırmadan su sonuçlara varılmıştır. Yatak dayanımı direkt olarak geometrik parametrelere bağlıdır. Yani, E/D ve W/D oranları arttıkça yatak dayanımı en üst değerine ulaşmaktadır. E/D oranı 4 ve 5 olduğu zaman, yatak dayanımı hemen hemen aynı değeri almakta ve hasar olabileceğinin en iyisi olmaktadır, fakat E/D oranı 1 olduğu zaman, yatak dayanımı en düşük değerini almıştır. W/D oranı 2 olduğu zaman genelde çeki hasarı, W/D oranı arttığı zaman ise hasar, kayma veya yatak hasarı halini almıştır. Ayrıca yatak dayanımı 0° katman yönlü malzemede en üst değeri alırken 45° katman yönlü malzemede en alt değeri almıştır. Yani diğer bir deyişle, katman yön açısı arttıkça yatak dayanımında düşüş görülmüştür [24].

Okutan, geometrik parametrelerin tek pim bağlantılı ve çok yönlü cam fiber ile güçlendirilmiş epoksiden elde edilmiş numunenin hasar dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmada [0/90/0] , [90/0/90] katman yönlü ve tek pim bağlantılı kompozit malzemeler kullanılmıştır. İlk önce ASTM standartlarına uygun numune ile malzemenin mekanik özellikleri ve dayanımları bulunmuştur. Daha sonra ise nümerik ve deneysel olarak inceleme yapıp karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler ve nümerik çalışmalardan sonra su sonuçlar ortaya çıkmıştır. Tek delikli numunelerde net çeki dayanımı katman yönlerine bağlıdır. Tek delikli bağlantının kayma performansına bakıldığı zaman, kayma dayanımının katman yönlerine ve E mesafesine bağlı olduğu görülmüştür. [90/0/90] için deneysel sonuçlara bakıldığı zaman, W/D oranının 2 ve 3 olduğu durumlarda kritik E/D oranının 4, W/D oranının 4 olduğu durumlarda ise kritik E/D oranının 2 olduğu görülmüştür [25].

Okutan ve arkadaşı, pim bağlantılı kompozit malzemenin dayanımını inceledikleri bir araştırmada, kompozit malzeme bileşenleri olarak E – camı ve epoksi kullanmışlardır. Ayrıca iki farklı katman yönünde ([0,±45], [90,±45]) 20 farklı geometri kullanılmışlardır. Numunenin yatak dayanımının [90,±45] katman yönlerine sahip numuneden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. W/D oranın azaldıkça pim yataklarındaki dayanımında azaldığı görülmüştür. Aynı sonuç E/D oranı için de geçerli olmuştur. [90,±45] için maksimum dayanım, E/D oranının 3 veya 3' ten büyük ve W/D

oranının da 4 veya 4'ten büyük olduğu durumlarda görülmüştür. $[0, \pm 45]$ için maksimum dayanım ise, E/D ve W/D oranlarının 3 olduğu durumdur. Bu araştırmada, tek delikli numunenin net gerilim dayanımının katman yönlerine ve numunenin genişliğine bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, W/D oranındaki değişikliğin doğurduğu etkiler $[0, \pm 45]$ katman yönlü numunede daha belirgin bir şekilde görülmüştür. Tek delikli bağlantının kayma dayanımının, E/D oranına bağlı olarak katman yönlerine bağlı olduğu görülmüştür. Buna bir örnek olarak, $[0, \pm 45]$ için E/D oranının arttırılması ile maksimum kayma gerilimi %50 kadar azaltılabilmektedir, fakat $[90, \pm 45]$ için ise, E/D oranındaki değişiklikler dayanımda yaklaşık %66 kadar kayba yol açmıştır[26].

Akkuş, karbon epoksi levha yuvalarının statik ve dinamik yük altındaki mukavemetini incelemiştir. Bu çalışmada $[0/45/-45/90]_s$ ve $[90/45/-45/0]_s$ ardışık yığılı karbon epoksi laminantları üzerindeki statik ve dinamik mukavemet davranışlarını incelemek için pim-bağlantı deneyleri yapılmıştır. Test sırasında en iyi geometriyi elde etmek için kenar uzunluğunun pim çapına oranı E/D ve numune genişliğinin pim çapına oranı W/D sistematik olarak değiştirilmiştir. Sonuç olarak dayanıklılık açısından $[90/45/-45/0]_s$ sırası, $[0/45/-45/90]_s$ sırasına göre %12' ye kadar daha güçlü olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, en iyi geometri E/D 4 ve W/D 4' te elde edilmiş ve her iki dizilimde de en üst yuva mukavemetleri, bu geometrilerde elde edilmişlerdir. Tüm E/D ve W/D ve yığın dizilimleri karşılığında E/D ve W/D oranları artarken yorulma dayanımı, statik dayanımın %63'üne kadar azalma göstermiştir. $[0/45/-45/90]_s$ ve $[90/45/-45/0]_s$ yığınları için yorulma dayanma limiti, E/D ve W/D oranları artarken, azalma göstermiştir. Buna rağmen her iki sıralı yığında, aşağı yukarı aynı dayanıklılık sınırını vermiştir[27].

Toparlı ve Aksoy (1998), dış kemiği kompozit reçine yüzeyinin yapıştırıcı bağının tokluğunun güvenilirliği ve geçerliliğini kırılma mekaniği açısından araştırmışlardır. İki farklı yapıdaki reçinenin kırılma tokluğu ve kırılma enerjisini üç nokta eğme deneyinde yükleme yapılarak test metoduyla analiz yapmışlardır. Sonuçta, çiğneme güçlerinin altındaki çatlakların başlaması ve ilerlemesinin kırılma tokluğu veya kırılma enerjisi ile izlenebileceğini söyleyerek, kırılma yükünün başlangıçtaki çatlak uzunluğuna bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca kırılma tokluğu değerinin diğer dayanım parametrelerinden daha iyi gösterge olduğunu ifade etmişlerdir[28].

Gogotsi et al. (2002), yaptıkları çalışmada birkaç farklı çeşit seramik partikül kompozit malzemenin kırılma tokluğu değerlerini deneysel metotla elde ederek, sonuçlarını yayımlamışlardır. Kırılma tokluğu değerlerini belirleyebilmek için numunelere üç nokta eğme testi uygulanmış sonuçların geçerliliği açısından deneyler birçok sayıda tekrarlanmıştır. Deneyler oda sıcaklığında ve 1400°C sıcaklıkta yapılmış, bu sıcaklıklarda elde edilen kırılma tokluğu değerleri makalenin sonunda yayımlanmıştır[29].

Karaaslan, Topuz ve Yıldırım (2003), yaptıkları çalışmada alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, alüminyum matrisli alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli kompozit malzemeleri toz metalürjisi yöntemiyle üretmişler ve farklı hacimlerde alüminyum oksit ve silisyum karbür içeren kompozit malzemelerin mekaniksel özelliklerini yorumlamışlardır. Araştırmalarından elde ettikleri sonuçlara göre, düşük takviye elemanı içeren alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel özelliklerini yüksek takviye elemanı içerenlere göre daha üstün olarak belirlemişlerdir[30].

Hattatoğlu, Hınıslioğlu ve Özel (2003), düşük sıcaklıktaki asfalt betonu kırılganlığının kırılma tokluğunun sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, düşük sıcaklıktan dolayı asfalt kaplamalarda meydana gelen çatlamların Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) kanunlarıyla araştırılabileceğini ortaya koymuşlar ve buna bağlı olarak asfalt malzemeler için ömür tahmini yapmışlardır[31].

Avcı, Arıkan ve Akdemir (2003), yaptıkları çalışmada çelik fiber takviyeli polimer kompozitin kırılma davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, çelik fiber takviyeli parçacık dolgulu polimer kompozit kirişler ağırlıkça farklı çelik fiber oranlarında üretilmiş ve deney için başlangıç çatlak açılmıştır. Hazırlanan numunelere üç nokta eğme testi uygulanmış ve Mod I'e göre kırılma davranışları incelenmiştir. Numunelerin gerilme şiddet faktörleri başlangıç çatlak derinliği, komplians ve J-integral metotları gibi farklı metotlar kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır[32].

Avcı, Uyaner ve Şahin (2003), yaptıkları çalışmada cam kumaş-polyester kompozit levhalarda takviye açısının kırılma davranışına etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaç için, ASTM E-399 standardına uygun olarak kompakt çekme numuneleri hazırlamışlar ve bu numunelerle kırılma mekaniği deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kompozit malzemenin kırılma tokluğu değerini belirlemişlerdir. Takviye açısı farklı numunelerle deneylere devam etmişler, takviye açısına bağlı olarak elde ettikleri kırılma tokluğu sonuçlarını grafik olarak yayınlamışlardır[33].

Aslantaş ve Taşgetiren (2003), yaptıkları çalışmada tabakaya bağlı çatlaklarda gerilme şiddet faktörü değerini sonlu elemanlar analizi ile elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada, yapı, farklı malzemelerden oluşmuş tabaka bağ ile bir araya getirilmiş ve elde edilen numunenin gerilme şiddet faktörü değeri sonlu elemanlar metodu ile belirlenmiştir. Analiz için mod I kırılma modeli kabul edilmiştir. Her bir tabakanın homojen, lineer elastik ve izotropik olduğu öngörülmüştür. Elde edilen sonuçlar makalenin sonunda yayınlanmıştır[34].

Karaaslan, Topuz ve Yıldırım (2003), yaptıkları çalışmada alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel davranışları üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Yapılan çalışmada, alüminyum oksit ve silisyum karbür takviyeli kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş, elde edilen sonuçlar, üretilen kompozit malzemenin elastisite modülü ve mikro yapısına göre yorumlanmıştır. Deneylere farklı hacimlerde takviye elemanı kullanılarak devam edilmiş ve araştırmada elde edilen sonuçlara göre %5 ve %10 takviye elemanı içeren alüminyum matrisli kompozit malzemenin mekanik özellikleri %15 ve %20 takviye elemanı içerenlere göre daha üstün olarak belirlenmiştir[35].

Yang, Chen, Hu ve Wang (2005), yaptıkları çalışmada piezoelektrik seramiklerin kırılma kriteri ve hasar analizi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında piezoelektrik seramiklerin mekaniksel ve elektriksel hasarlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişler ve sonuçlarını tablo halinde makalenin sonunda yayınlamışlardır. Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre, piezoelektrik seramiklerde, mekaniksel hasar kırılma üzerine elektriksel hasardan çok daha etkili bir rol oynamaktadır[36].

Shabana ve Noda (2001), üretim aşamasında uygulanan sıcaklıklar nedeniyle meydana gelen artık gerilmeleri dikkate alarak ısı elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır [37].

Yapıcı ve Sinan ([30,-30]₂) fiber takviyeli tabakalı termoplastik kompozit levhaların tek yönde çekmeye maruz kalması durumunda delik çapına bağlı olarak delik kenar arasında oluşan artık gerilmeleri incelemiştir[38].

Yazıcı ve Ülkü iki boyutlu rasgele dağılı kısa cam elyafı takviyeli polyester matrisli kompozit plakalarda çekme hızının kompozit mukavemeti üzerine etkilerini araştırmışlar ve çekme hızı arttıkça kompozit mukavemetinde düşme olduğunu tespit etmişlerdir[39].

Şen, açılı oryantasyona sahip, simetrik ([60°/-60°]_s) ve anti simetrik ([60°/-60°]₂), çelik fiberle takviye edilmiş, tabakalı ve ortasında dairesel delik bulunan termoplastik kompozit plaklarda, uniform sıcaklık etkisiyle meydana gelen ısı gerilmeleri hesaplamıştır[40].

Sayman ve Aksoy, içinde bir delik bulunan alüminyum metal matrisli tabakalı bir kompozit için elastik-plastik gerilme analizini sonlu elemanlar metodu ile çalışmışlardır ve uygulanan yükün değişimi ile kalıntı gerilme ve plastik bölgenin genişlemesini incelemiştir. [41].

Hwai Chung Wu ve Bin Mu, içinde dairesel bir delik bulunan izotropik/ortotropik plakalar ve silindirler için sonlu elemanlar metodu yardımıyla gerilme yığılmalarını tespit etmiş ve geometrinin etkisini incelemiştir[42].

Arslan ve Kaman, termoplastik matrisli ve çapraz takviyeli çelik fiber ile takviye edilmiş kompozit malzemelerden imal edilen kanca bloğu makara karterinde elasto-plastik gerilme analizini sonlu elemanlar metodu kullanarak gerçekleştirmişlerdir[43].

Gür ve arkadaşları, kompozit malzemeden imal edilmiş ortasında dikdörtgen delik bulunan üniform çekme yüklerine maruz, düzlem bir levhada elasto-plastik gerilme analizini sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirmişlerdir[44].

Chen ve arkadaşları, BEAM metodu kullanarak delikli tabakalarda iki boyutlu gerilme analizi yapmış ve sonuçların sonlu elemanlar metodu ile iyi uyum sağladığını tespit etmişlerdir[45].

Maa ve Cheng, merkezinde dairesel bir delik bulunan tabakalı kompozitin çekme etkisi altındaki davranışını sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz etmişlerdir[46].

Serier ve arkadaşları, merkezinde bir delik bulunan tabakalı bir numunede bir ara yüzey çatlağının davranışlarını sonlu elemanlar ile analiz etmişlerdir. Ayrıca gerilme yığılma faktörünün varyasyonları ve gerilme bölgeleri, elastisite modülü oranının bir fonksiyonu olarak tespit edilmiştir[47].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir. Cam elyafı polyester levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, otomobil lastikleri ve seramik metal karışımı olan sermentler bunlara örnektir. Kompozitler çok fazlı malzeme sayılırlar. Yapılarında sürekli bir ana faz ile onun içinde dağılmış pekiştirici bir donatı fazı bulunur.

Faz: Bir malzemenin iç yapı yönünden farklı olan kısımlarına denir.

Bu faz iki tür bileşimle sağlanabilir:

1- Mikroskobik

2- Makroskobik

Mikroskobik bileşim: Örneğin perlit çeliği, ferrit ve sementitin mikroskobik düzeyde homojen karışımlarından oluşur. Tek başına ferrit yumuşak ve düşük mukavemetli olup sert ve gevrek sementit ile birlikte yan yana ince tabakalar halinde dizilmek suretiyle yüksek mukavemetli ve yüksek tokluğa sahip perlit çeliğini oluştururlar.

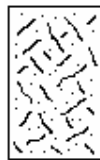
Makroskobik bileşim: Boyutları 0,1 mm' nin üzerinde gözle görülebilirler. Sonradan bir araya getirilerek üstün özelliklerdeki kütleleri oluştururlar.

Kompozit malzemeler donatılı veya pekiştirilmiş türüne göre üç gruba ayrılır:

Taneli kompozitler



Lifli kompozitler



Tabakalı kompozitler



Lifli ve tabakalı kompozitlerin sağladığı özelliklerdeki artış, taneli kompozitlere göre daha yüksektir. Taneli kompozitler için en önemli örnek betondur. Sert tanelilerin sünek bir malzemeyle birleştirilip aglomera haline getirilen kompozitlere diğer bir örnek de asfalt betonudur.

Asfalt, viskoz ve düşük mukavemetlidir. Taş ise sert ve gevrek, kütle halinde fazla şekil değiştirmeden çatlayarak kolayca kırılabilirler. Farklı boyutlardaki kırmataş ile asfaltın birleşerek hem sünek hem de yeterli mukavemetli olan yol kaplaması malzemesini oluştururlar.

Tungsten karbür (WC) taneciklerinin Co metali ile yüksek sıcaklıkta basınç altında sinterlenmesi sonucu elde edilen kompozit çok sert olup yüksek hızlı kesme takımı üretimine elverişlidir. Uygulamada bunlara SERMET denir. Uygulamada en önemli kompozitler lifli olanlardır. Liflerin çapları yaklaşık 0,1mm civarında olup tek başına kullanılmazlar. Kalınlıkları arttığında kusur oluşma olasılığı nedeniyle mukavemetleri çok azalır. Bu lifler uygun bir malzemeyle istenen boyutta taşıyıcı kütlelere dönüştürülür. Bu bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Uygulamada donatı malzemesi olarak kullanılan liflerin çoğu kuvvetli kovalent bağa sahiptir. Aynı amaçla kullanılan metal liflerin mukavemeti de soğuk çekme ile artırılmaktadır. Lifler yönlenmiş veya rasgele dağılmış olabilir. Yönlenmiş lifler doğrultusunda mukavemet doğal olarak yanal doğrultudan çok daha büyük olur. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti de yükselir. Yönlenmiş liflerde bu oran hacmin %80, rasgele yönlenmişlerde ise %40-50 arasında kalır.

Cam lifli polyesterlerin mukavemeti ve elastisite modülü düşüktür. Ancak diğerlerine göre daha ucuz ve kolay uygulandığından deniz tekneleri, oto, spor malzemeleri ve yapı elemanları üretiminde çok yaygın olarak kullanılır.

3.1.Kompozit Malzeme Türleri

1. Polimer Kompozitler
2. Metal Kompozitler
3. Seramik Kompozitler

3.1.1.Polimer Kompozitler:

Liflerle pekiştirilmiş polimer kompozitler endüstride çok geniş kullanma alanına sahiptir. Pekiştirici olarak cam, karbon, kevlar ve boron lifleri kullanılır.

Tablo. 1. Pekiştirici Liflerin Özellikleri Tabloda Verilmiştir

Malzeme	Özgöl ağırlık gr / cm ³	Çekme mukavemeti N / mm ²	Elastisite modülü N / mm ²
Cam lifi	2,54	2410	70000
Karbon lifi	1,75	3100	220000
Kevlar lifi	1,46	3600	124000

Polimer kompozitlerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet (mukavemet/ özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumundadırlar. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemetin 110 N.m / gr olmasına karşın cam lifi – polyesterlerde 620 N.m/gr’dır. Diğer taraftan karbon lifi epoksida 700 N.m/gr ve kevlar epoksida 886 N.m/gr dır. Diğer taraftan karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir.

Tablo.2. Lifli Kompozitlerin Özellikleri

Malzeme	Özgöl ağırlık gr/cm ³	Çekme mukavemet N/mm ²	Elastik mukavemet N/mm ²
Cam lifi – polyester	1,5 – 2,1	200 – 340	55000 – 130000
Karbon lifi – epoksi	1,5 – 1,8	1860	145000
Kevlar – epoksi	2,36	2240	76000
Boron lifi - epoksi	1,4	1240	176000

3.1.2.Metal Kompozitler (Metal Matrisli Birleşik Malzemeler MMC) :

Bir metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile eritme vakum emdirmeye, sıcak presleme ve difüzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak MMC’ ler elde edilirler.

MMC' ler daha çok uzay ve havacılık alanlarında, mesela uzay teleskopu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları vs. yerlerde kullanılır.

3.1.3.Seramik Kompozitler (Seramik Matrisli Birleşik Malzemeler CMC) :

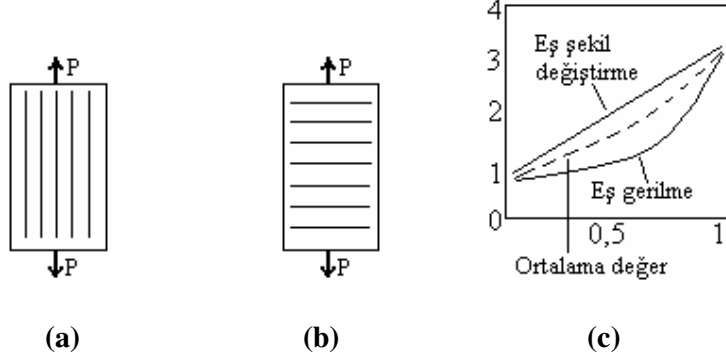
Bu amaçla yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramikleri kullanılmaktadır. Başlıcaları Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B_4C , CbN, TiC, TiB, TiN, AlN' dir. Bu bileşikler değişik yapılarda olup amaca göre bir yada bir kaç beraber kullanılarak CMC' ler elde edilir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir.

4. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI

Kompozitlerde lifler kuvvet yönüne paralel veya dik yönde veya rastgele dağılmış durumda bulunurlar. Lifler yönlenmiş durumda iken kompozit büyük ölçüde anizotrop olur. Lifler rastgele dağıtılmış ise düzlemsel boyutta izotrop olurlar.

Liflerle kuvvet birbirine paralel ise liflerle matris aynı miktarda şekil değiştirir. Buna eş şekil değiştirme hali denir. Matrisin elastisite modülü E_m , liflerin elastisite modülü E_f ve liflerin hacimsel oranı V_f ise kompozitin paralel doğrultudaki bileşke elastisite modülü ;

$$E_k = E_f \cdot V_f + V_f (1 - E_m) \text{ olur.} \quad (4.1)$$



a) Eş şekil değiştirme hali (Paralel lifler)

b) Eş gerilme hali (Dik lifler)

c) Elastisite modülünün kompozitin bileşim oranı ile değişimi (Rastgele lifler)

Kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri liflerin kopmasıyla sona erer. En uygun kompozit yapısında lifler kuvvet doğrultusunda paraleldir.

Liflerin kuvvet yönüne dik olduğu hallerde makro ile lifler aynı yükü taşır. Eş gerilme hali bilinen bu yükleme karşısında kompozitin elastisite modülü;

$$E_k = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + (1 - V_f) E_f} \quad (4.2)$$

Kompozit malzemenin çekme mukavemeti liflerin kopması ile sona erer. En uygun kompozit yapısında lifler kuvvet doğrultusuna paraleldir. E_f , T_f liflerin çekme

mukavemeti, T_m liflerin koptuğu andaki şekil değiştirme için matristeki gerilme ve V_f liflerin hacimsel oranı ile kompozitin çekme mukavemeti.

$$T_k = T_f V_f + (1 - V_f) T_m \text{ olur.} \quad (4.3)$$

5. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

5.1.Hafiflik:

Polimer kompozitler genelde $1,5 - 2 \text{ gr / cm}^3$ yoğunluğundadır. Metal kompozitler, $2,5 - 4,5 \text{ gr / cm}^3$ olmakla beraber özellerde sıçrama görülebilir. Seramik kompozitler ise ikisi arasındadır.

5.2. Rijitlik Ve Boyut Kararsızlığı:

Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararlılığı gösterir.

5.3. Yüksek Mekanik Özellikler:

Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları çok yüksektir.

5.4.Yüksek Kimyasal Direnç:

Kompozitler birçok kimyasal maddelere, bu arada asitler, alkaliler, çözücüler ve açık hava şartlarına karşı son derece direnç gösterirler. Kimya tesisleri için çok kullanılan malzemelerdir.

5.5.Yüksek Isı Dayanımı:

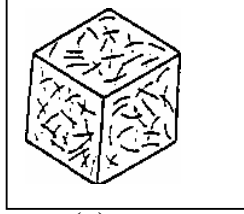
Kompozitlerin ısı dayanımı sıradan plastiklere göre yüksektir.

5.6.Elektriksel Özellikler:

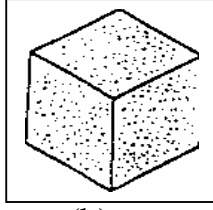
Elektriksel özellikler kompozitlerde isteğe göre ayarlanabilir. Metal Matrisli Birleşik Malzemeler (MMC)' ler iletkenidir.

6. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI:

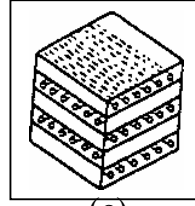
Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapıdaki malzemelerin formuna göre bir sınıflama yapmak mümkündür. Bu sınıflama şekli aşağıda verilmektedir.



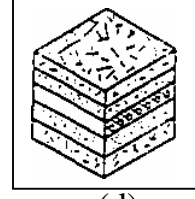
(a)



(b)



(c)



(d)

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

- a. Elyafli kompozitler
- b. Parçacıklı kompozitler
- c. Tabakalı kompozitler
- d. Karma kompozitler

a) Elyafli kompozitler: Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyeleri her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir.

Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

b) Parçacıklı kompozitler: Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler.

c) Tabakalı kompozitler: Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönelmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallerle göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler.

Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler.

d) Karma (Hibrid) kompozitler: Aynı kompozit yapıda iki yada daha fazla elyaf çeşidinin bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyafı kompozitten daha yüksektir.

7. KOMPOZİT MALZEME YAPIMINDA TEMEL MADDELER

7.1. Matris Malzemeleri:

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir yada birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit olarak dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf yada matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

7. 1.1. Reçineler ve Özellikleri:

a) Epoksi Reçineleri: Epoksi reçineleri bifenol A ile epiklorhidridin reaksiyon ürünü olup sertleştirici (katalist) ile karıştırıldığında adi sıcaklıkta veya fırınlama ile (70 – 90 derece) bir sonucu belli bir sürede sertleşir ve bir plastik görünümü alır. Önemli özellikleri olarak sıvı, viskoz sıvı veya katı hallerde bulunabilmeleri, elektrik, ısı, kimyasal dirençleri ile mekanik özelliklerinin yüksek olması, hava şartlarından etkilenmemeleridir. Depolanma süreleri oda sıcaklığında 24 aydır.

b) Polyesterler: Dibazik asitlerle gliserin, glikol gibi polialkollerin reaksiyonundan elde edilirler. Katı, sıvı termostat, termoplast gibi türlerde bulunur. Sıvı polyesterler, katalist ve hızlandırıcı kullanılarak kür edilirler. Sert, kimyasal maddelere ve hava şartlarına direnci çok yüksektir. Katı polyesterler (LPET gibi) darbe dayanımlıdır.

c) Üretan Reçineleri: Bir izosiyanatla bir polialkolün oda sıcaklığında katılma polimerizasyonu ile elde edilen üretanlar daha çok köpük lastik (esnek ve rijit) yapımında kullanılırlar. Kimyasal direnci iyidir. Yazılım özellikleri yüksektir.

d) Fenolik Reçineler: Fenol formaldehit kondenzasyon ürünü olup, bu ham maddelerin bazen türevlerinde kullanılmaktadır. Katı ve sıvı türleri vardır. Yurdumuzda sıvı reçine üretimi vardır.

7.2. Elyaf Çeşitleri Ve Özellikleri:

Matris malzeme içinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Cam elyaflar teknolojiye kullanılan en eski elyaf tipleridir. Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramid elyaflar ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan elyaf tipleridir. Elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca, elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır.

1. Üstün mikroyapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri.

2. Boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması.

3. Elastisite modülünün çok yüksek olması.

7.2.1. Cam Elyaflar:

Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir, doğada genellikle oksijenle birlikte silis (SiO_2) şeklinde

bulunur. Cam imali için silis kumu, katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde iken 1260 °C civarına ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir.

Cam Elyafların Bazı Özellikleri Aşağıdaki Gibi Özetlenebilir

1. Çekme mukavemeti yüksektir, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir.

2. Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.

3. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.

4. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.

5. Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkan tanırırlar.

Cam elyaf imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur.

1). A (Alkali) Camı: A camı yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek, en yaygın cam tipidir.

2). C (Korozyon) Camı: Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

3). E(Elektrik) Camı: Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suyu karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı kullanılır.

4). S(Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılırlar.

Tablo 3. Cam Elyafların Mekanik Özellikleri ve Bileşimleri

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti(MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katki Malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

7.2.2. Bor Elyaflar:

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır.

Bor-Tungsten elyaflar, sıcak tungsten flamanın hidrojen ve bortriklorür (BCl₃) gazından geçirilmesi ile üretilirler. Böylece Tungsten flamanın dışında bor plaka oluşur. Bor elyaflar değişik çaplarda üretilirler (0.05mm ila 0.2mm). Tungsten çekirdek ise daima 0.01 mm çapında üretilir. Bor elyaflar yüksek çekme mukavemetine ve elastik modüle sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758 MPa ila 3447 MPa'dır. Elastisite modülü ise 400 GPa'dır. Bu değer S camının elastisite modülünden beş kat fazladır. Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak, maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor Karbür (B₄C) kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanması ile çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040°C civarındadır.

7.2.3. Silisyum Karbür Elyafı:

Bor gibi, Silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0.1 mm ila 0.14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyafından daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370°C' de mukavemetinin sadece %30'nu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık 640 °C' dir. Bu elyaflar genellikle Titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında Titanyum, Alüminyum ve Vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak Silisyum karbür elyafı Bor elyafına göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafın yoğunluğu düşüktür.

7.2.4. Alümina Elyafı:

Alümina, Alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elyaf formundaki alümina, 0.02 mm çapındaki alümina flamanın Silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir. Alümina elyafının çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir, ancak basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alümina epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ila 2413 MPa'dır. Ayrıca, yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.

7.2.5. Grafit (Karbon) Elyafı:

Karbon, yoğunluğu 2.268 gr/cm³ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyafı cam elyafından daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Hem karbon hem de grafit elyafı aynı esaslı malzemeden üretilirler. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyafının üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000 – 3000 °C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyafı uygun değildir.

Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyafı 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyafı ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyafı kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür.

Tablo 4. Karbon Ve Grafit Elyafların Karşılaştırılması

Özellik	Grafit	Karbon
Safılık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	> 1700	< 1700
Elastisite Modülü (GPa)	>345	<345

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaf, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaf, çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaf, alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

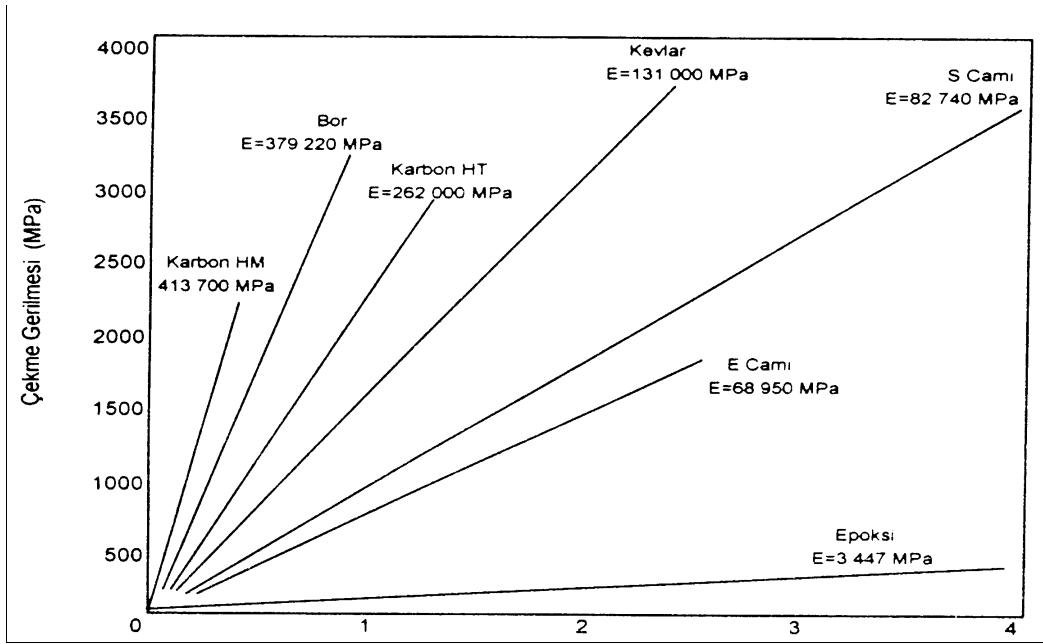
7.2.6. Aramid Elyaf:

Aramid "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir, aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmışlardır. İki farklı tip aramid elyaf mevcuttur. Bunlar Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Aramidin mekanik özellikleri grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf eksenine doğrultusunda çok iyi iken elyaflara dik doğrultuda çok zayıftır. Aramid elyaf, düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu nedenle kolay şekil verilebilir. Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir.

Her iki kevlar da 2344 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir ve kopma uzaması %1.8'dir. Kevlar 49'un elastik modülü kevlar 29'ununkinden iki kat fazladır. Kevlar elyafın yoğunluğu cam ve grafit elyafın yoğunluklarından daha düşüktür. Kevlar49/Epoksi kompozitlerinin darbe mukavemeti grafit epoksi kompozitlere oranla yedi kat, bor/epoksi kompozitlere oranla dört kat daha iyidir. Uçak yapılarında, düşük

basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerinin iyi olmamasının yanı sıra kevlar epoksi kompozitlerinin nem absorbe etme özellikleri kötüdür. Şekilde farklı elyaf malzemelerin ve epoksi matrisin gerilme-uzama diyagramı verilmiştir. Çizelgede ise farklı elyaf malzemelerin epoksi matris ile oluşturduğu yarı mamul tabaka maliyetleri, E camının maliyeti baz alınarak verilmektedir.

Kopma Uzaması (%)



Şekil 1. Elyaf ve Matris Malzemelerin Gerilme Uzama Diyagramı

Tablo 5. Farklı Elyaflardan Oluşan Kompozitlerin Birim Maliyetleri

Kompozit	Maliyet
E Camı/Epoksi	1
S Camı/Epoksi	4-8
Kevlar/Epoksi	15-40
Karbon(HT)/Epoksi	30-60
Karbon(HM)/Epoksi	80-120

8. KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIMI

8.1. Günlük Ve Ticari Hayatta Kullanım:

Bu amaçla, yaygın şekilde cam elyafı, cam, keçe ve cam dokuma ile polyester reçineden yapılan çeşitli ürünler kullanılmaktadır. Cam elyaf oranı % 30– 40 arasındır. Çay tepsisi, masa–sandalye, depo, küvet, tekne, bot ve otomotiv sanayi bu kompozitlerin uygulama örnekleridir. Ayrıca formika, baskılı devre plakası, elektrikçi fiberleri, spor malzemeleri ve araç şarjı atlama sııkları, kaynak takımı, tenis raketi, yarış kanoları değişik birleşik malzemelerden yapılan ürünlerdir.

8.2. Uzay Ve Havacılık Sanayisinde:

Birleşik malzemelerin uzay ve havacılık sanayinde kullanımı başta hafiflik ve sağlamlık nitelikleri sayesinde. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düşünülmeyip stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin önde gelen avantajlarıdır.

Birleşik malzemeler, değerli niteliklerden dolayı uzay ve havacılık araçlarında gittikçe daha fazla kullanılmaktadır. Bugün bir av bombardıman uçağında birleşik malzeme kullanımı toplam uçak ağırlığının yarısına ulaşmış bulunmaktadır. Bu sayede bor karbür, silisyum karbür, alümina karbon, cam ve kevlar elyafı değişik reçinelerle değişik birleşik malzemeler yapımında kullanılmaktadır.

8.3. Silah, Roket Ve Diğer Mühimmat Sanayisinde:

Birleşik malzemelerin silah üretimi de kullanımı pek yaygın olmamakla beraber 3000 bara kadar dayanabilen 60 ve 81 mm gibi küçük çaplı havanlar için bazı çalışmalar olmuştur. Bu silahlar hafifliği nedeniyle piyadenin savaş performansını artırıcı niteliktedir.

Roket üretiminde birleşik malzemelerin rolü oldukça büyüktür. Örnek olarak M72 de motor lançeri cam elyafı ve epoksiden, Apilasta ve diğer tanksavar roketlerde gövde kısmen kevlar ve epoksiden, M77 MLRS de lüle (nozzle) karbon birleşik malzemesinden yapılmaktadır.

Mühimmat üretiminde de birleşik malzemeler kısmen kullanılmaktadır. M19 A/T mayınında gövde ABS reçine ve cam elyaf parçacıklarından, bu mayına ait küçük ve büyük belleville yayları cam doku ve fenolik reçineden yapılmışlardır. 155mm lik ICM mühimmatı gövdelerinde cam elyafı epoksi sargı vardır. Miğfer konusunda kevlar ve değişik reçineler kullanılmaktadır.

Kurşun geçirmez yeleklerde günümüzde bitişli kevlardan, balistik testler için zırh levhaları cam ve fenolik reçineler imal edilmektedir ve tasarım alternatiflerinin bulunmasıyla git gide artacak ve birçok avantajlarıyla insanlığın hizmetine verilmiş olacaktır.

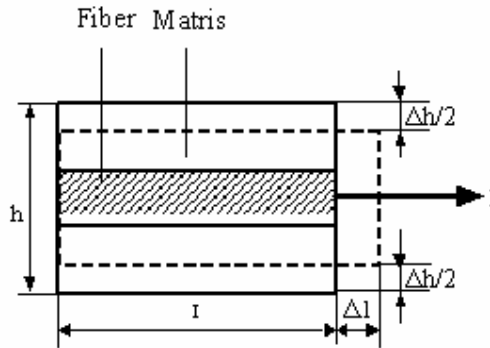
9. ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELERİN MEKANİĞİ

Uygulanan dış yüklere karşı bir cismin gösterdiği tepki mekanik davranış olarak adlandırılır. Bu davranışın biçiminde mekanik özelliği tayin edilir. Bu nedenle bileşenlerin gerilme ve uzama analizi önemlidir. Polimerler visko-elastik olduğu için de deformasyon sıcaklık, yük altında zaman gibi faktörlere bağlıdır. Bu malzemenin 'sürünmesi' olarak bilinir ve sabit uzamaya karşılık zamana bağımlı gerilme ise (σ) , uzama (ϵ) ve zaman (t) 'nin fonksiyonu olarak şu şekilde gösterilir.

$$\sigma = f(\epsilon, t) \quad (9.1)$$

Bu eşitlik, verilen zaman aralığı için gerilmenin doğrudan zamanla orantılı olacağını ifade eder. Tasarım sırasında en önemli kriterlerden birisi, kompozitin kendisi ve bileşenlerinin mekanik özelliklerinin dikkate alınmasıdır.

1- Takviye doğrultusundaki elastiklik modülünün hesaplanması



Şekil 2. Fibere Paralel Yönde Çekme Yüküne Maruz Karma Malzeme Modeli

Yük uygulandığında fiber, matris ve karma malzeme aynı miktarda uzayacağından, boyca uzama oranı (ϵ);

$$\epsilon_k = \epsilon_f = \epsilon_m \quad (9.2)$$

k=karma (kompozit) malzeme, f=fiber, m=matris ve karma malzemenin taşıdığı yük (P) ise;

$$P_k = P_f + P_m \quad (9.3)$$

$$\sigma_k \cdot A_k = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (9.4)$$

ifadesi yazılabilir. Burada A=kesit alanı, σ =çekme gerilmesi ve fiber sürekli olduğundan ;

$$V_f = A_f / A_k \quad V_m = A_m / A_k \quad (9.5)$$

$$V_f + V_m = 1 \quad (9.6)$$

$$\sigma_k = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (9.7)$$

olur, ve denklem birim uzama değerine bölünürse karma malzemenin elastiklik modülü için ;

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (9.8)$$

Bulunur. Genel ifadesi,

$$\sigma_k = \sum_i V_i \cdot \sigma_i \quad (9.9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; V_i = i bileşeninin hacim oranı ve σ_i = bileşeninin özelliğidir.

9.1. Poisson oranının (ν_{12}) Hesaplanması

Deneyler sırasında, boyuna uzamanın yanı sıra, enine bir büzülme görülmektedir. Bu iki şekil değiştirme miktarının oranı sabit olup,

$$\nu_{12} = -\epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (9.10)$$

$$\epsilon_2 = \Delta h / h \quad (9.11)$$

Burada; ϵ_2 = enine şekil değiştirme oranı, ν_{12} = poisson oranı (büzülme sayısı), Δh =elyaf

ve matristeki daralmaların toplamıdır. Eş birim uzama olduğundan,

$$\nu_{12} = V_m \cdot \nu_m + V_f \cdot \nu_f \quad (9.12)$$

9.2. Takviyeye Dik Doğrultudaki Elastiklik Modülünün Hesaplanması

Fibere dik yöndeki zorlamalarda ise yapı bileşenlerin aynı gerilme altında kaldığı kabul edilebilir (Eş gerilme).

$$\sigma_k = \sigma_f = \sigma_m \quad (9.13)$$

Malzemenin bu yöndeki uzaması,

$$\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_f \quad (9.14)$$

Şeklinde yazılabilir.

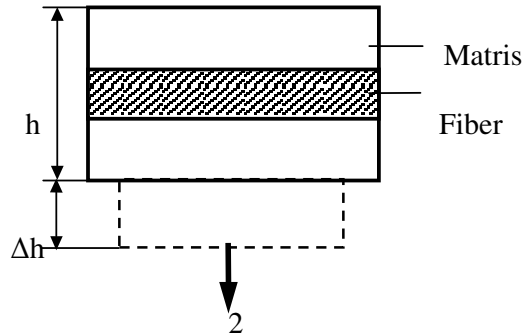
$$\Delta h = \epsilon_k \cdot h \quad (9.15)$$

$$\Delta h_m = \epsilon_m \cdot h_m$$

$$\Delta h_f = \epsilon_f \cdot h_f$$

$$\epsilon_k \cdot h = \epsilon_m \cdot h \cdot V_m + \epsilon_f \cdot h \cdot V_f \quad (9.16)$$

$$\epsilon_k = \epsilon_m \cdot V_m + \epsilon_f \cdot V_f$$



Şekil 3. Fibere Dik Yönde Çekme Yüğüne Maruz Karma Malzeme Modeli

$$\sigma_k/E_k = \sigma_m/E_m \cdot V_m + \sigma_f/E_f \cdot V_f \quad (9.17)$$

$$1/E_2 = 1/E_m \cdot V_m + 1/E_f \cdot V_f \quad (9.18)$$

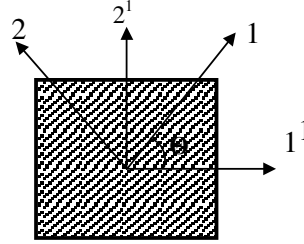
elde edilir.

$$\frac{1}{\ddot{O}_k} = \sum_i \frac{V_i}{\ddot{O}_i} \quad (9.19)$$

şeklinde yazılabilir. Gerilmeler eşit olduğundan,

$$1/G_2 = v_m/G_m + v_f/G_f \quad (9.20)$$

yazılabilir.



Şekil 4. Herhangi X-Y Eksenlerinden Malzeme Asal Eksenlerine Pozitif Yönde Dönüşün Şematik Gösterimi.

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ T_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ T_{xy} \end{bmatrix} \quad (9.21)$$

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ T_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ T_{12} \end{bmatrix} \quad (9.22)$$

Olur. Benzer şekilde

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (9.23)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (9.24)$$

Bununla beraber bir [R] matrisi,

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (9.25)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (9.26)$$

elde edilir.

10. SONLU ELEMENLAR

10.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Bu bölümde sonlu elemanlar metodunun bazı temel kavramları tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar metodu; otomotiv, bina, uçak, köprülerdeki ısı akışı, akışkan hareketi, manyetik akı vb. uygulamalarda karşılaşılan problemlerin çözümünü kolaylaştıran ve gerçeğe çok yakın çözümler veren nümerik analiz yöntemidir. Çoğunlukla günlük pratik uygulamalarda kullanılır. Yukarıda sıralanan ve kapalı biçim çözüm yönteminin kullanımının mümkün olmadığı veya çok güç olduğu yerlerde problemin çözümü sonlu elemanlar metoduyla rahatlıkla yapılabilir.

10.2. Sonlu Eleman Metodunun Gelişimi

1960'lı yılların başlarında, mühendisler bu metodu gerilme analizi, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve diğer alanlardaki problemlerin yaklaşık çözümlerini bulmak için kullanmaya başlamıştır. 1955'te Angryis tarafından yazılan enerji teoremleri ve

matris metotları ile ilgili kitap, sonlu elemanlar metodunun gelişimine temel hazırlamıştır. Sonlu elemanlarla ilgili, Ziesnkiewicz ve Chung tarafından yazılan ilk kitap 1967’de yayınlanmıştır. 1960’ların sonlarında ve 1970’lerin başlarında sonlu elemanlarla analiz yapan paket programlar yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Bu gelişmeler; kompleks plakaların, kabuk yapıların ve katı rijit cisimlerde gerilme ve yer değiştirme analizlerini kolaylaştırmıştır.

Günümüzde, bilgisayar teknolojisi ve CAD sistemlerindeki ilerleme ile karmaşık problemlerin modeli yapılabilir hale gelmiştir. Günümüzde ilk prototipler (modeller) yapılmadan önce bilgisayarda birçok alternatif konfigürasyonlar yapılmaktadır. Bu çalışmada ANSYS gerilme programı kullanıldı.

10.3.Sonlu Eleman Metodunun Çözümü

Bu yöntemle, incelenmek istenilen cismin sonlu sayıda küçük elemana bölünerek inceleme yapıldığı için Sonlu Elemanlar Yöntemi (The Finite Element Method) olarak adlandırılır.

Bu metot ile yapılacak deney, düğüm noktalarından birbirine bağlı sonlu sayıda küçük elemana bölünür. Seçilen birim eleman, geometrik bir şekildir. Bunun amacı, geometrik yapısını bildiğimiz küçük elemanlar üzerinde inceleme ve çözüm yapmamızın kolay olmasıdır. Bu işlem ANSYS’te MESH komutuyla yapılır. Birim eleman boyunun küçülmesi, daha hassas çözüm yapmamızı sağlarken, denklem sayısını arttırdığı için işlem süresini uzatır.

Sonlu elemanlar metoduyla çözüm yapılırken izlenmesi gereken yol;

1. Yapıyı ya da sürekli elemanı birim elemanlara bölmek. Bu yapılırken birim elemanın boyutunu ve şeklini, malzemenin fiziki özelliklerine göre seçmek gerekir.

2. Sonlu elemanlar birbirine düğüm noktalarından bağlanmış kabul edilirler. Bu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri, basit yapıların analizlerinde olduğu gibi, problemin bilinmeyen ana parametreleridir.

3. Her bir sonlu elemanın yer değişimini tanımlamak için düğüm noktalarının yer değişimleri cinsinden fonksiyon seçilir.(genelde bir polinomdur, polinomun derecesi değişimleri birim elemanın düğüm sayısına bağlıdır).

4. Elemanla yer değiştirme fonksiyonları seçildikten sonra her bir elemanın özelliklerini ifade eden matris denklemleri oluşturulur. Bunun için dört yaklaşımdan biri kullanılır. Bu yaklaşımlar;

I. Direkt Yaklaşım

II. Varyasyonel Yaklaşım

III. Ölçülmüş Kalıcı Yaklaşım

IV. Enerji Dengesi Yaklaşımı

5. Elemanlara bölünen sistemin özelliklerini toplamak gerekir. Bunu da elemanların matris denklemlerini birleştirerek sistemin davranışını ifade eden matris denklemleri oluşturmakla yapabiliriz. Sistemin matris denklemleri bir elemanın matris denklemleriyle aynı formdadır. Fakat sistemde denklemlerin terim sayısı fazladır.

6. Düğüm noktalarına toplanmış kabul edilen ve sınır gerilmeleri dengeleyen kuvvetler ile düğüm noktalarının yer değiştirmeleri arasında;

$$|P| = |K| \times \{U\}$$

$|P|$: Sütun matris olup dış kuvvetlerin tamamını göstermektedir.

$|K|$: Sistemin toplam katılık (direngenlik) matrisidir.

$\{U\}$: r, θ, z yönündeki düğüm yer değiştirmelerini gösteren sütun matrisidir.

Matris denklemi ile sonlu elemanlar metoduna giriş yapılır. Sonuç olarak bu denklem gösteriyor ki $|K|$ oluşturulan cismin birim yer değiştirmesi için gerekli kuvveti temsil etmektedir. Yani cismin sonlu elemanlar modelini bir denge yayı olarak düşünürsek, $|K|$ bu yayın yay sabiti (direngenlik sabiti) olur. Böylece sonlu elemanlar metodunun esası cismin direngenliği bakımından yapılan analizi olmuştur. Verilen sınır şartları ve dış kuvvetler etkisi altındaki cismin düğümlerinin yer değiştirmesi bulunur. U , cismin gerilme ve yer değiştirmesinden hesaplanır. Verilen sınır şartları ve dış kuvvetler ile cismin düğümlerinin yer değiştirmesi bulunur.

10.4. Eleman Şeklinin Seçilmesi

Eleman şeklinin seçimini verilebilen bir cismin alt bölmelerinin özellikle iç ve dış sınır şartlarının şeklini belirlerken şekil geometrisine göre seçilecektir. İki boyutlu şekillerde dörtgen ve üçgen elemanlar oluşturmak yerine, eğrisel ve dik açılı elemanlar oluşturmak daha kullanışlıdır. Üç boyutlu cisimlerde ise tetrahedron(üçgen prizma) daha kullanışlıdır. Cismin şekline bağlı olarak bazen bu elemanların karışımından oluşan bir bölme oluşturmakla mümkündür.

10.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Diğer Yöntemlere Göre Avantajları

Neden diğer nümerik metotlara göre, örneğin sonlu farklar yönteminin daha eski ve güvenilir olmasına rağmen, sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmelidir. Sonlu elemanlar yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları:

- Sonlu elemanlar yöntemi ile verilen şekil ne kadar karışık olursa olsun, şekle ve boyutlarına esneklik kazandırmaktadır.
- İlgili olduğu alanlar arttırılabilir.
- Değişik malzeme özellikleri ve geometrisinde farklı güçlükler ortaya çıkmaz.
- Genel katılık maddesiyle ilişkili kuvvet ve yer değiştirmesi bakımından formüle edilmiş neden sonuç ilişkisi problemidir. Bu durum sonlu elemanlar metoduyla problemin çözümünü kolaylaştırır.
- Sınır şartları kolayca tespit edilir.
- Sonlu elemanlar metodunun esnekliği sayesinde çok yönlü karmaşık yapılarda diğer problemlerdeki sonuç ilişkisinden daha etkin olarak kullanılır. Sonuçları diğer analitik veya deneysel metotlarla daha iyi karşılaştırılabilir.

11. ANSYS PAKET PROGRAMI

11.1. Programın Genel Tanıtımı

Mühendislik alanında sonlu elemanlar yöntemiyle çeşitli konularda analiz yapan programdır. Bu konular;

- Yapısal Analiz
- Termal Analiz
- Elektromanyetik Analiz
- Akışkan Analizleridir.

11.2. Programın Genel Kullanımı

Programı çalıştırmak için START menüsünden programlar altında ANSYS adlı menü altından INTERACTIVE seçeneği kullanılır. Aynı menü altında RUN INTERACTIVE NOW seçeneği ise bir önceki yapılan çalışmanın default loading işlemidir. Açılan pencereden ANSYS'in ilk seçimleri yapılır. Bunlar;

Enable ANSYS Paralel Performance: Bu modülü etkin kıldığımız vakit, program çift işlemci çalışır ve komplike problemleri veya hassas mesh'lenmiş parçaların çözüm zamanı azalır.

Drop Test Module: Bu modül etkinleştirilmesi için ANSYS/LS-DYNA tipinde çalışılması gerekmektedir.

Working Directory: Yaptığımız çalışma esnasında save dosyalarının korunması ve çeşitli hata mesajlarının saklanması için Hard Diskteki çalışma klasörüdür. Bu klasöre ayrıca yapılan animasyonlarda default olarak save edilir

Graphics Device Name: Grafikler için görüntü bağdaştırıcı seçimi buradan yapılır. Nodal renklendirmenin üç boyutlu olmasını istiyorsak bu modülü kullanmalıyız. Aşağıda 3-D modu ile aynı sonuçların win 32 değerleri arasındaki farklar gösterilmiştir.

Memory Requested: Programın çalışma esnasında bellekten kullanacağı alanı gösterir. Bu default değerler değiştirilebilir. Değerlerin arttırılması programın

performansında bir değişiklik yapmaz, ancak programda uzun süre çalışılacaksa artırılması nispeten daha randımanlı sonuçlar vermektedir.

11.2.1. ANSYS te Ana Menüler

File: Bu kısımda yeni bir çalışma başlatma, çalışma ismi daha önceden kaydedilmiş dosyaları çağırma, yapılan yeni çalışmayı kaydetme veya programdan çıkış gibi karakteristik dosya işlemleri yapılabilir.

Select: Model üzerinde çalışırken zaman zaman modelin kimi kısımlarının ayrı incelenmesi gerekebilmektedir. Bu genel görünümünden ayrı inceleme işlemleri select alt menüleri ile yapılabilir.

Plot: Modelin nokta, çizgi, alan, elemanların gösteriminin ayarlandığı ve sonuçların ekranda görsel olarak ayarlandığı menüdür.

Plot Controls: Modelin grafik ekranındaki görünüm açısının değişimi, perspektif, görüntü veya istenen şekillerde animasyon görüntüleri alınmasına yarar.

Work Plane: Başlangıçta kullanılan kartezyen koordinat sistemi, bu menü yardımı ile silindirik, küresel, kutupsal sistemlere çevrilebilir. Ayrıca kullanıcıya, opsiyonel olarak kendi çalışma düzlemini yaratma seçenekleri de alt menülerde sunulmuştur.

Parameters: Uygulanacak yüklerin bir fonksiyon halinde verilmesini sağlayan bir alt menüsü vardır.

Menü Controls: Ekranda kullanılan pencerelerin açılıp kapanmasını sağlar.

11.1.2. ANSYS Main Menu

Preferences: Analiz tipini belirterek, programın diğer analiz tipi ile ilgili olan menülerini elimine etmek için kullanılır. Neticede tek amacı görsel kolaylık sağlamaktır.

Preprocessor: Bu alt menüde tüm ön çalışmalar yapılabilir. Malzemenin modellenmesi, sonlu elemanlara ayrılması (meshing), istenen yükün uygulanması,

malzeme özelliklerinin belirtilmesi, birim sisteminin değiştirilmesi, sınır şartlarının uygulanması gibi işlemler bu menüden yapılabilir.

Solution: Alt menüsündeki Current/LS komutu ile çözüm yaptırılır.

General Postprocessor: Analiz sonuçlarının istenen şekilde okunması için kullanılan bölümdür

TimeHist Postpro: Geçmişteki çalışmalarla ilgili bilgileri içerir. Working Directory kısmından sonuç dosyaları okunabilir.

Run Time Starts: Programın çalışıyor haldeki istatistiki bilgilerine ulaşabileceğimiz alt menüdür. İterasyon ayarları, sistem ayarları gibi ayarlar yapılabilir.

11.2.3. ANSYS Output Window

Bu pencerede ANSYS ile ilgili yaptığımız kişisel ayarlar görülebilir. Ayrıca çözüm esnasında programın yaptığı işlemler görülebilir. Kısacası programda yapılan çalışmanın aynısı bu pencerede görülebilir.

12. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

12.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Yapılan deneylerde, değişik şekillerde imal edilmiş plastik matrisli kompozitler ve değişik fiberler ile güçlendirilmiş termoplastik malzemeler kullanıldı. Malzemelerin bir kısmı TAI firmasından yarı mamul olarak temin edildi. Bu malzemeler çeşitli proseslerden geçirilerek mamul olarak deneylerde kullanılmaya hazır hale getirildi. Bir kısım malzeme ise Diyarbakır'da bulunan Temsan Su Türbini ve Generatör fabrikasından mamul olarak temin edilerek deneylerde kullanıldı. Kullanılan kompozit malzemeler Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Deneylerde Kullanılan Kompozit Malzemeler

Malzeme	Evsafı	Kalınlık	Temin yeri	Durumu
CYCOM7701-B	Epoksi/E-glass fiber	0,30 mm	TAI	Y.Mamul
CYCOM7714-A	Epoksi/Kevlar 49	0,30 mm	TAI	Y.Mamul
CYCOM7714-B	Epoksi/Kevlar 49	1 mm	TAI	Y.Mamul
ISOVAL11	Epoksi/E-glass fiber	1 mm	TEMSAN	Mamul
POLİETİLEN	İnce kevlar lif takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	Kalın kevlar lif takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	Cam elyaf lif takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	Sıralı cam elyaf lif takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	kırpılmış cam elyaf lif takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	İnce dokuma cam elyaf takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	Kalın dokuma cam elyaf takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	Kalın dokuma kevlar elyaf takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul
POLİETİLEN	İnce dokuma kevlar elyaf takviyeli	3 mm	ÜRETİLDİ	Y.Mamul

Kompozitlerin ülkemizde üretimi ve üretim yöntemi henüz bilimsel araştırma ve çalışma konusu olduğundan deneylerdeki sonuçların daha iyi değerlendirilebilmesi için deneylerde kullanılan kompozit malzemeler yukarıda bahsedildiği üzere TAI'den, endüstride birçok alanda kullanılan, genelde toz yada granül halinde bulunan polietilen malzemesinden imal edildi ve Diyarbakır Temsan Su Türbini ve Generatör fabrikasından temin edildi. Ancak TAI firmasından gelen malzemeler ile polietilen malzemesi yarı mamul olduğundan proses özelliklerine göre mamul haline getirildi.

CYCOM 7714 ve CYCOM 7701 epoksi reçineleri uçaklar için yapısal laminatlar ve peteğimsi çekirdek sandviç panellerin kullanımı için dizayn edilmiş erimeye karşı dirençli, kendini yok edebilen reçinelerdir. Otoklav veya baskı işlemi için formüle edilmiştir. Çözünme işlemi yoluyla bütün uygun yapılara emdirilebilir bununla birlikte en çok aramid ve cam fiberlerin üstüne uygulanır.

ISOVAL11, epoksi sisteminin sıcaklığa dayanıklı versiyonu ile emdirilmiş cam bezden meydana gelir. Tabakalar, mükemmel termik ve kimyasal dayanmanın yanında yükseltilmiş sıcaklıklarda mekanik güç ortaya koyar. ISOVAL11 yüksek kalitedeki inşaat malzemelerinde kullanılabildiği gibi çeşitli makine ve donanımlarda elektrik ve termik izolasyon malzemesi olarak ta, özellikle bu alanlarda yüksek mekanik gereksinimleri ile birleştirilmiş yüksek işletme sıcaklıklarında da kullanılabilir. Yüksek sıcaklıkta çok iyi burulma ve basma kuvvetini ayrıca geleneksel polyamid ile kaplanılabilen alanlarda uygulamayı olanaklı kılar. Tabaka kuvvetinden ve sertliğinden ve ayrıca kullanılan yüksek içerikli cam ekipmanlarından dolayı yüksek derecede aşınmayla karşı karşıya gelebilir. Bundan dolayı sadece elmas karbür filtreli ekipmanların ve yüksek hızdaki makinelerin kullanılması önerilir.

Polietilen, etilen gazının polimerizasyonu sonucunda elde edilen C_2H_4 formülüyle gösterilen bir polimerdir. Polietilen üretim metoduna göre iki sınıfa ayrılır; Yüksek Basınç polietileni (düşük yoğunluk polietileni) ve alçak basınç polietileni (yüksek Yoğunluk polietileni).

Polietilenin, darbe, kimyasal ve gerilme çatlamlarına karşı mukavemeti çok yüksektir. Ayrıca, elektrik özellikleri çok iyidir. İletkenliğin az oluşu, di elektrik direncinin yüksek olması polietilenin izolasyon işlerinde başarı ile kullanılmasını sağlar. Film olarak ambalaj sanayinde, çeşitli malzemelerin saklanması, kırılmaması, su almaması ve korunması amacıyla tarım alanında seralar için örtü ve dış etkenlere karşı tarımsal ürünlerin korunması için kullanılmaktadır.

Tablo 7. Deneyde Kullanılan Düşük Ve Yüksek Yoğunluklu Polietilenin Bazı Özellikleri

Özellik	Düşük Yoğunluklu Polietilen	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
Max. Gerilme (N/m ²)	15,2	27.6
Kopma Uzaması(%)	620	500
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	98	----
Ergime Sıcaklığı (°C)	108	135

12.2. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin İmalatı

CYCOM7701-B

1 adet 21x29.7 cm ebadındaki malzeme 1/2 oranında katlandı. 2 mm kalınlığındaki malzeme önce şekil 6'da görülen 10 ton pres altında 1 dakika bekletildi. Buradan sıcaklığı 110 °C de şekil 7'de görülen 5 ton sıcak pres altında 10 dakika bekletilerek 15x130 mm ebadında 0,30 mm kalınlığında malzeme elde edildi.

CYCOM7714-A

1 adet 21x29.7 cm ebadındaki malzeme 1/2 oranında katlandı. 2 mm kalınlığındaki malzeme önce şekil 6'da görülen 10 ton pres altında 1 dakika bekletildi. Buradan sıcaklığı 110 °C de şekil 7'de görülen 5 ton sıcak pres altında 10 dakika bekletilerek. 15x130 mm ebadında 0,30 mm kalınlığında malzeme elde edildi.

CYCOM7714-B

1 adet 21x29.7 cm ebadındaki malzeme 1/2 oranında katlandı. 3,50 mm kalınlığındaki malzeme önce şekil 6'da görülen 10 ton pres altında 1 dakika bekletildi. Buradan sıcaklığı 110 °C de şekil 7'de görülen 5 ton sıcak pres altında 10 dakika bekletilerek 15x130 mm ebadında 1 mm kalınlığında malzeme elde edildi.

Polietilen malzemesinden imal edilenler

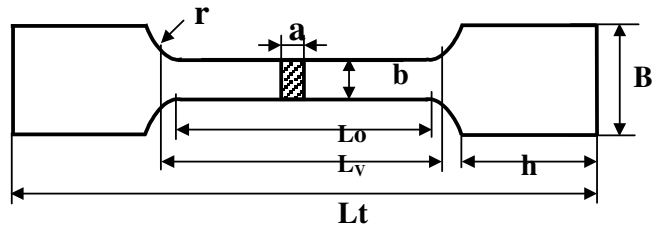
İlk önce, alt tabla yüzeyine ham maddenin yapışmaması için şekil 9'da görüldüğü gibi A4 boyutlarında bir asetat konuldu. Daha sonra, asetat üzerine kalınlığı 1mm olan kalıp yerleştirildi. Bu kalıp içerisine granül haldeki polietilen malzemesi konularak düzgün bir sıra halinde boşluksuz olarak dizildi. Bunun üstüne ikinci bir asetat konuldu ve tablalar 160°C ye kadar ısıtıldı. Alt tabla, krik o vasıtası ile malzemenin sıkıştırılması için yukarı doğru kaldırılarak böylece malzemenin ergimesi sağlandı. Soğumadan sonra malzeme kalıp içerisinden çıkarılarak kenarlarındaki düzgünsüzlükler giderilip düz bir plaka haline getirildi.

Değişik mukavemet değerlerine sahip numuneler elde edebilmek için daha önce dökülmüş düz plakalardan ikisi arasına değişik kalınlık, ve belli bir sıklık içerisinde takviye malzemesi konuldu. Daha sonra bunlar da diğer düz plakalar gibi ısıtılıp sıkıştırıldıktan sonra soğumaya bırakıldı ve bu üçünün birleşiminden şekil 9'da

görüldüğü gibi tek bir plaka elde edildi. Bu işlem 10 adet değişik numune için tekrarlandı. Kullanılan numuneler aşağıda sıralanmıştır.

- 1- İnce kevlar lif takviyeli kompozit malzeme (No:1)
- 2- Kalın kevlar lif takviyeli kompozit malzeme (No:2)
- 3- Cam elyaf lif takviyeli kompozit malzeme (No:3)
- 4- Sıralı cam elyaf lif takviyeli kompozit malzeme (No:8)
- 5- Kırpılmış cam elyaf takviyeli kompozit malzeme (No:9)
- 6- İnce dokuma cam elyaf takviyeli kompozit malzeme (No:10)
- 7- Kalın dokuma cam elyaf takviyeli kompozit malzeme (No:11)
- 8- Kalın dokuma kevlar elyaf takviyeli kompozit malzeme (No:12)
- 9- İnce dokuma kevlar elyaf takviyeli kompozit malzeme (No:13)
- 10- Takviyesiz termoplastik kompozit malzeme (No:14)

Dökülen bu değişik takviyeli malzemelerden 14x2.5 cm boyutlarında parçalar kesilip hazırlandı (şekil 5). Her bir parça, çekme cihazında çekmeye tabi tutularak uygulanan kuvvet ve uzama miktarları dijital olarak okundu. Elde edilen bu değerler tablo haline getirilip grafiklere aktarıldı.



Şekil 5. Çekmeye Tabi Tutulan Numunelerin Örneği



Şekil 6. Kompozit Malzemeleri Üretmek İçin Kullanılan Soğuk Pres.

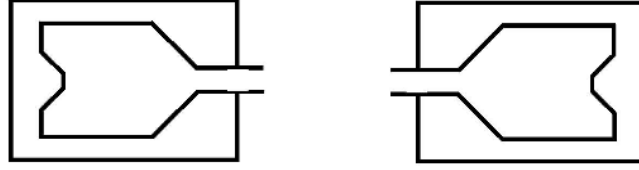
İmal edilen tüm malzemeler sıcak preslemeden alındıktan sonra buzdolabında 20 dakika bekletilmek suretiyle hızlı soğuması sağlanmıştır. Malzemelerin fırınlama süreleri ve sıcaklıkları TAI firmasından alınmıştır. Soğuk pres tezgahı FANİGUER marka olup maksimum 200 ton'a kadar yükleme yapılabilmektedir.



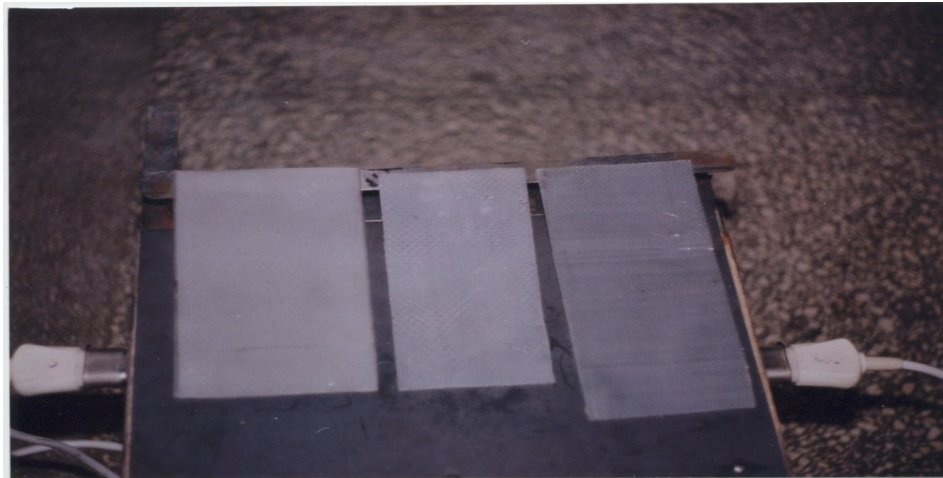
Şekil 7. Kompozit Malzemeleri Üretmek İçin Kullanılan Sıcak Pres.

Sıcak pres tezgahı, şekil 8'de görüldüğü gibi içlerinden çubuk şeklinde dirençler geçirilmiş üst üste gelecek yüzeyleri taşlanmış 40x40x2.8 cm. ebatlarında iki adet tabladan ibarettir. Alt ve üst tablalarında 2000 wattlık toplam 4000 watt rezistans

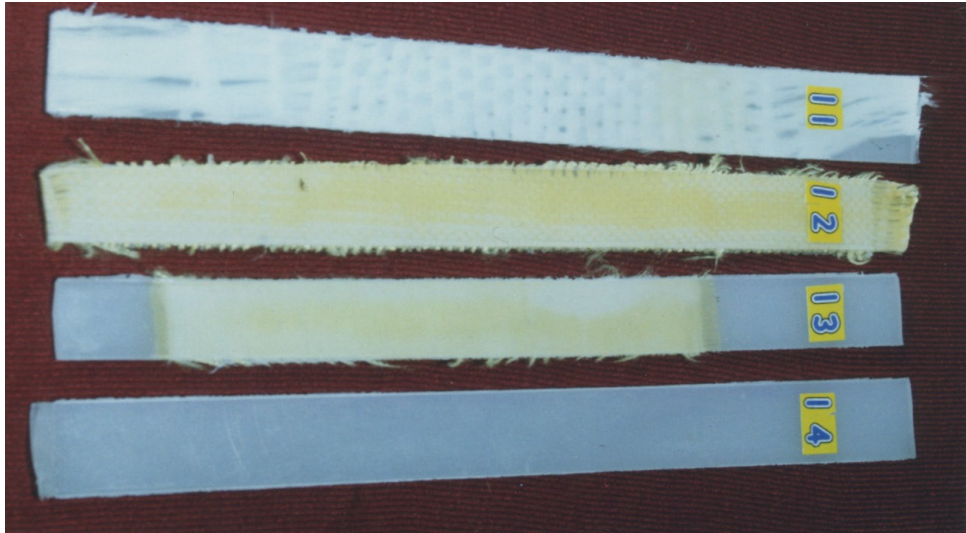
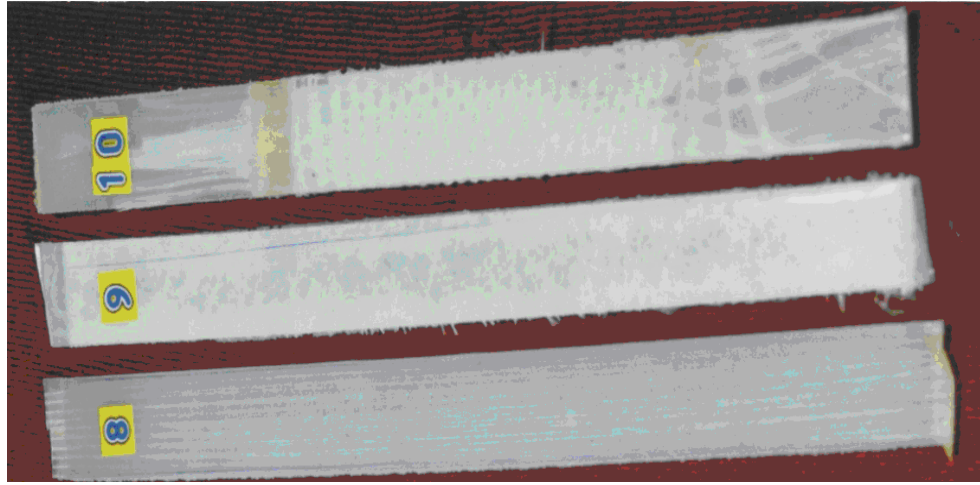
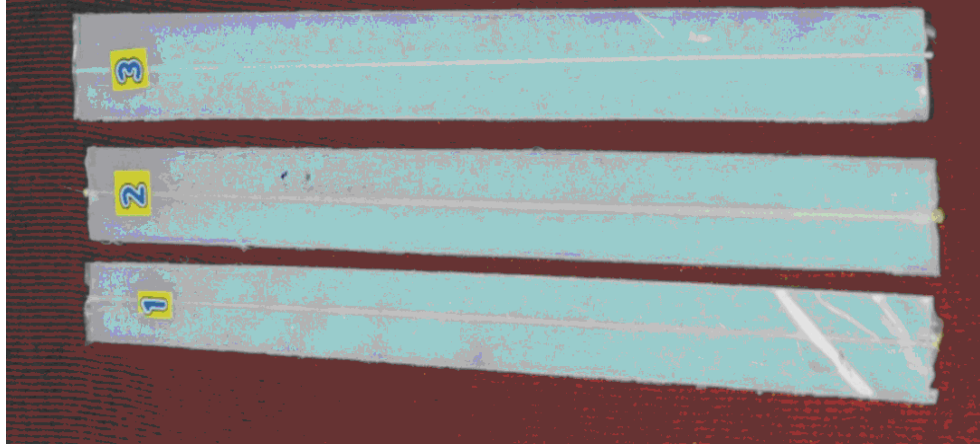
yerleştirilmiştir. Üst tabla sabit alt tabla hareketlidir. Alt tabla hareketini 5 tonluk krikodan almaktadır. Sıcaklık kontrolü 0°C ile 300°C de çalışan termostatla yapılmaktadır.



Şekil 8. Alt ve Üst Tabla İle Bağlanmış İki Ayrı Direnç



Şekil 9. Granül Haldeki Polietilen Malzemesinin Sıcak Pres Üzerine Serilmesi



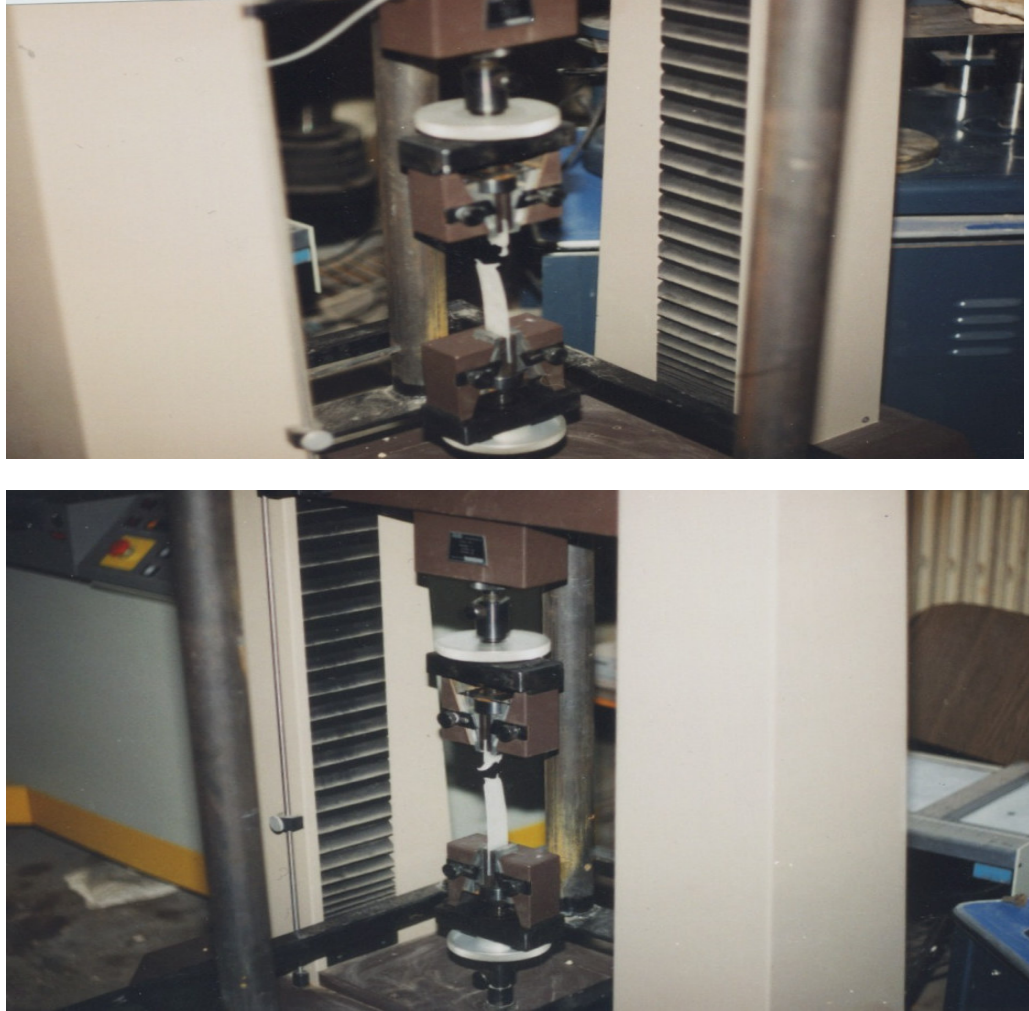
Şekil 10. Polietilen Malzemesinden Elde Edilen Numuneler

13. DENEYLERİN YAPILIŞI

DeneYler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuarında bulunan UTES marka üniversal çekme test cihazında maksimum çekme hızı 2 mm/dak.'lık sabit hız alınarak gerçekleştirilmiştir.

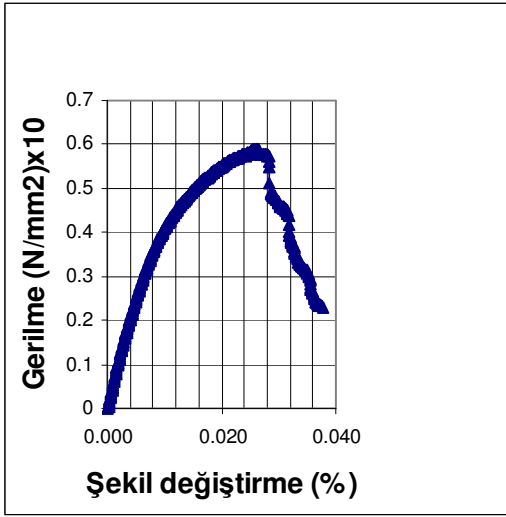
Çekme cihazında deneyler başlatılmadan önce cihaza bağlı olan ve cihazdan aldığı deney datalarına göre istenilen grafik bilgilerini veren programa; numunelerin kalınlığı, genişliği ve ilk boyu gibi geometrik ölçüleri girilmiştir.

DeneYler başlatıldıktan sonra kopma gerçekleşinceye kadar tüm datalar bilgisayar tarafından eş zamanlı olarak istenilen grafik bilgilerine dönüştürülerek aşağıda gösterilmiştir.

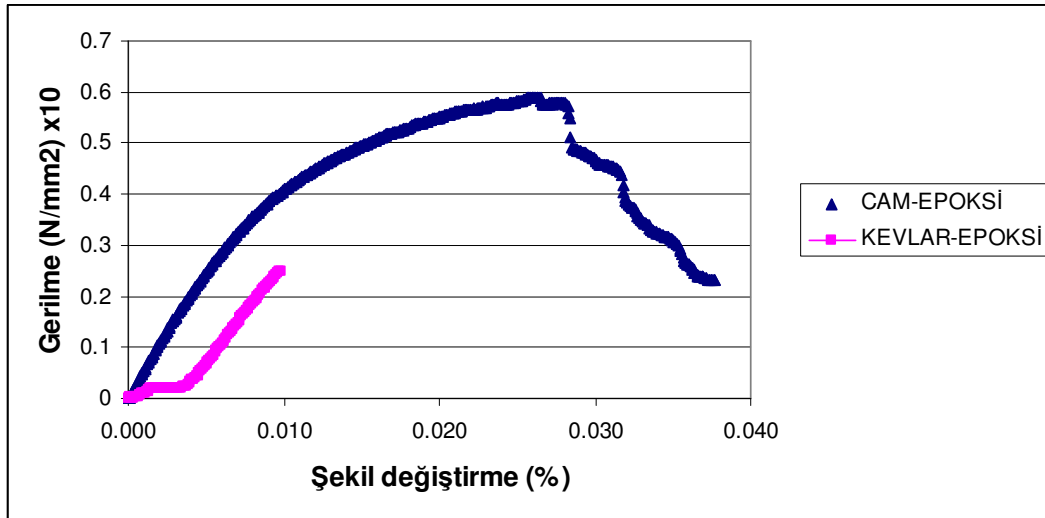
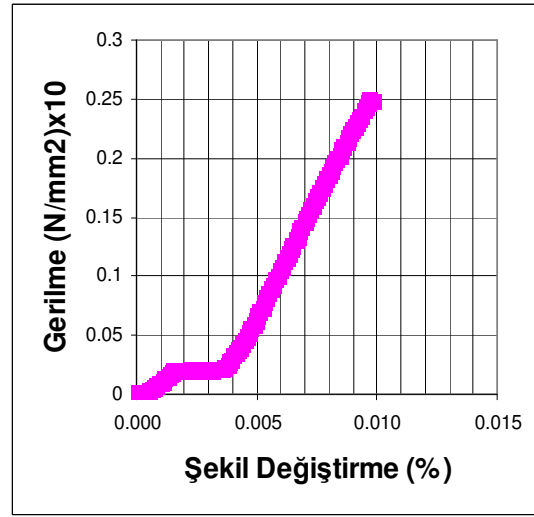


Şekil 11. Kompozit Numunelerinin Çekme Deneylerinin Yapılması

CAM-EPOKSİ

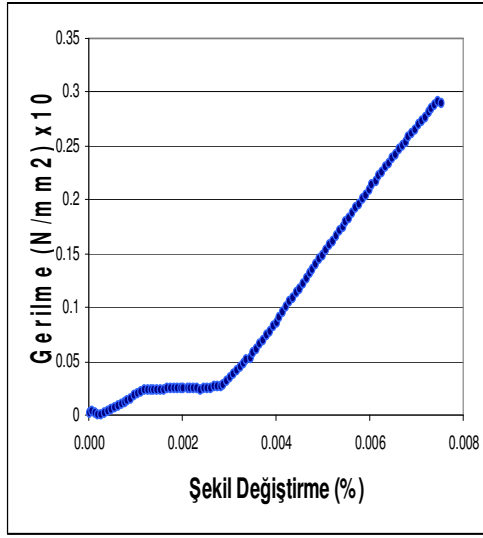


KEVLAR-EPOKSİ

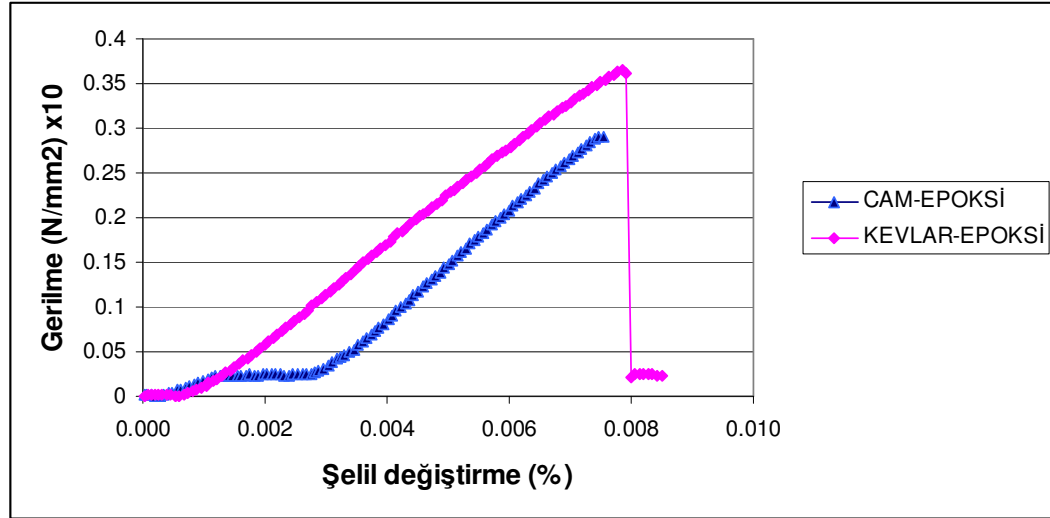
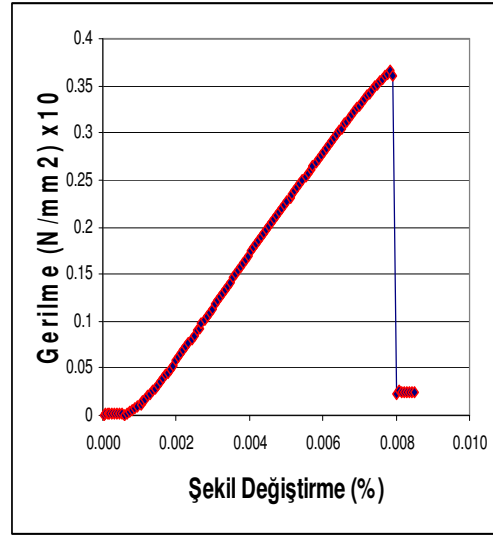


Şekil 12. Kalınlığı 0.30 mm Olan Cam-Epoksi Ve Kevlar-Epoksi Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

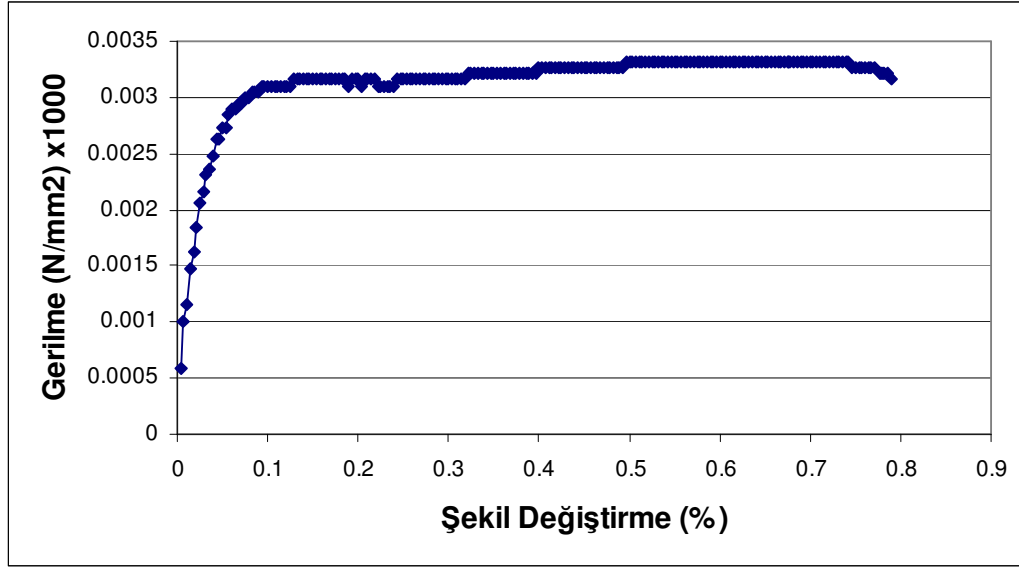
CAM-EPOKSİ



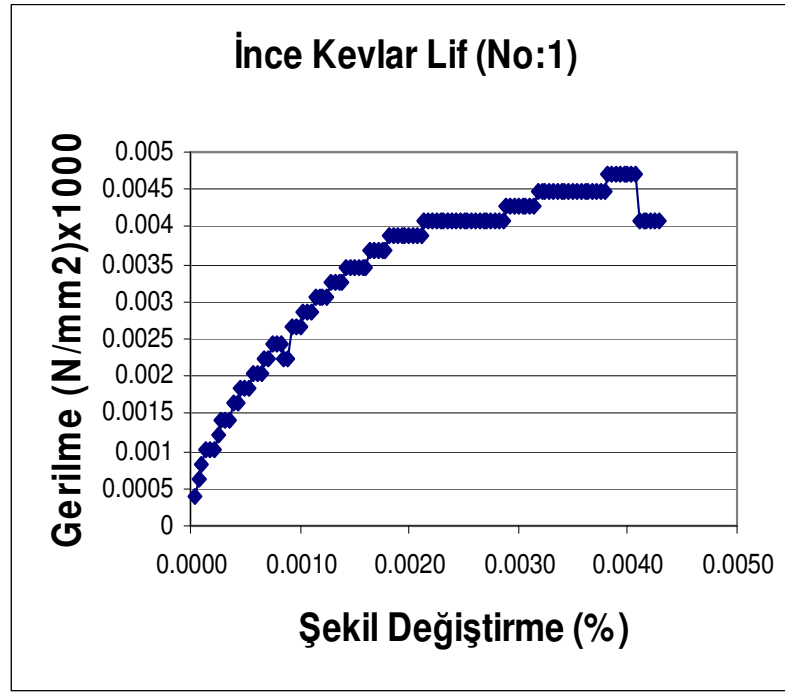
KEVLAR-EPOKSİ



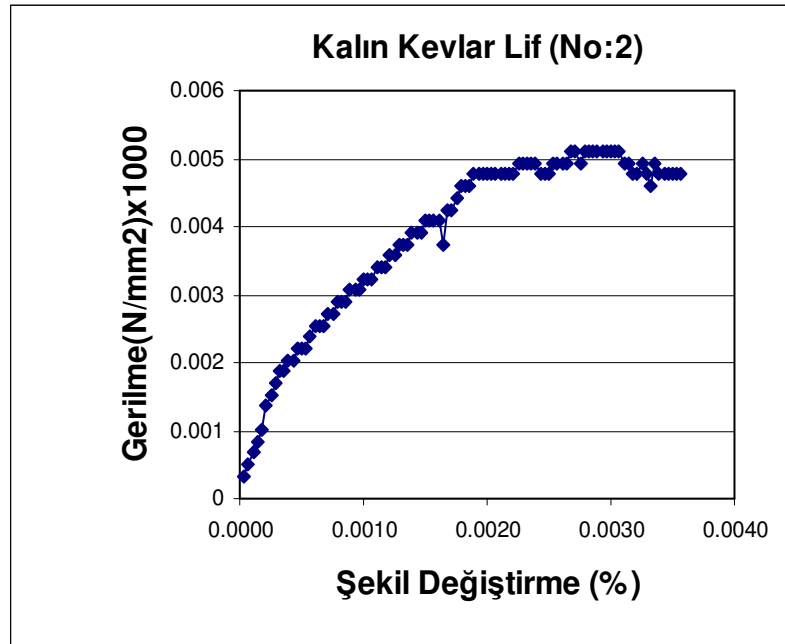
Şekil 13. Kalınlığı 1 mm Olan Kevlar-Epoksi ve Epoksi-Cam Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği



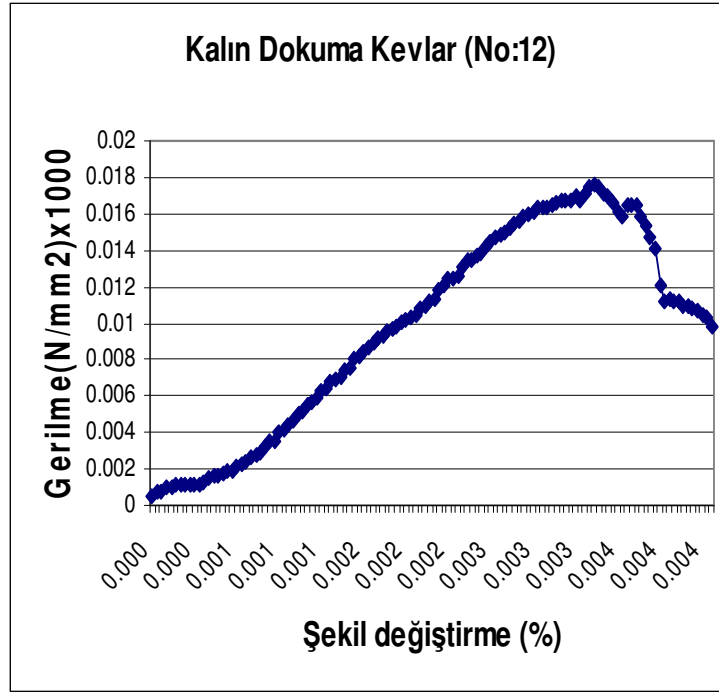
Şekil 14. Takviyesiz Numunenin Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği



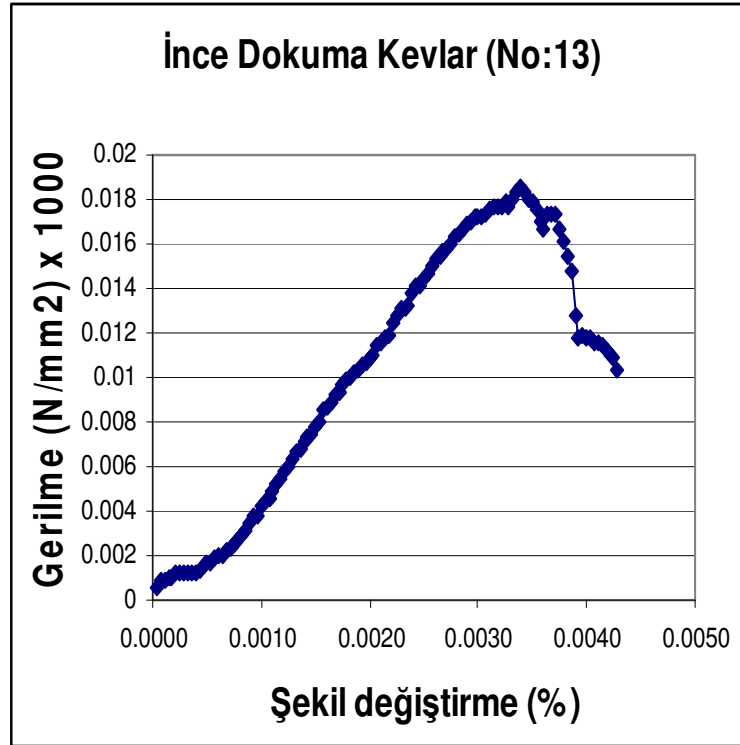
Şekil 15. İnce Kevlar Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği



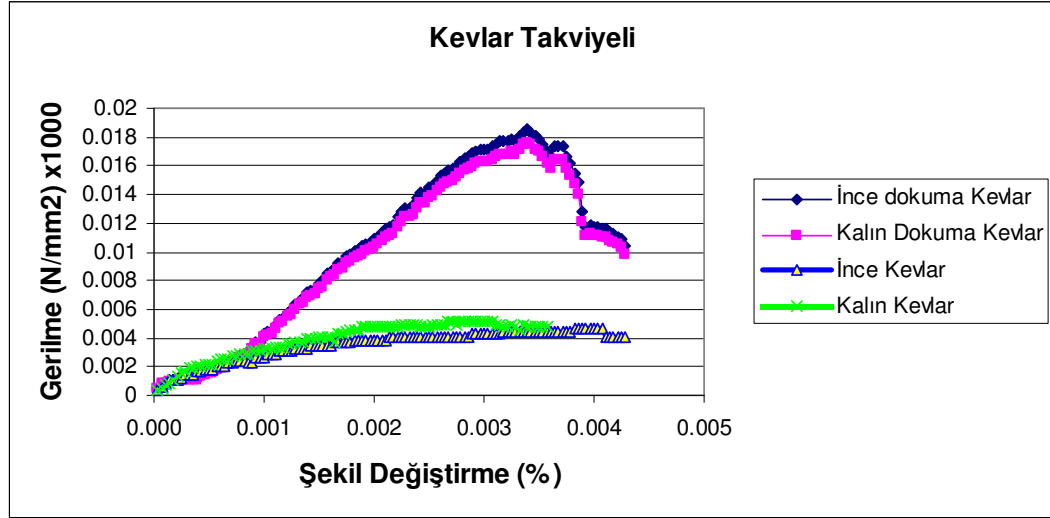
Şekil 16. Kalın Kevlar Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği



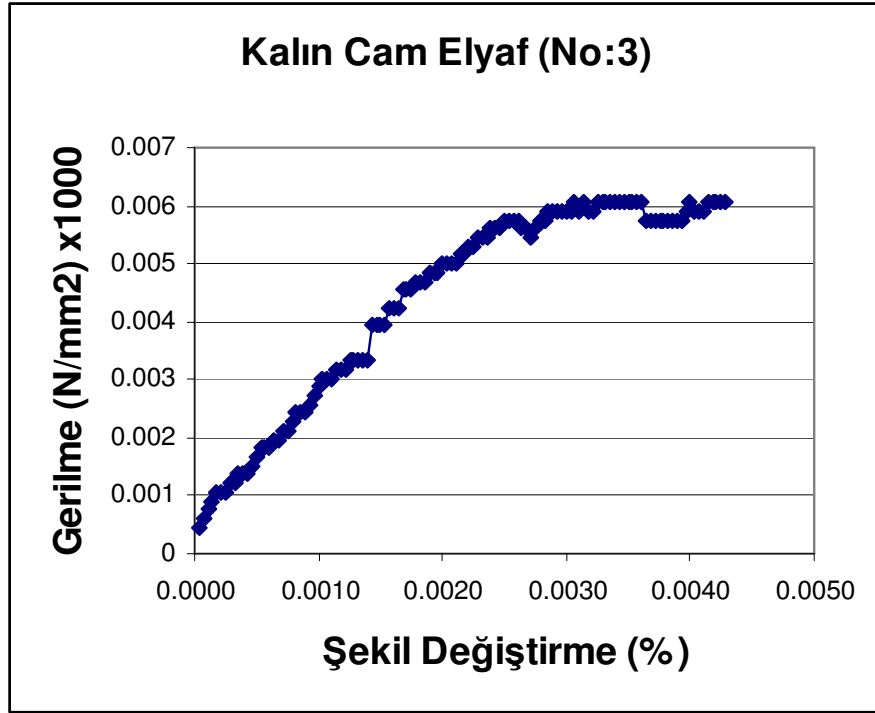
Şekil 17. Kalın Dokuma Kevlar Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği



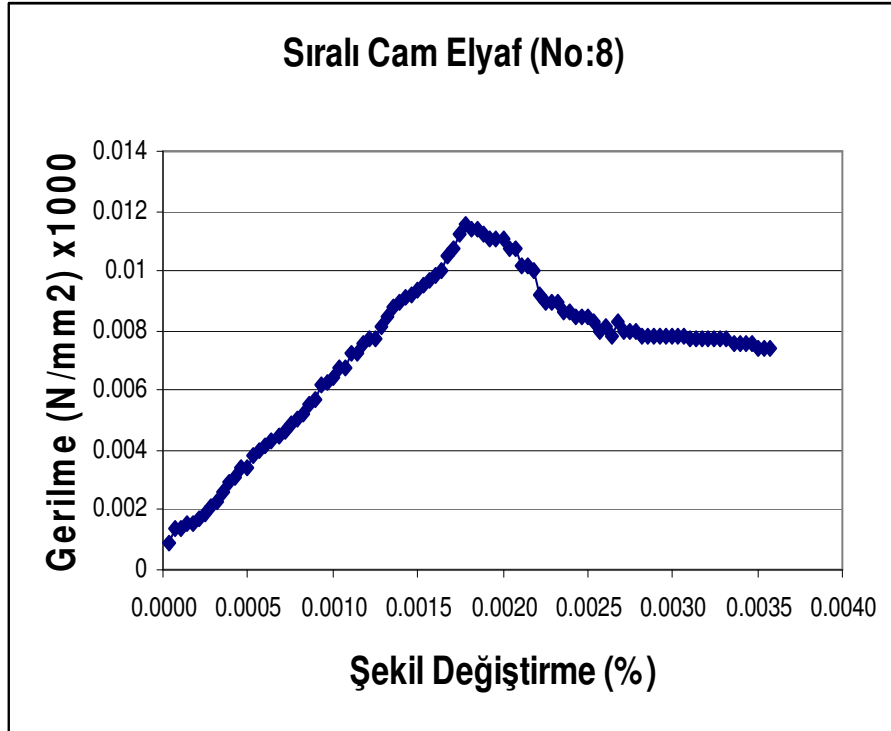
Şekil 18 İnce Dokuma Kevlar Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği



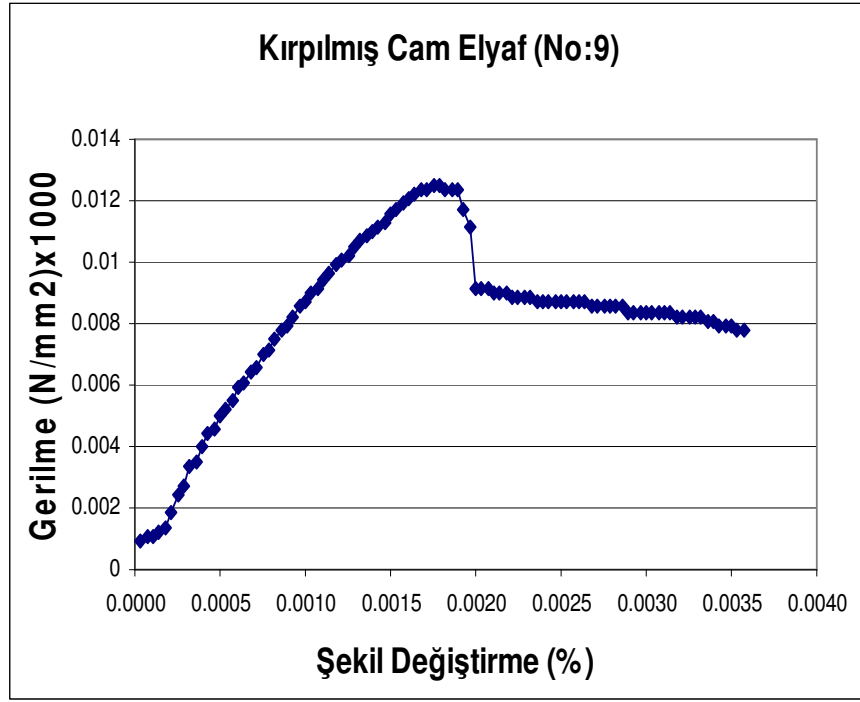
Şekil 19. Kevlar Takviyeli Termoplastik Numunenin Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği



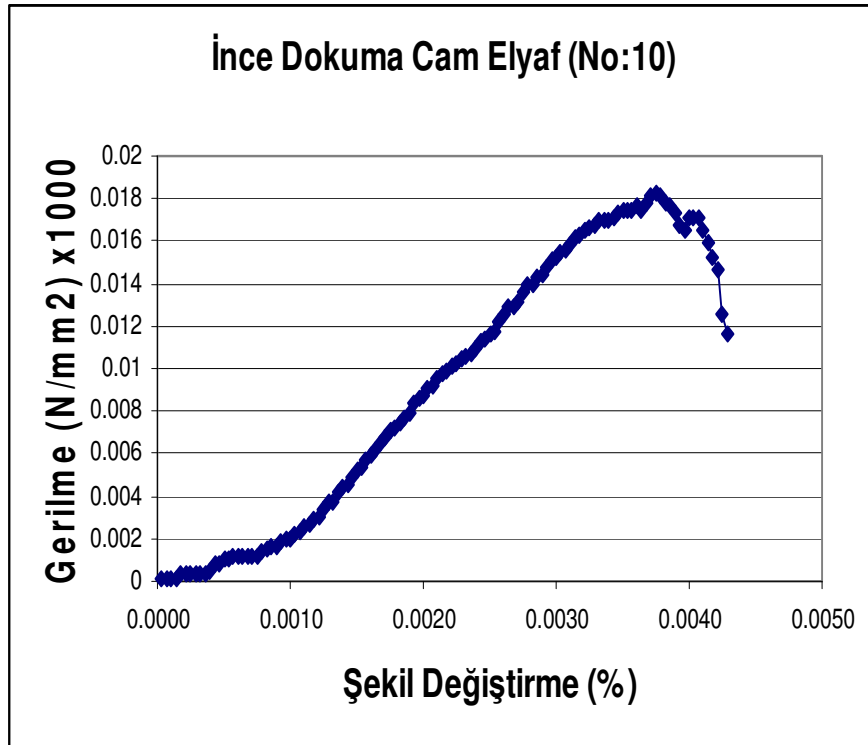
Şekil 20. Kalın Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği



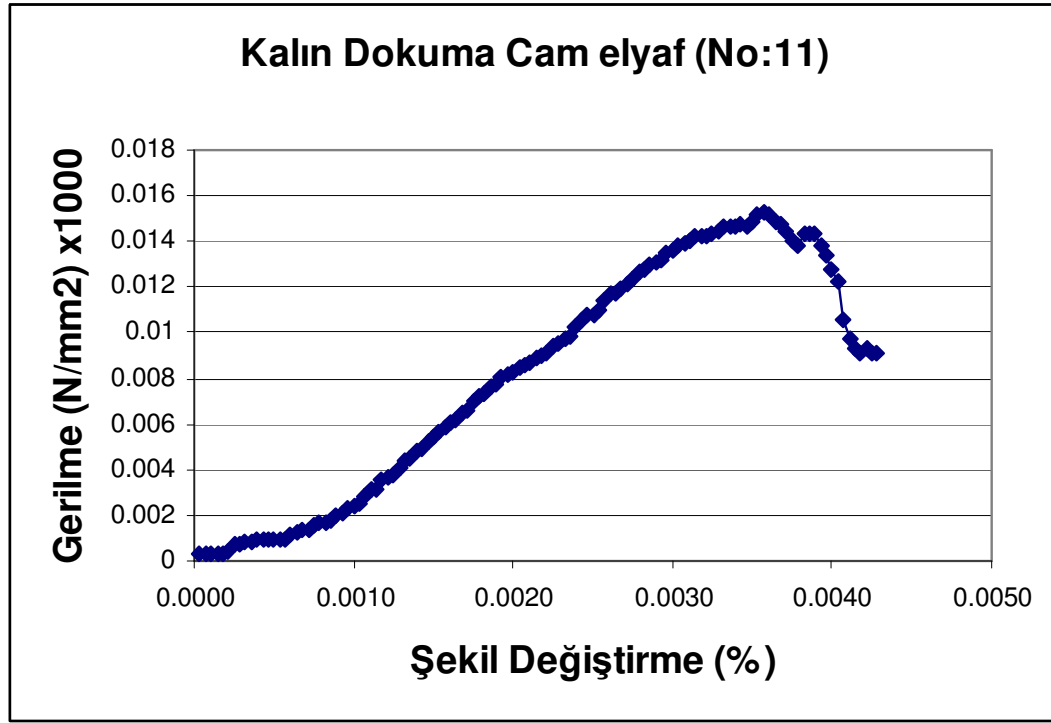
Şekil 21. Sıralı Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği



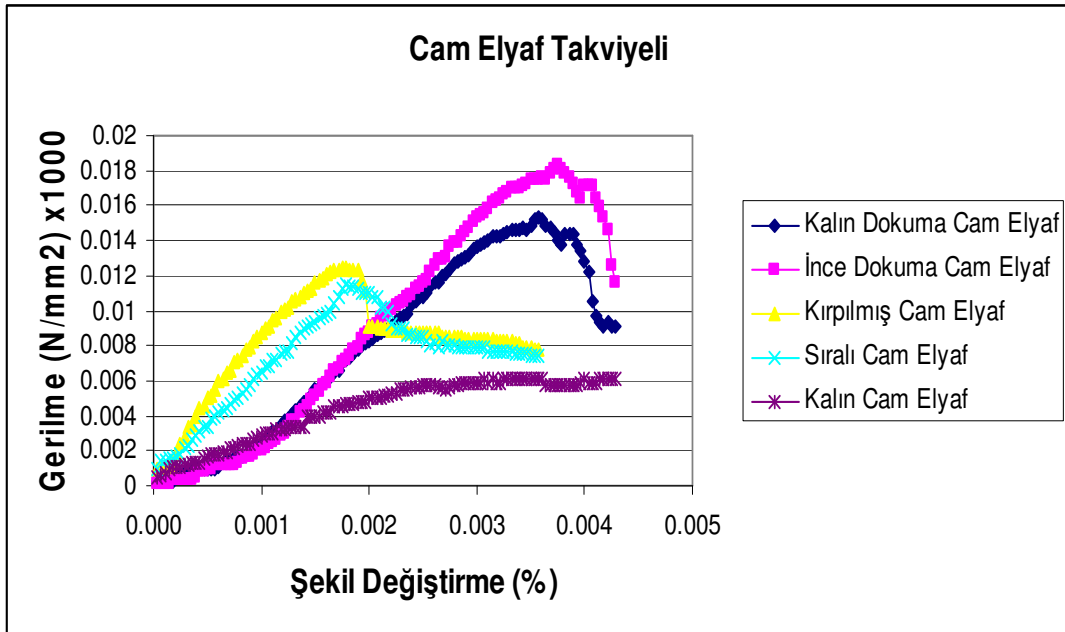
Şekil 22. Kırpılmış Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği



Şekil 23. İnce Dokuma Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

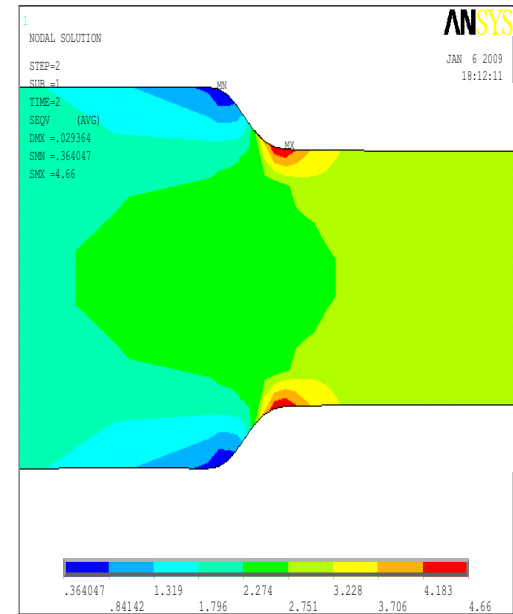
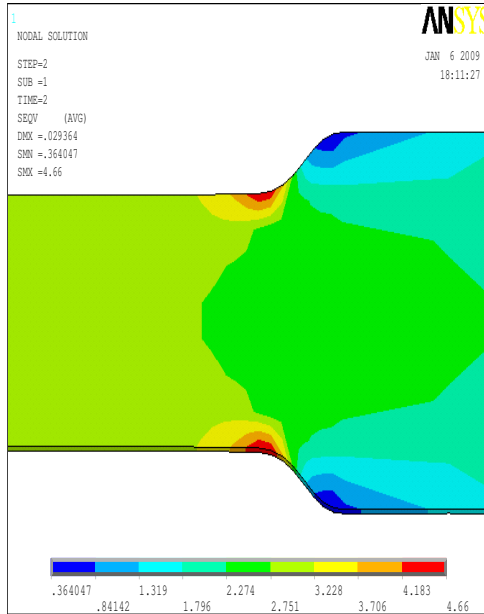
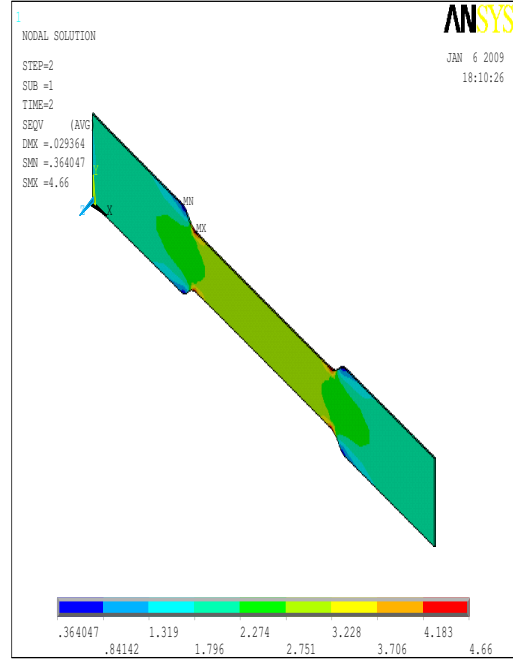
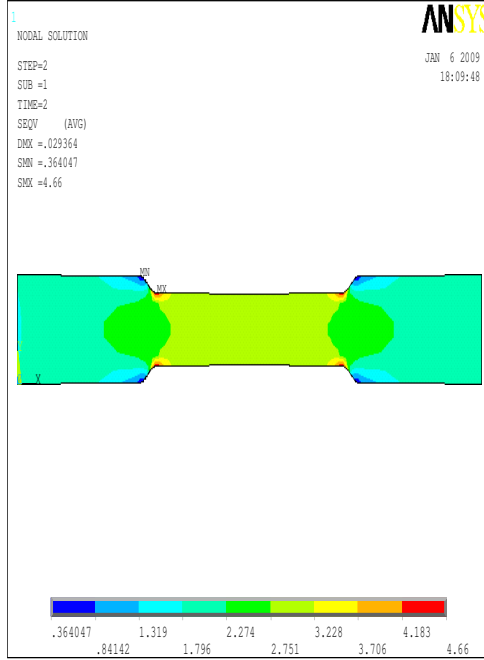


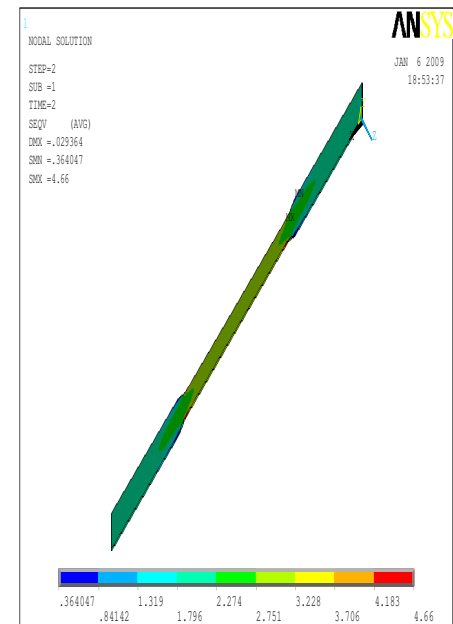
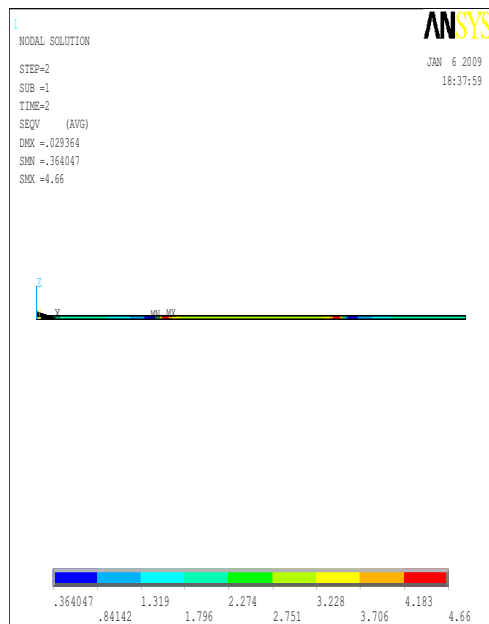
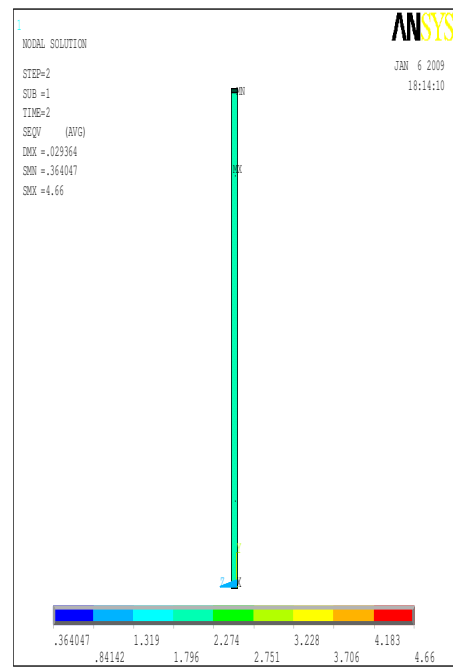
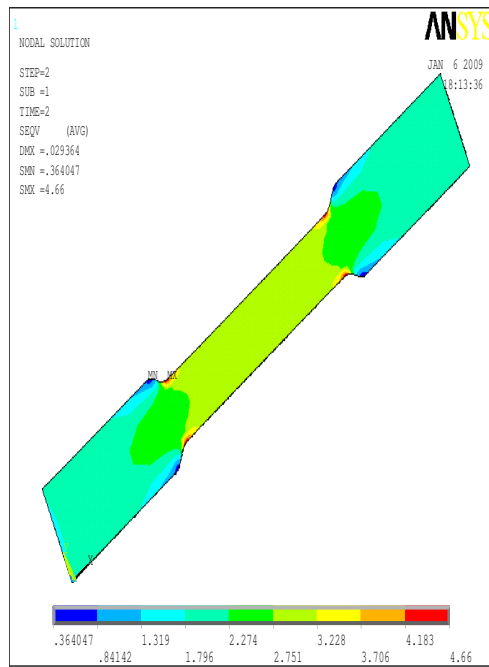
Şekil 24. Kalın Dokuma Cam Elyaf Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

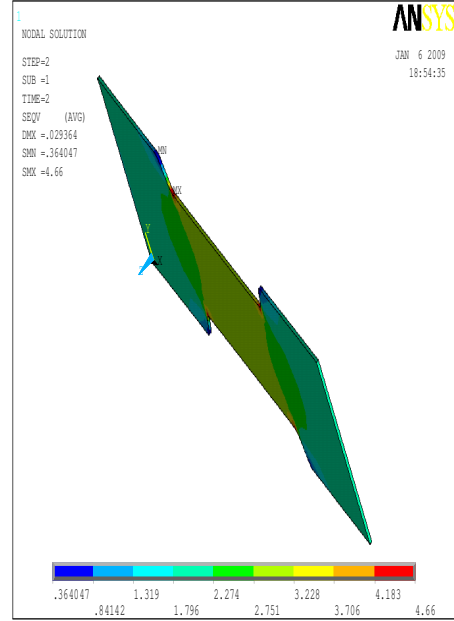
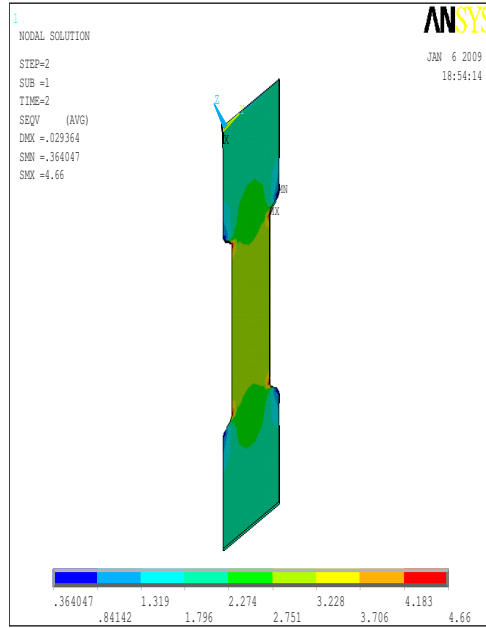


Şekil 25. Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Numunenin Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

13.1. Sonlu Elamanlar Metoduyla Oluşturulan Şekiller

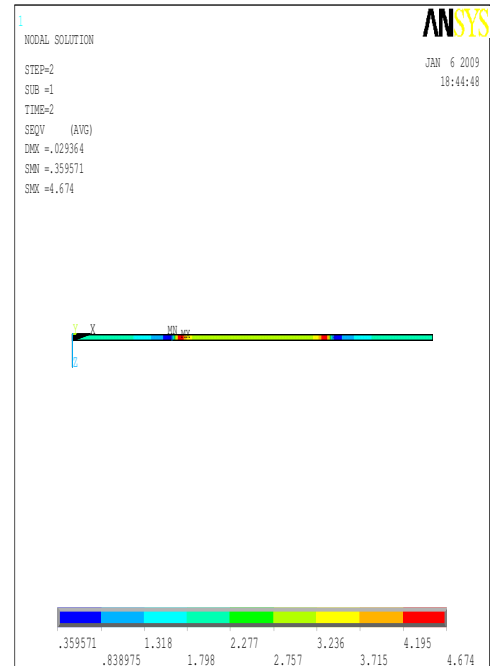
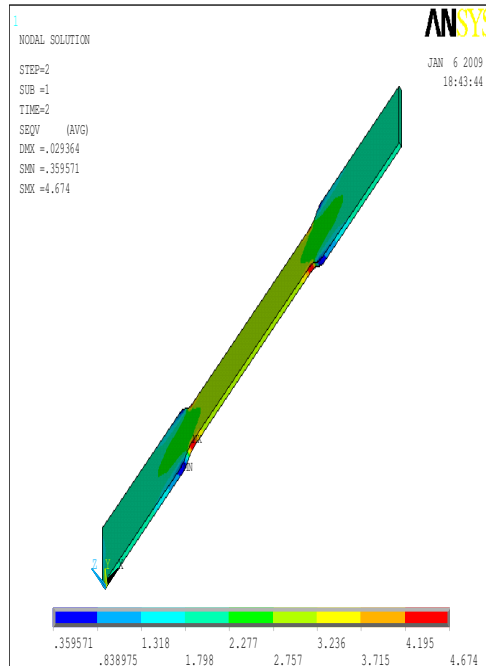
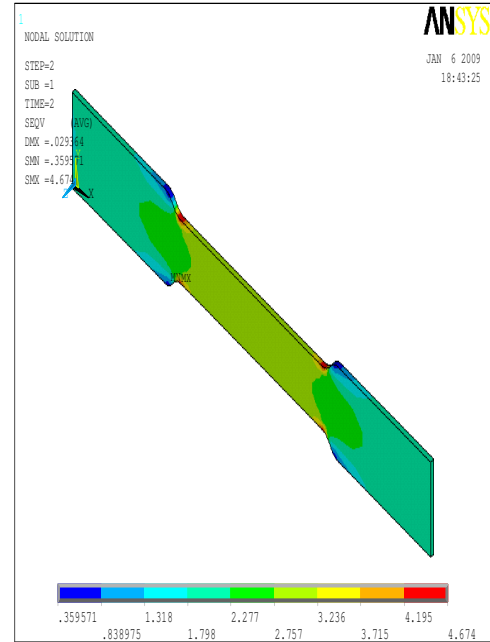
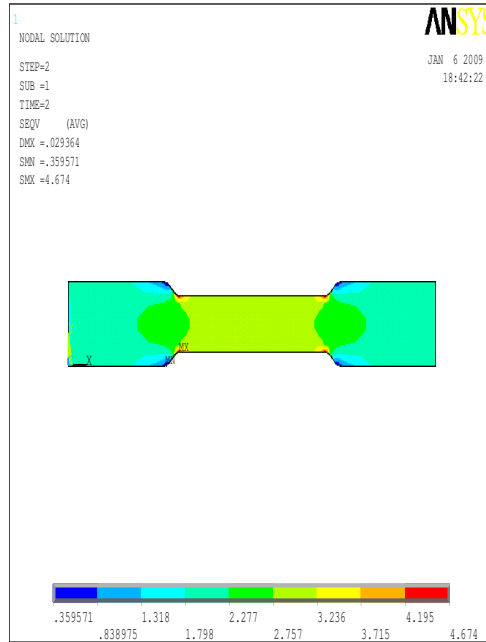


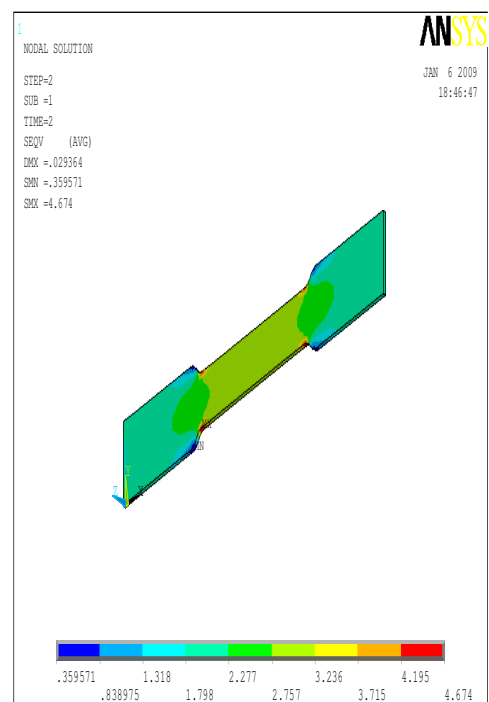
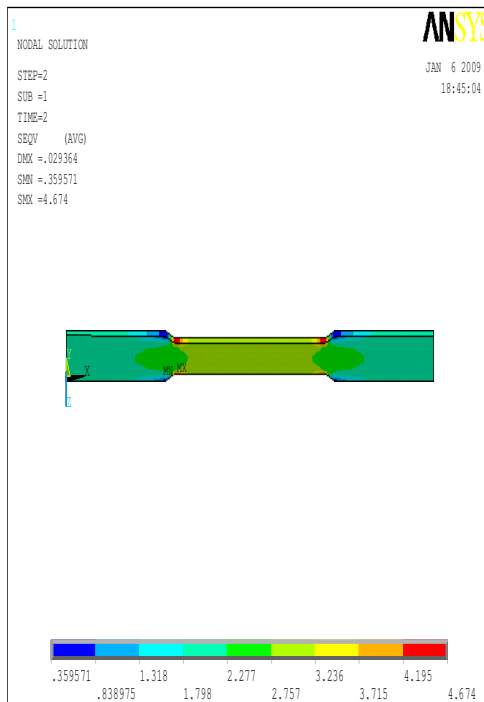
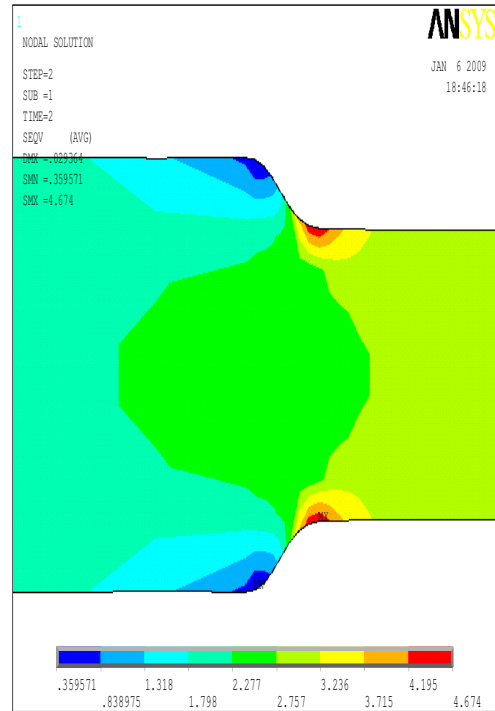
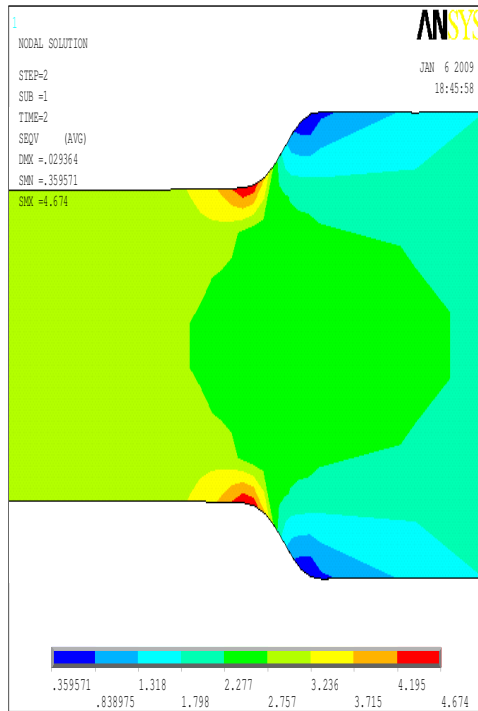


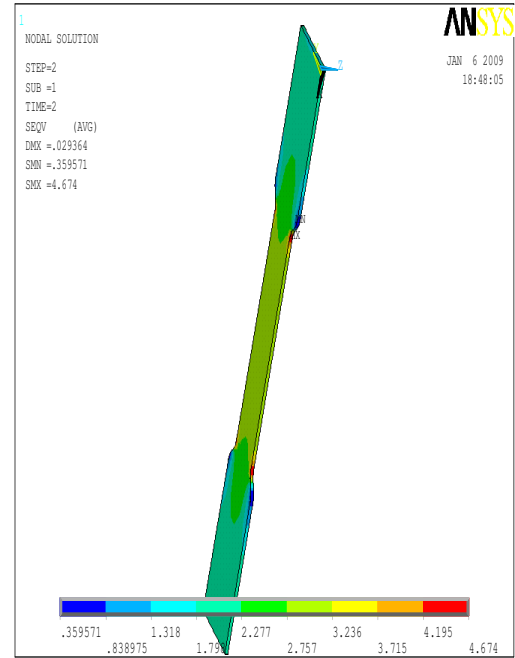
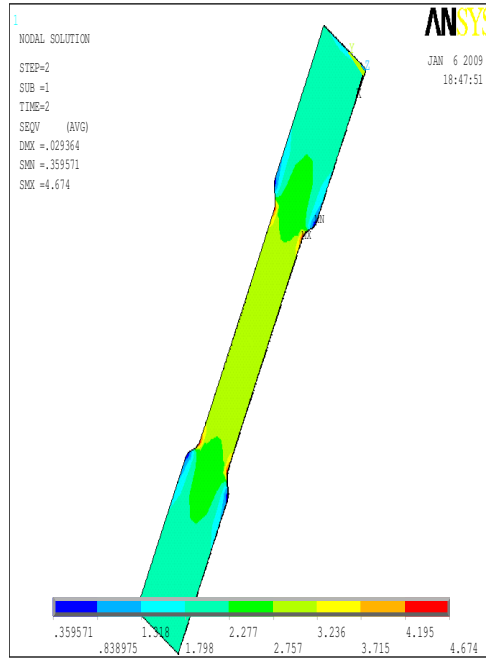
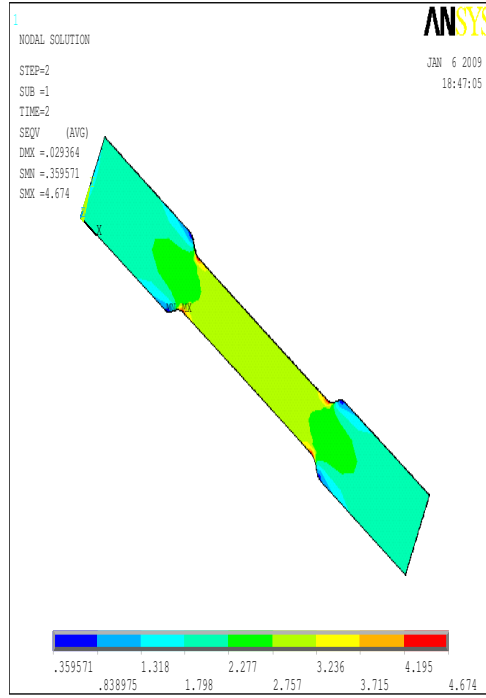


Şekil 26. Kalınlığı 0.30 mm Olan Cam – Epoksi ve Kevlar-Epoksi Şekilleri

13.2. Kalınlığı 1 mm olan cam-epoksi ve kevlar-epoksi

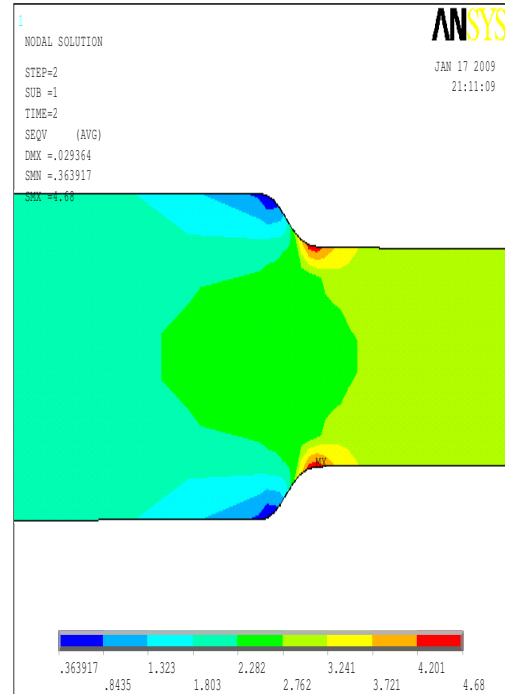
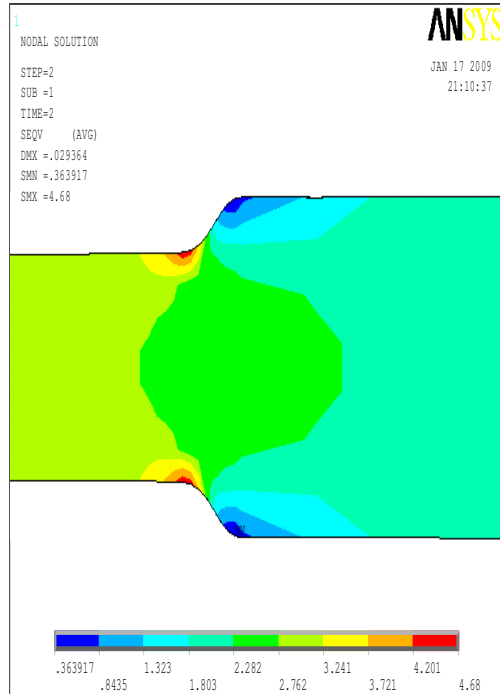
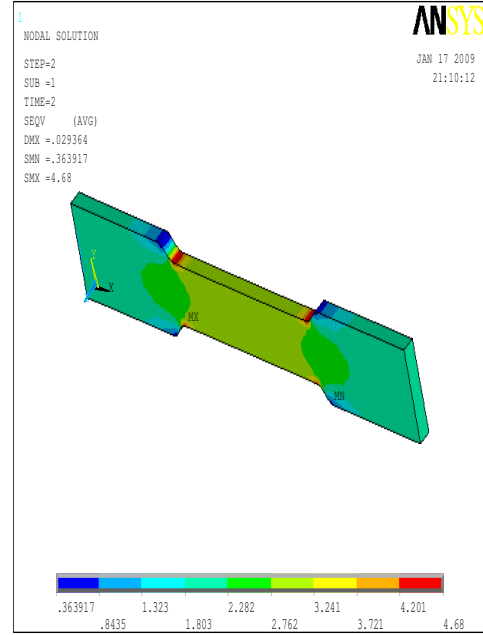
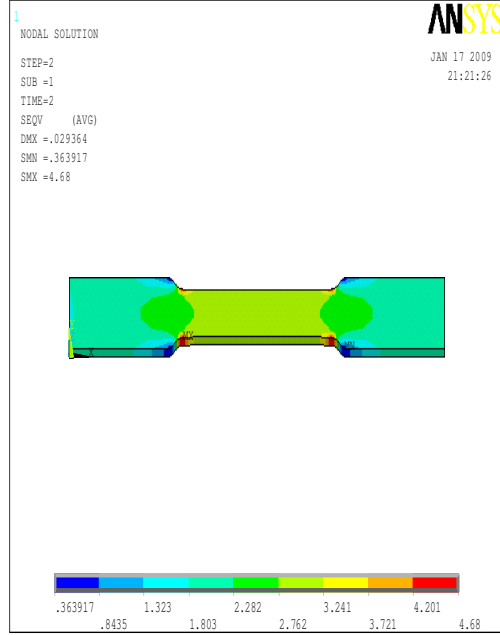


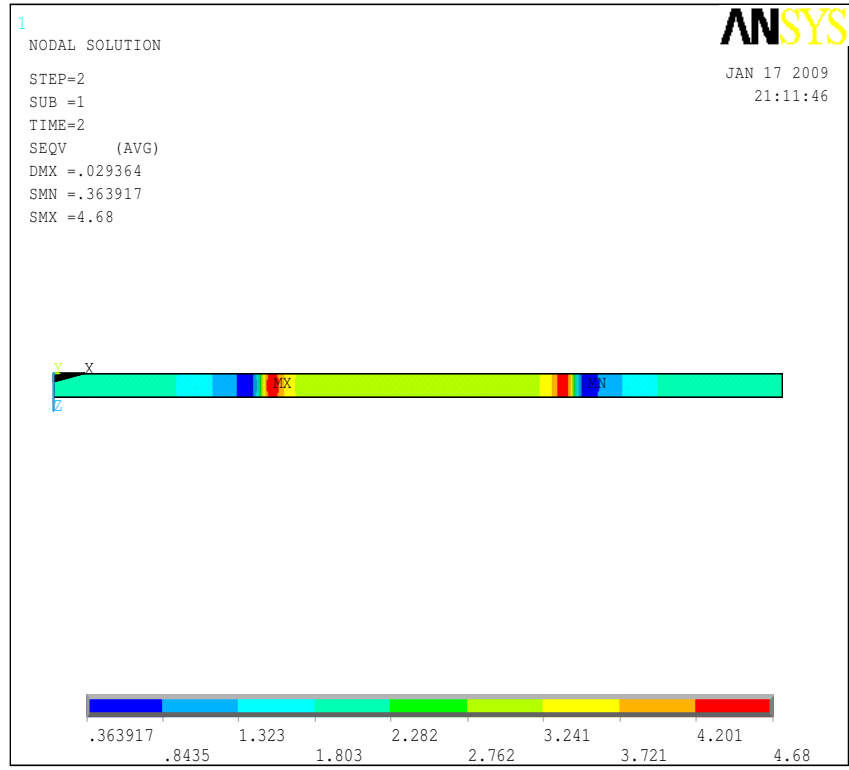




Şekil 27. Kalınlığı 1 mm Olan Cam-Epoksi ve Kevlar-Epoksi Şekilleri

13.3. Kalınlığı 3 mm Olan Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemeler





Şekil 28. Kalınlığı 3 mm Olan Termoplastik Matrisli Malzeme Şekilleri

14. GENEL SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu araştırmada cam-epoksi ve kevlar-epoksi kompozit malzemelerinin ve termoplastik matrisle güçlendirilen 10 ayrı numuneye ait deneysel çalışmaları yapıldı ve kompozit malzemelerin gerilme durumunun tespiti yanında mekanik özelliklere etkisinin deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak araştırıldı. Çalışmaların sayısal kısmı analitik ve nümerik olmak üzere iki bölümde incelendi. Analitik kısımda mekanik özelliklerin tespiti için kompozit malzeme olarak kevlar-epoksi, cam-epoksi ve termoplastik matriksle güçlendirilen kompozit malzemelerden imal edilen deney numunelerinin çekmesi incelendi ve bu malzemeler arasındaki mekanik özellikler tespit edildi. Deneyler sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25'te gösterildi. Nümerik kısımda ise geometrisi ve özellikleri belirlenmiş olan kompozit malzemelerin bir sonlu elemanlar modeli ANSYS programında katı modelleri oluşturularak şekil 26, şekil 27 ve şekil 28'de gösterildi.

Termoplastik matriksle güçlendirilen numunelere ait mekanik özellikler deneysel çalışmalar yapılarak şu tespitler elde edilmiştir. Deneyler sonucunda mukavemet değerleri düşük olan termoplastik malzemelerin fiber ile takviye edildikten sonra mukavemet değerlerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu iyileşme ise her ayrı numuneye göre malzemenin mekanik özelliklerinde de farklı değerlerde olduğu grafik sonuçlarından görülmektedir. Ancak kompozitlerin tekrar tekrar ısıtılıp soğutularak yeni şekillere dönüştürülebildiği ve ısı altında şekillendirilmelerinin çok kolay olduğu ve şekil değişikliği esnasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramadığı tespit edilmiştir. Takviyesiz olarak çekmeye tabi tutulan termoplastik malzemedeki çekme sonunda belirli bir değere kadar uzayıp, kopma göstermeden uzaması sürekli bir şekilde devam etmiştir. Bu sonuç şekil 14'te görülmektedir.

Termoplastik malzeme değişik takviye malzemeler ile güçlendirildikten sonra daha fazla bir mukavemet göstererek uzaması belirli bir değere kadar devam edip, takviyesiz malzeme gibi sürekli akma göstermediği ve bir noktada koptuğu görülmüştür. Örneğin, cam ve kevlar takviyeli malzeme şekil 19 ve şekil 25'te görüleceği gibi takviyesiz duruma göre daha fazla gerilmeye maruz kaldığı görülmektedir. Böylece daha büyük

yüklere maruz kaldığında mekanik özellik bakımından daha iyi sonuçları vereceği görülmüştür.

Deneylerde kullanılan malzemeler özel olarak üretildiğinden sınırlı sayıda deney yapılmak zorunda kalınmıştır.

Kompozit plaka kalınlığı artırıldığında plaka üzerine etki eden gerilmenin arttığı ve plakanın orta noktasında uzamanın meydana geldiği gözlemlendi.

Cam-epoksinin kevrlara göre gevrek bir malzeme olduğu ve akma sınırına girmeden koptuğu gözlemlendi.

Cam fiber takviyeli termoplastik malzemelerin imalatında dikkat edilmesi gereken husus cam fiber termoplastik malzeme arasındaki ara yüzeyin iyi bir şekilde oluşması ve cam fiberin matris içerisinde homojen olarak dağılmasıdır. Bu amaçla, kullanılacak cam fiberin termoplastik malzeme ile uyumlu olması ve cam fiber çap ve boyunun çok iyi seçilmesi gereklidir. Eğer cam fiber buyu kritik cam fiber boyuna yakın seçilirse mekanik özelliklerinde büyük bir düşüş gözlenir.

Ansys ile yapılan analizde X yönünde maksimum şekil değişiminin görüldüğü nokta kompozit malzemenin kopmaya başladığı noktalar olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada ANSYS sonlu elemanlar yönteminin ve deney verilerinin karşılaştırılması sonucunda hassasiyet gerektiren uygulamalarda deney verilerinin gerekli olduğu ancak çok karmaşık yapılarda ANSYS sonlu elemanlar modelinden faydalanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kompozit yapı lifleri doğrultusunda gelen kuvvetleri kolay karşılayabilirken dik doğrultuda gelen kuvvetleri karşılamakta zorlanmaktadır.

Yapılan çekme deneyi sonuçlarında küçük hatalar gözlemlendi, bu hatalar deney numunelerinin imalat sırasında sıcaklık ve basınçtan kaynaklandığı sonucuna varıldı.

Öneri olarak, daha değişik tip takviye ile birlikte daha değişik güçlendirme biçimi ve değişik mekanik özellikleri tespit edilerek değişik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. GÜVEN. Ş. Yılmaz, Kompozit Malzemeler ve Kullanım Alanları, Isparta Mühendislik Mimarlık-Fakültesi Makine Müh, Bölümü, Isparta, 1990.
2. Armatlı Kayrak, Müge, Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet Maliyet Analizleri, Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksek Okulu, Eskişehir, 1999.
3. Yaşa Ersoy, Halit, Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları, İstanbul, Ekim 2001.
4. Aran, A., Kompozit malzemeler, İTÜ yayınları, 1998
5. DONALD R. ASKELAND, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Nobel Yayınları, Ankara 1998.
6. Özbay, Mahmut, Çağdaş Teknolojide Kompozit Malzemeler, Mühendis ve Makine, Cilt 28, Sayı 325, Şubat 1987.
7. Şimşek, Muhittin, Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri Mühendis ve Makine, Cilt 35, Sayı 414, Ekim 1994.
8. Tarakçılar. A.R. - Topçu. M. - Taşgetiren. S., Kompozit Malzeme Kullanımında Tasarım Esasları, Mühendis ve Makine, Cilt 36, Sayı 422, Haziran 1995.
9. BREGENZER. Rene, Yeni Kullanım Alanları İçin Kompozit Malzemeler, Mühendis ve Makine, 2000.
10. Tarakçılar. A.R. - Topçu. M. - Taşgetiren. S., Kompozitler ve Özelliklerini Belirleyen Faktörler, Mühendis ve Makine, Cilt 36, Sayı 420, Nisan 1995.
11. Sönmez. Fazıl Önder, Otomotiv Sanayinde Kompozit Malzeme Kullanımı, Mühendis ve Makine, Cilt 39, Sayı 465, Mayıs 2000.
12. Robert. C. Forney, Kompozit Malzemeler Çağı, Teknik ve Uygulama, Sayı 11, Ekim 1987.
13. Kaya, Şahin, Kompozit Malzemeler ve Cesur Tasarımlar, Yakın Geleceğin Uçakları, Teknik Uygulama, Sayı 11, Ekim 1987
14. Topçu M., Taşgetiren S. , 1998 , Mühendisler için sonlu elemanlar metodu , Pa.Ü. Müh. Fak. Matbaası, Denizli

15. Shanley, F.R. , 1967, Mechanics of Materials, Mc Graw Hill Book Comp. Newyork.
16. Arslan N, Kaman M., Gür M, 1999, Eksenel yüklü faturalı ankastre kompozit levhalarda elasto-plastik gerilme analizi, Bilim Günleri, Denizli.
17. Arslan N., Kaman M., Pıhtılı H., 1999, Eksenel yüklü yarım daire çentikli kompozit levhalarda elasto-plastik gerilme analizi, Bilim Günleri , Denizli.
18. Özel A., Sayman O., Karaca H., 1993, “U” çentikli kompozit levhalarda elasto-plastik gerilme analizi, 5. Denizli malzeme sempozyumu , Denizli.
19. Sayman O., Arslan N., Pıhtılı H., 2001, An elastic – plastic stress analysis in a thermo plastic composite cantilever beam ldaded uniformly, Journal of thermo plastic composite composite material, Volume 14.
20. Arslan N., Pıhtılı H., Gür M., 2001, Elasto – plastic stress analysis of thermo plastic matrix composite laminated and perforated plates under in plane loading, Journal of reinforced plastics and composites, Volume 20 , No 14.
21. Pyner, G.R., Matthews, F.L, “Comparison of single and multi-hole bolted joints in glass fiber reinforced plastic” , Journal of Composite Materials 13, 232-239, 1979.
22. Quinn .J., Matthews F.L, “The effect of stacking sequence on the pin-bearing strength in glass fiber reinforced plastic” Journal of Composite Materials, Vol: 11, PP: 139-145, 1977.
23. Ramamurthy T.S. , “Analysis of interference fit pins in composite plates” , Proceedings of the American Society for Composites, 623-632, 1988.
24. Rowlands R.E., Rahman, M.U., Wilkinson, T.L., “Single- and multiple-bolted joints in orthotropic materials”, Composites, PP: 273-279, 1982.
25. Segeev B., Madenci, E., “Influence of bolt spacing and degree of anisotropy in single-lap joints”, Computers & Structures, Vol:76, PP: 89-103 , 2000.
26. Stockdale J.H., Matthews, F.L., “ The effect of clamping pressure on bolt bearing loads in joints”, Computers & Structures, Vol:76, PP: 89-103 , 2000.

27. Tarnopol'skii Yu.M., Kulakov, V.L., "Methods of determination of shear properties of textile composites", Composites, Part A, Vol : 30, PP : 879-885, 1999.
28. Tsai Ho.H., Morton, M.Y., "An experimental investigation of Iosipescu specimen for composite materials", Journal of Experimental Mechanics, PP:328-336, 1991.
29. Tsai M.Y, Morton, J. "Stress and failure analysis of a pin-loaded composite plate: An experimental study", Journal of Composite Materials, Vol: 24, PP:1101-1120, 1990
30. Wang S., Han, Y., "Finite element analysis for load distribution of multi fastener joints" Journal of Composite Materials, Vol: 22, PP:124-136, 1988.
31. Zhang K.D., Ueng C.E.S., "Stresses around a pin-loaded hole in orthotropic plates", Journal of Composite Materials, Vol: 18, PP: 432-446, 1998
32. Scalea F.L., Cloud, G.L., "A study on the effects of clearance and interference fits in a pin-loaded cross-ply FRP laminate" Journal of Composite Materials, Vol: 32, PP: 783-802, 1998

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 23.09.1982

Doğum Yeri : Diyarbakır

Lise : Özel Dicle Lisesi, 1995

Lisans : Dicle Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Bölümü,
2000

Çalışma : 2005 Gevran Tekstil, Diyarbakır

2007 Yıldırımlar Mühendislik, Diyarbakır