

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerde Interlaminar Kayma Gerilmelerinin Nümerik Analizi ve Dört Noktadan Eğme Testi İle Interlaminar Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Yeliz ALNAK

Cumhuriyet Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Züleyha ASLAN

Tabakalı kompozit malzemelerde en kritik hasar mekanizmalarından birisi tabakaların ayrışması (delamination) hasarıdır. Delaminaton hasarına karşı direnç interlaminar kayma mukavemeti ile karakterize edilir. Bu tezin amacı örgü fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde Dört Noktadan Eğme Kayma Testi ile elde edilen interlaminar kayma mukavemetinin araştırılmasıdır. Kompozit malzemelerde tabakalar arası kayma mukavemetinin belirlenmesi için Dört Noktadan Eğme Kayma Test Metodu pratikte endüstride yaygın olarak kullanılmasına rağmen, henüz literatürde geçerliliği yoktur. Bu nedenle, bu tezde Dört Noktadan Eğme Kayma Testi ile elde edilen interlaminar kayma mukavemeti sonuçları ile ASTM D 2344 Short Beam Shear Metod (Üç Noktadan Eğme Testi) ve D 3846 Double Notched Shear Method sonuçları karşılaştırılmıştır. Dört noktadan ve üç noktadan eğilmeye maruz tabakalı kompozitteki tabakalar arasındaki maksimum interlaminar kayma gerilmeleri, kayma gerilmesi dağılımı ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile nümerik olarak belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Interlaminar kayma gerilmesi, dört noktadan eğme, tabakalı kompozit, E-glass fiber/Epoxy reçine.

SUMMARY

MSc Thesis

Numerical Analysis of Interlaminar Shear Stresses of Fiber Reinforced Composite Materials and Determination of Interlaminar Shear Strength by Four Point Bending Test.

Yeliz ALNAK

Cumhuriyet Üniversitesi

Graduate School of Natural

and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assistant Professor Züleyha ASLAN

Delamination is one of the most critical failure mechanisms of laminated composite materials. The resistance against delamination is characterized by the interlaminar shear strength (ILSS). Purpose of this thesis is to investigate interlaminar shear strength by Four Point Bend Shear Testing for woven fiber reinforced laminated composite. Although the Four Point Bend Shear Test Method is a common practice in the industry to determine the interlaminar shear strength for laminated composite materials, it has not been previously validated in the literature. For this reason the interlaminar shear strength results obtained from Four Point Bend Shear Testing Method was compared to the results obtained 2344 Short Beam Shear (Three Point Bending Test) Method and D3846 Double Notched Shear Method in this thesis. Maximum interlaminar shear stress, shear stress contour for laminated composite subjected to four point and three point bending was determined numerically using commercial ANSYS finite element package program.

KEY WORDS: Interlaminar shear stress, four point bending, laminated composite, e-glass/epoxy.

BÖLÜM I

1. GİRİŞ

20. yüzyılın ikinci yarısında tekniğin hızla gelişmesiyle beraber malzeme biliminde de gelişmeler hızlanmıştır. Fakat bu gelişim, yeryüzünde bulunan ana malzemelerin sınırlı olmasından dolayı, malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri, teknolojisinin gelişmesine ayak uyduramamıştır. Uzay araçlarının yapımına başlanan asrımızda, bilim adamları çağın yenilikleri ile birlikte mevcut malzeme özelliklerinden bilimin gelişmesi paralelinde günün şartlarına uyacak şekilde gerek ekonomik gerekse daha uygun malzemeler imal etme yolunu seçmişlerdir. Dolayısıyla hem ekonomik hem daha mukavemetli ve hem de çok hafif malzemelerin teşekkülü için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Bu tip malzemelerin elde edilmesi için yapılan çalışmalar sonucunda değişik özelliklerdeki malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır ve kompozit malzemeler büyük bir önem kazanmıştır.

Kompozit malzemeler şehircilikte, toplu konut yapımında çevre güzelleştirme ve düzenleme çalışmalarında (heykel, banklar, elektrik direkleri, vs...) , masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında, elektrik ve elektronik sanayisinde her türlü elektrik ve elektronik malzemelerin imalinde, havacılık ve uzay sanayisinde üretim malzemesi olarak, planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında, otomotiv sanayisinde otomobil kaporta parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastiklerinin yapımında, iş makinelerinde iş makinelerinin koruma kapakları ve çalışma kabinleri yapımında, inşaat sektöründe cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları, tarım sektöründe seralar, tahıl depolama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kullanılmaktadır (Parılı,1995), (Tanır,1997).

Tabakalı kompozit malzemeler, kompozit malzemeler içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerin anizotropik doğasından dolayı mekanik özelliklerinin bulunması, izotropik malzemelere göre oldukça zordur. Mekanik özellikler, çekme, basma ve kaymaya ait özelliklerdir. Çekme ve basma test metotları ile kayma test metotları karşılaştırılırsa, kayma test metotları çok çeşitlidir. Ortotropik malzeme için kayma mukavemetini ve kayma modülünü en doğru şekilde bulabilmek için son yıllarda birbirinden oldukça farklı test metotları geliştirilmiştir. En sık kullanılan kayma test metotları; Short Beam Shear, Iosipescu Shear, ± 45 Tensile Shear, Two-Rail Shear, Double-Notched Shear, Four-Point Shear, V- Notched Rail Shear metotlarıdır. Bu metotların bir kısmının ASTM standartları olmasına rağmen, bir kısmının ASTM standartları yoktur ve pratikte kullanılmaktadır. Bu kayma test metotlarının çoğu ortotropik malzeme için sadece bir veya iki düzlemdeki kayma özelliklerini verebilmektedir.

Tabakalı kompozitler yüke maruz kaldıklarında tabakayı oluşturan tabakacıkların arasında ayrışma meydana gelebilir. Delamination adı verilen bu hasar tabakalı kompozit yapılarda istenmeyen bir durumdur. Tabakalı kompozitler üzerine yapılan tüm çalışmalarda en önemli

hasarın delamination olduğu belirtilmektedir. Delamination hasarını oluşturan etmen, tabakalar arasında oluşan interlaminar kayma gerilmeleridir. Bu nedenle interlaminar kayma mukavemetinin doğru olarak bulunması çok önemlidir. Interlaminar kayma mukavemetini bulmak için şu anda en sık kullanılan test metotları Short Beam Shear-ASTM D2344 (Üç Noktadan Eğme) ve Double-Notched Shear-ASTM D 3846 test metodudur. Double-Notched Shear test numunesindeki çentikleri hasarsız olarak açmak zor olduğundan Üç Noktadan Eğme Test Metodu en çok kullanılan metottur. Üç Noktadan Eğme Test Metodunda yük yalnızca tek bir noktadan uygulandığı için bölgesel gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Bu nedenle bu tezde Dört Noktadan Eğme Metodu kullanılmaktadır. Çünkü dört noktadan eğme testinde yüklerin dağılımı daha iyidir. Dört noktadan eğme pratikte kullanılmasına rağmen henüz interlaminar mukavemeti için literatürde geçerli bir standardı yoktur.

Feraboli ve Kedward (2003), karbon/epoxy tabakalı kompozit malzeme için dört noktadan eğme interlaminar kayma testini, hem deneysel hem de nümerik olarak çalışmışlardır. Nümerik çalışma için ANSYS paket programını kullanmışlardır ve tabakalar arasındaki interlaminar kayma mukavemetini ‘‘four-point bend’’ testiyle bulmuşlardır. Abali ve arkadaşları (2003), kompozitlerin interlaminar kayma mukavemetini ölçmek için ‘‘Modifiye Edilmiş Short Beam Shear’’ testini kullanmışlardır. Deneylerinde karbon/karbon, graphite/epoxy kompozit malzeme kullanmışlardır. Deneylerde yük ve kompozit plaka arasına alüminyum plakalar yerleştirerek yükün düzgün dağılmasını sağlamışlardır. Elawadly (2002), süper iletken manyetik enerji depolamada kullanılacak olan tabakalı E-glass/epoxy kompozit tüplerinin interlaminar kayma gerilmesi üzerine tabakaların kalınlığı ve fiber oryantasyonu etkilerini deneysel ve analitik olarak çalışmışlardır. Deneysel çalışma üç noktadan eğme testiyle yapılmıştır. Mujika (2005), üç nokta ve dört noktadan eğme testlerini kullanarak tek yönlü takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde esneklik modülünü bulmuştur. Deneylerinde karbon/epoxy kompozit malzeme kullanmıştır. Tarnopol’skii ve arkadaşları (2000), tekstil kompozitlerin kayma karakteristiklerini Iosipescu ve asimetric dört noktadan eğmeyi de içeren dokuz farklı kayma testi ile deneysel çalışmışlardır. Shivakumar ve arkadaşları (2003), tabakalı dokuma kumaş kompozitlerde interlaminar kayma gerilmesini Modifiye Edilmiş Short Beam Shear test metoduyla bulmuşlardır. Dokuma kumaş kompozitleri, tek yönlü cam lifleri ve karbon lifleri için Short Beam Shear testini standart ve modifiye edilmiş olarak iki şekilde kullanmışlardır. Kress ve arkadaşları (2004), ayrı ayrı eğrisel tabakaların, interlaminar normal gerilme dağılımını incelemek için yeni bir sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. Karbon/epoxy kompozit malzeme kullanmışlardır. Ünal ve Dayal (2002), seramik kompozitlerin interlaminar kayma mukavemetini ‘‘Asimetric Four-Point Bend’’ testiyle bulmuşlardır. Roselli ve Santare (1996), ‘‘Interlaminar Shear Device Testi’’ ve ‘‘Short Beam Shear Testi’’ni hem deneysel hemde nümerik olarak karşılaştırmışlardır. İki metodun sonuçlarının çok yakın olduğunu bulmuşlardır. Zhou ve arkadaşları (2004), Short Baem Shear ve Iosipescu metodu ile quasi-izotropik karbon/epoxy tabakalar için hem interlaminar kayma hem de esneklik

mukavemetini belirlemişlerdir. Zhang ve arkadaşları (2002), CYTEC G 40–800/5276–1 grafit/epoxy tabakalı kompozitin interlaminar kayma gerilmesi üzerinde fiber takviye açısının etkisini araştırmışlardır. İki komşu tabaka arasında farklı θ açıları kullanmışlardır. Double Notch shear metodunu kullanarak, çentik derinliğinin etkisini incelemişlerdir. John ve Brown (1998), cam takviyeli phenolic kompozitlerde interlaminar kayma ve esneklik özelliklerini çalışmışlardır. Çalışmalarında s/t (mesnetler arası açıklık/kalınlık) oranını 64/1; 16/1 ve 12/1 seçmişlerdir. Lagunegrand ve arkadaşları (2004), tabakalı kompozitlerde kenar delamination hasarını çalışmak için, dört noktadan eğme test metodunu modifiye etmişlerdir. Tracy ve arkadaşları (2003), karbon fiber epoxy kompozitlerde yapay çatlak oluşturup delamination bölgesi meydana getirerek, interlaminar kırılma tokluğunu deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada ‘‘Single Leg Four Point Bend Test’’ metodunu kullanmışlardır. Adams (2005), kayma özelliklerinin belirlenmesi için tüm kayma test metodlarını karşılaştırmıştır. Ve her bir metodun avantajları ve dezavantajlarını belirtmiştir. Adams ve Lewis (1995), üç ve dört noktadan eğme kayma test metodlarını tek yönlü takviyeli tabakalı kompozitler için karşılaştırmıştır. Tek yönlü takviyeli glass/epoxy kompoziti için interlaminar kayma mukavemetini iki metod ile hemen hemen aynı bulmuşlardır. Fakat tek yönlü takviyeli karbon/epoxy kompoziti için dört noktadan eğme sonuçlarını daha düşük bulmuşlardır. Ming ve Adams (1995), tek yönlü takviyeli kompozit malzemeler için üç ve dört noktadan eğme test metodlarını üç boyutlu elastik-plastik sonlu eleman analizi ile karşılaştırmışlardır. Ve çalışmalarında s/t (mesnetler arası açıklık/kalınlık) oranının kayma mukavemetini önemli derecede etkilediğini bulmuşlardır.

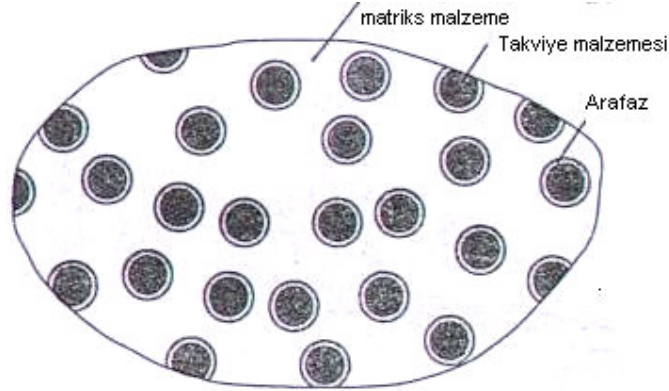
Bu çalışmada ise örgü e-glass/epoxy tabakalı kompozit malzemede dört noktadan eğme testi ile interlaminar kayma mukavemeti deneysel ve nümerik olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada dört noktadan eğme aparatı ile çekme cihazında deneyler yapılarak maksimum yük bulunmuş, interlaminar kayma mukavemeti hesaplanmıştır. Bulunan maksimum yük ANSYS paket programında kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu yüke karşılık gelen interlaminar gerilmeler hesaplanmış, deneysel interlaminar kayma mukavemeti ile karşılaştırılmıştır. Deneyler beş farklı s/t (mesnetler arası açıklık/kalınlık) oranı için tekrarlanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile ANSYS paket programından elde edilen sonuçların oldukça yakın değerler verdiği bulunmuştur. Ayrıca üç noktadan eğme testi deneysel ve nümerik olarak çalışılmış, üç noktadan eğme testi ile dört noktadan eğme testi karşılaştırılmıştır. Üç noktadan eğme testinde ASTM D 2344’te tanımlanan $s/t=4$ oranı için elde edilen interlaminar kayma mukavemeti ile dört noktadan eğme testinde $s/t=8$ kullanılarak elde edilen interlaminar kayma mukavemeti değerleri oldukça yakındır.

BÖLÜM II

2. KOMPOZİT MALZEMELER

İki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesi ile elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denir (Şahin,2000).

Kompozit malzemeler genellikle matriks adı verilen ana faz ile fiber olarak adlandırılan ikincil fazların istenilen oranda ve tertipte fiziki karışımı ile üretilirler. Bu iki malzeme gurubundan çekirdek olarak kullanılan fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matriks malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Ayrıca matriks olarak kullanılan malzemenin bir amacı da fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylelikle fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olmaktadır (Tanır, 1997). Şekil 2.1’de kompozit malzemenin fazları görülmektedir.



Şekil 2. 1. Kompozit malzemenin fazları (Daniel, 1994).

Kompozitlerin üretim amaçları:

- Mukavemeti arttırmak
- Yorulma dayanımı arttırmak
- Aşınma dayanımını arttırmak
- Korozyon dayanımını arttırmak
- Kırılma tokluğunu arttırmak
- Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri iyileştirmek
- Isıl iletkenliği arttırmak
- Elektrik iletkenliğini arttırmak

- Akustik özelliği iyileştirmek
- Rijitliği arttırmak
- Ağırlığı azaltmak
- Estetik çekicilik kazandırmak

Hiç kuşkusuz tüm bu özelliklerin aynı anda elde edilmesi olanaklı değildir. Kullanım yerine göre tasarımın gerektirdiği istekler sağlanmalıdır.

2.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

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 özelliklerde sıçrama görülebilir. Seramik kompozitler ise ikisi arasındadır.

2-Rijitlik ve Boyut Kararsızlığı: Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararsızlığı gösterir.

3-Yüksek Mekanik Özellikler: Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları çok yüksektir.

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-Yüksek Isı Dayanımı: Kompozitlerin ısı dayanımı sıradan plastiklere göre yüksektir.

6-Elektriksel Özellikler: Elektriksel özellikler kompozitlerde isteğe göre ayarlanabilir. Metal Matrisli Birleşik Malzemeler (MMC)'ler iletkendir (<http://www.teknolojikarastirmalar.com>).

2.2. Kompozit Malzeme Türleri

Kompozit malzemeler üçe ayrılır;

- Polimer kompozitler
- Metal kompozitler
- Seramik kompozitler

2.2.1. Polimer kompozitler:

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

Tablo 2.1'de pekiştirici liflerin özellikleri, Tablo 2.2'de ise lifli kompozitlerin özellikleri görölmektedir.

Tablo 2. 1. Pekleştirici liflerin özellikleri (<http://www.teknolojikarastirmalar.com>).

Malzeme	Özgül 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

Tablo 2. 2. Lifli kompozitlerin özellikleri (<http://www.teknolojikarastirmalar.com>).

Malzeme	Özgül ağırlık gr/cm ³	Çekme mukavemet N/mm ²	Elastisite modülü 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

Polimer kompozitlerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Pekleştirici 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 Nm / gr olmasına karşın cam lifi – polyesterlerde 620 Nm/gr dır. Diğer taraftan karbon lifi epokside 700 Nm/gr ve kevlar epokside 886 Nm/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 (<http://www.teknolojikarastirmalar.com>).

2.2.2. Metal kompozitler (Metal matrisli birleşik malzemeler MMC):

Bir metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile eritme vakum emdirme, sıcak presleme ve difizyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak MMC' ler elde edilirler. MMC ler daha çok uzay ve havacılık alanlarında, mesela uzay teleskobu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları vs. yerlerde kullanılır (<http://www.teknolojikarastirmalar.com>).

2.2.3. Seramik kompozitler (Seramik matrisli birleşik malzemeler CMC):

Bu amaçla yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramikleri kullanılmaktadır. Başlıcaları Al₂O₃, SiC, Si₃N₄, B₄C, CbN, TiC, TiB, TiN, AlN' dir. Bu bileşikler değişik yapılarda olup amaca göre bir ya da bir kaçını beraber kullanılarak CMC ler elde edilir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir (<http://www.teknolojikarastirmalar.com>).

2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler yapılarını oluşturan malzemelere ve yapım metotlarına göre iki ayrı şekilde sınıflandırılabilir.

2.3.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre

Fiber ve matriks olarak kullanılabilen malzemeler amaca uygun olarak çok çeşitli olabilmektedir. Fakat genellikle cam, seramik, plastik ve metaller kullanılmaktadır.

2.3.1.1. Plastik – Plastik kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik, yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matriks olarak kullanılan plastik, esneklik verici, darbe emici ya da istenen amaca göre kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastik türleri de iki ayrı grupta incelenebilir.

2.3.1.1.1. Termoplastikler:

Bu tür plastikler, ısıtıldığında yumuşar ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşir. Bu işlem sırasında plastiğin mikro yapısında herhangi bir değişiklik olmaz. Genellikle 5–50 ° C arasındaki sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bu gruba giren plastikler şunlardır;

- a) Naylon
- b) Polietilen
- c) Polistren
- d) Karbonflorür
- e) Akriklikler
- f) Selülozitler
- g) Viniller

2.3.1.1.2. Termosetplastikler:

Bu tip plastikler ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikro yapıda oluşan değişim nedeni ile eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır. Bu grubun belli başlı plastikler;

- h) Polyesterler
- i) Epoksiler
- j) Alkitler
- k) Aminler (Tanır,1997)

2.3.1.2. Plastik-Cam elyaf kompozitler

Bu kompozitler isteğe göre termoplastik veya termoset plastikten oluşan matriks ve cam liflerin uygun kompozisyonlarında üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikler nedeni ile cam

lifler birçok durumda metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliği gibi liflere tercih edilebilirler. Ancak cam elyafı kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılma olmasından dolayı gevrektiler.

Bu tür kompozitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek, arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçinelerde, daha önce izah edildiği gibi termoplastik veya termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerinde düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyaf takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler polyesterlerdir. Bunlar reçine malzemeleri içinde takribi olarak %85 gibi yüksek bir kullanma oranına sahip olup, birçok çeşitleri vardır (Tanır,1997).

2.3.1.3. Plastik – Metal fiber kompozitler

Endüstride çok kullanılan bir tür olan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça mukavemetli ve hafif bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır.

Cam fiber ile takviye edilmiş termoset plastikler ancak fiberlerin düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyafı kompozitler ise büyük kuvvetleri nakletmelerine karşılık camın çok kırılma olmasından dolayı çok düşük dirençlidirler. Fakat plastik içine gömülmüş metal fiberler bütün bu aksaklıkları ortadan kaldırır.

Bu kompozitler, metal fiberlerin (bakır, bronz, alüminyum, çelik, vs...) polietilen ve polipropilen plastiklerini takviyelendirmesi amacı ile elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünde takviyelendirme yaygın olarak kullanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır (Tanır,1997).

2.3.1.4. Metal matriksli kompozitler:

Metallerin ve metal alaşımların birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılma olmaktadır. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matriksli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler.

Bakır ve alüminyum matriksli, volfran veya molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti, bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matriksin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşmasını sağlamaktadır. Fiberlerin, malzemeyi kuvvetlendirme derecesi, yüzeysel bozuklukların olmayışına bağlıdır. Böylece teorik duruma yaklaşılabilir. Fiberlerin çaplarına matriksle olan adezyon kuvvetinin niteliğine bağlı olarak belli bir kritik uzunluktan daha kısa olmamalıdır.

Bu kompozitlerde metal matriks içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi gelişigüzel olarak dağıtılmış küçük parçacıklar halinde de olabilir (Tanır,1997).

2.3.1.5. *Seramik kompozitler*

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşiminden oluşan seramik kompozitler yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi bir dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler, ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği de gösterirler.

Üç ayrı grupta toplanılan seramik kompozitler şu şekilde sıralanabilirler.

- a) *Seramik-Cam Sistemi*: Yaşamımızın her alanında kullanılan porselen, bir seramik cam kompozittir. Kuartz fiberlerin bir cam matrisine çini ile hamurlanıp yerleştirilmesi ile oluşmuştur.
- b) *Seramik- Seramik Sistemi*: İki seramik fazın karışımından oluşmaktadır. (Saf çini gibi)
- c) *Seramik- Metal Sistemi*: Bu tür kompozitler, çok fazlı bir yapıya sahiptirler. Bir metal faz, bir seramik fazı, bir gözenek fazı ve daha çok karmaşık formlarda seramik ve metalin ilave fazlarından meydana gelmiştir.

Endüstride kullanılan ve elmas olarak adlandırılan kesme aleti buna örnektir. Bir kobalt matrisine içine dağıtılmış tungstren karpit parçalarından oluşan bu kompozit malzeme büyük bir dayanım sağlamaktadır (Tanır,1997) (Parıltı,1995).

2.3.1.6. *Asfalt ve çakıl taşı kompozitler*

Bir asfalt kaplama, çakıl, hava ve asfalt karışımından oluşur. Yol yapımında kullanılan asfalt- çakıl kompozitinde çakıl, kompozitin sert kısmıdır ve aşınmaya mani olacak derecede mekanik mukavemete sahiptir.

Asfaltın fonksiyonu çakıl taneleri arasında ve çakıl ile yol sathı arasında bir bağlayıcılık temin etmektedir.

Genellikle suyun ve aşırı tozun bulunmadığı hallerde iyi bir yapışma sağlar. Bu kaplamanın sıcak havalarda deformasyona uğramaması, soğuk havalarda ise çatlamaması için asfaltın uygun bir vizkozitede olması lazımdır (Tanır,1997).

2.3.2. *Yapım yöntemlerine göre kompozitler*

2.3.2.1. *Karışık malzeme ve sinterleme*

Endüstride kullanılan çok çeşitli karışık kompozitler vardır. İnce kalıp kumunun bir plastik ile bağlanması ve plastiğin yüksek sıcaklıkta polimerize olmasından yararlanılarak dökümcülükte kullanılan kalıp malzemeleri ortaya çıkmıştır. Zımpara taşı taneleri de cam ve reçine tarafından bağlanarak zımparalar oluşturulmuştur. Ayrıca daha önce bahsi geçen asfalt ve beton, iyi birer karışık malzeme örneğini oluşturmaktadır.

Karışık malzemelerin birleştirilmesinde bir başka yöntem de sinterlemedir. Sinterleme küçük parçaları (çoğu kez toz metalleri) yüksek sıcaklıkta basınç altında birbirine bağlama ile gerçekleşir. Sinterleme olması için ya bir sıvı faz meydana gelmeli ya da katı halde yayılma ile parçaların arasında bir bağ oluşmalıdır. Sıvı fazlı sinterlemede bağlayıcı metal erir ve karbür

taneleri arasında sürekli bir faz oluşturur. Fakat sinterlemeden sonra kristalleşir ve rijit bir yapı meydana getirir. Küçük parçaları birbirine bağlamada reçine kullanıldığı zaman aynı şekilde tanelerin yüzeyini kaplaması gerekir. Kristalleşme yerine, reçine polimerize olur ve akışkanlığını kaybederek, kuvvetli bir bağ yapar.

2.3.2.2. *Yüzey kaplamaları (Koruyucu kaplamalar)*

Birçok uygulamada, aşınmaya dayanıklı, çok sert bir yüzeyi olan malzeme istenir. Böyle bir yüzey elde etmenin bir yolu, metal yüzeylerini aşınmaya dayanıklı bir maddeyle kaplamaktır. Metal üzerine bir tabaka şeklinde bağlanmış boya veya seramik yüzey kaplama şeklinde bir kaplama oluşturur.

Kaplamanın ana malzemeye yapışabilmesi için yüzey tabakası ile yüzey altı malzeme arasında bir süreklilik olmalıdır. Her iki malzeme birbirine benzer özellik taşıyorsa, bağlarda, mikro yapı içerisindeki fazlar arası bağlar gibi olur. Aynı şekilde galvaniz kaplaması çelik levhaya metaller arası bağlar şeklinde yapışır. Kaplama ile alttaki malzeme birbirine benzeyen yapıya sahip ise, genel olarak astar tabaka veya bağlayıcı tabaka kullanılır. Örnek olarak boyanın cama iyi yapışması için öncelikle cam üzerine silikon yayılır. Çünkü silikonun yapısal özellikleri hem cama hem de boya taşıyıcılarına benzemektedir.

Yüzey kaplamada kullanılan bir diğer yöntem ise alaşım elementlerinin dışarıdan yüzey tabakasına yayılması ile yapılır.

2.3.2.3. *Lif takviyesi*

Malzemenin mekanik özelliklerini yükseltmek için malzeme yapısı içine çok sert ve çok ince fazların serpilmesi yöntemidir. Bu tür kompozitler, ana fazdan beklenen bazı özelliklerin elde edilmesi ya da geliştirilmesi amacıyla üretilir. Ana faz yani matriks, ikincil faz yani fiberle belirli doğrultularda takviyelendirilir. Böylece, mukavemet, korozyon ve aşınma direnci, ısı izolasyonu, rijitlik ve ağırlık gibi özelliklerde daha iyi hale getirilir. Örnek olarak, ferritin çekme kuvveti 2800 [kg /cm²] olduğu halde, ferritin içine serpilmiş çok ince karbür tanelerinin oluşturduğu beynit 14000 [kg /cm²] lik bir çekme kuvvetine sahiptir.

Bu arada cam ile takviyeli plastik, kord bezi ile takviyeli otomobil lastiği ve demir ile takviyeli betondan söz edilebilir. Bu tür kompozitlerde hem fiber, hem de matriks malzeme yeterince büyük olduklarından her birinin etkisini ayrı ayrı hesaplayıp, bu hesapları kompozit malzeme üzerinde birleştirmek gerekmektedir.(Tanır,1997) (Parılı,1995)

2.4. **Kompozit Malzemeyi Oluşturan Elemanlar**

Lif takviyeli kompozit malzemelerin en önemli elemanları, takviyelendirme görevi yapan lifler ve bu lifleri bir arada tutan matrikstir. Bunların yanında kompozit içerisinde bağlama,

kaplama ve dolgu elemanları da bulunmaktadır. Bağlama ve kaplama elemanlarının görevi liflerin ıslanmalarını ve lif-matriks arasındaki yapışmayı artırmaktır.

Dolgu elemanları ise bazı polimer matrikslerle kullanılarak maliyeti düşürmek ve boyutsal stabilizasyonu artırmak amacıyla kullanılır.

2.4.1. Takviye Elemanları

Lif takviyeli kompozit malzemelerde, temel eleman liflerdir. Kompozit yapı içerisinde, en büyük hacimsel orana sahiptirler ve yapıya uygulanan yükün büyük bir bölümünü de lifler karşılarlar. Lif seçimi, lif hacimsel oranı ve lif oryantasyonu kompozit yapının performansı açısından çok önemlidir. Kompozit yapının bu özellikleri;

1. Özgül yoğunluk
2. Çekme mukavemeti ve modülü
3. Basma mukavemeti ve modülü
4. Yorulma mukavemeti
5. Darbe mukavemeti
6. Elektrik ve ısı iletkenliktir.

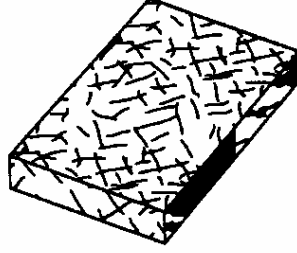
Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadır; parçacıklar, süreksiz ve sürekli elyaflar. Parçacık genelde küresel bir biçimde olmamasına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlardadır. Çakıl, mikrobalonlar ve reçine tozu parçacık takviyelerine örnekler arasında sayılabilir.

Takviye malzemelerinin bir boyutu diğer boyutlarına göre daha fazla olduğunda elyaflardan bahsetmeye başlarız. Süreksiz elyaflar (doğranmış elyaflar, öğütülmüş elyaflar veya whiskers-püskül) birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Çoğu lifin çapı birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu nedenle elyafların parçacık halden lif haline geçişi için çok fazla bir uzunluğa gerek yoktur.

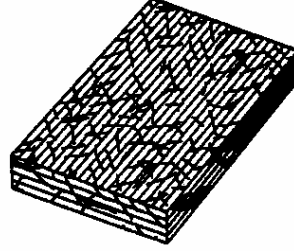
Sürekli elyaflar ise tel sarma yöntemi gibi yöntemlerde kesilmeden ip şeklinde kullanılmaktadır. Elyaflar en yüksek mekanik özelliklerini enlerinden daha çok boylarına gösterirler. Bu özellikler kompozit malzemelerin metallere rastlanmayan aşırı anisotropik malzeme özelliği göstermelerine neden olur. Bu nedenle tasarım aşamasında elyafların reçine içindeki yerleşimleri ve geometrilerini göz önünde bulundurmak çok önemlidir. Malzemenin anisotropik özelliği tasarım aşamasında ürünün uygun yerinde kullanılarak avantaja dönüşebilir.

Bazı durumlarda malzemenin dayanımı artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için elyaflar kumaş olarak dokunurlar. Sürekli liflerle hazırlanan dokuma elyaf kumaşlarının farklı amaçlar için geliştirilmiş türleri vardır.

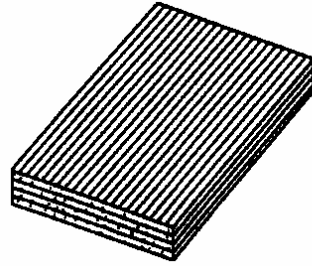
Şekil 2.2a'da parçalı fiber kompozit, Şekil 2.2b'de melez hibrit kompozit, Şekil 2.3a'da sürekli fiber kompozit, Şekil 2.3b'de örülmüş fiber kompozit, Şekil 2.4'te ise elyaf dokuma türleri görülmektedir.



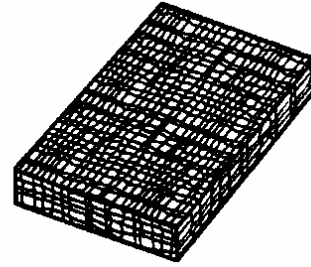
Şekil 2. 2. a-) Parçalı fiber kompozit



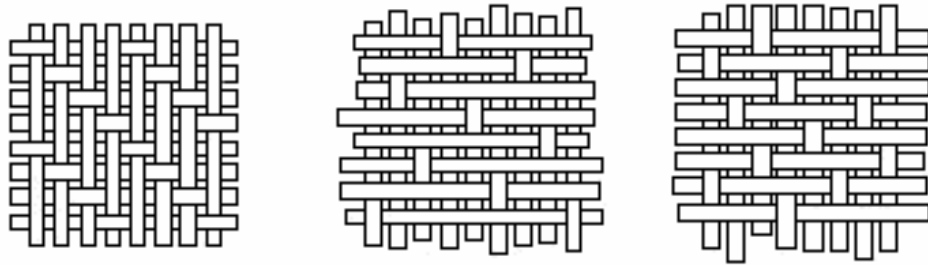
b-) Melez – hibrit- kompozit (Gibson, 1994).



Şekil 2. 3. a-) Sürekli fiber kompozit



b-) Örülmüş fiber kompozit (Gibson, 1994).



Şekil 2. 4. Elyaf Dokuma Türleri (<http://www.argeportal.com>).

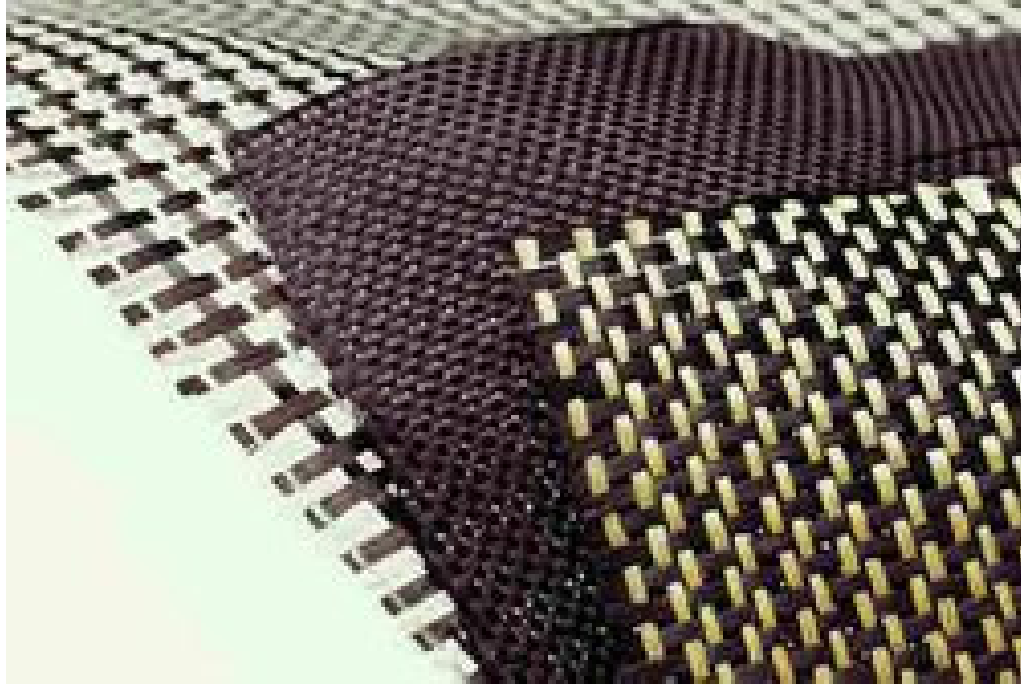
Cam elyafının günümüzde en çok kullanılan ve geçerli takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbon elyafı kullanılmaktadır. Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava araçlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır. Karbon elyafından daha güçlü ve aynı zamanda daha pahalı olan ise bor elyafıdır (Kuş,1996) (<http://www.argeportal.com>).

Polimerler matris olarak kullanılmalarının yanı sıra kompozitler için elyaf üretilmesinde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemeye çok yüksek düzeyde sağlamlık katan ve sertlik kazandıran Kevlar (Aramid) bir polimer elyafıdır. Hafiflik ve güvenilir konstrüksiyon amaçlanan ürünlerdeki kompozit malzemelerde aramid kullanılır.

Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri;

1. Cam elyafı,
2. Karbon (Graphite) elyafı, (PAN -polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
3. Aramid (Aromatic Polyamid) elyafı, (Ticari ismi; Kevlar-DuPont)
4. Bor elyafı,
5. Oksit elyafı,
6. Yüksek yoğunluklu polietilen elyafı,
7. Polyamid elyafı,
8. Polyester elyafı,
9. Doğal organik elyaflar

Bu elyaflar arasından en çok Cam, Karbon ve Aramid elyafları kullanılmaktadır. Bu üç elyaf türü de güçlü, sert ve sürekli biçimde üretilebilmektedirler. Şekil 2.5'te karbon elyafa örnek görülmektedir.



Şekil 2. 5. Karbon Elyaf Örnekleri (<http://www.argeportal.com>).

2.4.1.1. Cam lifleri

Polimer kompozitlerde en çok kullanılan cam lifleridir ve ergime sıcaklığı 840 ° C civarındadır. Temel avantajları, düşük maliyet, yüksek çekme mukavemeti, yüksek kimyasal direnç ve mükemmel yalıtım özellikleridir. Dezavantajları ise, düşük çekme modülleri, diğer liflere göre izafi yoğunluk, düşük yorulma direnci ve aşırı sertliğidir. Cam lifleri düşük sıcaklıkta oldukça mukavemettir ve -80 ila 200 ° C vakum altında sabit mukavemete sahiptir.

Diğer liflerin aksine cam lifi 3 boyutlu network yapısından dolayı izotropiktir. Tekrarı olmayan moleküler yapısı ve muhteva ettiği enerjiler bakımından kristalli yapılar ile hemen hemen aynıdır. Taşıma ve kompozit üretimi sırasında liflerin birbirine sürtünmesiyle lif yüzeylerinde mikro çatlakların oluşması sonucu çekme mukavemeti düşer. Bunu önlemek için lif yüzeyleri belli bir madde ile kaplanır. Bu işlem aynı zamanda kimyasal bir bağ oluşturarak, lif – matris ararım yapışma mukavemetini de artırır.

Kompozisyonlarına bağlı olarak, değişik cam lif cinsi vardır.

A Tipi Cam Lifi- Pencerelede ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz.

C Tipi Cam Lifi - Yüksek kimyasal direnç gösterir. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.

E Tipi Cam Lifi -Takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür. Düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranı özelliklerine sahiptir.

S + R Tipi Cam Lifi - Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Yalnız uçak sanayisinde kullanılır. Elyaf içindeki tellerin çapları E Cam'ın yarısı kadardır, böylelikle elyaf sayısı fazlaşır dolayısıyla birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelen daha sert yüzey elde edilebilmektedir.

Cam elyafının kullanım amacına bağlı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir. Cam elyafı biçimlendirildikten sonra yıpranmaya dayanımın artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır. Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlık performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır (Kuş,1996) (<http://www.arageportal.com>).

2.4.1.2. Karbon lifleri

Bilinen metallere göre daha düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet ve katılığa sahip olan karbon lifleri, özellikle karbonun elektriği iyi iletmesinden dolayı üretilmiştir. Karbon elyafları çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafı da

grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matriksler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiber üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır.

Karbon elyafları piyasada 2 biçimde bulunmaktadır:

*Sürekli Elyaf*lar - Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreg'larda kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

Kırpılmış Elyaf - genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorulma dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler (Kuş,1996) (<http://www.argeportal.com>).

2.4.1.3. *Aramid lifleri*

Aramid lifi sentetik organik lifler sınıfının en genel adıdır ve benzen halkaları içeren aromatik polimerlerdir. Aramid lifi piyasada daha çok ticari isimleri Kevlar ve Twaron olarak bilinmektedir. Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok farklı özelliklerde aramid lifi üretilmektedir. Aramid lifleri 500 ° C civarında dekompoze olurlar ve birim ağırlık bazında çeliğe göre 5 kez daha kuvvetlidir.

Aramid elyafının avantajları

- Genellikle rengi sarıdır
- Düşük yoğunlukludur.
- Kevlar elyafı kompozitler Cam elyafı kompozitlere göre 35% daha hafiftir
- Yüksek dayanıklılığa
- Yüksek darbe dayanımına
- Yüksek aşınma dayanımına
- Yüksek yorulma dayanımına
- Yüksek kimyasal dayanıma
- E Cam türü elyaflara yakın basınç dayanıklılığına sahiptir.

Aramid elyafının dezavantajları

- Bazı tür aramid elyafı ultraviyole ışınlarla maruz kaldığında bozulma göstermektedir. Sürekli karanlıkta saklanmaları gerekmektedir.
- Elyaflar çok iyi birleşmeyebilirler. Bu durumda reçinede mikroskobik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar malzeme yorulduğunda su emişine yol açmaktadır.

Genellikle polimer matrisler için takviye elemanı olarak kullanılan aramid elyafının bazı kullanım alanları;

- Balistik koruma uygulamaları; Askeri kasklar, kurşungeçirmez yelekler...
- Koruyucu giysiler; eldiven, motosiklet koruma giysileri, avcılık giysi ve aksesuarları
- Yelkenliler ve yatlar için yelken direği
- Hava araçları gövde parçaları
- Tekne gövdesi
- Endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum
- Fiber optik ve elektromekanik kablolar
- Debriyajlarda bulunan sürtünme balatalarında ve fren kampanalarında
- Yüksek ısı ve basınçlarda kullanılan conta, salmastra vb.

En çok bilinen ve kullanılan aramid elyafı Dupont firmasının tescilli ismi olan Kevlar'dır. Kevlar 29 ve Kevlar 49 olarak iki çeşidi bulunmaktadır. Kevlar 29 üstün darbe dayanımı özelliğine sahiptir ve bu nedenle çoğunlukla kurşungeçirmez yelek gibi uygulamalarda kullanılırlar. Kevlar 49 ise tekne gövdesi yapımında kullanılır(Kuş,1996) (<http://www.arceportal.com>).

2.4.2. Matriks Malzemeleri

Lif takviyeli kompozit malzemelerde matriks elemanı bazı fonksiyonları yerine getirir. Bu fonksiyonları şöyle sıralamak mümkündür:

1-Lifler arasındaki gerilme transferini sağlarlar.

2-Lifleri korozyon ve oksidasyon gibi çevre etkilere karşı korumak suretiyle, lif ve matriks arasında alternatif hasar ortaya çıkararak, çatlak ilerlemesine karşı koyar.

3-Lif yüzeylerini mekanik aşınmaya karşı korurlar.

Polimer reçineler liflerin dengede ve bir arada tutulmasını sağlarlar, ancak liflere oranla daha zayıftırlar. Kompozit sistemindeki gerilmeler lif – matriks ara birimi boyunca transfer edilirler. Bu nedenle ara birim yapışma mukavemetinin oldukça büyük önemi vardır ve matriks seçiminde, lif – matriks uyumluluğunun yanı sıra, maliyet ve üretim kolaylığı, arzu edilen özelliklere sahip olması gibi parametreleri de göz önünde bulundurmak gereklidir. Tablo 2.3'de aramid lifleri ve bazı diğer liflerin mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 2. 3. Aramid lifleri ve bazı diğer liflerin mekanik özellikleri (Kuş,1996).

LİF	Çekme Muk. (GPa)	Lif Çapı (µm)	Çekme Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Erime Sıcaklığı (° C)
HDPE	0.48	130–250	0.68	10–40	0.95	130
LDPE	0.16	130–250	0.27	70–80	0.91	112
SPECTRA 900	2.58	38	117.24	3.5	0.97	147
NYLON 6	0.66	-	4.27	16–20	1.14	217
NYLON 66	0.79	-	5.02	18–45	1.14	263
POLYESTER	0.57	11–28	9.74	19–25	1.38	249
KEVLAR 29	3.45	12.1	58.60	4.0	1.44	500
KEVLAR 49	3.65	11.9	124.0	2.5	1.44	500
E-CAM	2.90	10	71.0	3.37	2.55	840
KARBON	1.86	8.4	517.0	0.38	1.96	3650

Diğer taraftan, matriks malzemesinin seçiminde, yüzeysel kayma gerilmesi, basma mukavemeti, kopma, yorulma ve darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklerinde dikkate alınması bir zorunluluktur. Aynı zamanda matriks malzemelerinin yeterli yüzeysel kayma katılığı sağlayabilmek için yüksek kayma modülüne sahip olması gerekir.

Matriks malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer bir hususta, matriksin su ve nem alma özelliğidir. Matriksin su alması demek hidrostatik genleşme demektir ki, buda iç gerilmelere neden olur. Böylece, lifler matriks malzemedan ayrılırlar ve kompozit malzeme performansı azalabilir. Matriks malzemesinin viskozite, erime noktası, yoğunluk, katılma süresi gibi özellikleri, lif takviyeli kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri üzerinde etkilidir.

2.4.2.1. Polimerik matriks malzemeleri

Polimer matriks malzemeler düşük yoğunluk ve kolayca istenilen yapısal gelişmelerinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Yalıtkan ve düşük ısı iletimine sahip olduklarından dolayı, elektrik uygulamaları ve izolasyon işlerinde kullanılırlar. Özellikle ısı izolasyonu, gürültü sönümleme, darbe direnci, kolay ve ekonomik üretimlerinden dolayı otomotiv endüstrisinde oldukça geniş ölçüde kullanılırlar. Polimerik malzemeler, termoset ve termoplastik malzemeler olmak üzere iki guruba bölünebilirler (Kuş,1996).

2.4.2.1.1. Termoset matriks malzemeleri

Termoset esaslı kompozit malzeme matriksleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan

bir süreçtir. Termoset polimerler tekrar eritilemez ve şekil verilemez, yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris, sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1–4 hafta arası) bekletildiğinde sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hâl alır ve kullanılmaz duruma gelir. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadır.

Lif takviyeli kompozit malzeme yapımında genellikle, lifleri daha iyi ıslatabilmeleri için düşük viskozitede olmaları istenir. Termal stabilite, kimyasal direnç, düşük yoğunluk gibi özellikler bu reçinelerin avantajlarından. Oda sıcaklığındaki sınırlı çalışma zamanı, katılma için geçen uzun üretim zamanı, düşük kopma uzaması ve kırılma olmaları dezavantajlarından (Kuş, 1996).

2.4.2.1.2. Termoplastik matris malzemeleri

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar, ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir.

Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler. Bununla beraber, çok hafif ve kolay şekil verilebilir olmasına rağmen, düşük erime sıcaklıklarından dolayı kompozit malzeme yapımında kullanımları yaygın değildir. Ancak kısa lif takviyeli kompozit malzeme yapımında kullanılırlar.

Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimdeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termoplastikler termosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır.

Polypropilen, polietilen, polycarbonat ve naylon en yaygın termoplastik matris malzemelerdir (Kuş, 1996).

2.4.2.2. Epoksi reçineler

Lif takviyeli kompozit malzemelerde en yaygın olarak kullanılan matris malzemelerden birisidir. Bir oksijen atomu ve iki karbon atomunu içeren üç üyeli halka epoksi reçinenin başlangıç malzemesidir. Buna epoksid adı verilir. Epoksi reçinenin başlangıç malzemesi (Bi-fenol A

Diplisidil Eter)'dir. Reaktif katılaştırma maddesi (örneğin, di etilen tri amin), takviye lifleri ile reçine karıştırılmadan önce, reçine sıvı haldeyken ilave edilir. Katılaştırıcı maddenin amina gurupları, reçinenin epoksi gurupları ile reaksiyona girer. Reaksiyon süresinde reçine molekülleri birbirlerine çapraz bağ oluştururlar. Zamanla üç boyutlu network bir yapı oluşur. Katkı maddesinin miktarı ve tipi katılma süresini etkiler.

Epoksi reçinenin diğer termoset reçinelere göre başlıca avantajları arasında, başlama maddesi, katılaştırıcı ve çeşitli modifiye elemanlarının farklı şekilde kullanılması ile epoksi matrikslerde çok çeşitli özellikler elde edilebilir. Katılma sırasında malzemeden gaz çıkışı olmaz, kimyasallara ve çözücülere karşı mükemmel bir direnç gösterirler ve aynı zamanda lif matriks arasında yüksek bir yapışma sağlarlar. Bununla beraber, katılma süreleri oldukça uzundur ve maliyetleri yüksektir. Ancak oldukça geniş kullanıma sahiptirler. Özellikle uçak endüstrisinde %60'ın üzerinde bir kullanım alanına sahiptir (Kuş, 1996).

2.4.2.3. Polyester matriks malzemeleri

İki karbon atomu içeren (C=C) doymamış polyester reçine, termoset polyesterlerin başlangıç malzemesidir. Bu çift bağlar doymamış bir monomer yardımıyla polimer zincirleri arasındaki çapraz bağların kırılmasını ve üç boyutlu kuvvetli bir yapının oluşturulmasını sağlarlar. Bu durumda katılaştırıcı olarak kullanılan monomer, yapının bir parçası olur. Kullanım yerine göre polyesterin çeşitli özelliklerini iyileştirmek için farklı birçok monomer çeşitli oranlarda kullanılabilir. Bu reçineyi katılaştırarak mekanik özellikler kazandırmak için katalizörlere ihtiyaç vardır. Katalizörler polimerizasyonun başlaması için gerekli enerjiyi sağlarlar. Katılaştırıcıda denilen bu bileşikler Oksijen-Oksijen bağları ihtiva ederler. Bu bileşikler peroksit bileşiklerdir. Kimyasal yapısı R-O-O-R şeklindedir.

Peroksit parçalanınca R-O ve R-O radikalleri oluşur. Bunlar yeterli miktarda olursa polyester ve stirenin çifte bağları azalır, yeni radikaller oluşur. Bu zincirleme reaksiyon polyester ve stirende çifte bağlar kalmayana ve reçine sertleşerek çifte bağlara ulaşmayana kadar devam eder. Bu işlem sırasında oluşan polystren ile büyüyen polyester molekülleri arasında kimyasal bağ oluşarak (kopolimerizasyon) şebeke yapısı kurulur. Doymamış polyester reçine cinsine ve reaksiyon hızına göre katılacak miktar ayarlanır.

Mekanik açıdan polyester reçinelerinin en büyük avantajı hafifliğidir. Yoğunluğu 1.56 gr/cm³ olan polyester katılma sırasında kendini %5-12 arasında çeker. Bu nedenle düzgün yüzey elde etmek güçtür. Lif ile takviyelendirildiğinde kendini çekme sırasında liflerin burkulmasına sebep olur ve basmaya karşı mukavemeti düşüktür (Kuş, 1996).

2.4.2.4. Kaplama ve dolgu malzemeleri

Lif-matriks arabiriminin yapışma mukavemetinin artırılmasında kullanılan yöntemlerden birisi de kaplama malzemeleri kullanmaktır. En önemli fonksiyonu, lif ile matriks malzemesi arasında kimyasal uyumluluğu sağlamasıdır. Özellikle cam takviyeli kompozit malzemelerde

kullanılır. Cam elyafla birlikte kullanılan kaplama elemanları genellikle silika maddeleridir ve silen olarak bilinir. Kaplama elemanları aynı zamanda cam liflerinin birbirlerine sürtünmesini engellerler. Silen ve diğer kaplama elemanları ile lif ve matriks malzemesi arasında daha iyi bir yapışma ve kayma mukavemeti elde edilmiştir.

Bazı durumlarda, lif takviyeli kompozit malzemelerde özellikle matriks malzemelere bazı dolgu elemanları eklemek suretiyle, bazı mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, maliyetin düşürülmesi gibi iyileştirmeler yapılabilir. Özellikle maliyeti düşürmek, modül ve katılığı düşürmek, darbe mukavemetini artırmak, kalıplama anında çekmeyi azaltmak, viskoziteyi kontrol etmek, matlık vermek ve daha düzgün bir yüzey elde etmek gibi amaçlar için kullanılırlar. Dolgu elemanları genellikle modülü yükseltirken çekme mukavemetini düşürürler.

Kalsiyum karbonat, genellikle polyeşter reçinelerde maliyeti azaltmak ve çekmeyi azaltmak için kullanılır, silika cam lifi takviyeli kompozit malzemelerde kullanılır. Epoksi reçinelerde kullanılan alüminyum tozları işlenebilirliği artırmak ve aynı zamanda kompozit yapıda oluşan yüksek ısının uzaklaştırılmasını sağlar (Kuş, 1996).

2.5. Kompozitlerin Olumlu ve Olumsuz Özellikleri

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu, hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviye kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerin dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler, metalik malzemelerin yerini alabilecektir (Tanır,1997).

2.5.1. Kompozitlerin olumlu özellikleri

- **Yüksek mukavemet**

Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetleri, birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı, kompozitlere istenen yönde ve istenen bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilebilir.

- **Kolay şekillendirilebilme**

Büyük ve karışık parçalar, tek işlemlerle bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

- **Elektriksel özellikler**

Uygun malzemelerin seçilmesi ile çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji ve nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

- **Korozyona ve kimyasal etkilere karşı mukavemet**

Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilere zarar görmezler. Bu özellikleri nedeni ile kompozit malzemeler, kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörleri, tekne ve deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, bu yönü ile endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

- **Isıya ve ateşe dayanıklılık**

Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özellikleri, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.

- **Kalıcı renklendirme**

Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçine ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

- **Titreşim sönümlendirme**

Kompozit malzemelerde süneklik nedeni ile doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak büyümesi olayı da böylece minimize edilmiştir.

2.5.2. Kompozitlerin olumsuz özellikleri

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

- Kompozit malzemeler, değişik doğrultularda değişik mekanik özellik gösterirler, bu nedenle kullanım yerine uygun doğrultuların seçilmemesi dezavantaj olarak kendini göstermektedir.

- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.

- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

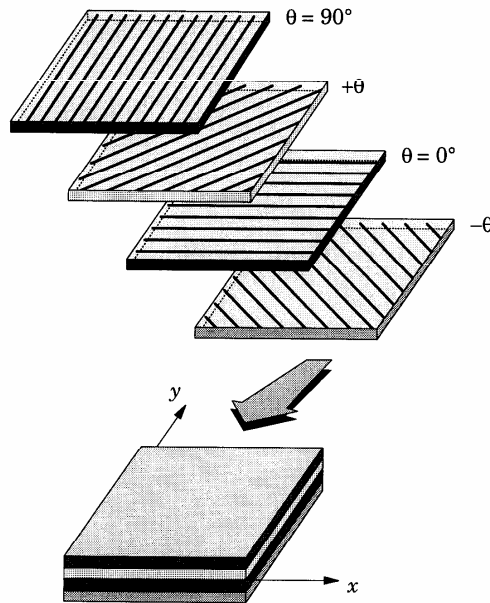
Görüldüğü gibi kompozit malzemeler bazı dezavantajlarına rağmen çelik ve alüminyum gibi metallerle göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikler nedeni ile kompozitler, otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, kimyasal madde depolama tanklarından karayolu tankerlerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi kolunda problemleri çözümlenecek bir malzemedir (Tanır, 1997).

2.6. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit, iki veya daha fazla sayıda tabakacığın tek ve bütün bir eleman gibi rol alacak şekilde birbirine yapıştırılması ile oluşturulmuştur. Tabakalı kompozitlerde, tabakaların birbirine tam olarak yapıştığı varsayılır. Tabakalar, matris içerisine rasgele yönlendirilmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakadan oluşabilir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, geniş özelliklerine bağlı olarak tek veya çok katlı tabakalı malzemeler olarak ta sınıflandırılabilir. Tek katlı kompozitler birkaç farklı tabakadan yapılabilir, her tabaka aynı yönelme ve özelliklere sahip, sonuçta tüm laminate tek katlı tabakalı kompozit olarak düşünülebilir. Kesikli elyaf takviye içeren kalıpta üretilen kompozitlerde de elyaf dağılımı kalınlık boyunca uniform olmamasına rağmen farklı laminate mevcut olmaz ve bu nedenle malzeme tek katlı kompozitler olarak sınıflandırılabilir.

Yapısal uygulamalarda kullanılan çoğu kompozitler çok katlıdır. Her tabaka, tasarım amaçlarına bağlı olarak değişen elyaf doğrultular ile tek katlı kompozitten oluşabilir. Genellikle her katman çok ince olup yaklaşık 0.1 mm kalınlığında olduğundan dolayı bu şekilde kullanılmaz. Her kattaki kompoziti oluşturan elemanlar aynı ise bunlar 'İzotropik' olarak adlandırılır. Birçok katlı kompoziti oluşturan malzemeler farklı malzemelerden oluşuyorsa bunlar 'ortotropik' veya 'karma ve melez laminetler' olarak adlandırılır. Buna örnek olarak ta bir karma tabakalı kompozitin biri katı cam elyaf takviyeli epoksi iken diğer tabaka ise grafit elyaf takviyeli epoksi kompozit olabilmektedir. Şekil2.6'da farklı lif yönlendirilmeleriyle oluşturulmuş tabakalı kompozit görülmektedir.



Şekil 2. 6. Farklı lif yönlendirilmeleriyle oluşturulmuş tabakalı kompozit (Reddy, 1997).

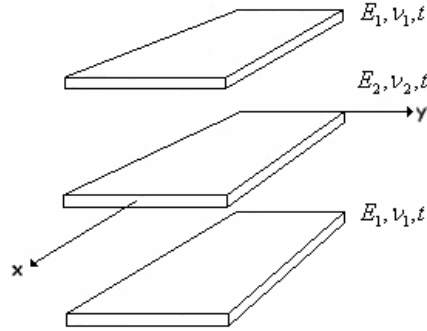
Tabakalı kompozitler, simetrik ve anti simetrik olmak üzere ikiye ayrılır.

2.6.1. Simetrik tabakalar

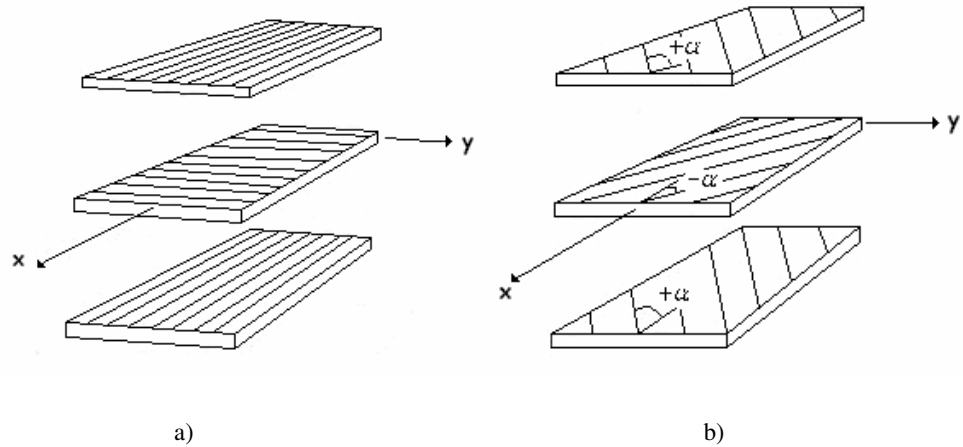
Tabakacıklar, orta yüzeyden itibaren materyal özellikleri ve geometrik bakımdan simetrik yerleştirilmişlerse bunlara **Simetrik Tabakalar** denir.

- *İzotropik Tabakalardan Oluşan Simetrik Tabakalı Kompozit:* Şekil 2. 7'de üç tane İzotropik tabaka simetrik olarak yerleştirilmiştir. Burada değişik kalınlıklarda çok sayıda izotropik tabaka, orta yüzeye göre hem geometrik hem de materyal özellikleri bakımından simetrik şekilde yerleştirilmiştir.

- *Ortotropik Tabakalardan Oluşan Simetrik Tabakalı Kompozit:* Ortotropik tabakalar, orta yüzeye göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Şekil 2. 8. a'da fiber takviye açıları 0° , 90° , 0° olan üç tabakalı bir kompozit, şekil 2. 8. b'de ise fiber takviye açıları $+\alpha$, $-\alpha$, $+\alpha$ olan üç tabakalı kompozit görülmektedir.



Şekil 2. 7. İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998).

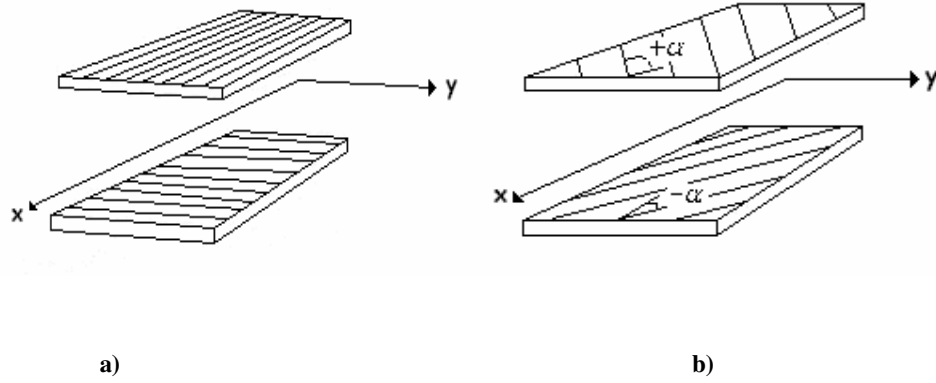


Şekil 2. 8. Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit (Jones, 1998).

2.6.2. Antisimetrik tabakalar:

Tabakalı kompozitlerin uygulanmasında dizayn ihtiyacını karşılamak için antisimetrik tabakalara ihtiyaç duyulur. Örneğin, bir tabakanın ısıya karşı koruyucu bir plaka görevi yapması istenirse antisimetrik tabaka seçilir. Çünkü ısı sadece bir taraftan gelecektir.

Şekil 2. 9. a'da antisimetrik olarak yerleştirilen, fiber takviye açıları 0° ve 90° olan iki tabakalı bir kompozit, şekil 2. 9. b ' de ise yine antisimetrik olarak yerleştirilen, fiber takviye açıları $+\alpha$, $-\alpha$ olan iki tabakalı bir kompozit görülmektedir.



Şekil 2. 9. Antisimetrik Tabakalar (Jones, 1998).

BÖLÜM III

3. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI

3.1. Orthotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme Halinde Gerilme-Şekil Değişirme Bağıntısı

Bir orthotropik malzemede 3 boyutlu gerilme-şekil değişirme bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

σ : Normal gerilme

τ : Kayma gerilmesi

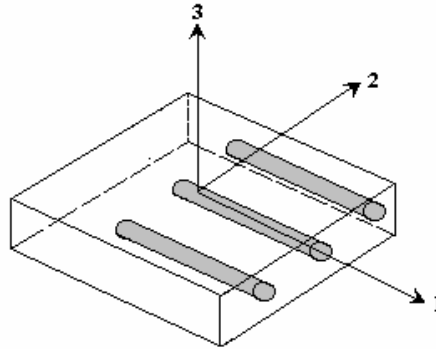
C : Mühendislik sabitleri

ε : Birim şekil değişirme

γ : Birim çarpılma açısı

Orthotropik malzemeler için, şekil değişirme-gerilme bağıntısı ise şu şekilde de yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$



Şekil 3. 1. Tek yönlü takviye edilmiş tabakacık.

Şekil 3. 1’de görülen tabaka için düzlem gerilme hali şu şekilde ifade edilir.

$$\sigma_3 = 0, \tau_{23} = 0, \tau_{31} = 0 \quad (3.3)$$

Düzlem gerilme hali için ε_3 , γ_{23} ve γ_{31} ise denklem 3. 2’den şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= S_{13}c_1 + S_{23}c_2 \\ \gamma_{23} &= \gamma_{31} = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Sonuçta denklem 3. 2 düzlem gerilme hali için aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

Burada

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}}, S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (3.6)$$

Denklem 3. 5’teki şekil değiştirme-gerilme bağıntısı, gerilme-şekil değiştirme bağıntısını elde etmek için tersine çevrilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Burada Q_{ij} , indirgenmiş rijitlik olarak adlandırılır.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{66} = G_{12} \quad (3.8)$$

Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ve şekil değiştirme-gerilme bağıntısı, sadece kendi düzleminde kuvvetlere maruz kalan tabakalar için temel denklemlerdir.

3.2. Gerilme Şekil Değiştirme Dönüşümü

Ortotropik malzemenin asal malzeme ekseninde gerilme hali için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları yukarıda verildi. Bu hal özel bir durum olup genelde malzeme eksen doğrultularından farklı eksenlerde, doğrultularda gerilmelere maruz kalır. Bu eksenler asal gerilme eksenlerinden (θ) açısı kadar dönmüş olan doğrultularda olabilirler.

Asal malzeme doğrultuları 1 ve 2 eksenleri ile tanımlanan ortotropik kompozit malzemenin üzerine uygulanmakta olan gerilmeler (θ) kadar farklı olan x-y eksenleri doğrultusunda olduğunda, malzemenin elemanter mekaniğinden yararlanarak, transformasyon denklemlerinin yazılması gerekir. Transformasyon denklemi aşağıda verilmektedir (Sayman, Aksoy, 1995).

$m = \text{Cos}\theta$ ve $n = \text{Sin}\theta$ ve θ , şekil 3.2'den görüldüğü gibi $x_1 - x$ eksenindeki

açı olmak üzere;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad \text{ve}$$

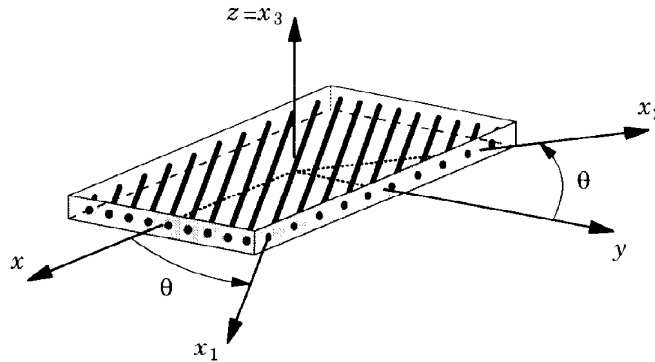
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Burada

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(n^4 + m^4) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n^3m \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(n^4 + m^4) \end{aligned} \quad (3.11)$$

\bar{Q}_{ij} matrisinin üzerindeki çizgi, Q_{ij} indirgenmiş rijitliğinin yerine dönüştürülmüş indirgenmiş rijitliğin olduğunu gösterir.



Şekil 3. 2. Malzeme koordinat sistemi (Reddy,1997).

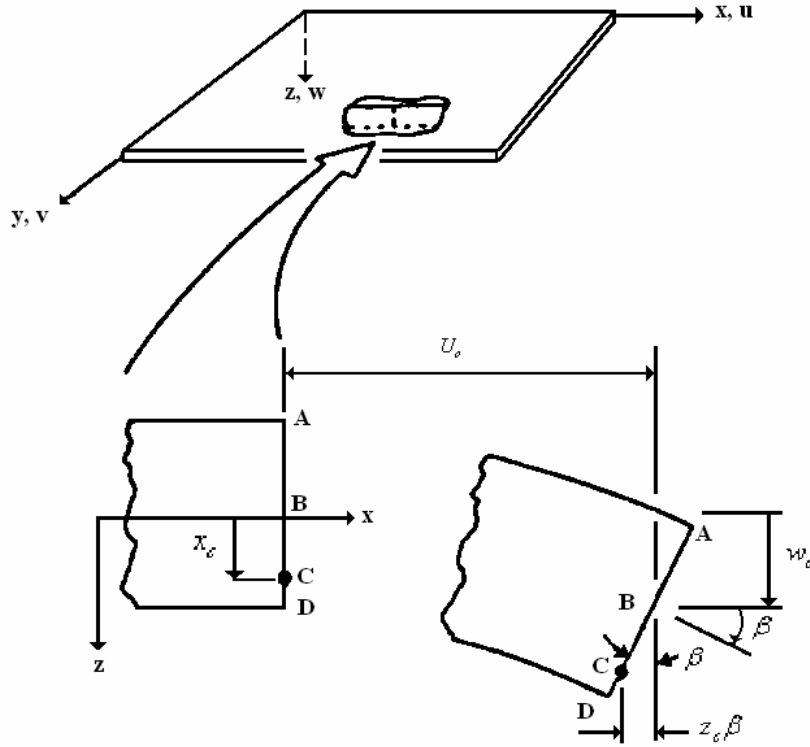
3.3. Tabakalarda Gerilme-Şekil Değişirme Davranışı

Düzlem gerilmeye maruz bir orthotropic malzemenin bir tabakacığı için asal malzeme koordinatlarındaki gerilme-şekil değişirme bağıntıları denklem 3. 7'de verilmiştir. Denklem 3. 10'da ise keyfi koordinatlarda gerilme-şekil değişirme bağıntıları verilmiştir. Hem denklem 3. 7 hem de denklem 3. 10, çok katmanlı bir tabakalı kompozitin k. tabakası için gerilme-şekil değişirme bağıntısı olarak düşünülebilir. Böylece denklem 3. 10 şu şekilde yazılabilir.

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon\}_k \quad (3.11)$$

Bir tabakanın yer değiştirmeleri Kirchoff-Love hipotezi ile bulunur. Tabakanın x, y, z yönlerindeki yer değiştirmeleri sırasıyla u,v,w olsun. Şekil 3. 3'te tabakalı kompozit plakanın ABCD kenarı incelenmektedir. Tabaka deformasyona uğramadan önce ABCD düz bir çizgi halindedir. x ekseninden z kadar mesafede olan C noktası için;

$$u_c = u_0 - z_c \beta \quad (3.12)$$



Şekil 3. 3. Deforme olmamış ve deforme olmuş tabaka kenar elemanı (Jones, 1998).

Kalınlık boyunca herhangi bir nokta için u, v yer değiştirmesi,

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x}, \quad v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (3.13)$$

Birim şekil değiştirme-yer değiştirme bağıntıları şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.14)$$

Böylece, denklem 3. 13'teki u ve v yer değiştirmelerini elde etmek için, şekil değiştirmeler,

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \tau_{xy} &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{aligned}$$

veya

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

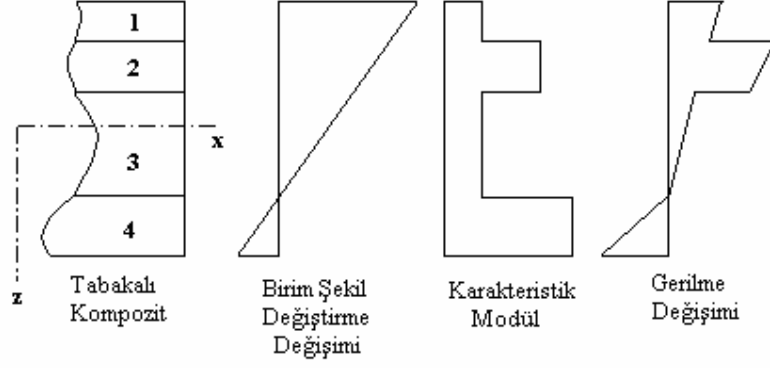
Burada, orta yüzeydeki şekil değiştirmeler ve orta yüzey eğriliği sırasıyla şu şekildedir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \frac{2\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

Tabakalı bir kompozitin k. Tabakasındaki gerilme hali aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \right\} \quad (3.17)$$

Şekil 3. 4'de görüldüğü gibi \bar{Q}_{ij} tabakalı kompozitin her bir tabakası için farklı olabilir. Bu nedenle tabaka kalınlığı dolrultusunda birim şekil değiştirme değişimi lineer olmasına rağmen, gerilme değişimi lineer değildir.



Şekil 3. 4. Tabaka kalınlığı boyunca birim şekil değişirme ve gerilme değişimi (Jones, 1998).

BÖLÜM IV

4. DENEYSEL METOD

4.1. Tabakalı Kompozit Malzeme

Deneylerde kullanılan tabakalı kompozit malzeme Izoreel Firmasında imal edilmiştir. Örgü malzemeden yapılmış E-glass fiber ve epoksi reçine kullanılmıştır. Hacimsel fiber yüzdesi yaklaşık olarak %64'dür. Cure işlemi 0,2 MPa basınç ve 120 °C ile 4 saatte, postcure ise 100 °C'de 2 saat ile tamamlanmıştır. Daha sonra aynı basınçta oda sıcaklığına soğutulmuştur. Tabakalı kompozit malzeme 10 tabakadan oluşmuştur ve malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4. 1'de görülmektedir (Aslan, 2002).

4.2. Interlaminar Kayma Mukavemetinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Interlaminar kayma mukavemetinin deneysel olarak belirlenmesinde ‘‘Double Notch (ASTM D 3846, 2006)’’ ve ‘‘Short Beam Shear (Üç Noktadan Eğme) (ASTM D 2344, 2006)’’ olmak üzere iki tane ASTM standardı ve henüz bir standardı olmayan ve araştırma halinde olan Dört Noktadan Eğme (Four Point Bend) metodları kullanılır.

Tablo 4.1'de örgü kompozit malzemenin mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 4. 1. Örgü kompozit malzemenin mekanik özellikleri (Aslan, 2002).

Sembol	Değer	Özelliği
V_f	% 64	Fiber hacimsel yüzdesi
ρ	1.78 gr/cm ³	Yoğunluk
E_1	20 GPa	1 yönünde elastisite modülü
E_2	20 GPa	2 yönünde elastisite modülü
G_{12}	4 GPa	Kayma modülü
ν_{12}	0.1171	Poisson oranı
X_t	473 MPa	Fiber doğrultusunda çekme mukavemeti
Y_t	473 MPa	Fiberlere dik doğrultuda çekme mukavemeti
X_c	300 MPa	Fiber doğrultusunda basma mukavemeti
Y_c	300 MPa	Fiberlere dik doğrultuda basma mukavemeti
S	85 MPa ^{† specimen} 90 MPa ^{† osipescue}	Kayma mukavemeti
S_i	35 MPa	Interlaminar kayma mukavemeti

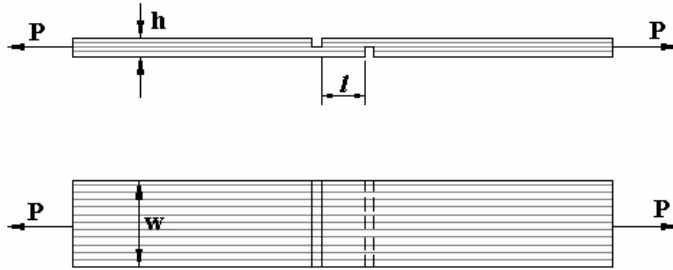
4.2.1. Double Notch Metodu

S_i , interlaminar kayma mukavemetini bulmak için, Double-Notch Shear test numunesi ASTM D 3846 standardında tanımlandığı gibi hazırlanır. Numune Şekil 4.1' de görüldüğü gibi tek yönlü fiber takviyeli tabakalı kompozitten hazırlanmıştır. Uzunluğu 79,5 mm, genişliği 12,7 mm ve kalınlığı 2,5 mm'dir. Numunenin her iki yüzeyinde 6,4 mm aralıkla ve numune kalınlığının yarısı kadar derinlikte iki paralel çentik açılır. Daha sonra bu numune tek eksenli gerilmeye maruz bırakılır. Kayma hasarları, numunede çentikler arasında orta düzlem boyunca meydana gelir. Interlaminar kayma gerilmesi şu şekilde belirlenir.

$$S_i \cong \frac{P}{wl} \quad (4.1)$$

Burada, P hasara uğratan yük, l çentikler arası mesafe ve w numunenin genişliğidir.

Double notch metodu çok iyi sonuç vermesine karşın, malzemedeki çentikleri hazırlamakta büyük güçlük çekilmektedir. Çentiklerin açılmasındaki zorluğun sebebi ise çentikleri açarken fiberlerin hasar görmesidir.



Şekil 4.1. Double Notch kayma test numunesi (ASTM Standard D 3846, 2006).

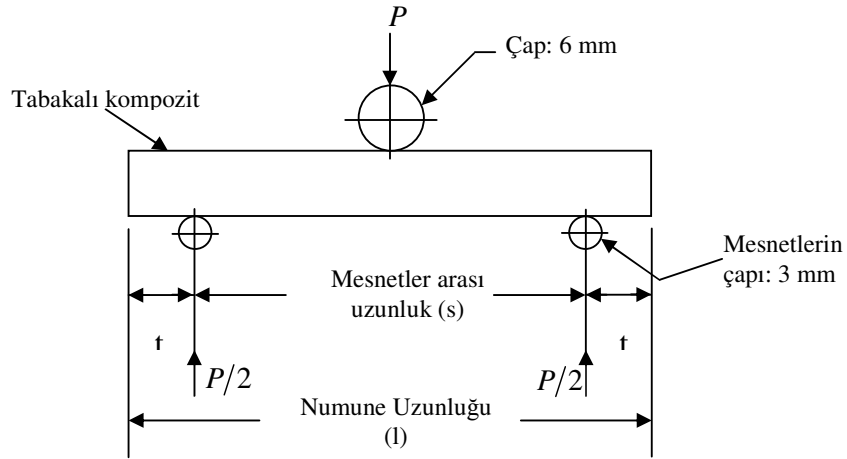
4.2.2. Short Beam Shear Method

Short Beam Shear Method diğer adıyla Üç Noktadan Eğme olarak adlandırılır. Bu metot fiber takviyeli polimer matrisli tabakalı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetini belirlemek için kullanılmaktadır. Tezde kullanılan metot 2006 yılında ASTM D 30 komitesi tarafından onaylanmıştır. Interlaminar kayma mukavemeti S_i , Short Beam Shear test metodu ASTM D 2344'de tanımlandığı gibi hesaplanır. ASTM D 2344 standardı için deney düzeneği şekil 4.2'de görülmektedir. Mesnetlerin çapı 3 mm, silindir yükleme kafasının çapı 6 mm olmalıdır. Mesnetler ve yükleme silindir kafası numunenin her iki tarafından en az 2 mm taşacak kadar fazla olmalıdır. Numunenin mesnet dışında kalan kısımları en az kalınlık kadar olmalıdır. Yüklemeye, ya numune hasara uğrayıp iki parçaya ayrılana kadar, ya da yük değerinde %30'dan

daha büyük düşme oluncaya kadar devam edilir. ASTM D 2344 standardında mesnetler arası açıklığa s , numunenin kalınlığına ise t denilerek bir s/t oranı tanımlanmıştır. s/t oranı 4 ile 8 arasında olduğu zaman Short Beam Shear testi uygulanabilir. Standartta tavsiye edilen oran 4 veya 5'tir. s/t oranı 4' ten küçük olursa basma, 8' den büyük olursa esneklik hasarı oluşur. Tavsiye edilen numune boyutları;

Numune uzunluğu= kalınlık x 6

Numune genişliği= kalınlık x 2 ' dir.



Şekil 4.2. Short Beam Shear test düzeneği.

Interlaminar kayma mukavemeti düşey yüklü, dikdörtgen kesitli kirişlerde kayma gerilmesi formülünden denklem 4.2'de olduğu gibi hesaplanır.

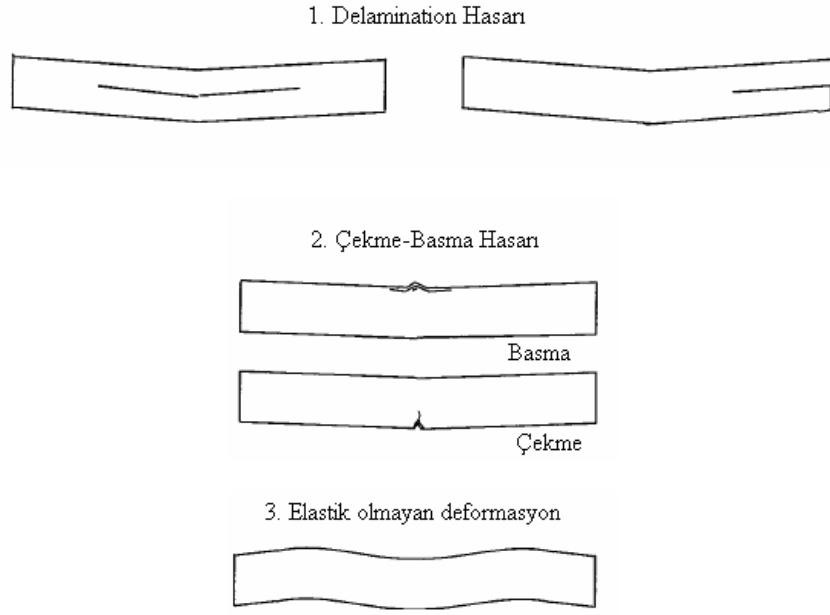
$$S_i = \frac{3 P}{4 w.t} \quad (4.2)$$

Burada, S_i Interlaminar kayma mukavemeti, P maksimum yük, w numunenin genişliği ve t numunenin kalınlığıdır.

Short Beam Shear testinde kullanılan numuneler $s/t=4$ iken çok küçüktür. Mesnetlerin çapı 3 mm, silindirik yükünün çapı 6 mm olduğundan numuneye yükleme yaparken sıkıntılar yaşanır.

Short Beam Shear testinde karşılaşılan tipik hasarlar şöyle sınıflandırılır (Şekil 4.3).

1. Delamination
2. Çekme-basma hasarı
3. Elastik olmayan deformasyon

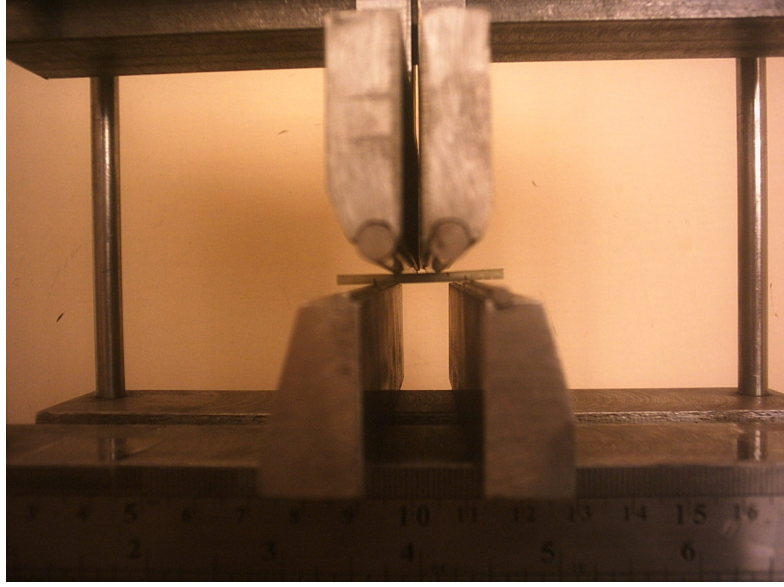


Şekil 4.3. Short Beam Shear testinde karşılaşılan tipik hasarlar.

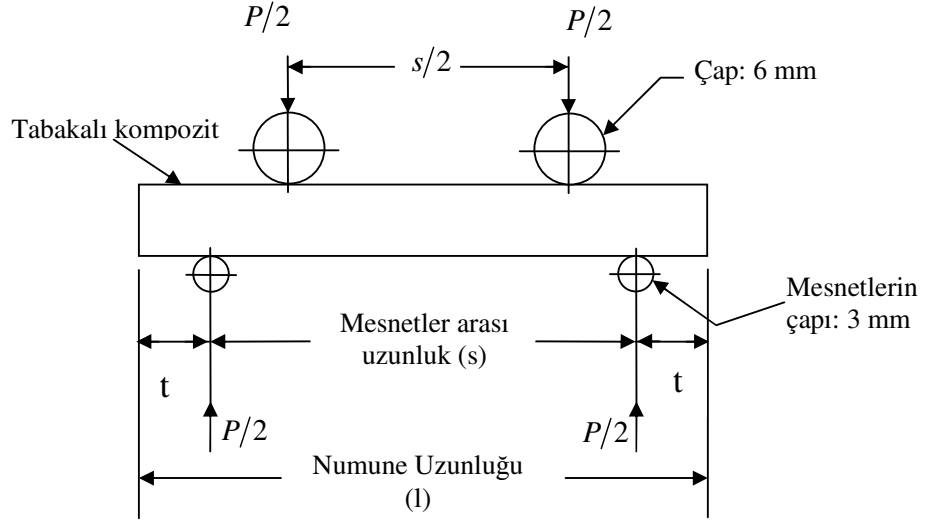
4.2.3. Dört noktadan eğme metodu

Üç noktadan eğme metodunda tekil yük konsantre olarak bir noktadan uygulanmaktadır. Bu nedenle yükün uygulandığı yerde gerilme yığılması oluşmaktadır. Eğer yük ikiye bölünerek uygulanırsa daha düzgün bir gerilme dağılımı elde edilebilir. Böylece dört noktadan eğme test metodu, üç noktadan eğme test metoduna göre daha iyi sonuçlar verir. Bu nedenle bu tezde dört noktadan eğme metodu incelenmiştir. Dört noktadan eğme metodu henüz standartlaştırılmamıştır. Deneysel numunesi ASTM D 2344'e göre hazırlanır. Bu tezde s/t oranı 8 ile 12 arasında seçilmiştir. Yükler arası açıklık mesnetler arası açıklığın yarısı kadardır. Interlaminar kayma mukavemeti düşey yüklü, dikdörtgen kesitli kirişlerde kayma gerilmesi formülünden denklem 4.2 'de olduğu gibi hesaplanır.

Şekil 4.4'te dört noktadan eğme test aparatının görüntüsü, Şekil 4.5'te ise dört noktadan eğme test düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.4. Dört noktadan eğme test aparatının görüntüsü.

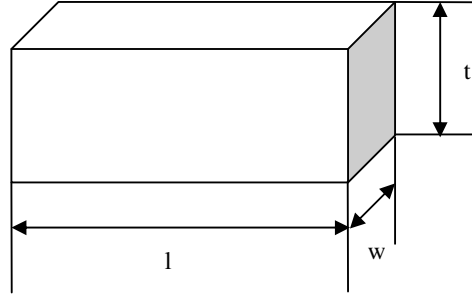


Şekil 4.5. Dört Noktadan Eğme test düzeneği.

4.2.4. Parametreler

Bu tezde E-glass fiber/Epoxy reçineden yapılmış örgü tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Tabakalı kompozit malzeme kalınlığı 2,5 mm ' dir ve 10 tabakadan oluşmuştur. Her bir tabakanın kalınlığı 0,25mm'dir. Üç ve dört noktadan eğme testlerinde genişlik sabit tutulmuş ve 7 mm olarak seçilmiştir. Üç Noktadan Eğme Testi için $s/t=4, 5, 6, 7, 8$ ve dört noktadan eğme testi için $s/t=8, 9, 10, 11, 12$ kullanılmıştır. Her bir deneyde s/t oranı değiştiği için numune

uzunluğu değişmektedir. Şekil 4.6'da numune boyutları görülmektedir. Yapılan deneylerde kullanılan kompozit numunelerin boyutları Tablo 4.2 ve 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.6. Numune boyutları.

Tablo 4.2. Üç noktadan eğme testi için numune boyutları.

	s/t=4	s/t=5	s/t=6	s/t=7	s/t=8
l (mm)	15	17,5	20	22,5	25
w (mm)	7	7	7	7	7
t (mm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

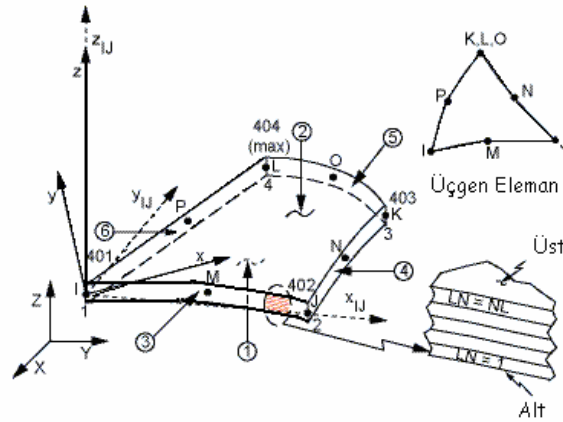
Tablo 4.3. Dört noktadan eğme testi için numune boyutları.

	s/t=8	s/t=9	s/t=10	s/t=11	s/t=12
l (mm)	25	27,5	30	32,5	35
w (mm)	7	7	7	7	7
t (mm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

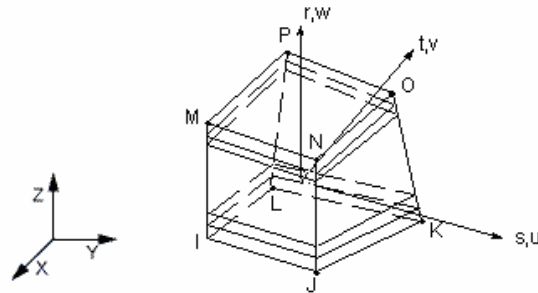
BÖLÜM V

5. NÜMERİK METOD

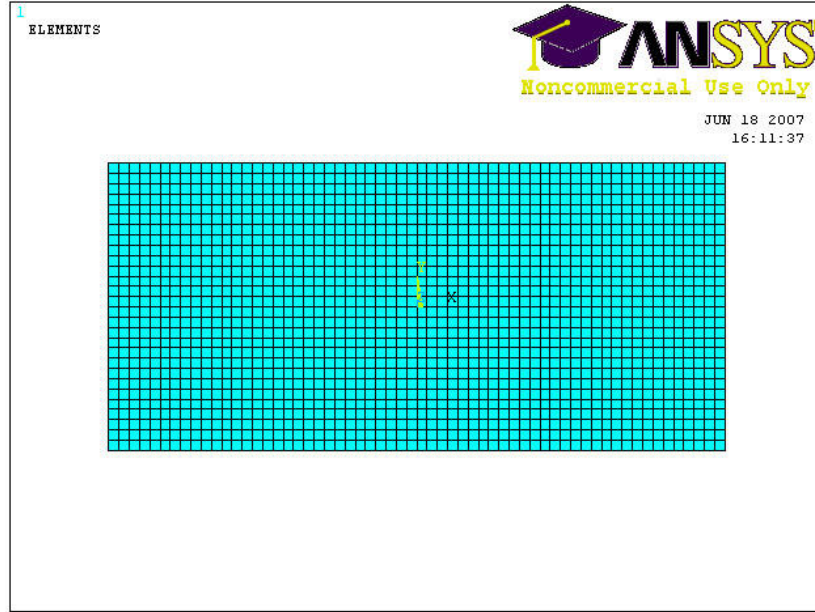
Nümerik analiz için ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. İki boyutlu ve üç boyutlu nümerik analiz yapılmıştır. İki boyutlu analiz için Shell 91 tabakalı kompozit plak elemanı (Şekil5.1), üç boyutlu analiz için Solid46 tabakalı kompozit elemanı (Şekil5.2) kullanılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman analizinde shell91 elemanı kullanılarak 2800 eleman ve 8657 düğüm oluşturulmuştur. Her bir eleman 8 düğüme sahiptir. Üç boyutlu sonlu eleman analizinde solid46 elemanı kullanılarak 3500 eleman ve 4590 düğüm oluşturulmuştur. Solid46 elemanında tabakalar Şekil 5.2’ den görüldüğü gibi z ekseni doğrultusunda yığılmaktadır. Kübik elemanlar 8 düğüme sahiptir. Shell91 ve solid46 elemanları tabakalar arasındaki kayma gerilmelerini (ILSS, ILSXZ, ILSYZ) hesaplayabilmektedir. Oluşturulan sonlu eleman modelleri iki boyutlu analiz için Şekil 5.3’ de, üç boyutlu analiz için Şekil 5.4’ de verilmiştir. Deneylerden bulunan P_{max} yükü ANSYS ‘te yük olarak kullanılmıştır. Üç noktadan eğmede aynen deneylerde olduğu gibi yük düzgün yayılı olarak orta kısımdan uygulanmıştır. Dört noktadan eğmede ise yük ikiye bölünerek uygulanmıştır.



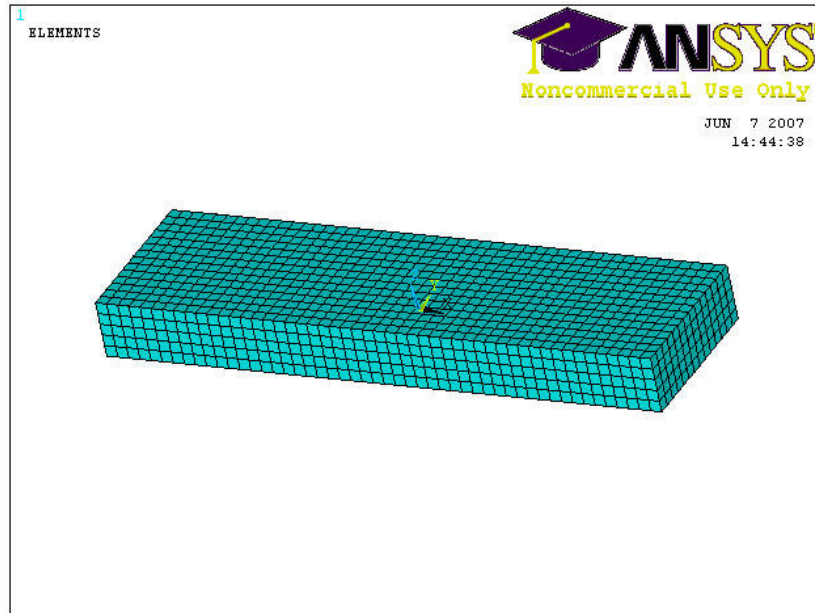
Şekil 5. 1. Shell 91 elemanı.



Şekil 5. 2. Solid 46 elemanı.



Şekil 5. 3. İki boyutlu sonlu eleman modeli.



Şekil 5. 4. Üç boyutlu sonlu eleman modeli.

5.1. Interlaminar Kayma Gerilmesinin Hesaplanması

Interlaminar kayma gerilmesini (ILSS) hesaplamak için iki metot vardır:

1. Düğüm kuvvetleri ile hesap.
2. Tabaka tabaka gerilme değerlendirmesi ile hesap.

1. Düğüm Kuvvetleri:

Kayma gerilmeleri bütün hacim üzerinden hesaplanır.

$$\sigma_{xz} = \frac{1}{4} \left[\frac{F_M^x - F_I^x}{A^{I-M}} + \frac{F_N^x - F_J^x}{A^{J-N}} + \frac{F_O^x - F_K^x}{A^{K-O}} + \frac{F_P^x - F_L^x}{A^{L-P}} \right] \quad (5.1)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{1}{4} \left[\frac{F_M^y - F_I^y}{A^{I-M}} + \frac{F_N^y - F_J^y}{A^{J-N}} + \frac{F_O^y - F_K^y}{A^{K-O}} + \frac{F_P^y - F_L^y}{A^{L-P}} \right] \quad (5.2)$$

Burada;

σ_{xz}, σ_{yz} = Ortalama transverse kayma gerilmesi bileşenleri.

$F_I^x, F_I^y, vb.$ = I düğümündeki kuvvetler.

$A^{I-M}, vb.$ = I, M düğümleri ile ilgili alan (Temel düzlemdeki, en yakın integrasyon noktasındaki Jacobian'ın belirlenmesi ile değerlendirilir.)

2. Tabaka Tabaka Gerilme Değerlendirmesi:

Interlaminar gerilme için tabakalardaki kayma gerilmesi basit bir şekilde kullanılır. Böylece, elemanın x yönündeki Interlaminar kayma gerilmesi şekil 5. 1'deki eleman ve düğüm noktalarına göre;

$$\sigma_{xz}^1 = \sigma_{xz} \text{ 1. tabakanın altı. (I-J-K-L düzleminde)} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{xz}^{N_\ell+1} = \sigma_{xz} \text{ } N_\ell \text{. tabakanın üstü. (M-N-O-P düzleminde)} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{xz}^j = \frac{1}{2} (\sigma_{xz} \rightarrow (j-1) \text{. tabakanın üstü} + \sigma_{xz} \rightarrow j \text{. tabakanın altı}) \quad (5.5)$$

Burada; $1 < j < N_\ell$ dir.

Tüm tabakalardaki σ_{xz} ve σ_{yz} 'nin toplam vektörleri ‘‘MAX. ILSS’’ olarak adlandırılır (ANSYS,2007)

5.2. Tsai-Wu Hasar Kriteri

Tsai-Wu hasar kriteri denklem 5.6'daki gibi hesaplanmaktadır. Kriterin değerinin 1' den büyük olması kompozit malzemelerde hasar olduğunu göstermektedir.

$$\xi = 1.0 / \left(-\frac{B}{2A} + \sqrt{(B/2A)^2 + 1.0/A} \right) \quad (5.6)$$

Burada;

ξ = Tsai-Wu hasar kriteri.

$$A = -\frac{(\sigma_x)^2}{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f} - \frac{(\sigma_y)^2}{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f} - \frac{(\sigma_z)^2}{\sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f} + \frac{(\sigma_{xy})^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} + \frac{(\sigma_{yz})^2}{(\sigma_{yz}^f)^2} + \frac{(\sigma_{xz})^2}{(\sigma_{xz}^f)^2} \quad (5.7)$$

$$+ \frac{C_{xy} \sigma_x \sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f}} + \frac{C_{yz} \sigma_y \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}} + \frac{C_{xz} \sigma_x \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}}$$

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{xt}^f} + \frac{1}{\sigma_{xc}^f} \right) \sigma_x + \left(\frac{1}{\sigma_{yt}^f} + \frac{1}{\sigma_{yc}^f} \right) \sigma_y + \left(\frac{1}{\sigma_{zt}^f} + \frac{1}{\sigma_{zc}^f} \right) \sigma_z \quad (5.8)$$

C_{xy}, C_{yz}, C_{xz} = Sırasıyla x-y, y-z, x-z eksenlerinin tsai-wu teorisinin coupling katsayısıdır (ANSYS,2007).

BÖLÜM VI

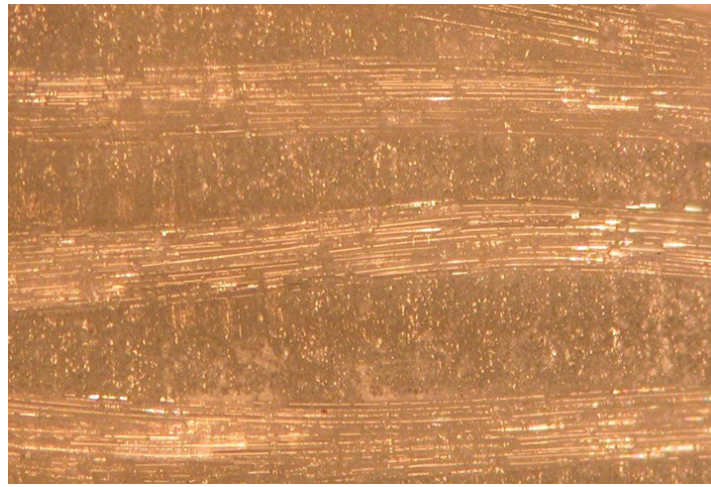
6. SONUÇLAR

6.1. Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti

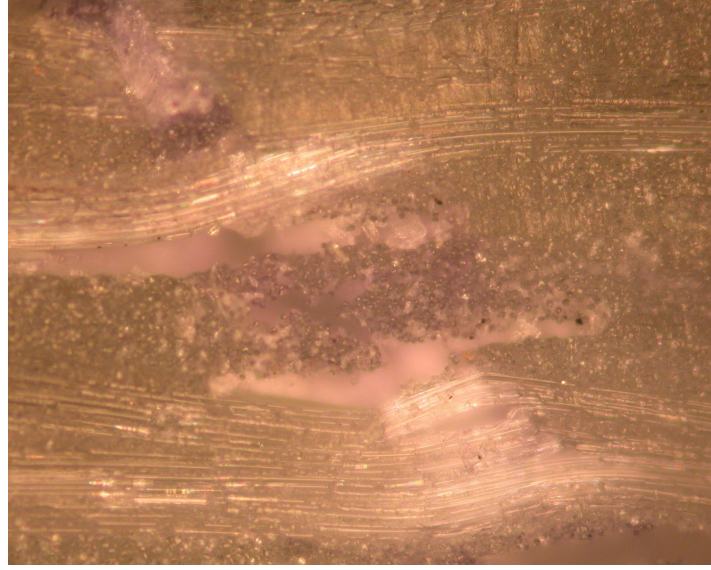
Bu tezde E-glass fiber/Epoxy reçineden yapılmış örgü tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Tabakalı kompozit malzeme kalınlığı 2,5 mm ve 10 tabakadan oluşmuştur. Her bir tabakanın kalınlığı 0,25mm'dir. Genişlik sabit tutularak 7 mm seçilmiştir. Tabakalı kompozit malzeme çapları 3 mm olan mesnetler arasına ve çapı 6 mm olan yükleme silindir kafasının arasına konup, basma yükü uygulanmış ve P_{max} yükü kaydedilmiştir. Yükleme, ya numune hasara uğrayıp iki parçaya ayrılana kadar, ya da yük değerinde %30'dan daha büyük düşme oluncaya kadar devam edilmiştir. Deneylelerden bulunan P_{max} yükü ANSYS 'te yük olarak kullanılmıştır. Üç noktadan eğmede yük düzgün yayılı olarak orta kısımdan uygulanmıştır. Dört noktadan eğmede ise iki noktadan uygulanmıştır. Yükler arası açıklık, mesnetler arası açıklığın yarısı kadardır. Deneyleler beş kez tekrar edilerek ortalama değer elde edilmiştir.

Şekil 6.1'de hasarsız tabakalı kompozit malzemenin mikroskobik görüntüsü verilmiştir. Deney yapıldıktan sonra hasarlı tabakalı kompozit malzemenin mikroskobik görüntüsü Şekil 6.2'de görülmektedir. Oluşan hasar tabakaların ayrışması yani delamination hasarıdır.

Üç noktadan ve dört noktadan eğme testlerinden elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilmiştir. Tablo 6.3'de ise deneysel ve üç boyutlu nümerik analiz arasındaki yüzde fark görülmektedir.



Şekil 6.1. Hasarsız tabakalı kompozit malzemenin mikroskobik görüntüsü.



Şekil 6.2. Hasarlı tabakalı kompozit malzemenin mikroskopik görüntüsü.

Tablo 6. 1. Üç noktadan eğme testi deneysel ve nümerik sonuçları

Üç Noktadan Eğme							
s/t	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Maksimum Yük (N)	Deneysel Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti (MPa)	Nümerik Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti SHELL91 (MPa)	Nümerik Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti SOLID46 (MPa)
4	2.5	7	15	896	38,4	43,823	43,371
5	2.5	7	17,5	860	36,85	42,213	41,441
6	2.5	7	20	793	33,98	38,928	38,252
7	2.5	7	22,5	621	26,61	30,488	29,293
8	2.5	7	25	528	22,62	25,928	24,347

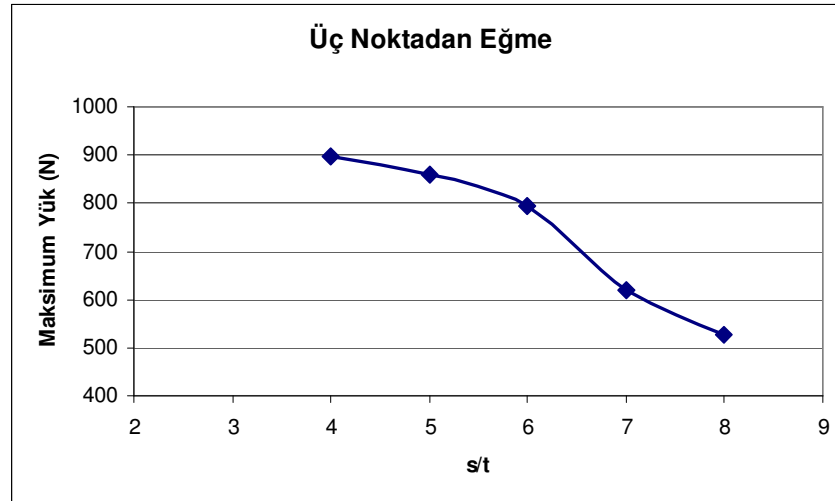
Tablo 6. 2. Dört noktadan eğme testi deneysel ve nümerik sonuçları

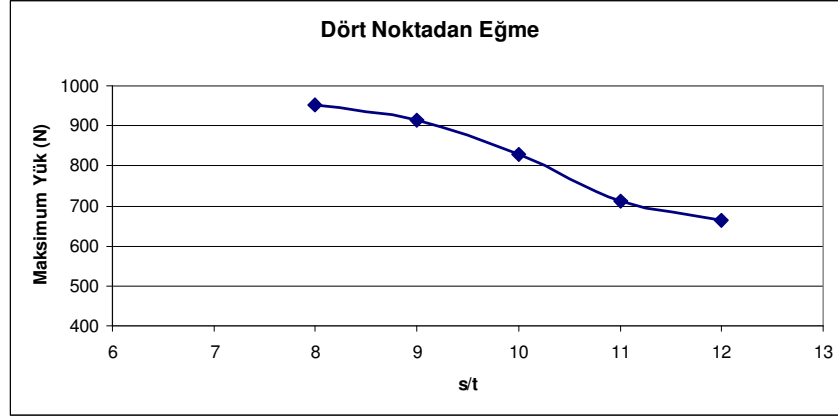
Dört Noktadan Eğme							
s/t	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Maksimum Yük (N)	Deneysel Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti (MPa)	Nümerik Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti SHELL91 (MPa)	Nümerik Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti SOLID46 (MPa)
8	2.5	7	25	952	40,8	46,659	44,992
9	2.5	7	27,5	913	39,12	44,735	42,849
10	2.5	7	30	828	35,48	40,625	38,582
11	2.5	7	32,5	712	30,51	34,983	32,947
12	2.5	7	35	665	28,5	32,64	30,581

Tablo 6.3. Deneysel ve üç boyutlu nümerik analiz arasındaki yüzde fark.

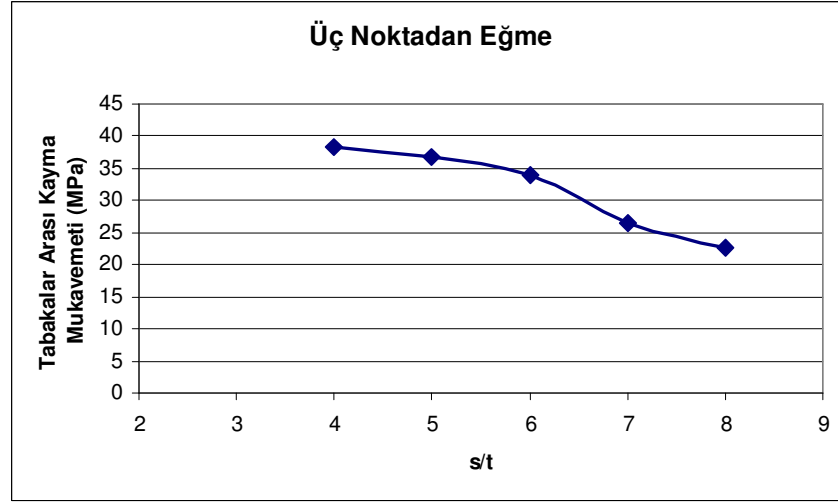
Üç Noktadan Eğme				Dört Noktadan Eğme			
s/t	Deneysel Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti (MPa)	Nümerik Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti SOLID46 (MPa)	% Fark	s/t	Deneysel Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti (MPa)	Nümerik Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti SOLID46 (MPa)	% Fark
4	38,4	43,371	12,94	8	40,8	44,992	10,27
5	36,85	41,441	12,45	9	39,12	42,849	9,53
6	33,98	38,252	12,57	10	35,48	38,582	8,74
7	26,61	29,293	10,08	11	30,51	32,947	7,98
8	22,62	24,347	7,63	12	28,5	30,581	7,30

Şekil 6.3 ve 6.4'de üç noktadan ve dört noktadan eğme deneylerinde P_{max} yüküne karşılık s/t oranı grafikleri verilmiştir. Şekil 6.5 ve 6.6'de üç noktadan ve dört noktadan eğme deneyleri ile elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) görülmektedir. Şekil 6.7'te ise üç noktadan ve dört noktadan eğmenin grafikleri birlikte görülmektedir. s/t=8 durumu için iki metod karşılaştırılabilir ve s/t=8 iken dört noktadan eğme metodunun daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Dört noktadan eğmede s/t=8 için elde edilen sonuç ile üç noktadan eğmede s/t=4 için elde edilen sonuç hemen hemen aynıdır ve dört noktadan eğme biraz daha yüksektir. Benzer sonuçlar Ferraboli ve Kedward (2003) ve Adams (1995) tarafından da tek yönlü takviyeli kompozitler için bulunmuştur. Bu tezde kullanılan kompozit ise örgü takviyeli kompozittir.

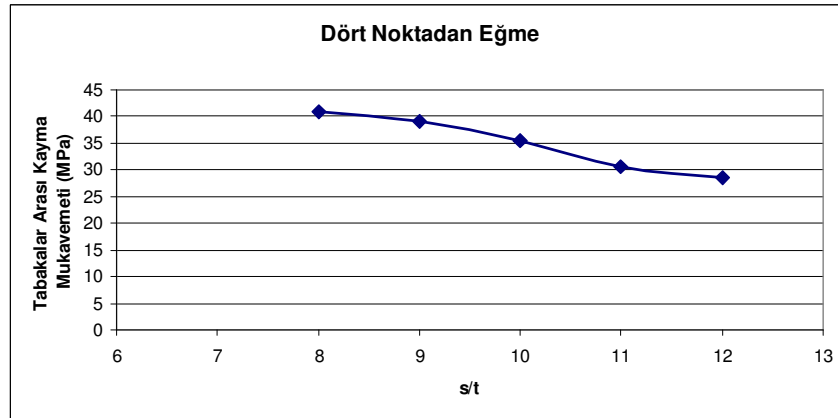
**Şekil 6. 3.** Üç noktadan eğme deneylerinde P_{max} yüküne karşılık s/t oranı.



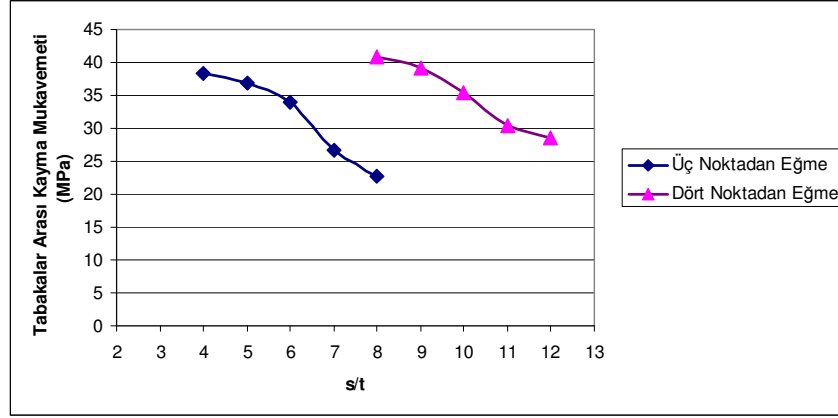
Şekil 6.4. Dört noktadan eğme deneylerinde P_{max} yüküne karşılık s/t oranı.



Şekil 6.5. Üç noktadan eğme deneylerinden elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti.



Şekil 6.6. Dört noktadan eğme deneylerinden elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti.



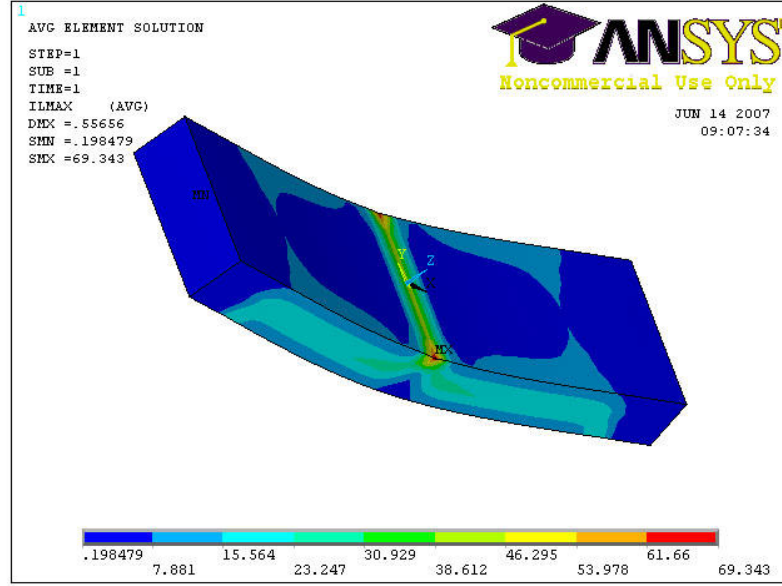
Şekil 6.7. Üç ve dört noktadan eğme deneylerinden elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti.

$s/t=4$ iken üç noktadan eğme deneyini yapmak oldukça zordur. Çünkü numunenin boyutları $s/t=4$ için çok küçüktür. Örneğin bu tezde $s/t=4$ ise numune boyu $l=15$ mm'dir. Mesnet çapları 3 mm ve yükleme silindirinin kafası 6 mm olduğundan yükleme yaparken zorluklar yaşanır. Üç noktadan eğme için $s/t=8$ seçilirse elde edilen interlaminar kayma mukavemeti çok düşüktür ve tabakalı kompozitin interlaminar kayma mukavemetini yanlış değerlendirmemize yol açar. Oysa $s/t=8$, $l=25$ mm seçilerek ve dört noktadan eğme testinde deneyler yapılırsa gerçek interlaminar kayma mukavemeti elde edilir.

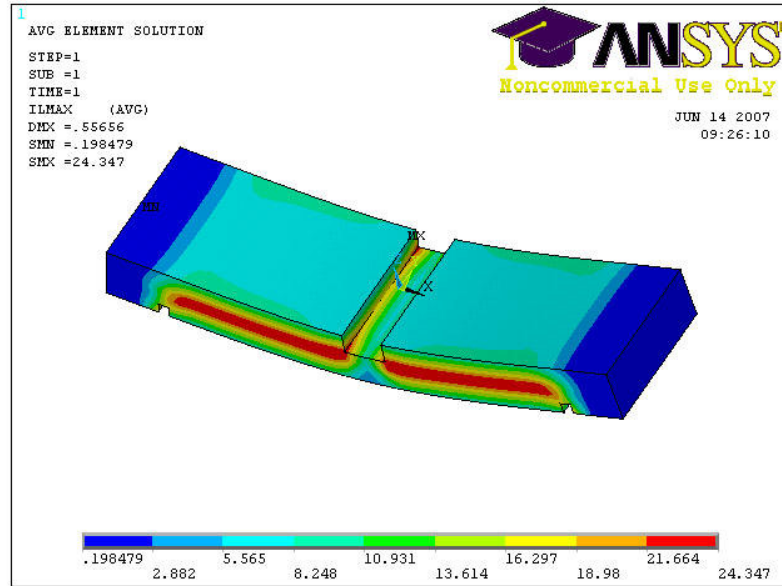
ANSYS'te $s/t=8$ oranı için üç nokta ve dört noktadan eğme sonuçları karşılaştırılmıştır. Interlaminar maksimum gerilmeler (ILMAX), normal gerilmeler (SX, SY, SZ) ve kayma gerilmeleri (SXY, SYZ, SXZ), z yönündeki çökme, Tsai-Wu hasar kriteri elde edilmiştir.

s/t oranı 8 için üç noktadan eğme deneyinde tabakalar arası kayma gerilmesi dağılımı şekil 6.6'da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yükün ve mesnetlerin uygulandığı yerlerde gerilme yığılması oluşmaktadır. Bu bölgedeki gerilmeler tabakalar arası kayma gerilmesini değerlendirilirken bizi yanlış değerlendirmeye sevk etmektedir. Bu nedenle ANSYS'te sonuçlar değerlendirilirken yükün uygulandığı yerdeki elemanlar ve mesnet bölgesindeki elemanlar göz önüne alınmamıştır. Şekil 6.8'de üç noktadan eğmede gerilme değeri ILSS 69,343 MPa iken, Şekil 6.9'da mesnetler ve yüklerin olduğu bölgedeki elemanlar çıkarıldığında ILSS 24,347 MPa olduğu görülmektedir. Şekil 6.10'da dört noktadan eğmede gerilme değeri ILSS 62,536 MPa iken, Şekil 6.11'de mesnetler ve yüklerin olduğu bölgedeki elemanlar çıkarıldığında ILSS 44,992 MPa olduğu görülmektedir. Dört noktadan eğmede gerilme yığılmasının olduğu mesnet bölgesinde toplam 14 eleman, yük bölgesinde ise toplam 28 eleman göz önüne alınmadığında elde edilen sonuçlar, deneysel interlaminar kayma mukavemeti ile uyumludur. Üç noktadan eğmede ise mesnet bölgesinde toplam 14 eleman, yük bölgesinde ise toplam 112 eleman göz önüne alınmamıştır. ANSYS'te interlaminar kayma mukavemeti belirlenirken tüm üç boyutlu analizde mesnet

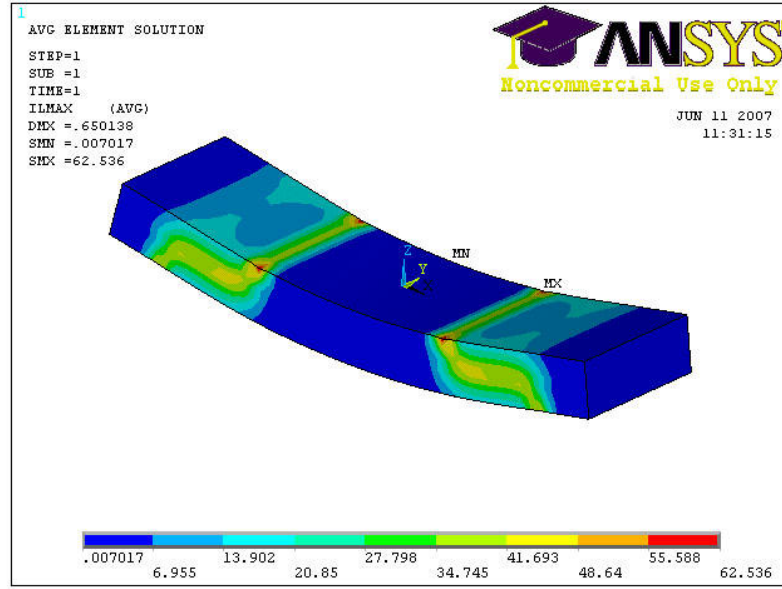
ve yük bölgelerinde aynı sayıda eleman çıkarılmıştır. Ferraboli ve Kedward'da (2003), ANSYS'te sonuçları değerlendirirken bu bölgeleri dikkate almamıştır.



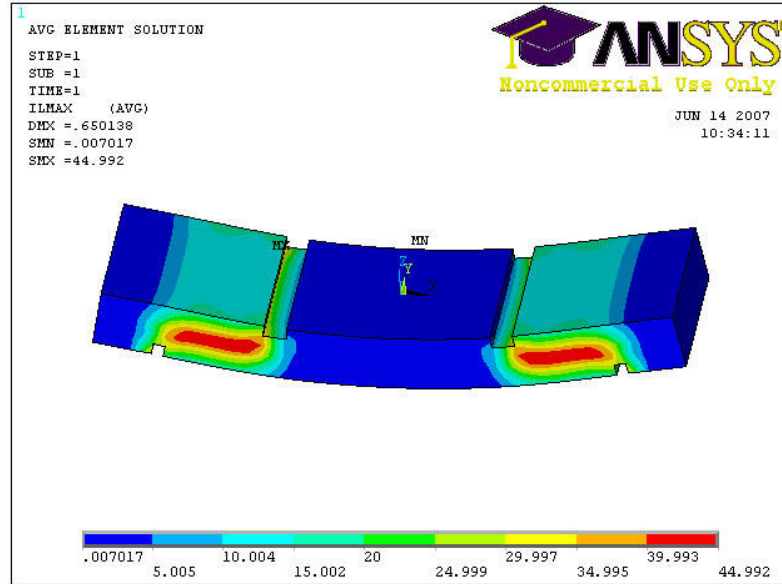
Şekil 6.8. $s/t=8$ için üç noktadan eğme-interlaminar maksimum kayma gerilmesi (MPa).



Şekil 6.9. $s/t=8$ için üç noktadan eğme-mesnetler ve yüklerin olduğu bölgedeki elemanlar çıkarıldığında interlaminar maksimum kayma gerilmesi (MPa).

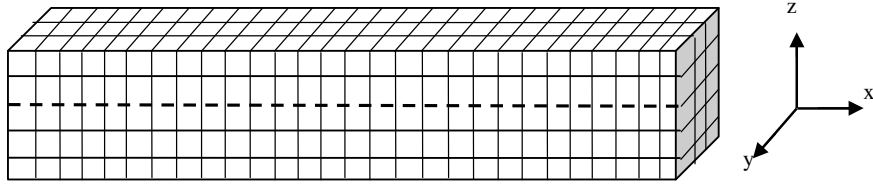


Şekil 6.10. $s/t=8$ için dört noktadan eğme-interlaminar maksimum kayma gerilmesi (MPa).

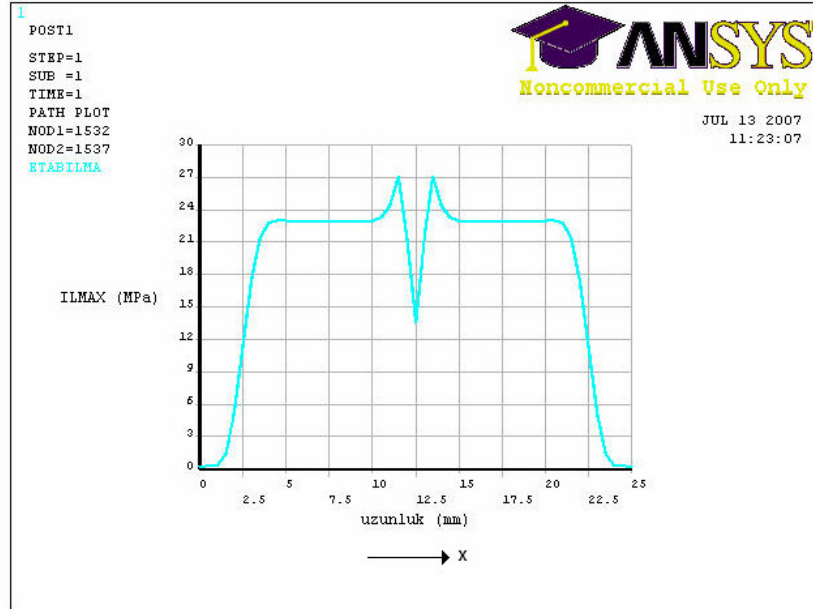


Şekil 6.11. $s/t=8$ için dört noktadan eğme-mesnetler ve yüklerin olduğu bölgedeki elemanlar çıkarıldığında interlaminar maksimum kayma gerilmesi (MPa).

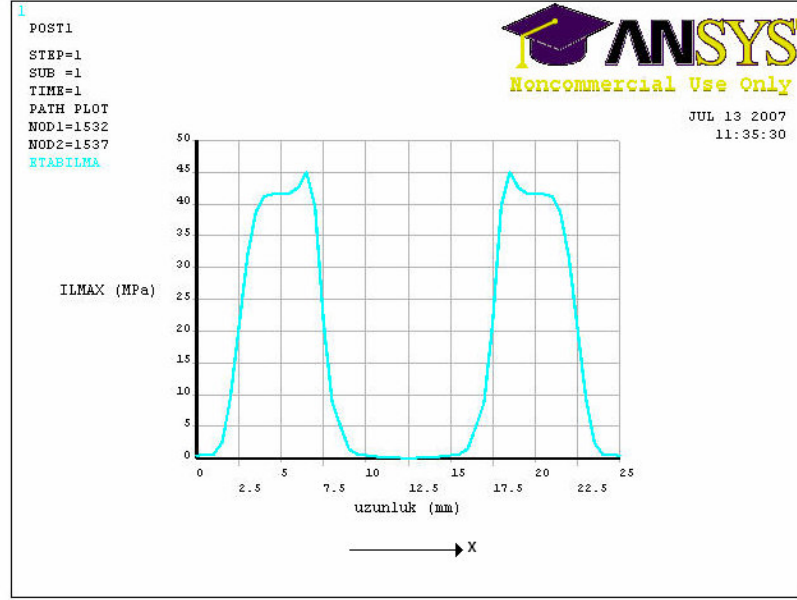
Tabakalı kompozit malzemenin orta kısmından Şekil 6.12’de görüldüğü gibi uzunluk boyunca bir hat alınıp üç ve dört nokta için interlaminar maksimum kayma gerilmesi değerlendirilmiştir. Şekil 6.13ve 6.14’de uzunluk boyunca interlaminar kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir. Burada maksimum interlaminar kayma gerilmesi yüklemenin olduğu yerlerdedir. Yalnız üç noktadan eğme için tekil yükün uygulandığı yerde gerilme değerlerinde sıçramalar görülmektedir.



Şekil 6.12. Tabakalı kompozit malzemenin orta kısmından uzunluk boyunca alınan hat.

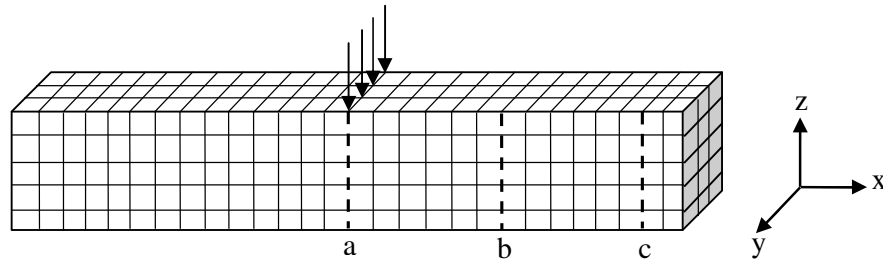


Şekil 6.13. Üç noktadan eğmede uzunluk boyunca interlaminar kayma gerilmesi.

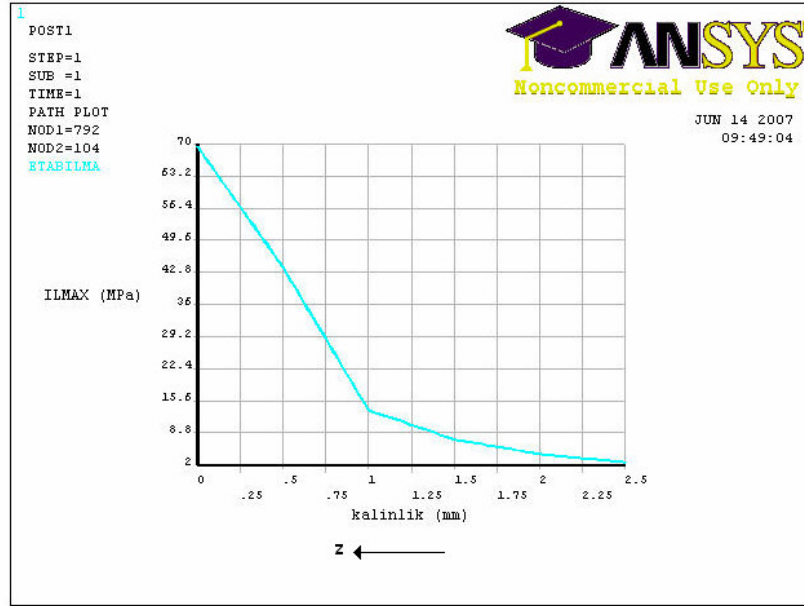


Şekil 6.14. Dört noktadan eğmede uzunluk boyunca interlaminar kayma gerilmesi.

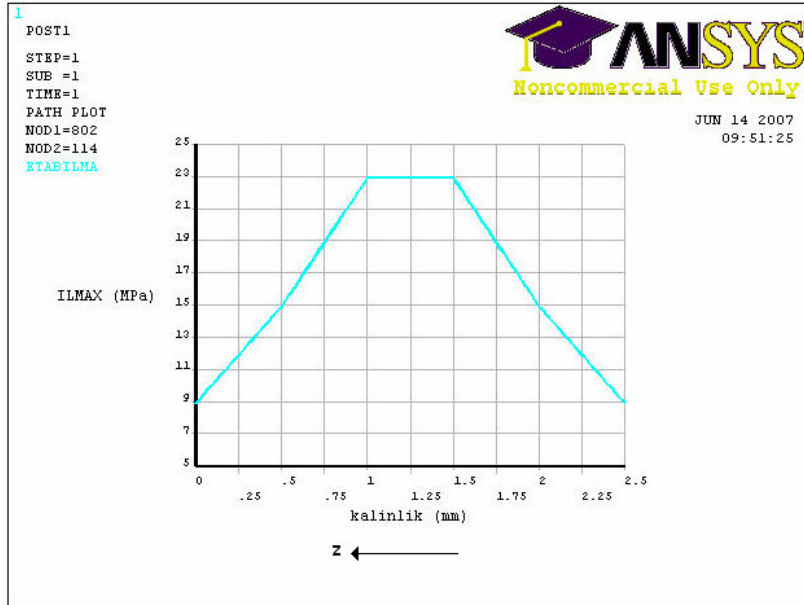
Tabakalı kompozit malzemenin kalınlığı doğrultusunda interlaminar gerilme dağılımını elde etmek için üç ayrı bölge Şekil 6.15'te olduğu gibi seçilmiştir. Yükün uygulandığı yer (a), mesnetin olduğu yer (c) ve son olarak yük ve mesnet arasındaki orta bölge (b). Üç noktadan eğme için a, b, c bölgelerindeki maksimum interlaminar kayma gerilmesi grafikleri Şekil 6.16-18'de görülmektedir. Yükün uygulandığı yerde (a bölgesi-Şekil 6.16) maksimum interlaminar gerilme değeri en üstteki tabakalar arasındadır. Alt tabakalara doğru interlaminar gerilmeler gittikçe azalmaktadır ve en alt iki tabaka arasında ise en düşük değerdedir. Yük-mesnet arası bölgede (b bölgesi-Şekil 6.17) maksimum tabakalar arası gerilme orta bölgededir. Orta bölgelere doğru gerilme değerleri gittikçe azalmaktadır. Mesnet bölgesinde ise (c bölgesi-Şekil 6.18) mesnede en yakın tabakalar arasında interlaminar kayma gerilmesi maksimumdur. En üstteki tabakalar arasındaki gerilmeler ise minimumdur.



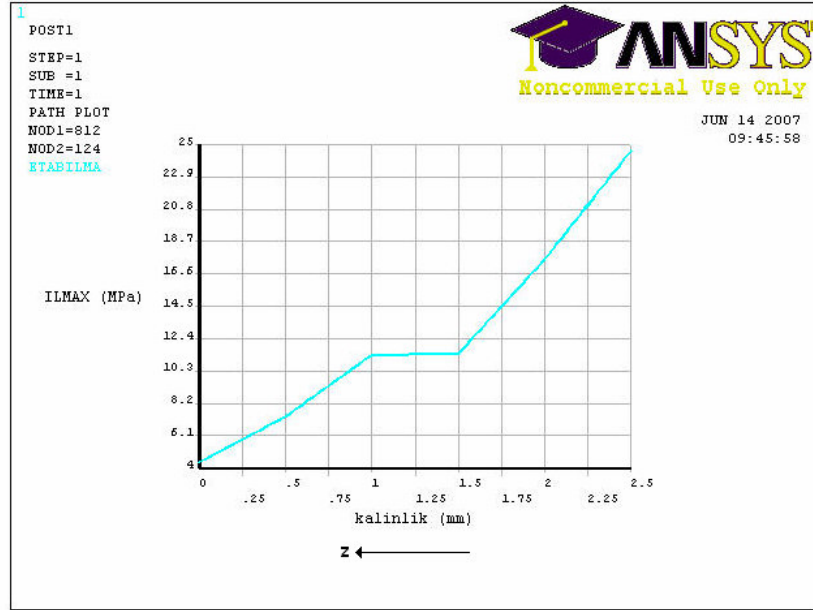
Şekil 6.15. Üç noktadan eğmede tabakalı kompozit malzemenin mesnet, yük ve mesnet-yük arasında kalınlık boyunca alınan hat.



Şekil 6.16. Yükün uygulandığı yerde kalınlık boyunca interlaminar kayma gerilmesi-a bölgesi.

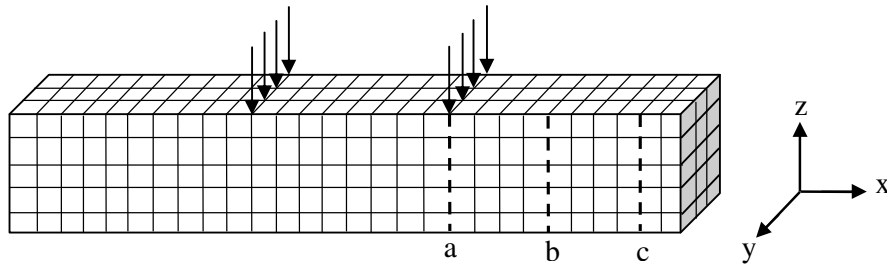


Şekil 6.17. Yük ve mesnet arasındaki bir noktada kalınlık boyunca interlaminar kayma gerilmesi-b bölgesi.

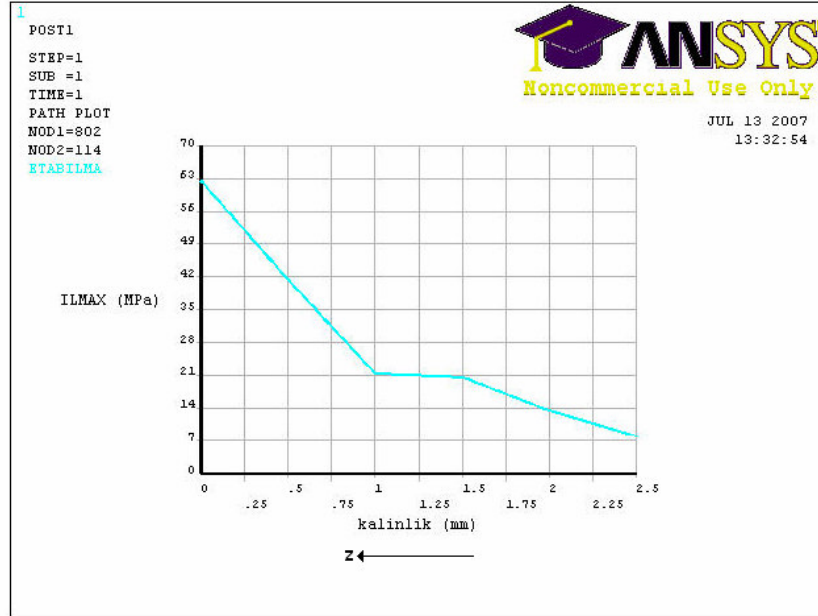


Şekil 6.18. Mesnetin uygulandığı yerde kalınlık boyunca interlaminar kayma gerilmesi-c bölgesi.

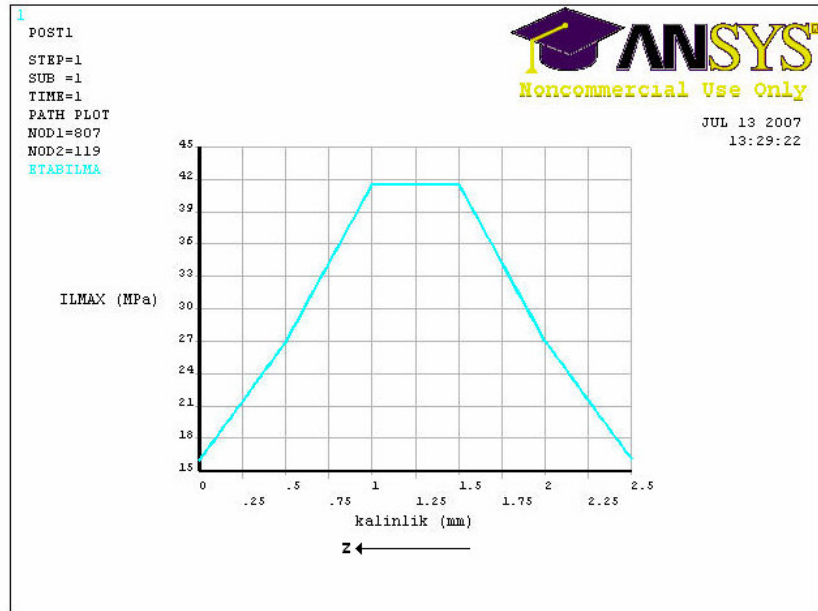
Tabakalı kompozit malzemenin kalınlığı doğrultusundaki gerilme dağılımı Şekil 6.19'da görüldüğü gibi dört noktadan eğme içinde elde edilmiştir ve eğrilerin üç noktadan eğme ile aynı olduğu görülmüştür (Şekil 6.20–22). Yükün uygulandığı yerde (a bölgesi-Şekil 6.20) maksimum interlaminar gerilme değeri en üstteki tabakalar arasındadır. Alt tabakalara doğru interlaminar gerilmeler gittikçe azalmaktadır ve en alt iki tabaka arasında ise en düşük değerdedir. Yük-mesnet arası bölgede (b bölgesi-Şekil 6.21) maksimum tabakalar arası gerilme orta bölgededir. Alt ve üst bölgelere doğru gerilme değerleri gittikçe azalmaktadır. Mesnet bölgesinde ise (c bölgesi-Şekil 6.22) mesnede en yakın tabakalar arasında kayma gerilmesi maksimumdur. En üstteki tabakalar arasındaki kayma gerilmeleri ise minimumdur.



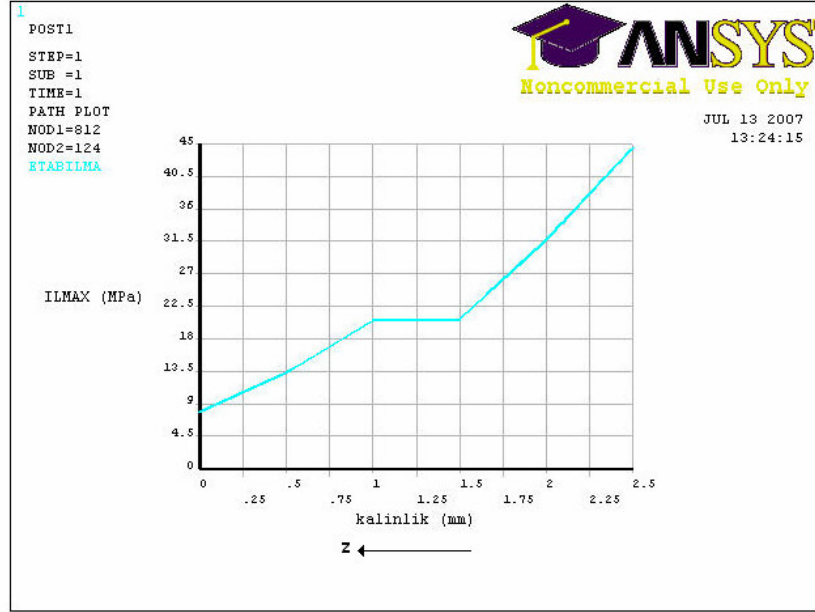
Şekil 6.19. Dört noktadan eğmede tabakalı kompozit malzemenin mesnet, yük ve mesnet-yük arasında kalınlık boyunca alınan hat.



Şekil 6.20. Yükün uygulandığı yerde kalınlık boyunca interlaminar kayma gerilmesi-a bölgesi.

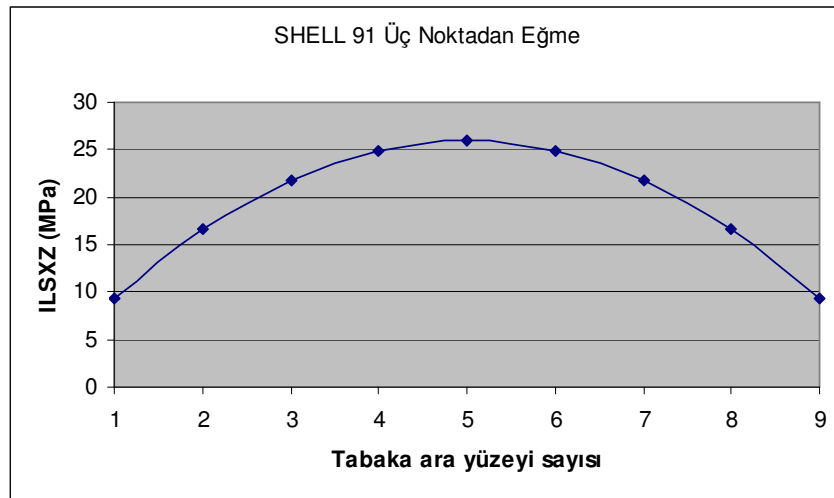


Şekil 6.21. Yük ve mesnet arasındaki bir noktada kalınlık boyunca interlaminar kayma gerilmesi-b bölgesi.

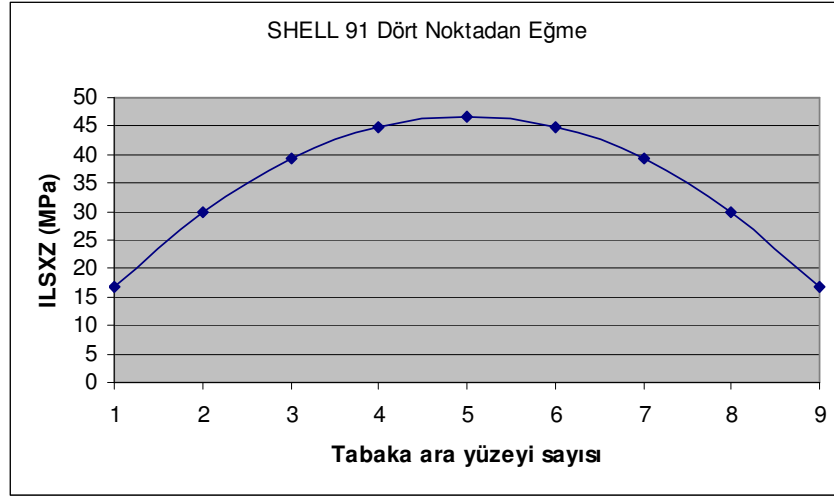


Şekil 6.22. Mesnetin uygulandığı yerde kalınlık boyunca interlaminar kayma gerilmesi-c bölgesi.

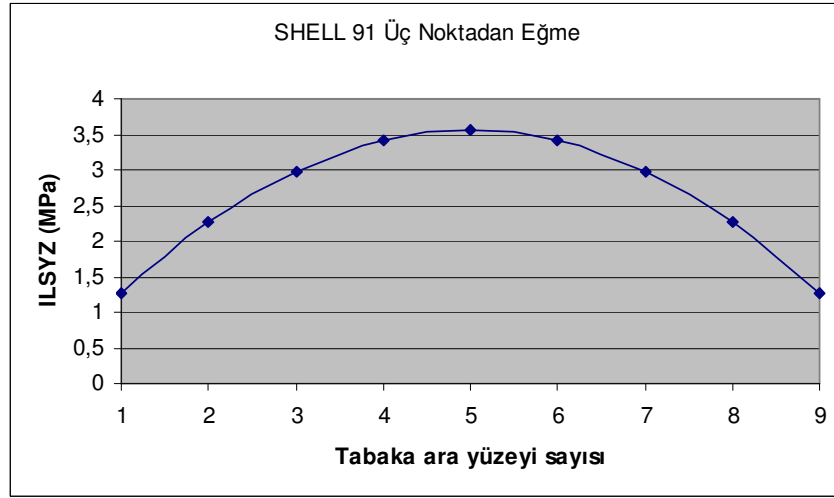
Nümerik analizde Shell91 elemanı için elde edilen sonuçlardan üç ve dört noktadan eğmede s/t oranı 8 için her bir tabakanın ara yüzeyinde meydana gelen tabakalar arası XZ gerilmesi (ILSXZ) ve tabakalar arası YZ gerilmesi (ILSYZ) sırasıyla Şekil 6.23–26’da görülmektedir. Grafiklerden de görüleceği gibi ILSXZ ve ILSYZ’deki en büyük kayma gerilmeleri en orta tabaka ara yüzeyinde meydana gelmektedir. Alt ve üst yüzeylere yaklaştıkça gerilmeler azalmaktadır.



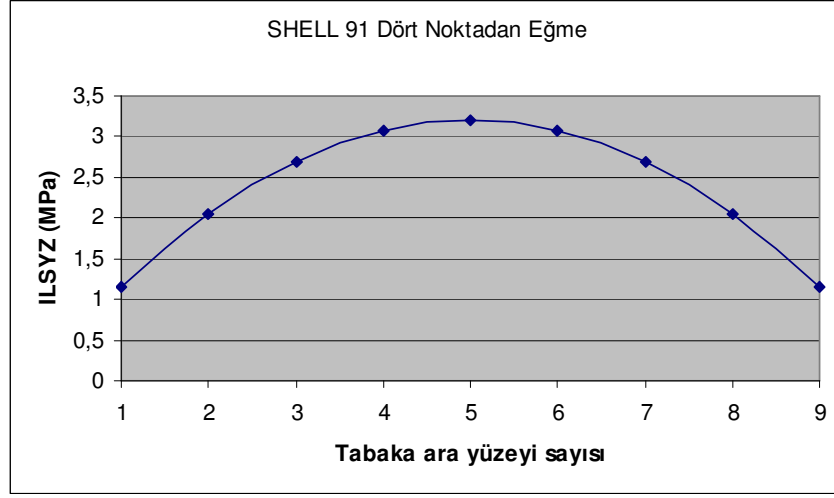
Şekil 6.23. Shell91, üç noktadan eğmede tabaka ara yüzeyi sayısı-ILSXZ.



Şekil 6.24. Shell91, dört noktadan eğmede tabaka ara yüzey sayısı-ILSXZ.



Şekil 6.25. Shell91, üç noktadan eğmede tabaka ara yüzey sayısı-ILSYZ.

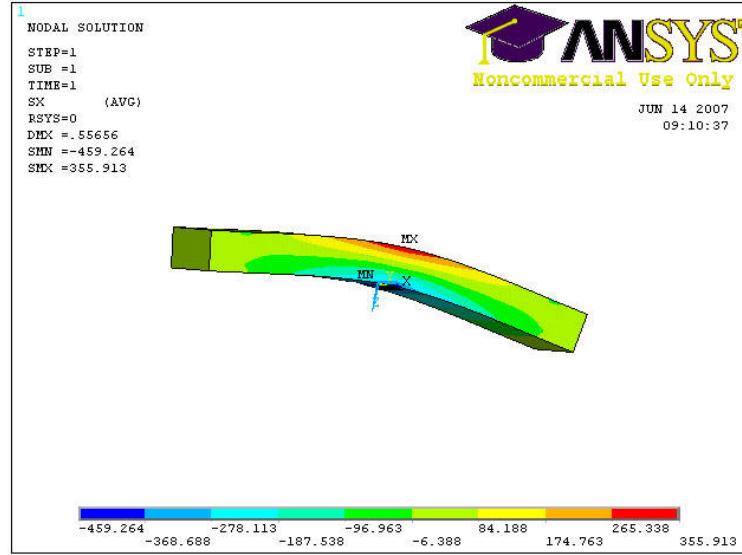


Şekil 6.26. Shell91, dört noktadan eğmede tabaka ara yüzey sayısı-ILSYZ.

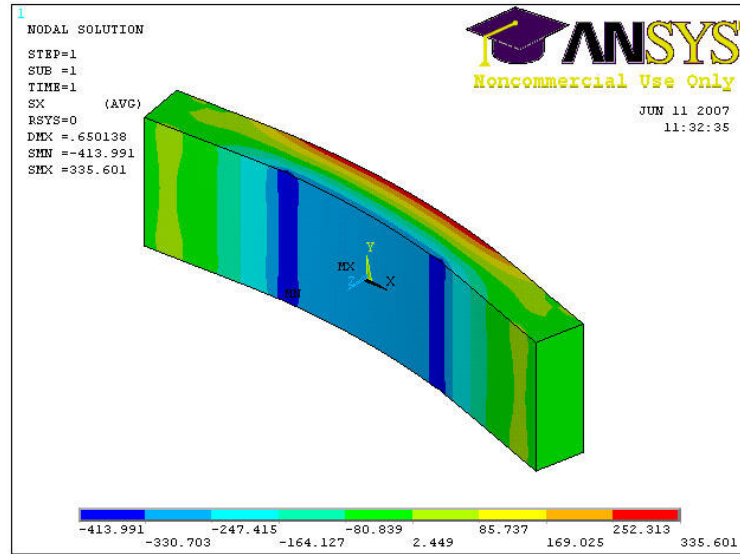
6.2. Gerilme Analizi

Üç noktadan ve dört noktadan eğme testlerinde deneysel olarak bulunan P_{max} yükü nümerik analizde kullanılmıştır. Üç noktadan eğme numunesini hasara uğratan yük $P=528$ N, dört noktadan eğme numunesini hasara uğratan yük $P=952$ N'dur. Üç boyutlu analiz sonucunda tabakalı kompozit malzemede oluşan S_x , S_y , S_z normal gerilmeleri ve S_{xy} , S_{yz} , S_{xz} kayma gerilmeleri ayrıca z yönündeki deplasman bulunmuştur. Şekil 6.27'de üç ve dört noktadan eğme için S_x normal gerilmesi gösterilmiştir. Yükün uygulandığı yerlerde ve mesnet bölgelerinde gerilme yığılması olduğu görülmektedir. Basma gerilmelerine bakıldığında yükün uygulandığı yerlerde basma hasarları meydana gelmektedir. Kullanılan kompozit malzemenin basma mukavemeti 300 MPa, üç noktadan eğme testinden elde edilen basma gerilmesinin değeri 459 MPa, dört noktadan eğme testinden elde edilen basma gerilmesinin değeri 413 MPa'dır. Malzemenin çekme mukavemeti 473 MPa, üç noktadan eğmede 355 MPa, dört noktadan eğmede 335 MPa olduğunda çekmede hasar meydana gelmemiştir.

Şekil 6.28'da S_y , Şekil 6.29'da S_z normal gerilmeleri görülmektedir. S_y normal gerilmesinin değeri oldukça düşüktür. S_z normal gerilmesinde S_x 'de olduğu gibi basma gerilmesinin değeri çok yüksektir. Çekme gerilmesinin değeri düşüktür. Üç noktadan eğmede $P_{max}=528$ N, dört noktadan eğmede $P_{max}=952$ N olduğu göz önüne alınırsa hasar anında S_x , S_y , S_z normal gerilmelerin üçünde de üç noktadaki eğmedeki gerilme değerleri, dört noktadan eğmedeki gerilme değerlerinden oldukça yüksektir. Çünkü dört noktadan eğmede $P_{max}=952$ N değerindeki yük ikiye bölünerek $P=476$ N olarak uygulanmaktadır.

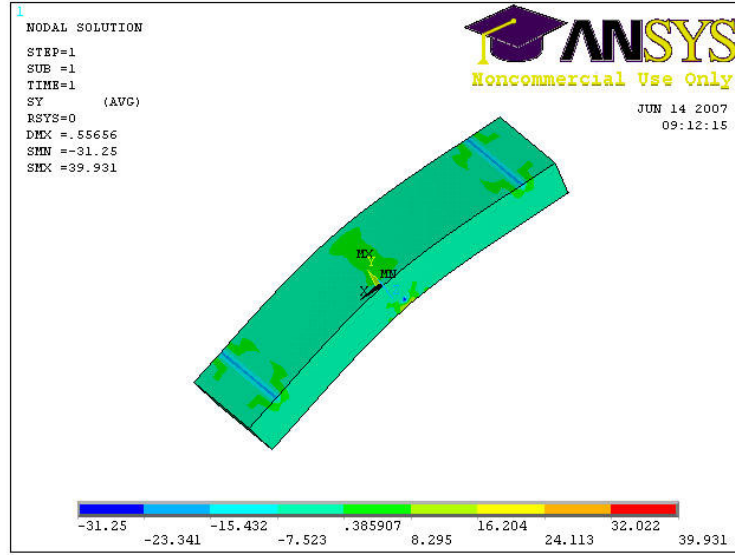


(a)

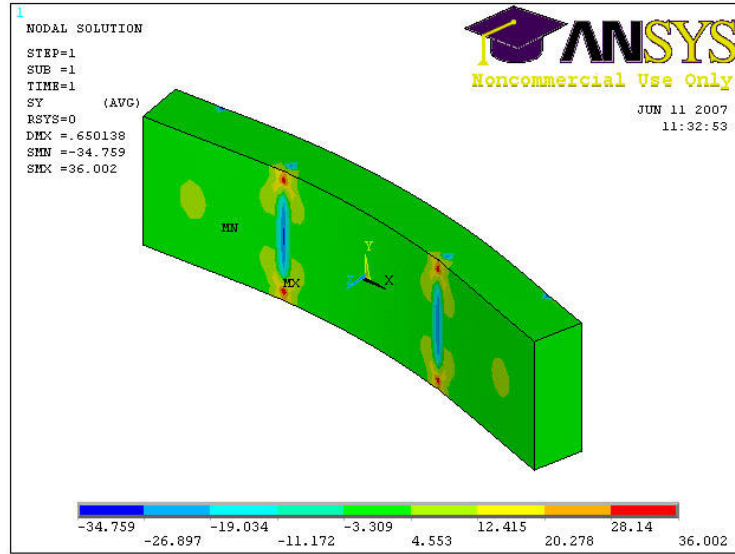


(b)

Şekil 6.27. S_x normal gerilmesi a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme (MPa).

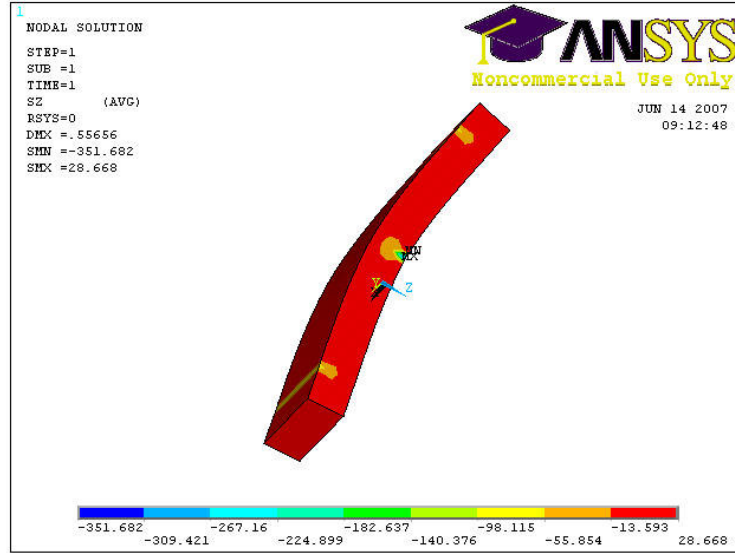


(a)

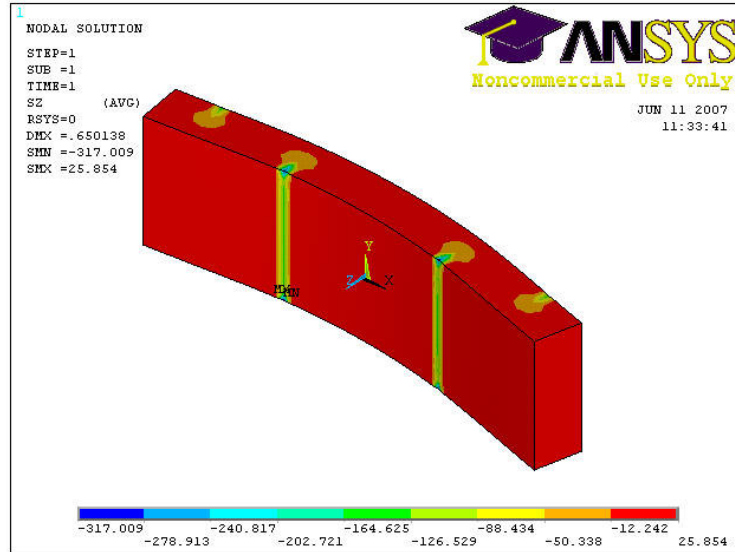


(b)

Şekil 6.28. S_y normal gerilmesi a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme (MPa).



(a)

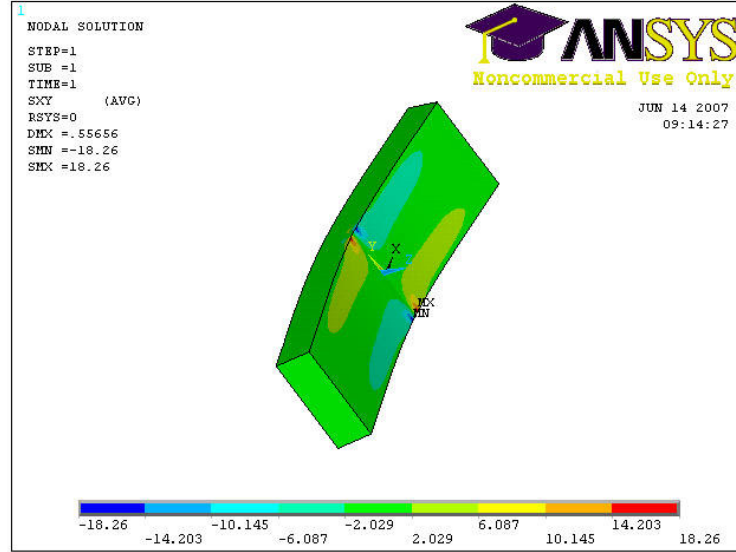


(b)

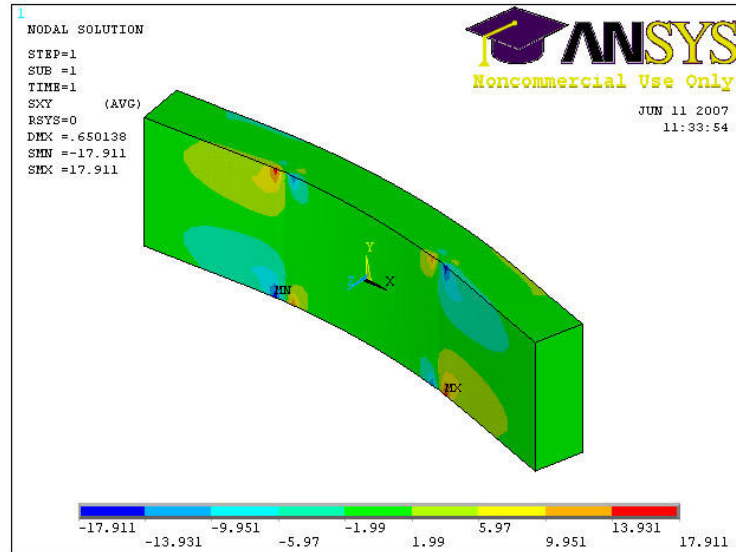
Şekil 6.29. S_z normal gerilmesi a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme (MPa).

Şekil 6.30-32'de tabakalı kompozitlerdeki kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir. S_{xy} kayma gerilmesi iki eğme testinde de oldukça düşüktür. S_{yz} kayma gerilmesinde de sadece yükün olduğu yerlerde gerilme yığılması vardır. Kompozit plakanın tamamında ortalama 6 MPa değerinde S_{yz} gerilmeleri vardır. S_{xz} kayma gerilmesi ise diğer kayma gerilmeleriyle

kıyaslandığında oldukça yüksektir. Şekil 6.33'de ise tabakalı kompozit plakanın z yönündeki deplasmanı görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi dört noktadan eğmede P_{max} yükü uygulandığı zaman oluşan çökme miktarı üç noktadan eğmedekinden daha fazladır.

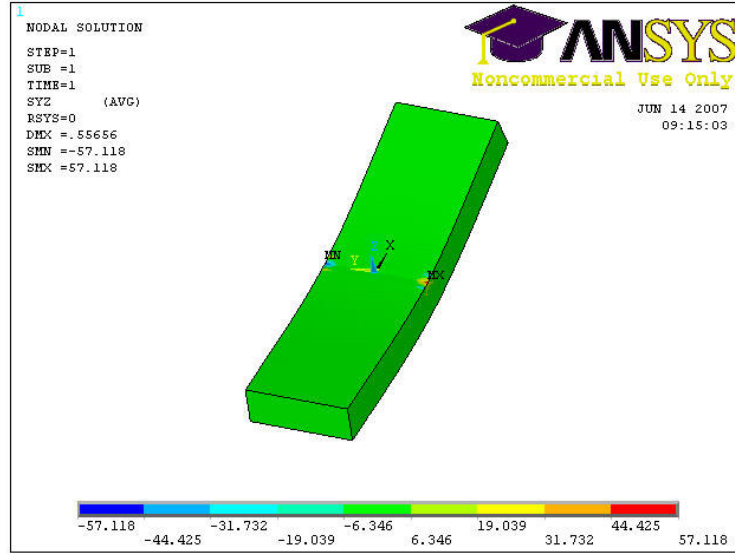


(a)

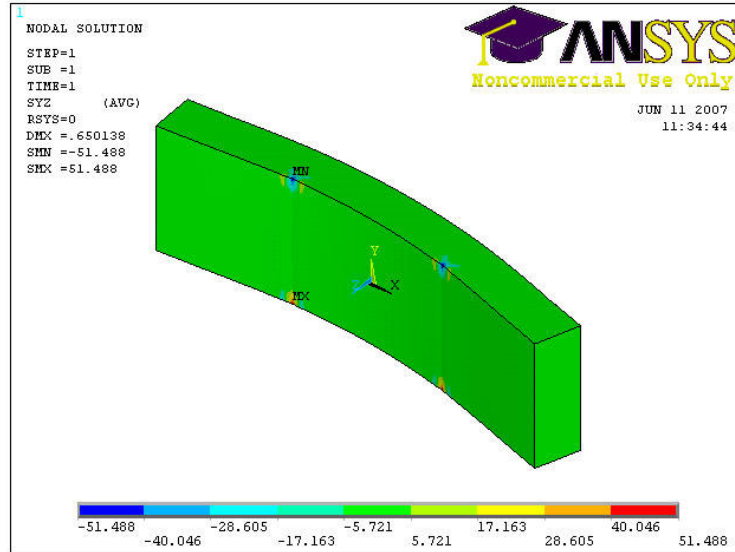


(b)

Şekil 6.30. S_{xy} kayma gerilmesi a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme (MPa).

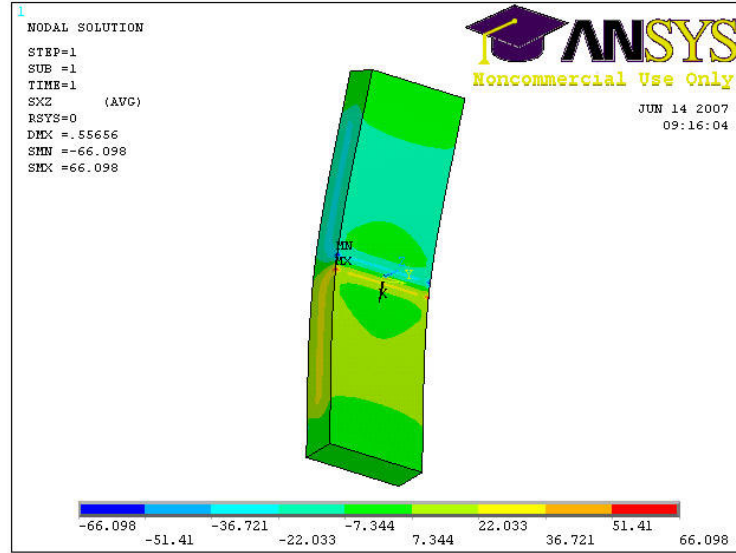


(a)

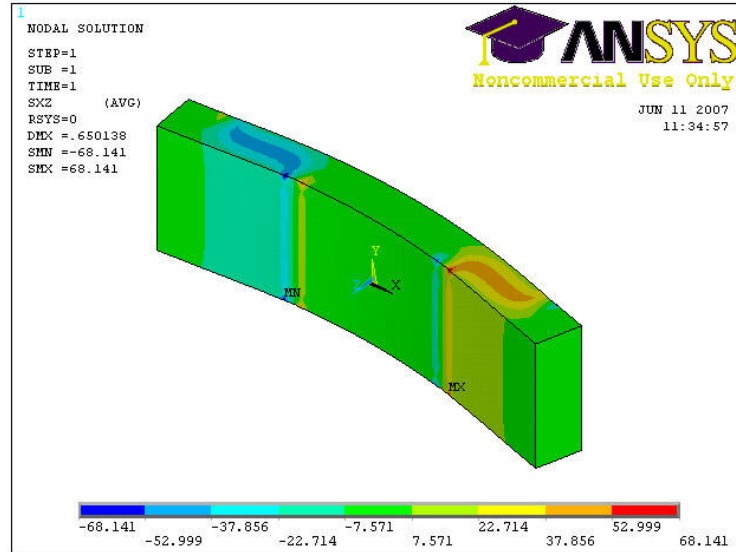


(b)

Şekil 6.31. S_{yz} kayma gerilmesi a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme (MPa).

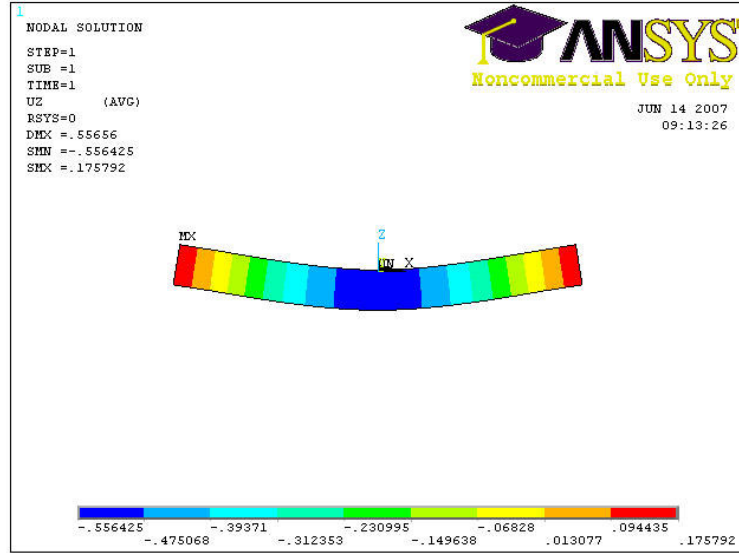


(a)

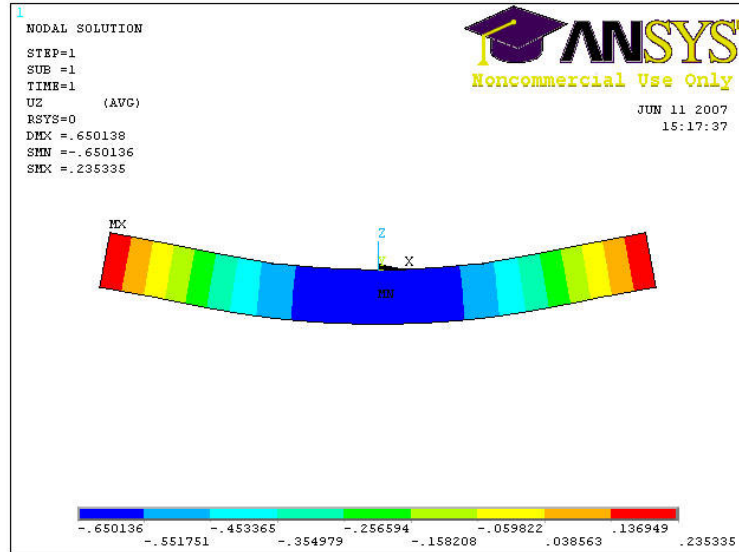


(b)

Şekil 6.32. S_{xz} kayma gerilmesi a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme(MPa).



(a)

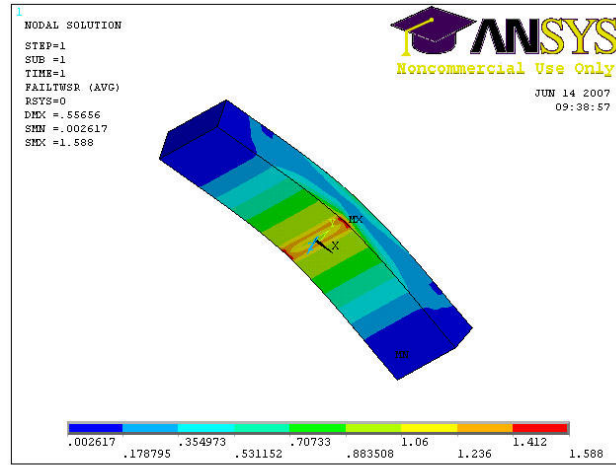


(b)

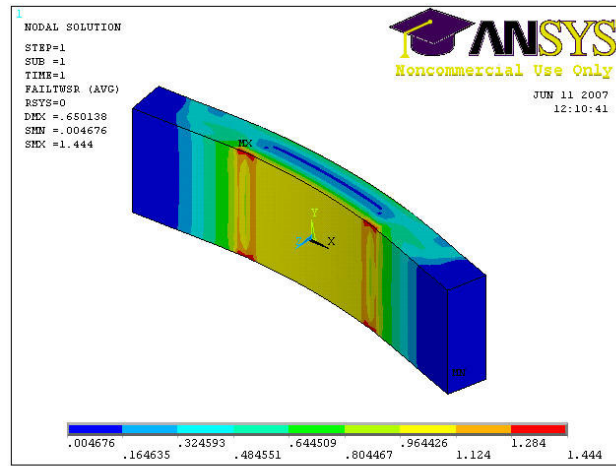
Şekil 6.33. z yönündeki deplasman a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme (mm).

6.3. Tsai-Wu Hasar Kriteri

Tabakalı kompozit malzemeler için en çok kullanılan hasar kriterleri Tsai-Hill ve Tsai-Wu hasar kriterleridir. Bu tezde ANSYS sonlu elemanlar programında solid46 elemanı için tanımlanmış Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Kriterin değerinin 1'den büyük olması kompozit malzemelerde hasar olduğunu göstermektedir. Şekil 6.34'de üç noktadan eğme için Tsai-Wu hasar kriterinin değeri 1,588 iken dört noktadan eğme için hasar kriteri 1,444 bulunmuştur. Aslında dört noktadan eğmede P yükü üç noktadan eğmeye göre daha büyük olmasına rağmen, yük ikiye dağıtılarak uygulandığı için daha az bir hasar olduğu görülmektedir. Hasar özellikle yükün uygulandığı bölgelerde ve mesnet bölgelerindedir.



(a)

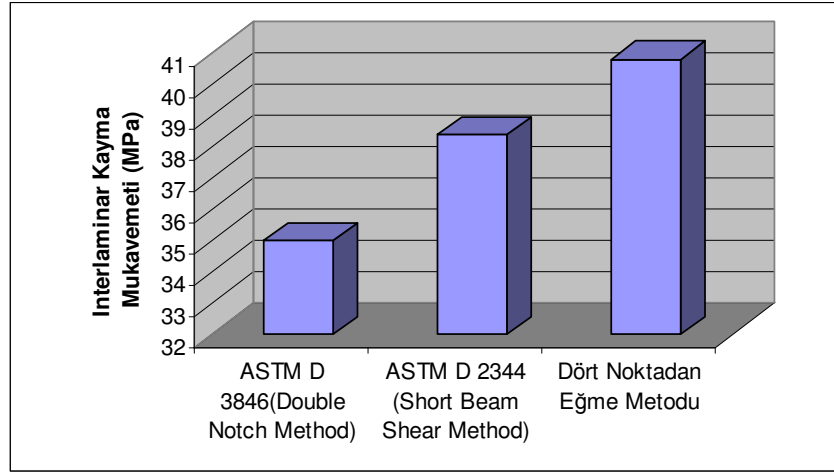


(b)

Şekil 6.34. Tsai-Wu hasar kriteri a) Üç noktadan eğme b) Dört noktadan eğme.

6.4. Test Metotlarının Karşılaştırılması

Interlaminar kayma mukavemetini bulmak için üç tane kayma test metodu vardır. Bu tezde ASTM D 2344' e göre $s/t=4$ için üç noktadan eğme deneyi sonucunda interlaminar kayma mukavemeti 38,4 MPa bulunmuştur. $s/t=8$ için dört noktadan eğme ile kayma mukavemeti 40,8 MPa bulunmuştur. ASTM D 3846'ya göre çift çentikli numune için yapılan deney sonucunda elde edilen interlaminar kayma mukavemeti değeri de 35 MPa'dır (Aslan,2002). Sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.35'de görülmektedir. Değerler birbirine oldukça yakındır ve en yüksek değer dört noktadan eğme test metodunda bulunmuştur.



Şekil 6.35. Interlaminar kayma test metotlarının karşılaştırılması.

BÖLÜM VII

7. YORUMLAR

Bu tezde E-glass/epoxy örgü fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde dört noktadan eğme kayma test metodu ile interlaminar kayma mukavemeti bulunmuş ve diğer kayma test metodlarıyla karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda interlaminar kayma gerilmeleri dağılımı ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile nümerik olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Dört noktadan eğmede $s/t=8$ için elde edilen sonuç ile üç noktadan eğmede $s/t=4$ için elde edilen sonuç hemen hemen aynıdır ve dört noktadan eğme biraz daha yüksektir.
- Deneyle bulunan P_{max} yükü ANSYS'te yük olarak kullanılmış, nümerik olarak tabakalar arası kayma mukavemeti iki boyutlu ve üç boyutlu kompozit elemanları kullanılarak bulunmuştur. Deneysel ve nümerik sonuçlar oldukça birbirine yakındır.
- ANSYS'te $s/t=8$ oranı için üç nokta ve dört noktadan eğme sonuçları karşılaştırılmıştır. Hasar anı değerlendirilirse üç noktadan eğmede $P_{max}= 528$ N için elde edilen gerilme değerleri, dört noktadan eğmede $P_{max}= 952$ N için elde edilen gerilme değerlerinden oldukça yüksektir.
- Dört noktadan eğme ile elde edilen interlaminar kayma mukavemeti ASTM D 2344 Short Beam Shear ve ASTM D 3846 Double-Notch Shear testlerinden elde edilen interlaminar kayma mukavemetinden daha yüksektir. Dört noktadan eğme testinde $s/t=8$ oranı için deneyleri gerçekleştirmek daha kolay olduğundan e-glass/epoxy örgü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde dört noktadan eğme test metodu daha iyi sonuç vermektedir.

BÖLÜM VIII

KAYNAKLAR

Abali F., Pora A., Shivakumar K., 2003, Modified short beam shear test for measurement of interlaminar shear strength of composites, *Journal of Composite Materials*, C. 37, N. 5, s. 453-464.

Addams D. F., 2005, A Comparison of Shear Test Methods, *Composites World*, <http://www.compositesworld.com/hpc/issues/2005/september/963/1>.

Adams D. F., Lewis E. Q., 1995, Experimental Study of Three- and Four-Point Shear Test Specimen. *Journal of Composites Technology and Research*, C. 17, N. 4, s. 341–349.

ANSYS, 2007, Theory and Referans Manuel.

Aslan Z., 2002, ‘‘Behavior of Laminated Composite Structures Subjected To Low Velocity Impact’’,Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

ASTM Standtard D 2344, 2006, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.

ASTM Standtard D 3846, 2006., Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics.

Daniel I. M., Ishai O., 1994, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Pres, NewYork.

Elawadly K. M., 2002, On the interlaminar shear stres response for E-glass/epoxy composite, *Journal of Composite Materials*, C. 37, N. 23, s. 2149-2158.

Feraboli P., Kedward K. T., 2003, Four-point bend interlaminar shear testing of uni- and multi-directional carbon/epoxy composite systems, *Composites Part A*, C. 34, s. 1265-1271.

Gibson R. F.,1994, *Principles of Composite Mmaterial Mechanics*, Department of Mechanical Engineering Wayne State University, Detroit, Michigan.

Jones. R. M., 1998 *Mechanics of Composite Materials*, Institute of Technology Southern Methodist University, Dallas, Texas.

John N. A., Brown J. R., 1998, Flexural and interlaminar shear properties of glass-reinforced phenolic composites, *Composites Part A*, C. 29A, s. 939-946.

Kress G., Roos R., Barbezat M., Dransfeld C., Ermanni P., 2004, Model for interlaminar normal stres in singly curved laminates, *Computers Structures*, C. 69, s. 458-469.

Kuş A., 1996, Çok Katlı Kompozit Plakların Enerji Absorbsiyon Özelliklerinin Teorik ve Deneysel Analizi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,Bursa.

Lagunegrand L., Lorriot Th., Harry R., Wargnier H., 2004, Design of an improved four point bending test on a sandwich beam for free edge delamination studies, *Composites Part B*, C. 37, s. 127-136.

Ming X., Adams D. F., 1995, Study of Three- and Four-Point Shear Testing of unidirectional composite materials, *Composites*, C. 26, s. 653–659.

Mujika F., 2005, On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests, *Polymer Testing*, C. 25, s. 214-220.

Parlıtı R., 1995, Polyester, Cam Lifihelisel Sarılı Kompozit Çubuk İmalatı ve Mukavemet Özelliklerinin Saptanması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Projesi, İzmir.

Reddy. J. N., 1997, *Mechanics of Laminated Composite Plates Theory and Analysis*, CRC, Pres, Newyork.

Roselli F., Santare M. H., 1996, Comparison of the short beam shear (SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests, *Composites Part A*, C. 28A, s. 587-594.

Sayman O, Aksoy S., 1995, *Kompozit Malzemeler*, Bornova, İzmir.

Shivakumar K., Pora A., Abali F., 2003, Interlaminar shear test for laminated textile fabric composites, 13. International Conference on Composite Materials, Beijing, China.

Şahin Y., Ekim 2000, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara.

Tanır O., 1997., Termoplastik Kompozitlerin İmali ve Mekanik Özelliklerinin Bulunması, , Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Projesi, İzmir.

Tarnopol'skii M. Yu., Kulakov V. L., Aranautov A. K., 2000, Measurements of shear characteristics of textile composites, *Computers and Structures*, C. 76, s. 115-123.

Tracy G. D., Feraboli P., Kedward K. T., 2003, A new mixed mode test for carbon/epoxy composite systems, *Science Direct Composites Part A* C. 34, s. 1125-1131.

URL1:http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit.htm#KOMPOZİT%20MALZEMELER

URL2: <http://www.argeportal.com/content/view/36/90/>

Ünal Ö., Dayal V., 2002, Interlaminar shear strength measurement of ceramic composite by asymmetric four point bend shear test, *Materials Science and Engineering C*. 340, s. 170-174.

Zhang C., Hoa S. V., Ganesan R., 2002, Experimental characterization of interlaminar shear strength of graphite/epoxy laminated composites, *Journal of Composite Materials*, C. 36, N. 13, s. 1615-1652.

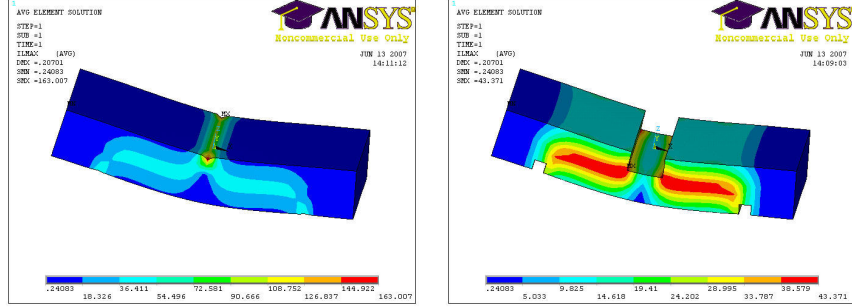
Zhou G., Sim L. M., Brewster P. A., Giles A. R., 2004, Through-the-thickness mechanical properties of smart quasi-isotropic carbon/epoxy laminates, *Composites Part A*, C. 35, s. 797-815.

BÖLÜM IX**ÖZGEÇMİŞ**

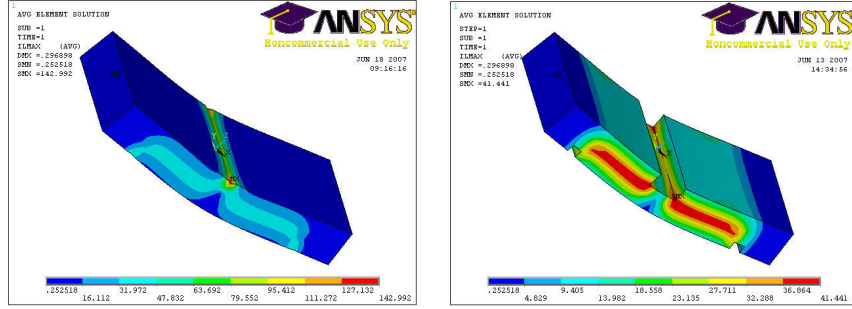
1980 yılında Almanya'nın Essen şehrinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sivas'ta tamamladı. 2003 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden Makine Mühendisi unvanıyla mezun oldu. 2004 yılında Cumhuriyet Üniversitesi'ne bağlı Teknik Eğitim Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Şu anda hala Cumhuriyet Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde görevini sürdürmektedir.

BÖLÜM X

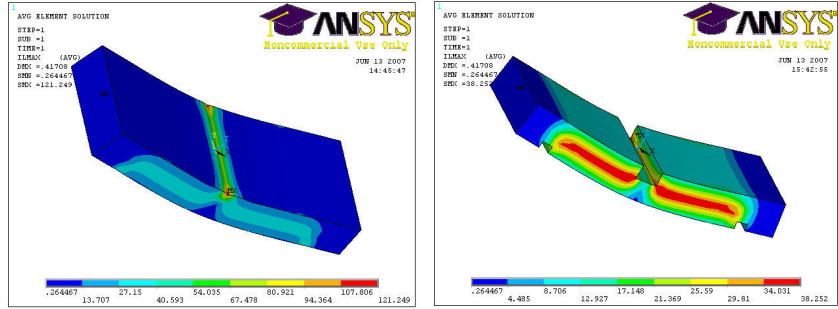
EKLER



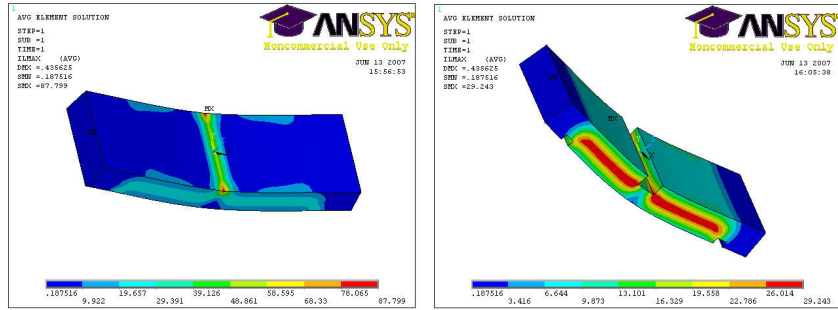
Şekil 10.1. Solid46 üç noktadan eğme $s/t=4$, ILMAX.



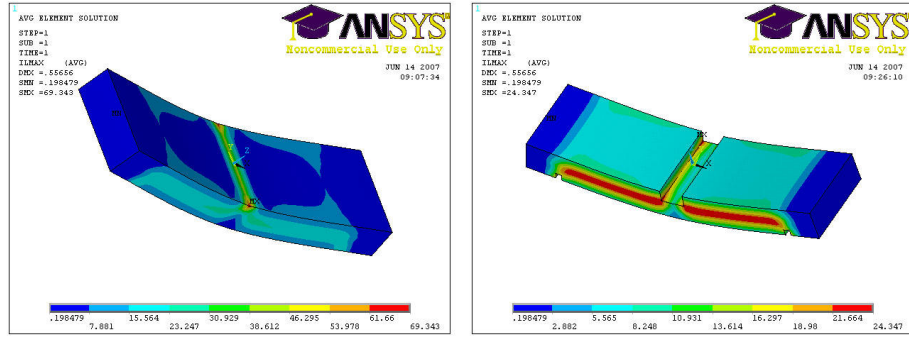
Şekil 10.2. Solid46 üç noktadan eğme $s/t=5$, ILMAX.



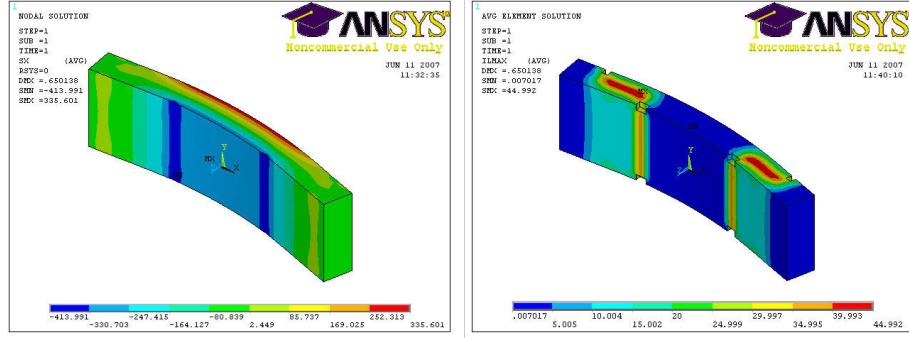
Şekil 10.3. Solid46 üç noktadan eğme $s/t=6$, ILMAX.



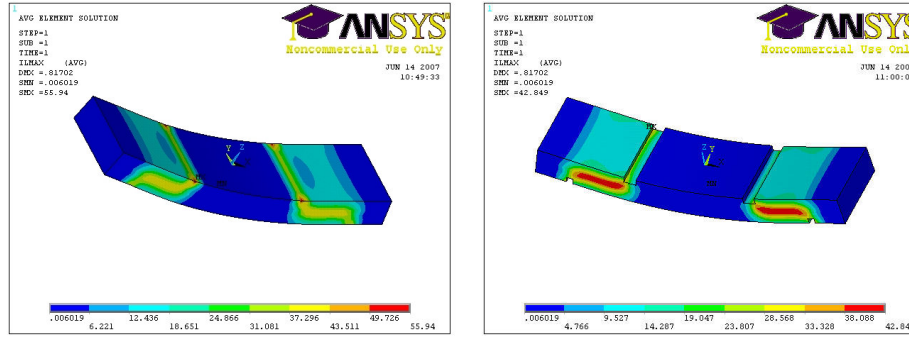
Şekil 10.4. Solid46 üç noktadan eğme $s/t=7$, ILMAX.



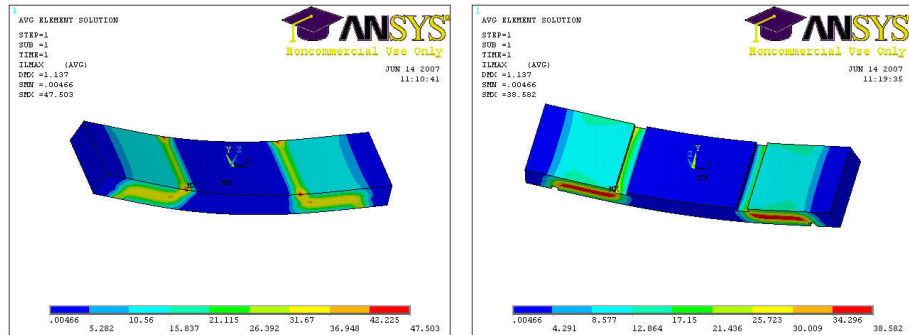
Şekil 10.5. Solid46 üç noktadan eğme $s/t=8$, ILMAX.



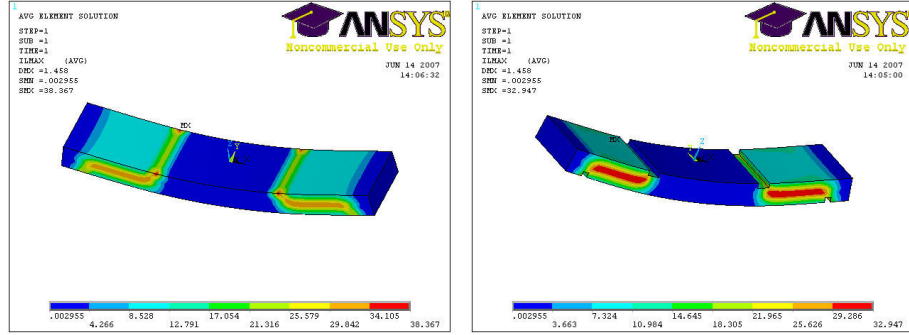
Şekil 10.6. Solid46 dört noktadan eğme $s/t=8$, ILMAX.



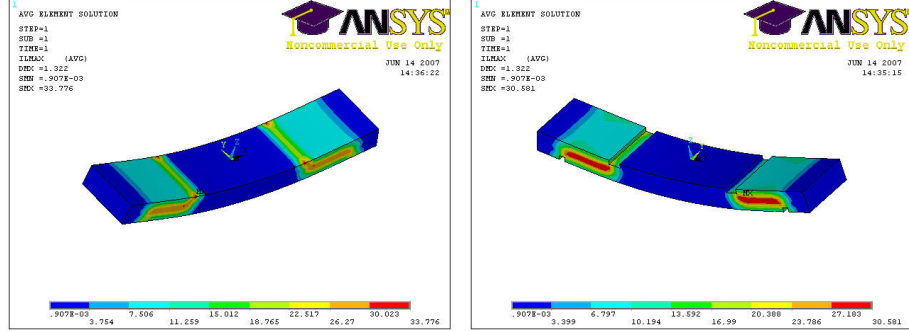
Şekil 10.7. Solid46 dört noktadan eğme $s/t=9$, ILMAX.



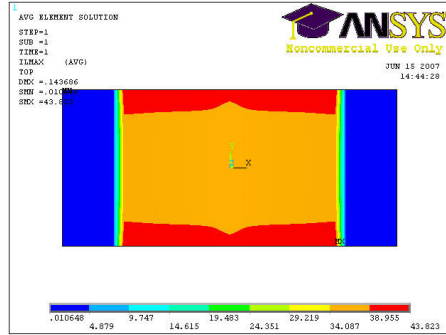
Şekil 10.8. Solid46 dört noktadan eğme $s/t=10$, ILMAX.



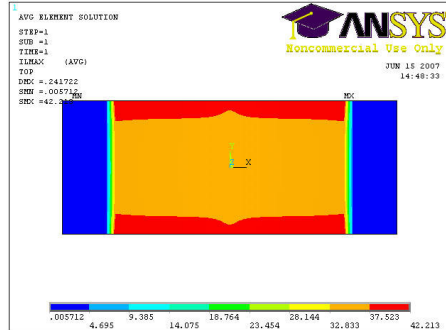
Şekil 10.9. Solid46 dört noktadan eğme $s/t=11$, ILMAX.



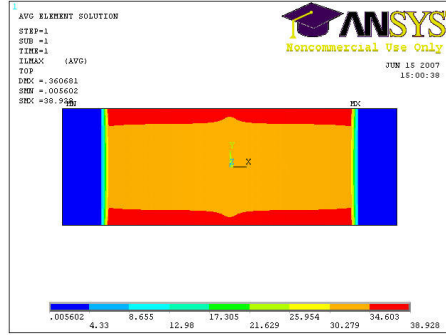
Şekil 10.10. Solid46 dört noktadan eğme $s/t=12$, ILMAX.



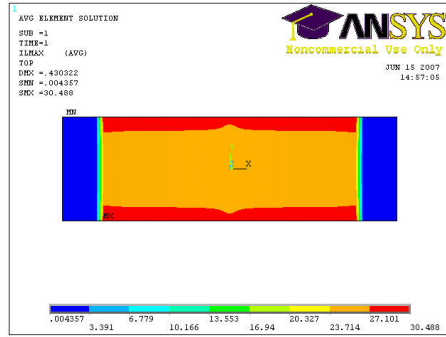
Şekil 10.11. Shell91 üç noktadan eğme $s/t=4$ için ILMAX.



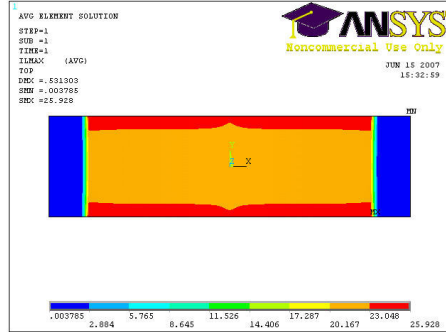
Şekil 10.12. Shell91 üç noktadan eğme $s/t=5$ için ILMAX.



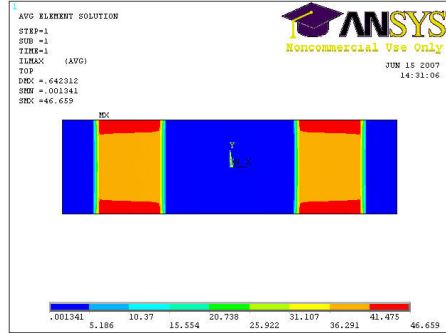
Şekil 10.13. Shell91 üç noktadan eğme $s/t=6$ için ILMAX.



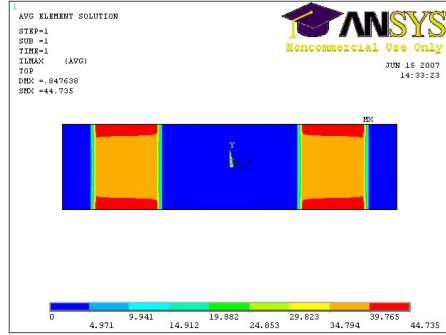
Şekil 10.14. Shell91 üç noktadan eğme $s/t=7$ için ILMAX.



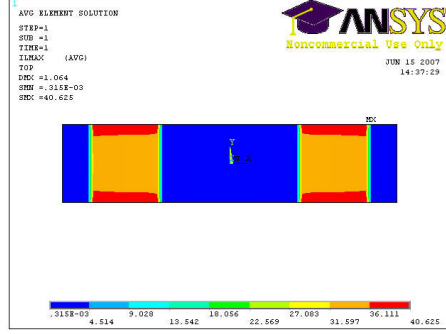
Şekil 10.15. Shell91 üç noktadan eğme $s/t=8$ için ILMAX.



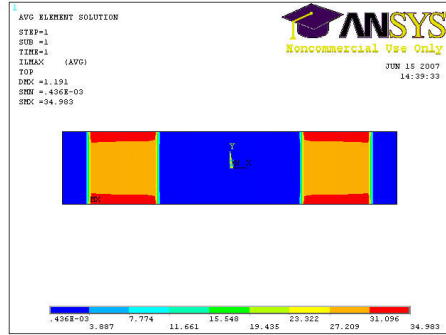
Şekil 10.16. Shell91 dört noktadan eğme $s/t=8$ için ILMAX.



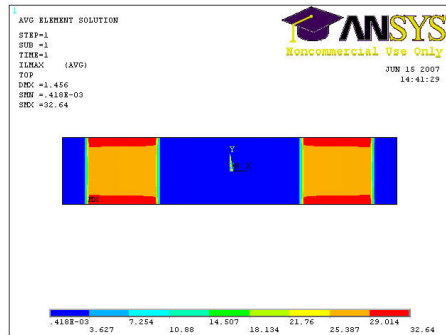
Şekil 10.17. Shell91 dört noktadan eğme $s/t=9$ için ILMAX.



Şekil 10.18. Shell91 dört noktadan eğme $s/t=10$ için ILMAX.



Şekil 10.19. Shell91 dört noktadan eğme $s/t=1$ için ILMAX.



Şekil 10.20. Shell91 dört noktadan eğme $s/t=12$ için ILMAX.