



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering
and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

Farklı Kevlar/epoksi kompozit tabakalarla takviye edilmiş 3D baskı ABS polimerlerin sonlu elemanlar yöntemi ile ilk hasar yüklerinin bulunması

 Semih Benli^{a,*}
^aAksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100 Aksaray, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 16 Aralık 2024

Düzeltilme 20 Şubat 2025

Kabul 17 Mart 2025

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Kevlar/epoksi kompozit tabaka

Sonlu elemanlar metodu

Tsai-Wu dayanım indeksi

İlk hasar yükü

ÖZET

Eklemeli imalat (Additive manufacturing, AM), endüstriyel uygulamalarda hızla ilerleyen ve 3 boyutlu (3D) baskı olarak da bilinen bir imalat yöntemidir. Eriyik yığıma modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM), düşük maliyetli polimer malzemelerden karmaşık ve nispeten yüksek mukavemetli parçalar üretme kabiliyeti nedeniyle yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat tekniklerinden biridir. FDM ile en yaygın kullanılan malzemelerden biri akrilonitril bütadien stiren (ABS) dir. Ancak, ABS'nin düşük dayanım ve elastik modülüne sahip olması tek başına kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, ABS'nin özelliklerini iyileştirmek amacıyla örülmüş Kevlar/epoksi kompozit tabakası ile oluşturulan farklı sandviç yapıların hasar yükünü ANSYS programında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak belirlemektir. Bu amaçla, ABS'nin alt ve üst yüzeylerine tek ve çift katmanlı, 0° ve 45° oryantasyonlu örülmüş Kevlar/epoksi kompozit tabakaları FM73 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılarak takviye edilmiş çekme ve eğme numunelerinin sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Çekme ve üç nokta eğme testinin simülasyonu için malzemelerin özellikleri ayrı ayrı programa girilmiş, yükleme ve sınır koşulları uygulanmıştır. İlk hasar yükünü belirlemek için Tsai-Wu dayanım indeksi değerine bakılmış ve bu değeri 1 yapan hasar yükleri tespit edilmiştir. Buna göre, çekme ve eğme esnasında yükün büyük kısmını örülmüş Kevlar/epoksi kompozit tabakalar karşılamasına rağmen ilk hasar ABS tabakalarında meydana gelmiştir. Sonuç olarak, ABS'nin örülmüş Kevlar/epoksi kompozit tabakalarla takviyesinin hem rijitliği hem de mukavemeti önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

Determination of initial failure loads of 3D printed ABS polymers reinforced with different Kevlar/epoxy composite layers using the finite element method

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 Dec 2024

Received in revised form 20 Feb 2025

Accepted 17 March 2025

Available online

Keywords:

Kevlar/epoxy composite layer

Finite element method

Tsai-Wu strength index

Initial damage load

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is a manufacturing method that is rapidly advancing in industrial applications and is also known as 3D printing. Fused Deposition Modeling (FDM) is one of the widely used additive manufacturing techniques due to its ability to produce complex and relatively high strength parts from low-cost polymer materials. One of the most widely used materials with FDM is acrylonitrile butadiene styrene (ABS). However, the low strength and elastic modulus of ABS limit its use alone. The aim of this study was to determine the failure load of different sandwich structures formed with knitted Kevlar/epoxy composite layers in order to improve the properties of ABS by using the finite element method in the ANSYS program. For this purpose, finite element models of tensile and bending samples reinforced by gluing single and double-layered, 0° and 45° oriented Kevlar/epoxy composite layers to the upper and lower surfaces of ABS with FM73 epoxy adhesive were created. For the simulation of tensile and three-point bending tests, the properties of the materials were entered into the program separately, and loading and boundary conditions were applied. In order to determine the initial damage load, the Tsai-Wu strength index value was examined and the damage loads that made this value 1 were determined. Accordingly, although the woven Kevlar/epoxy composite layers carried most of the load during tensile and bending, the initial damage occurred in the ABS layers. As a result, it was observed that the reinforcement of ABS with woven Kevlar/epoxy composite layers significantly increased both rigidity and strength.

I. GİRİŞ

3D baskı olarak da bilinen katmanlı üretim (AM), düşük maliyetle karmaşık şekillere ve belirli mekanik özelliklere sahip çok sayıda ürün üretmedeki çok yönlülüğü nedeniyle son on yılda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Son birkaç yılda 3D yazıcıların uygun fiyatlı olması ve baskı malzemelerinin bulunabilirliği 3D baskının kullanımında artışa sebep olmuştur [1]. Üç boyutlu baskı, biyomedikal, inşaat mühendisliği, havacılık ve otomotiv endüstrileri tarafından prototipler, modeller, yedek parçalar, diş kronları, yapay uzuvlar vb. üretmek için kullanılmıştır [2–4]. En popüler 3D baskı tekniklerinden biri, eritilen ve katman katman biriktirilen bir termoplastik filamentin termal ekstrüzyon sürecine dayanan erimiş biriktirme modellemesidir (FDM) [5]. FDM ile en yaygın kullanılan malzemeler akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asittir (PLA) [6–7].

ABS iyi mekanik özelliklere sahiptir ancak işleme sırasında hoş olmayan bir koku yayar, oysa PLA çevre dostudur ancak nispeten zayıf mekanik ve termal özelliklere sahiptir [8]. Ancak, bu malzemeler tek başlarına 30 ila 100 MPa arasında tipik yığın mukavemetleri ve 1,3–3,6 GPa aralığında elastik modülleri gibi nispeten düşük mekanik özelliklere sahiptir. Bu da basılı parçaların yüksek performanslı uygulamalar için kullanılamayacağı anlamına gelir [9, 10]. FDM süreçlerinde kullanılan malzemelerin orijinal özelliklerini geliştirmek için literatürde çeşitli yöntemler araştırılmıştır. Örneğin, Dul ve ark. [11] tarafından %2, %4 ve %8 ağırlık oranında grafenle modifiye edilmiş 3D baskılı ABS'nin mekanik özelliklerini araştırılmış ve grafenin varlığının elastik modülü ve dinamik depolama modülünü önemli ölçüde artırdığı, ancak modifiye edilmiş malzemenin maksimum çekme mukavemetini ve kopma uzamasını azalttığı görülmüştür. Galatas ve ark. [12], iki bileşenli epoksi reçinesi kullanılarak ABS ile basılmış bir parçaya karbon fiber kumaş eklenmesinin hem mukavemet hem de rijitlikte artışa sebep olduğu sonucuna varmışlardır. Bu artışın doğrudan karbon fiber katmanlarının sayısı ile ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Gohar ve ark. [13], FDM baskı tekniğiyle inşa edilen sandviç yapıların mekanik performansını incelemiştir. Takviye yüzey levhaları, PLA + %15 karbon fiber filament kullanılarak 3D olarak basılmıştır. Numunenin ana hasarının delaminasyon olduğu bulunmuştur.

3D yazdırılmış plastik parçaların mukavemetini artırmak için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. 3D yazdırılmış numunelerin boşluklarını yüksek mukavemetli reçineyle doldurmanın mekanik mukavemeti %25 ve %45 oranında etkili bir şekilde artırdığı bulunmuştur [14]. Öte yandan, ultrasonik güçlendirme tekniğinin çekme mukavemetini yaklaşık % 22 oranında artırdığı bulunmuştur [15], yerleştirilmiş kızılötesi lazer ısıtma ise katmanlar arası arayüz sıcaklığını artırmak ve dolayısıyla bağlanma mukavemetini yaklaşık %50 oranında iyileştirmek için kullanılmıştır [16]. Başka bir çalışmada, elyaf takviyesinin AM polimerik parçaların (PLA ve ABS) mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Doğal (jüt ve curauá) ve sentetik (cam) elyaf (1 ve 2 katman), sıkıştırma kalıplama yoluyla epoksi reçinesi kullanılarak AM parçalarının dış taraflarına lamine edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki 3D baskılı parçalara elyaf takviyelerinin eklenmesi, mekanik özelliklerde artışa ve uzamada azalmaya neden olmuştur. 3D baskılı çekirdeklerin malzeme türü, takviyeli 3D baskılı numunelerin mekanik özelliklerini etkilemiştir. PLA takviyeli numuneler, ABS takviyeli numunelere kıyasla daha yüksek çekme ve eğilme özellikleri göstermiştir [17].

Görüldüğü gibi, robotik ve diğer alanlar gibi birçok yük taşıyan uygulamada kullanılacak 3D yazdırılmış parçaların mukavemetini artırma çabaları birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Ancak, 3D yazdırılmış plastik parçaların rijitliği, dayanımı ve darbe direncinin birlikte iyileştirilmesi için sandviç yapıli kompozit kullanımı pek çalışılmamıştır.

Kevlar, yüksek modüllü para aramidten yapılmış bir tür sentetik elyafıdır. Aromatik poliamid ailesinden organik bir elyafıdır [18]. Örülmüş Kevlar elyafları, yüksek hızlı darbeye dayanma kabiliyetine ve yüksek özgül mukavemete sahiptir. Bu da onu metallerden daha verimli hale getirir ve yüksek mukavemeti ile çeşitli yapısal ve havacılık sistemlerinde kullanım için ideal malzeme yapmaktadır [19]. 3D basılı ABS polimerlerin örülmüş Kevlar ile güçlendirilmesi ile ilgili bir çalışma literatürde bulunmamıştır.

Bu çalışmada, farklı katman sayılı ve oryantasyon açılı örülmüş Kevlar/epoksi tabakalarıyla takviye edilmiş ABS malzemenin hasar yüklerini ve rijitliklerini belirlemek için sonlu elemanlar metodu kullanılarak çekme ve eğme numune modellerinin statik analizleri yapılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1 Çekme ve Eğme Numunelerinin Sonlu Elemanlar Modellerinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

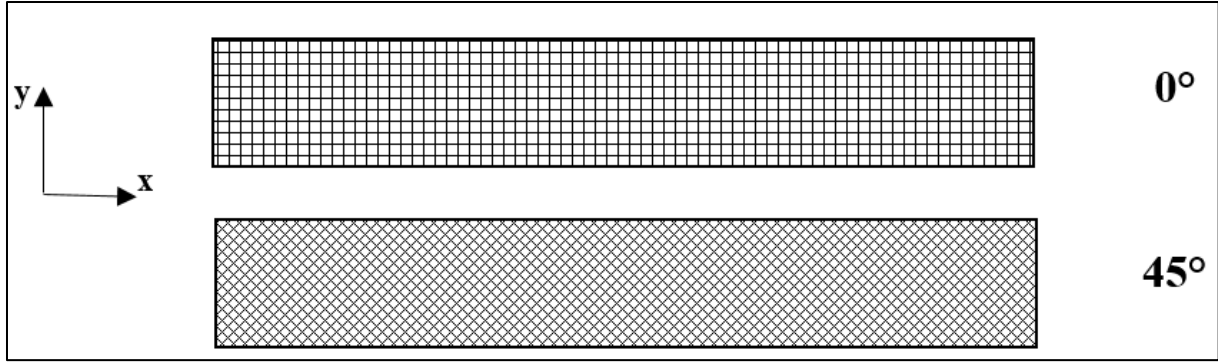
Çekme ve eğme numunelerinin ölçüleri sırasıyla ASTM D680-10 ve ASTM D790 standartlarından alınmıştır. 3D baskı ABS polimerinin x ve y yönünde aynı mekanik özelliklere sahip $[0^\circ/90^\circ]$ yazdırma açılı olduğu varsayılmıştır. Tüm numune modellerinde ABS tabakasının yazdırma açısı aynı kabul edilmiştir. ABS tabakasının kalınlığı 3,6 mm alınmıştır. Tek katmanlı örülmüş Kevlar/epoksi kompozit tabakası için kalınlık 0,35 mm, çift katmanlı için ise 0,7 mm alınmıştır. Yapıştırıcı olarak FM73 seçilmiş olup kalınlığı 0,2 mm olarak kabul edilmiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1’deki gibidir. ABS malzemesi, yapıştırıcı ve örülmüş çift ve tek katmanlı Kevlar/epoksi kompozit tabakalarından 4 tip sandviç plaka modellenmiştir. M ve M2 numunelerinde boylamsal doğrultuyla Kevlar/epoksi tabakasının takviye doğrultusu arasındaki açı 0° iken N ve N2 numunelerinde 45° alınmıştır. Numune tiplerinin açıklama ve kısa gösterimi Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 1’de Kevlar/epoksi kompozit tabakalarının 0° ve 45° oryantasyon açıları şematik olarak gösterilmiştir. Çekme ve eğme numunelerinin tabaka dizilimleri sırasıyla Şekil 2 ve 3’te gösterilmiştir.

Tablo 1. Malzemelerin mekanik özellikleri

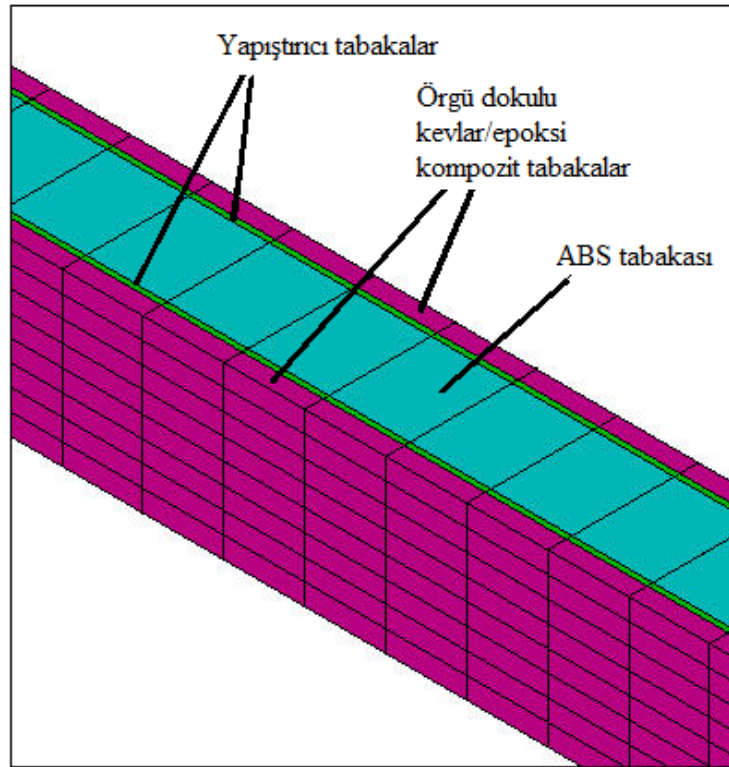
Malzemeler	Elastisite Modülü (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Çekme Dayanımı (MPa)
Örgülü Kevlar/epoksi kompozit plaka ^[20]	$E_1 = 26180$ $E_2 = 26180$	$G_{12} = 1533$	$\nu_{12} = 0,11$	$X_t = 420$ $Y_t = 420$
ABS Malzemesi ^{1[12]}	$E_1 = 2180$ $E_2 = 2180$	$G_{12} = 795$	$\nu_{12} = 0,37$	$X_t = 26$ $Y_t = 26$
FM73 yapıştırıcısı ^{[21][22]}	2295	850	0,35	46,3

Tablo 2. Tabaka dizilimleri ve numune tipleri

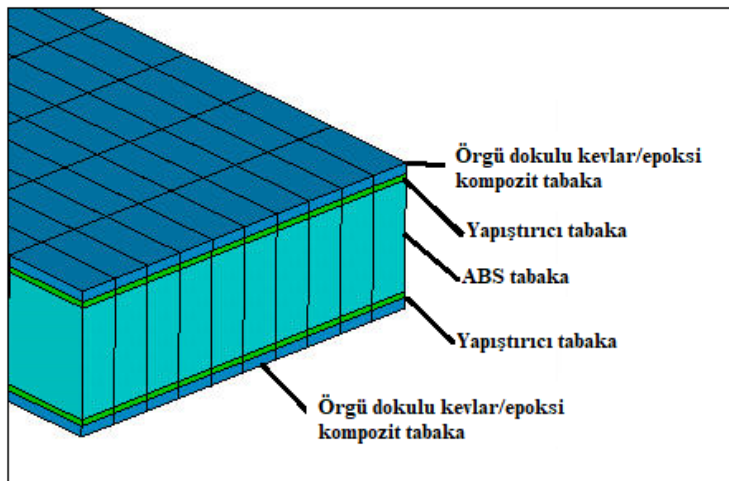
Numune Tipi	Çekme ve Eğme Numune Modellerinin Tabaka Dizilimleri
M Numunesi	Tek katmanlı 0° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka / Yapıştırıcı Tabaka / ABS Tabakası / Tek katmanlı 0° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka
N Numunesi	Tek katmanlı 45° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka / Yapıştırıcı Tabaka / ABS Tabakası / Tek katmanlı 45° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka
M2 Numunesi	Çift katmanlı 0° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka / Yapıştırıcı Tabaka / ABS Tabakası / Çift katmanlı 0° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka
N2 Numunesi	Çift katmanlı 45° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka / Yapıştırıcı Tabaka / ABS Tabakası / Çift katmanlı 45° oryantasyonlu Kevlar-epoksi tabaka



Şekil 1. Kevlar/epoksi kompozit tabakalarının 0° ve 45° oryantasyon açılarının şematik gösterimi



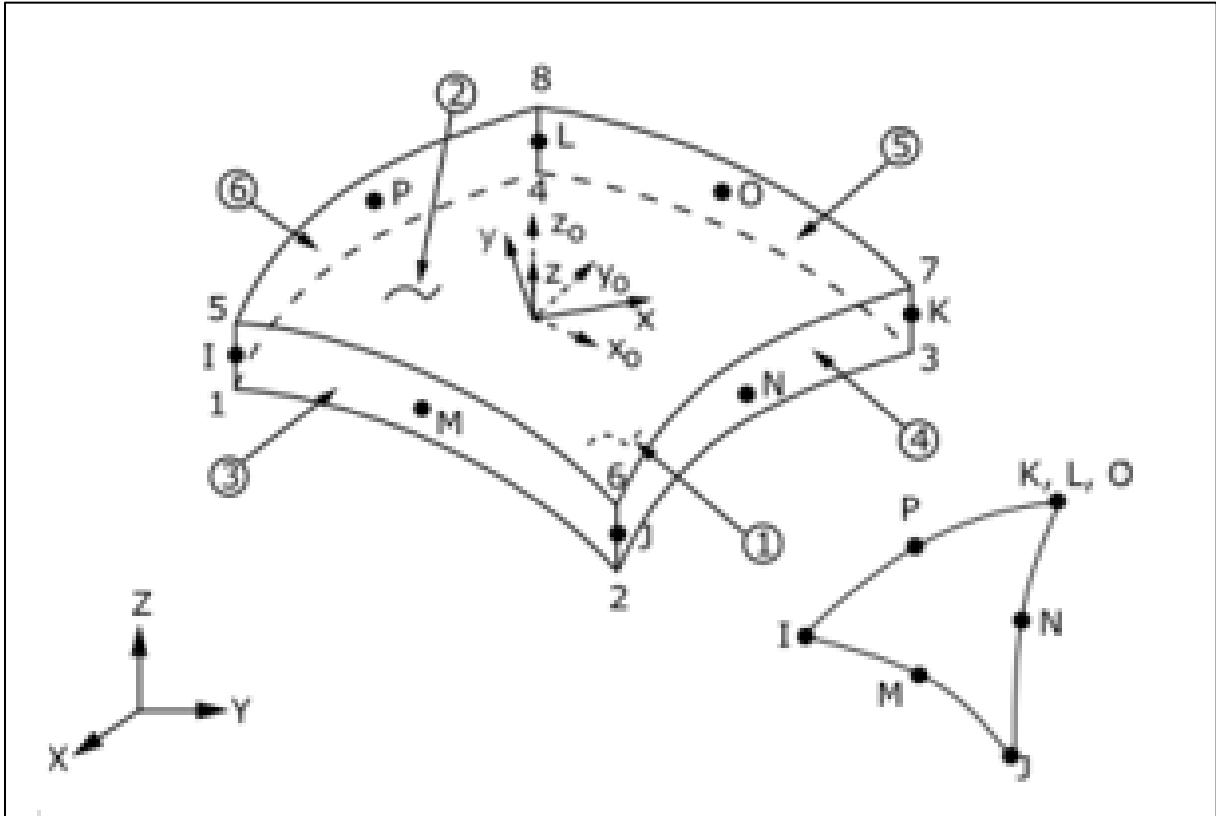
Şekil 2. Çekme numunesinin sonlu elemanlar modelindeki tabaka dizilimi



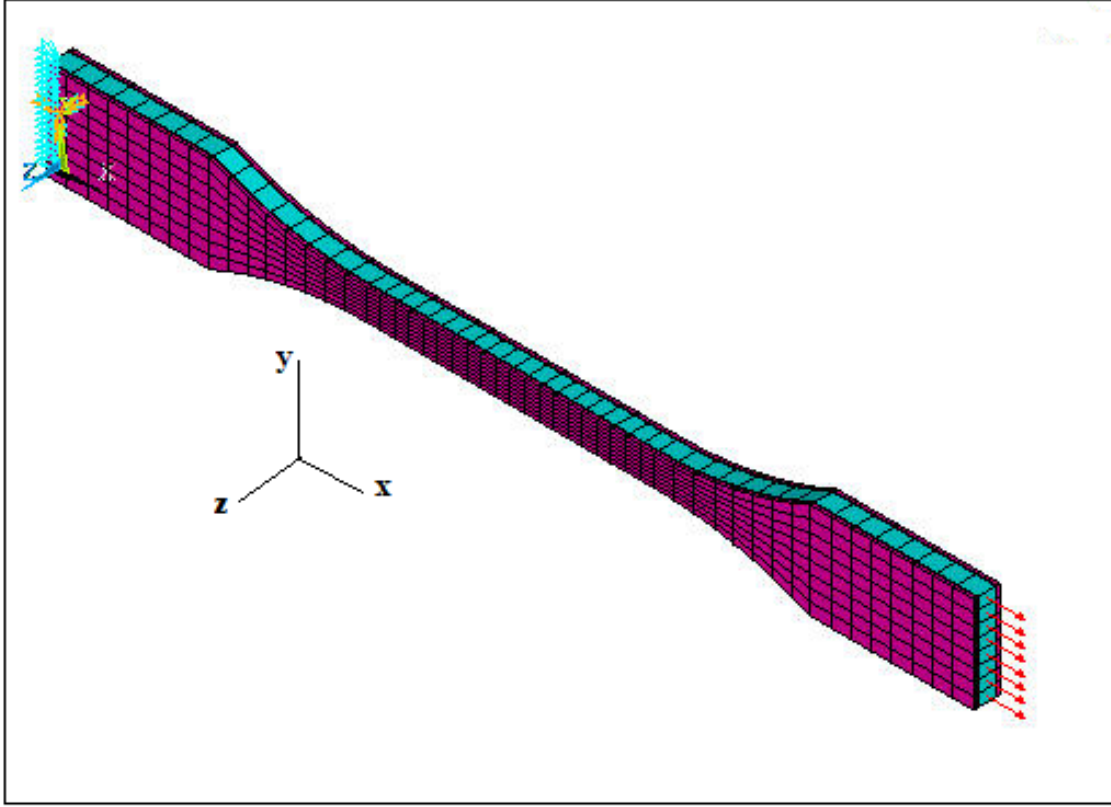
Şekil 3. Üç nokta eğme numunesinin sonlu elemanlar modelinde tabaka dizilimi

2.2 Çekme ve Eğme Numunelerinin Sonlu Elemanlar Modellemesi

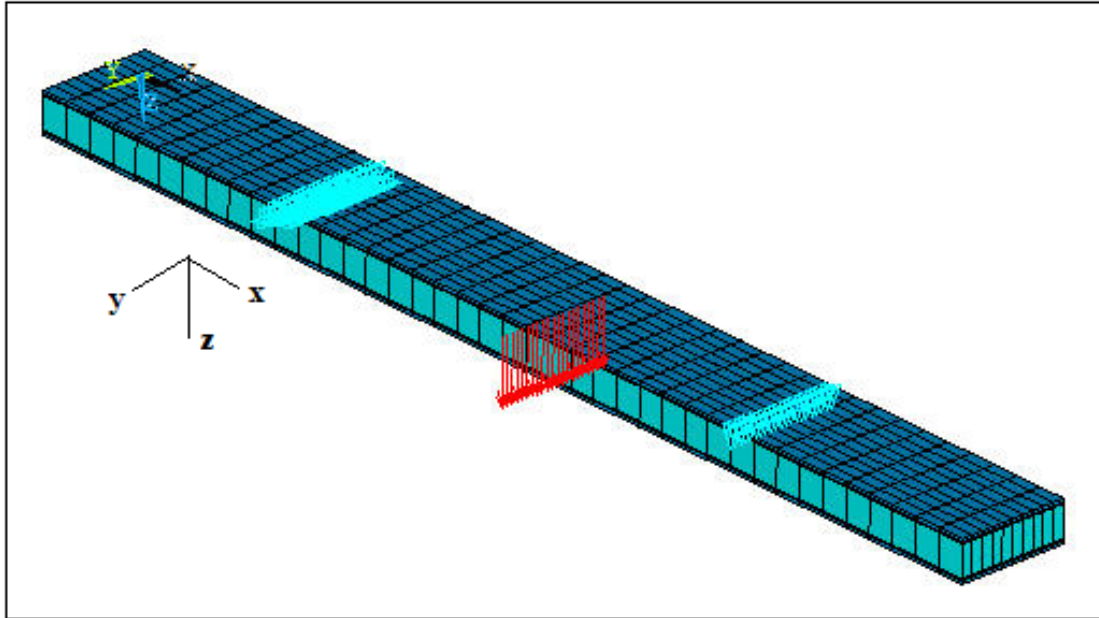
Örölmüş Kevlar/epoksi tabakalarının ABS plakaları üzerinde dayanımı ve rijitliği arttırıcı etkisini görmek amacıyla örölmüş Kevlar/epoksi kompozit malzeme ile takviye edilmiş ABS plakalarının çekme ve üç nokta eğme test numunelerinin sonlu elemanlar modelleri ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu amaçla, öncelikle iki boyutlu SHELL281 elemanı sonlu elemanlara ayırmak için seçilmiştir. Şekil 4’de gösterilen bu eleman ince veya orta kalınlıktaki kabuk yapıların analizi için uygundur. Bu eleman sekiz düğünden oluşur ve her düğümün x, y ve z eksenleri etrafındaki dönüşler ve x, y ve z eksenlerindeki ötelemeler olmak üzere toplam altı serbestlik derecesi vardır. SHELL281 elemanı, katmanlı uygulamalarda, sandviç yapı veya kompozit kabukları simüle etmek için kullanılabilir [23]. Numunelerin standartlara uygun ölçüleri kullanılarak iki boyutlu alan modelleri oluşturulmuş ve programın tabaka özellikleri kısmında malzemelerin kalınlıkları, malzeme özellikleri ve Kevlar/epoksi kompozit tabakası için oryantasyon açıları girilmiştir. ABS, kompozit malzemeler ve FM73 mekanik özellikleriyle ilgili Tablo 1’deki değerler programa girilmiştir. FM73 yapıştırıcının izotropik olduğu varsayılırken, 3D baskı ABS polimerinin ve Kevlar/epoksi kompozit malzemesinin ortotropik mekanik özellikleri yazılıma girilmiştir. İki boyutlu alan modeli düzgün şekilde ağ yapısına (mesh) bölünebilmesi amacıyla bölümlere ayrılmış ve yapıştırma komutu kullanılarak yeniden birleştirilmiştir. Ayrıca, modelin kenarları seçilip her kenar için eleman sayısı ve boyutları ayarlanmıştır. Yakınsama çalışması yapılarak uygun eleman ve düğüm sayıları belirlenmiştir. Çekme numune modelinde 416 adet eleman ve 1369 düğüm varken eğilme numune modelinde 400 adet eleman ve 1301 adet düğüm vardır. Çekme ve eğme numunelerin tabakalı sonlu elemanlar modelleri sırasıyla Şekil 5 ve 6’de gösterilmiştir.



Şekil 4. SHELL281 elemanı [23]



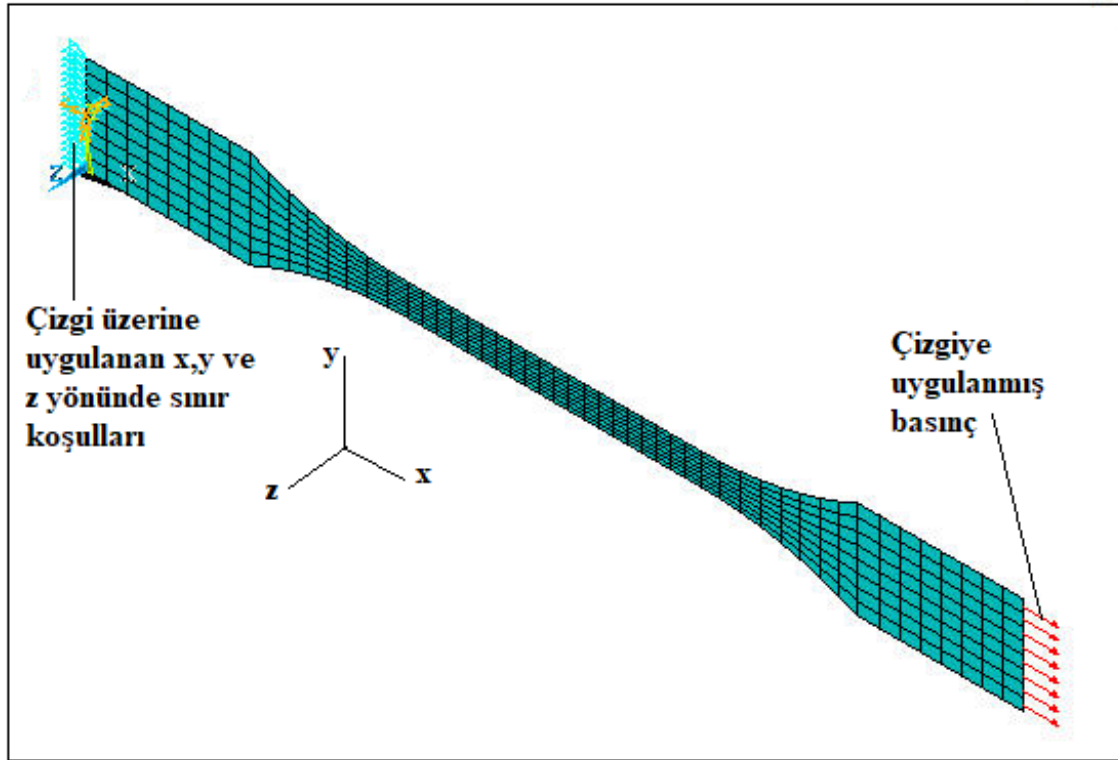
Şekil 5. Çekme numunesinin tabakaları ve kalınlıkları girilerek elde edilen sonlu elemanlar modeli



Şekil 6. Üç nokta eğme numunesinin tabakalı sonlu elemanlar modeli

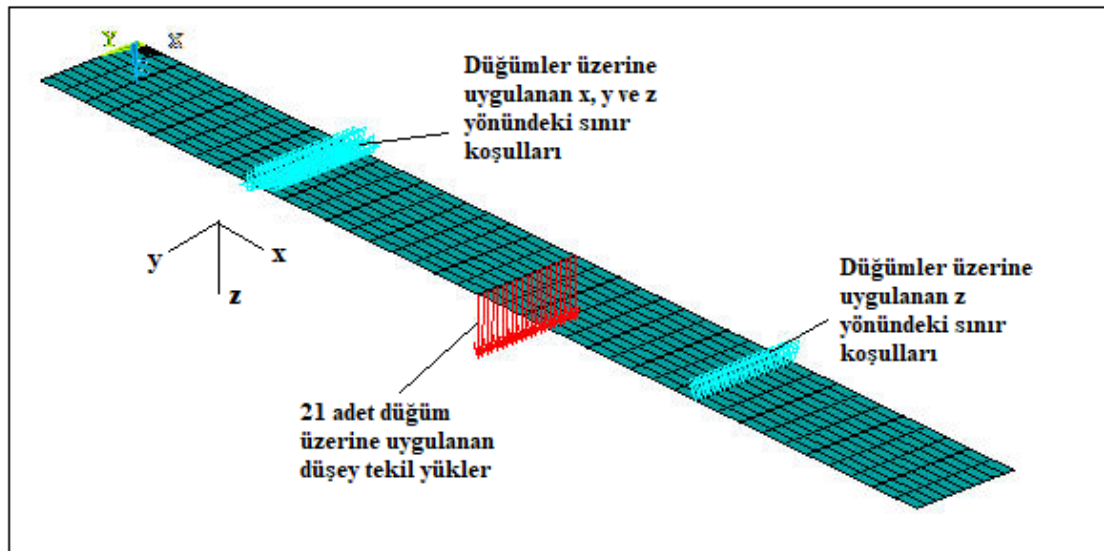
Çekme ve eğme numunelerinin sonlu eleman modellerine, programın çözüm kısmında sınır ve yükleme koşulları uygulanmıştır. Çekme numunesi modelinin sol kenarı x, y ve z eksenleri doğrultusunda sınırlandırılmıştır. Şekil 7'de görüldüğü gibi, çekme modelinin sağ kenarına çizgisel basınç uygulanmıştır. Yüklemenin çizgisel basınç

olarak uygulanmasının sebebi modelin iki boyutlu olması ve hasar yükünün kolaylıkla bulunabilmesidir. Uygulanan kuvvet çizgisel basınçla çizgi uzunluğunun çarpılmasıyla bulunabilmektedir.



Şekil 7. Çekme numunesinin 2 boyutlu sonlu elemanlar modelinin sınır ve yükleme koşulları

Üç nokta eğme numunesi modelinde sınır koşulları Şekil 8’de görüldüğü gibi uygulanmıştır. Sol mesnette x,y ve z yönünde sınırlandırılmışken sağ mesnette sadece z yönünde yani düşey yönünde yer değiştirmesi sınırlandırılmıştır. Üç nokta eğme testini simule edebilmek ve iki mesnette moment oluşmaması için dönme serbestliği bırakılmıştır. Modelin orta hattındaki 21 adet düğüme eşit miktarda tekil düşey yükler uygulanmıştır.



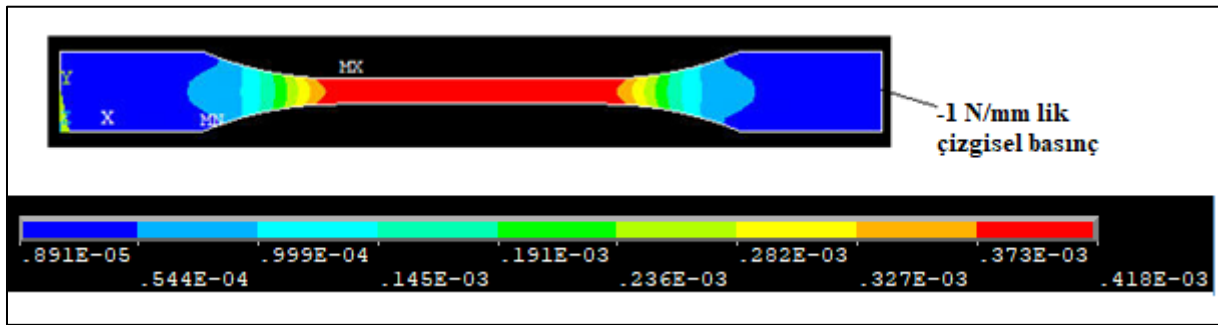
Şekil 8. Üç nokta eğme numunesinin 2 boyutlu sonlu elemanlar modelinin sınır ve yükleme koşulları

2.3 Çekme ve Eğme Numune Modellerinin İlk Hasar Yüklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada ilk hasar yükünün tespit edilmesi amaçlandığı için çekme ve eğme numune modellerinin çözüm aşamasında statik doğrusal elastik analiz yapılmıştır. Hem çekme hem de eğme numunelerine hasar veren ilk yükler sayısal olarak belirlenmiştir. İlk hasar yükleri Tsai-Wu dayanım indeksi kullanılarak hesaplanmıştır. Tsai-Wu dayanım indeksi değeri 1'e ulaştığında hasarın başladığı kabul edilir. Anizotropik malzemelere uygulanabilen Tsai-Wu hasar kriteri, Beltrami toplam şekil değiştirme enerjisi hasar teorisini baz alır. Tsai-Wu, düzlem gerilmedeki bir laminaya teoriyi uygulamıştır. Şayet denklem (1)'deki eşitsizlik ihlal edilirse tabakanın hasara uğradığı kabul edilir. Bu kriterin denklem (1)'deki H1, H2, H6, H11, H22 ve H66 bileşenleri dayanım parametreleri kullanılarak bulunur [24].

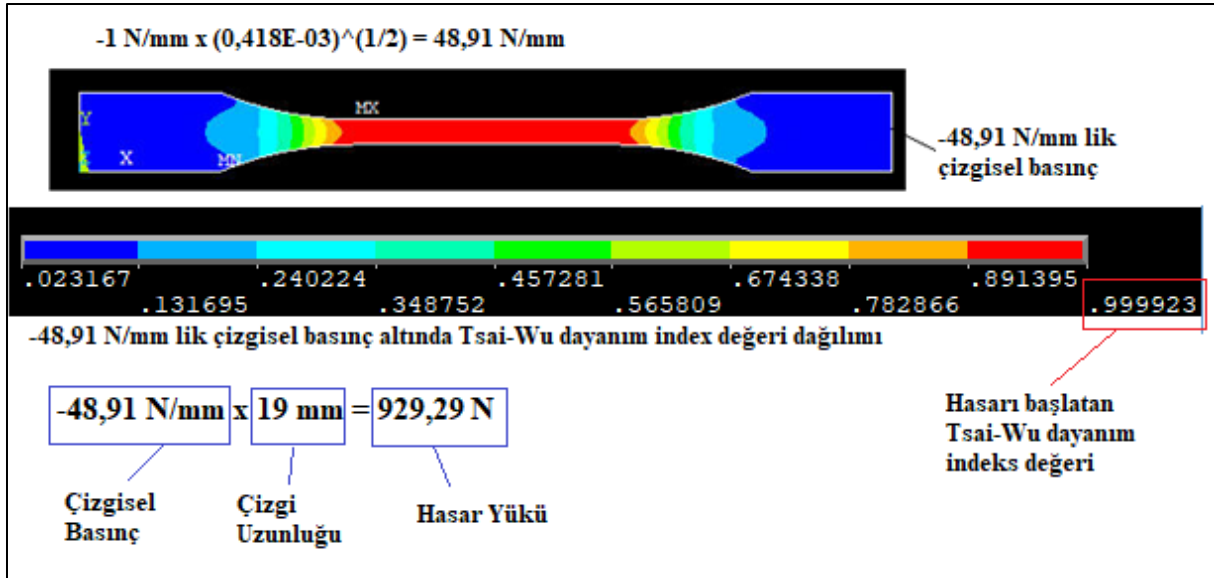
$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\sigma_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\sigma_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (1)$$

Çekme numune modellerinde ilk olarak -1 N/mm çizgisel basınç uygulanmıştır. Bu basınç için çözüm sonrası en ince kesitte en büyük gerilme olduğundan orta kesitteki Tsai-Wu dayanım indeksi belirlenmiştir. Örneğin, N numunesinin -1 N/mm çizgisel basınç için en ince kesitteki maksimum Tsai-Wu indeksi değeri 0,418E-03 olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Hasara neden olan çizgisel basınç değeri, -1 N/mm basınç değerinin maksimum Tsai-Wu indeks değerinin kareköküne bölünmesiyle -48,91 N/mm olarak bulunmuştur. Modelde hasara neden olan basınç değerine maruz bırakıldığında Tsai-Wu indeks değeri 1'e yaklaşmıştır. İlk hasar yükü, hasara neden olan basınç miktarı ile kenar uzunluğu çarpılarak hesaplanmıştır (Şekil 10). Bu sayede her numune için hasar yükleri sayısal olarak hesaplanabilmektedir.

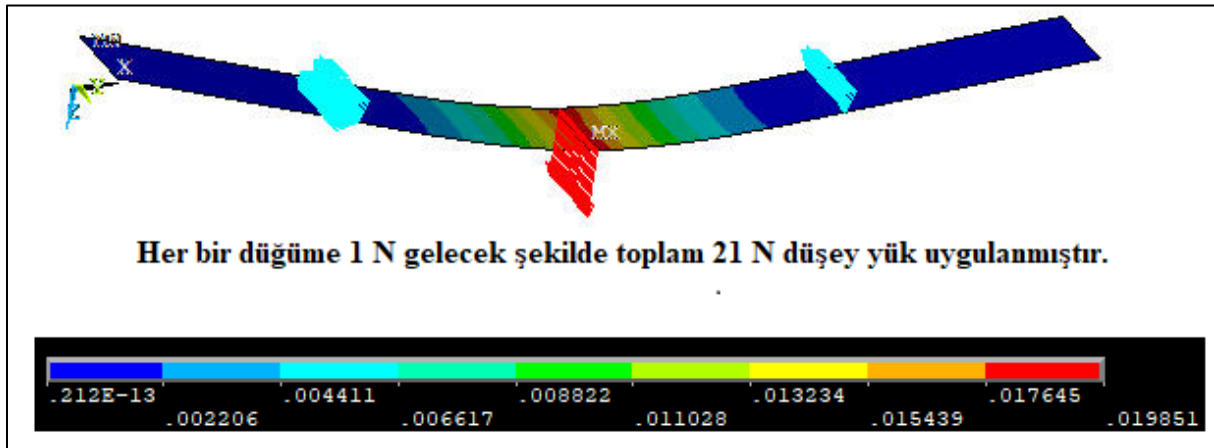


Şekil 9. N çekme numune modeli için -1 N/mm lik çizgisel basınç altında Tsai-Wu dayanım indeksi dağılımı

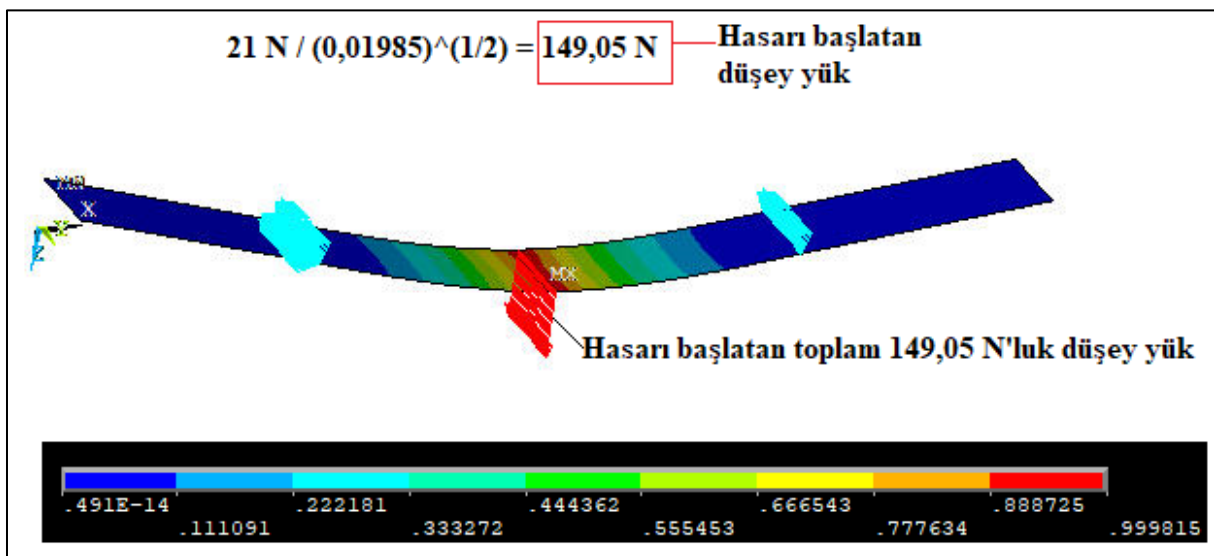
Eğilme numunelerinin hasar yükünü belirlemek için de benzer bir yöntem kullanılmıştır. N numunesi için hasar yükünün nasıl belirlendiğini şöyle açıklanabilir: Numunenin merkez hattındaki düğüm noktalarına önce her düğüme 1 N gelecek şekilde toplam 21 N'luk düşey yük uygulanmıştır. Şekil 11'de görüldüğü gibi bu yük için bir çözüm geliştirildiğinde Tsai-Wu dayanım indeksi değerinin maksimum değeri en orta kesitte olup 0,019851 olarak bulunmuştur. Şekil 12'de görüldüğü gibi 21 N'luk yük, belirlenen maksimum Tsai-Wu indeks değerinin kareköküne bölündüğünde hasara neden olan yük 149,05 N olarak tespit edilmiştir. Diğer eğme numune modelleri için de aynı yöntemle düşey hasar yükleri bulunmuştur.



Şekil 10. N çekme numune modeli için -48,91 N/mm lik çizgisel basınç altında Tsai-Wu dayanım index dağılımı ve hasar yükünün tespiti



Şekil 11. N eğme numune modeli için 21 N düşey yük altında Tsai-Wu dayanım index dağılımı



Şekil 12. N eğme numune modeli için 149,05 N'luk düşey yük altında Tsai-Wu dayanım index dağılımı ve hasarı başlatan yükün tespiti

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hasar analizleri tamamlandıktan sonra her çekme ve eğme numune modelleri için ilk hasar yükleri, uzama miktarları, çökme miktarları ve her katman için Tsai-Wu dayanım indeks değerleri tespit edilmiştir. Tablo 3 ve 4’de bu sayısal sonuçlar verilmiştir. Hem çekme hem de eğme numuneleri için Tsai-Wu dayanım indekslerine bakıldığında hepsinde ilk hasarın ABS polimer tabakasında başladığı görülmüştür. FM73 yapıştırıcı katmanlarda Tsai-Wu indeks değerleri 1’in oldukça altında çıkmıştır. Bu durum yapıştırıcı yüzeylerde yaygın olarak meydana gelen ayrılmanın (delaminasyon) ilk hasar anında gerçekleşmediğini göstermiştir. Kevlar/epoksi kompozit tabakaların Tsai-Wu indeks değerleri incelendiğinde 0° oryantasyonlu M ve M2 numunelerinin 45° oryantasyonlu N ve N2 numunelere göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Örneğin çekme M numunesinde Tsai-Wu indeks değeri 0,660 iken N numunesinde 0,084 dır. Bunun sebebi, 45° oryantasyonlu örülmüş kompozit yapının 0° oryantasyonluya göre oldukça esnek olması ve ilk hasar anında çok daha az yük taşımasındandır. İlk hasar anındaki deformasyon sonuçlarına bakıldığında hem çekme hem de eğme numune modelleri için uzama ve çökme miktarları birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Çekme numunelerinde uzama miktarı yaklaşık 1,4 mm eğme numunelerinde ise çökme yaklaşık 2,1 mm’dir. Çekme ve eğmede takviyesiz ABS ile takviyeli ABS’nin hasar anındaki deformasyonlarının yakın olması hasarın önce ABS de meydana geldiğinin diğer bir göstergesidir. Ayrıca, hasar anında ABS’deki gerilme ABS’nin dayanım (26 MPa) değerine de çok yakın çıkmıştır. Çekme ve eğme numune modellerinin ilk hasar yükleri incelendiğinde M2 numunesinde en yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi 0° oryantasyonlu ve iki katlı Kevlar/epoksi katmanı ile takviye edilmesidir. ABS’nin hasarı için gerekli olan deformasyonu oluşturmak için gerekli olan kuvvet en rijit sandviç yapıda en yüksek çıkmıştır. 45° oryantasyonlu N ve N2 numunelerinin hasar yükü ve rijitliğinin 0° oryantasyonlu M ve M2 numunelerine göre oldukça düşük olduğu görülmüştür. Takviyesiz çekme ve eğme ABS numune modelleriyle takviyeli ABS sandviç yapıları karşılaştırıldığında Kevlar/epoksi takviyesi ile hem ilk hasar yükü hem de rijitlik önemli ölçüde artmıştır. Örneğin takviyesiz çekme ABS numunesinin ilk hasar yükü 552,32 N iken takviyeli M2 numunesinin ilk hasar yükü 3378,46 N çıkmıştır.

Tablo 3. Kevlar/epoksi kompozit katman ile takviye edilmiş ABS çekme numunesi modeli için analiz sonuçları

Numune Tipi	İlk Hasar Yükü (N)	Numunenin ilk hasarında ABS’deki Tsai-Wu indeks değeri	Numunenin ilk hasarında FM73 Yapıştırıcısının Tsai- Wu indeks değeri	Numunenin ilk hasarında Kevlar/epoksi takviye malzemesinin Tsai- Wu indeks değeri	İlk hasar anındaki uzama miktarı (mm)	Numunenin ilk hasarında ABS’deki çekme yönündeki gerilme	Numunelerin Çekme Rijitliği (N/mm)
M numunesi	1702,23	0,999	0,303	0,660	1,402	25,96	1214,14
N numunesi	929,29	0,999	0,282	0,084	1,37	25,49	678,31
M2numunesi	3378,46	0,999	0,303	0,636	1,404	25,97	2406,31
N2 numunesi	1490,54	0,999	0,276	0,029	1,35	25,99	1104,1
Takviyesiz ABS numunesi	552,32	0,999	-	-	1,401	25,98	394,22

Daniel ve ark. [17] tarafından yapılan deneysel çalışmada cam/epoksi tek ve çift tabaka ile kaplanmış ABS numunelerin takviyesiz ABS'lere göre dayanımının sırasıyla 2 ve 2,6 katına çıktığı görülmüştür. Bizim çalışmada ise Kevlar/epoksi tek ve çift tabaka ile kaplanmış 0° oryantasyonlu ABS numunelerin takviyesiz ABS'ye göre dayanımı sırasıyla yaklaşık olarak 3 ve 6 katına çıktığı bulunmuştur. Galatas ve ark. [12] tarafından yapılan

çalışmada ise ABS üzerine karbon fiber takviyeli kompozit tabakalarla güçlendirilmesi ile dayanımın 9 kata kadar Young modülünün ise yaklaşık 16 kata kadar arttığı tespit edilmiştir. Karbon fiberin ABS üzerinde bu iyileştirici özelliklerine rağmen karbon takviyeli polimerlerin darbe direnci performansının cam elyaf takviyeli polimerlerden bile daha kötü olduğu görülmüştür [25]. Bu sebeple, bizim çalışmamızda dayanım ve rijitliğe katkısı açısından değerlendirilen Kevlar/epoksi kompozit tabakaların 3D baskı ABS polimerlerinin güçlendirilmesinde alternatif olabileceği düşünülebilir. Böylece, dayanım, rijitlik ve darbe direnci yüksek 3D baskı ABS polimer ürünleri üretilebilir. Kevlar/epoksi kompozit tabakaları ile takviye edilmiş ABS'nin deneysel çekme, eğme ve darbe testleri başka bir çalışmanın konusu olabilir.

Tablo 4. Kevlar/epoksi kompozit katman ile takviye edilmiş ABS eğilme numunesi modeli için analiz sonuçları

Numune Tipi	İlk Hasar Yüklü (N)	Numunenin ilk hasarında ABS' deki Tsai-Wu indeks değeri (3. tabaka)	Numunenin ilk hasarında FM73 Yapıştırıcısının Tsai-Wu indeks değeri (2. Tabaka / 4. tabaka)	Numunenin ilk hasarında Kevlar/epoksi takviye malzemesinin Tsai-Wu indeks değeri (1. tabaka/ 5. tabaka)	İlk hasar anındaki çökme (mm)	Numunenin ilk hasarında ABS' deki eğme yönündeki gerilme (MPa)	Numunelerin eğilme Rijitliği (N/mm)
M numunesi	347,65	0,999	0,269 / 0,332	0,724 / 0,878	2,11	24,41	167,76
N numunesi	149,03	0,999	0,278 / 0,343	0,083 / 0,115	2,00	25,04	74,51
M2 numunesi	650,30	0,999	0,282 / 0,336	0,694 / 0,87	2,20	24,96	295,59
N2 numunesi	284,97	0,999	0,277 / 0,342	0,112 / 0,175	2,14	25,28	133,16
Takviyesiz ABS numunesi	45,76	0,999	-	-	2,15	25,99	21,28

Daniel ve ark. [17] tarafından yapılan deneysel çalışmada cam/epoksi tek ve çift tabaka ile kaplanmış ABS numunelerin takviyesiz ABS'lere göre dayanımının sırasıyla 2 ve 2,6 katına çıktığı görülmüştür. Bizim çalışmada ise Kevlar/epoksi tek ve çift tabaka ile kaplanmış 0° oryantasyonlu ABS numunelerin takviyesiz ABS'ye göre dayanımı sırasıyla yaklaşık olarak 3 ve 6 katına çıktığı bulunmuştur. Galatas ve ark. [12] tarafından yapılan çalışmada ise ABS üzerine karbon fiber takviyeli kompozit tabakalarla güçlendirilmesi ile dayanımın 9 kata kadar Young modülünün ise yaklaşık 16 kata kadar arttığı tespit edilmiştir. Karbon fiberin ABS üzerinde bu iyileştirici özelliklerine rağmen karbon takviyeli polimerlerin darbe direnci performansının cam elyaf takviyeli polimerlerden bile daha kötü olduğu görülmüştür [25]. Bu sebeple, bizim çalışmamızda dayanım ve rijitliğe katkısı açısından değerlendirilen Kevlar/epoksi kompozit tabakaların 3D baskı ABS polimerlerinin güçlendirilmesinde alternatif olabileceği düşünülebilir. Böylece, dayanım, rijitlik ve darbe direnci yüksek 3D baskı ABS polimer ürünleri üretilebilir. Kevlar/epoksi kompozit tabakaları ile takviye edilmiş ABS'nin deneysel çekme, eğme ve darbe testleri başka bir çalışmanın konusu olabilir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek ve çift katmanlı 0° ve 45° oryantasyon açılı örülmüş Kevlar/epoksi tabakalarıyla takviye edilmiş ABS polimerlerin sonlu elemanlar metodu kullanılarak çekme ve eğme numune modellerinin statik analizleri yapılmıştır. Her numune modeli için ilk hasar yükü, her tabakanın Tsai-Wu dayanım indeks değeri, çekme numunesi için uzama, eğme numunesi için çökme miktarı ve rijitlik değeri tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar genel olarak, ABS yüzeyinin Kevlar/epoksi kompozit takviye tabakası ile kaplanmasının rijitliği ve ilk hasar yükünü önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu çalışmada, Kevlar/epoksi tabaka ile takviye edilmiş ABS'nin sonlu eleman analizleri ile katman sayısı ve fiber oryantasyon açısını değiştirerek istenilen özellikte yeni bir yapı elde edilebileceği, hasar yükünün ve yük altında tabakalardaki hasar risklerinin belirlenebileceği görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada üretime geçmeden önce zamandan tasarruf etmek ve en iyi bulguları elde etmek için, takviye malzemeleri kullanılarak 3D baskı ABS polimerlerinin güçlendirmesi incelenirken sonlu eleman yönteminin önemli bir araç olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen, KTQ, Hui D (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B* 143:172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
2. Dizon JRC, Espera AH, Chen Q (2018) Advincula, R.C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Addit. Manuf.* 20:44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
3. Mustapha KB, Metwalli KM (2021) A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites. *Eur Polym J* 156:110591. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110591>
4. Tan LJ, Zhu, W, Zhou, K (2020) Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing. *Adv Funct Mater* 30:2003062. <https://doi.org/10.1002/adfm.202003062>
5. Bhagia S, Bornani K, Agrawal R, Satlewal A, Durkovic J, Lagana R, Bhagia M, Yoo CG, Zhao X, Kunc V (2021) Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. *Appl Mater Today* 24:101078. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101078>
6. Shahrubudin N, Lee TC, Ramlan R (2019) An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manuf* 35:1286–1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
7. Arefin AME, Khatri NR, Kulkarni N, Egan PF (2021) Polymer 3D Printing Review: Materials, Process, and Design Strategies for Medical Applications. *Polymers* 13:1499. <https://doi.org/10.3390/polym13091499>
8. Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D (2017) 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. *Compos B Eng* 110:442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
9. Cavalcanti DKK, Banea MD, de Queiroz HFM (2019) Mechanical characterization of bonded joints made of additive manufactured adherends. *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle XII. Weld Equip Technol* 30:27–33. <https://doi.org/10.35219/awet.2019.04>
10. Cavalcanti DKK, Banea MD, de Queiroz HFM (2020) Effect of material on the mechanical properties of additive manufactured thermoplastic parts. *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle XII. Weld Equip Technol* 31:5–12. <https://doi.org/10.35219/awet.2020.01>
11. Dul S, Fambri L, Pegoretti A (2016) Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites. *Compos A Appl Sci Manuf* 85:181–191. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.013>
12. Galatas A, Hassanin H, Zweiri Y, Seneviratne L (2018) Additive manufactured sandwich composite/ABS parts for unmanned aerial vehicle applications. *Polymers* 10(11):1262. <https://doi.org/10.3390/polym10111262>
13. Gohar S, Hussain G, Ali A, Ahmad H (2021) Mechanical performance of honeycomb sandwich structures built by FDM printing technique. *J Thermoplast Compos Mater* 36(1). <https://doi.org/10.1177/0892705721997892>
14. Belter JT, Dollar AM (2014) Strengthening of 3D printed robotic parts via fill compositing. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA*, pp. <https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942959>
15. Li G, Zhao J, Wu W, Jiang J, Wang B, Jiang H, Fuh, JYH (2018) Effect of ultrasonic vibration on mechanical properties of 3d printing non-crystalline and semi-crystalline polymers. *Materials* 11:826. <https://doi.org/10.3390/ma11050826>
16. Ravi AK, Deshpande A, Hsu KH (2016) An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *J Manuf Process* 24:179–185. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>

17. Daniel KKC, Henrique FMDQ, Jorge SSN, Mariana DB (2022) Strengthening of additive manufactured parts by using different type of fibre reinforcements The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 123:1889–1903. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10327-8>
18. Bin KR, Ferdous N (2012) Kevlar-The Super Tough Fiber. International Journal of Textile Science 1:78-83. <https://doi.org/10.5923/j.textile.20120106.04>
19. Zhu D, Mobasher B, Rajan SD (2011) Dynamic Tensile Testing of Kevlar 49 Fabrics. Journal of Materials in Civil Engineering 23:1-11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000156](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000156)
20. İçten BM, Karakuzu R, Toygar ME (2006) Failure analysis of woven kevlar fiber reinforced epoxy composites pinned joints. Compos Struct 73(4):443-450. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.02.016>
21. Cheuk PT, Tong L, Rider AN, Wang J (2005) Analysis of energy release rate for fatigue cracked metal-to-metal double-lap shear joints, International Journal of Adhesion and Adhesives 25:181-191. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2004.04.007>
22. Han X, Crocombe AD, Anwar SNR, Hu P (2014) The strength prediction of adhesive single lap joints exposed to long term loading in a hostile environment. Int J Adhesion Adhes 55:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.06.013>
23. Ansys Help Page. Available online:
https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_elem/Hlp_E_SHELL281.html?q=shell281 Erişim 15.11.2024
24. Autar KK (2006) Mechanics of Composite Materials. 2. Baskı, CRC Press Taylor & Francis Group, USA.
25. Wan Y et al (2022) Experimental studies of low-velocity impact behavior on hybrid metal wire net/woven carbon-fiber reinforced composite laminates. Compos Commun 32:101185. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101185>