

## Cıvata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda hasar analizi Failure analysis of bolted laminated composite plates

Tolga DURSUN<sup>1\*</sup>, Mahmut ÖZBAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ASELSAN Anonim Şirketi, Mikroelektronik Güdüm ve Elektro-Optik Sektör Başkanlığı, Ankara, Türkiye.  
tdursun@aselsan.com.tr

<sup>2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
ozbaym@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.02.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 02.02.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 15.12.2019

doi: 10.5505/pajes.2020.99075  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bu çalışmada, cıvata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda çekme mukavemetini yüksek hassasiyette belirleyebilmek amacıyla kademeli hasar ilerleme modeli kullanılarak hasar analizi uygulanmıştır. Hasar ilerleme modeli ANSYS APDL kullanılarak hazırlanmıştır. Hashin hasar kriterleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmış ve oldukça benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca levha genişliği/delik çapı oranı ( $W/D$ ) 2'den 4'e kadar, kenar uzaklığı/delik çapı oranı ( $E/D$ ) ise 1'den 4'e kadar değiştirilerek geometrik etkilerin kompozit yapının yük taşıma kapasitesine etkisi araştırılmış ve maksimum çekme dayanımları hesaplanmıştır.  $W/D$  ve  $E/D$  oranları 2 için hasar levhanın serbest kenarına doğru kayma (yırtilma) şeklinde ilerlemiştir.  $W/D$  ve  $E/D$  oranları 2'den büyük olduğunda hasar ezilme (yatak hasarı) şeklinde gerçekleşmiştir.  $[0_2/90_2]_s$  konfigürasyonuna sahip kompozit levhada net çekme hasarı meydana gelmemiştir.  $W/D$  ve  $E/D$  oranları 3 olduğunda kompozit levha maksimum yatak (ezilme) mukavemetine ulaşmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Hasar ilerleme algoritması, Kompozit, Sonlu elemanlar yöntemi.

### Abstract

In this study, in order to determine the tensile strength of bolted laminated composite plates with high fidelity, failure analyses were performed by applying progressive damage model. Progressive damage finite element model was built using ANSYS APDL. Finite element failure analyses were performed using Hashin's failure criteria. Results of the present study were compared with the experimental data and very consistent results were obtained. Additionally, changing the plate width/ hole diameter ratio ( $W/D$ ) between 2-4 and edge distance/hole diameter ratio ( $E/D$ ) between 1-4, the effects of geometric parameters on the load carrying capacity of the composite plate were investigated and maximum tensile failure loads were determined. For  $W/D$  and  $E/D$  ratios equal to 2, failure propagated towards the free end of the plate showing shear failure mode. For  $W/D$  and  $E/D$  ratios greater than 2, bearing failure mode occurred. For  $[0_2/90_2]_s$  configuration no net-tension failure mode occurred in the composite plate and for  $W/D$  and  $E/D$  ratios equal to 3 maximum bearing strength was achieved.

**Keywords:** Progressive damage algorithm, Composite, Finite element method.

### 1 Giriş

Kompozit malzemeler metalik malzemelere kıyasla yüksek özgül mukavemet ve katılık, korozyon ve yorulma direncine sahip olmalarından dolayı özellikle son yıllarda havacılık sanayinde birincil (ana) yapı malzemesi olarak kullanım alanları bulmaktadırlar. Uzun mesafe ticari yolcu uçaklarında kompozit malzemelerin kullanımı toplam ağırlığın %50'sine kadar ulaşmaktadır. Kompozit yapıların oluşturulmasında cıvata/somun, perçin veya yapıştırma tekniği kullanılmaktadır. Mekanik bağlantı şekillerinin yapıştırmaya göre en önemli avantajı, montaj/demontaj işleminin çok daha basit olması ve yük taşıma kapasitesinin fazla oluşudur. Bu nedenle en yaygın bağlantı şekli olarak kabul edilmektedir ancak bu birleştirme şeklinin en önemli olumsuz tarafı ise yapılar üzerine açılan deliklerin sebep olduğu gerilme yığılmalarıdır. Bu durum da yapının mukavemetini zayıflatmaktadır. Kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet ve katılık değerlerine sahip olmalarına rağmen kırılma ve anizotropik yapıda olmalarından dolayı gerilme yığılmalarına karşı çok hassastırlar. Buna ilave olarak kompozitlerde yüklenme durumuna bağlı olarak farklı ve karmaşık hasar şekilleri oluşabilmektedir. Hasar tiplerine örnek olarak fiber kopması, matris yapıda çatlak oluşması ve delaminasyon verilebilir.

Haft ve dayanımı yüksek kompozit yapılar tasarlayabilmek için bu malzemelerin farklı yüklemeler altındaki davranışlarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu malzemelerin çekme mukavemetini ve hasar ilerleme şeklini belirleyebilmek amacıyla çok sayıda deneysel ve sayısal çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Üzerinde delik açılmış levhaların çekme ve basma mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli hasar modelleri üzerinde çalışılmıştır [1]-[4].

Nuismer ve Whitney [1] çalışmalarında üzerinde bir delik açılmış kompozit levha için iki kriterden bahsetmişlerdir. İlk kriterde delik çevresinden "d" uzaklığında oluşan gerilme, malzemenin çekme dayanımına eşit veya büyük olduğunda levhada kırılma meydana gelir. İkinci kriterde göre, delik çevresinden "a" değeri kadar uzaklıkta oluşan ortalama gerilme, malzemenin çekme dayanımına eşit veya büyük olduğunda levhada kırılma meydana gelir. Hesaplanan "d" ve "a" uzaklıklarının yapının şeklinden ve gerilmenin yapı üzerindeki dağılımından bağımsız ve malzeme özelliği olduğu gösterilmiştir. Yukarıda anlatılan kriterlere göre hasarın ilerleme yönü ve hasar tipi belirlenmemektedir. Chang [2],[3], kompozit levhalarda hasar tipinin ve hasarın ilerleme yönünün belirlenebilmesi amacıyla çalışmalar yapmıştır. İki boyutlu analizler için geliştirilen hasar kriteri, farklı takviye açlarına ve

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

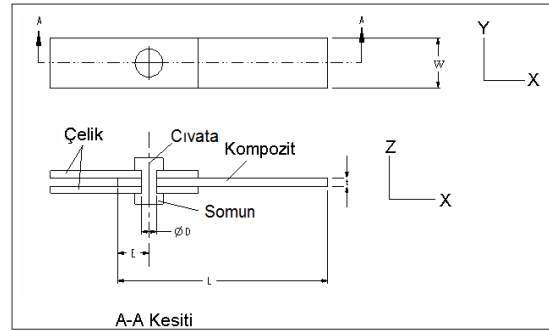
tabakalara sahip kompozit levhaların sonlu eleman analizlerinde kullanılmış ve model deney sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Tan [4], Tsai-Wu hasar kriterini kullanarak ortasında delik bulunan farklı takviye ve tabaka sayısına sahip kompozit levhalarda hasar tipini belirlemek üzere sonlu eleman analizleri yapmıştır. Lessard ve Shokrieh [5] pimden yüklenen delikli kompozit levhalar için hasar ilerleme modeli geliştirmiş ve bu modeli iki boyutlu sonlu eleman analizlerinde kullanarak kompozit levhaların çekme mukavemetlerini belirlemiştir. Okutan [6] ile İçten ve diğ. [7],[8], cam/epoksi ve kevlar/epoksi malzemelerinden üretilmiş pim bağlantılı kompozit yapılarda geometri özelliklerinin çekme mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Karakuzu ve diğ. [9] cam-vinylester/epoksi malzemeden imal edilmiş ve pimden yüklenmiş kompozit levhada geometri özelliklerinin yatak mukavemetine olan etkisini incelemek, hasar şekillerini ve yönlerini belirlemek üzere deneyler yapmış ve Hashin kriterlerini kullanarak yapılan sonlu eleman analizleriyle de sonuçları karşılaştırmışlardır. Dursun ve Özbay [10] ortasında delik bulunan tabakalı kompozit levhaların çekme dayanımını hesaplamak, hasar şekli ve kademeli hasar ilerlemesini Hashin hasar kriterlerini uygulayarak modellemek ve sonlu elemanlar analizi yapmak için ANSYS APDL kullanarak kod yazmışlar ve uyguladıkları modeli diğer çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Wang ve Hung [11],[12] civata bağlantılı kompozit levhalarda yatak mukavemetini incelemek üzere deneysel ve sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında civata öngerilmesinin çekme mukavemetine etkisini de incelemiştir. Civata ile birleştirilmiş kompozit yapıların çekme dayanımını belirlemek, geometrik faktörlerin hasar şekillerine etkisini görmek ve hasar ilerlemesini modellemek üzere hasar modelleri oluşturulmuştur. Üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmış ve yataklama mukavemetinin belirlenmesi üzerine analizler gerçekleştirilmiş, civata bağlantılı kompozit yapıların etkin ve performanslı kullanımına yönelik geometrik bilgiler ile elyaf takviye bilgileri çalışmalarda belirtilmiştir [13]-[20]. Ataş ve diğ. [21],[22] HTS40/977-2 karbon/epoksi malzemeden imal edilmiş çift taraflı civatalı kompozit yapıda hasar oluşumunu ve ilerlemesini modellemek üzere ANSYS yazılımını kullanarak makro yazmışlardır. Çalışmalarında sadece yatak hasarını incelemişler ve modellerini deneysel çalışmalarla doğrulamış, öngerilme ve sürtünme etkisini incelemiştir. Ayrıca civata bağlantı bölgesinde matraste meydana gelen delaminasyon modellenebilmesi için bu bölgede kohesif (yapışık) alan elemanları kullanarak sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Turan ve diğ. [23] pim bağlantılı karbon/epoksiden imal edilmiş kompozit yapıda elyaf açılarının ve geometri özelliklerinin hasar yüküne olan etkisini incelemek, hasar şekillerini ve yönlerini belirlemek üzere deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında kademeli hasar oluşumunu modellemek için makro yazmışlar ve ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Zhang ve diğ. [24] X850 karbon/epoksiden imal edilmiş çift taraflı civata bağlantılı kompozit yapıda delik merkezinin levha kısa kenarına olan mesafesini değiştirerek deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Farklı hasar ilerleme ve malzeme zayıflatma kuralları uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda delik çapının, levhanın kısa kenarına olan mesafesinin oranı 3 olduğu durumda en uygun mukavemet değerini elde etmişlerdir. Du ve diğ. [25] cam/epoksiden imal edilmiş çift taraflı civata bağlantılı kompozit yapı için deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında sadece yatak hasarını modellemiş

ve Abaqus yazılımı kullanarak açık (eksplisit) sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Doğrusal olmayan gerilim-gerinim ilişkisi ve gerinim tabanlı sürekli zayıflatma kuralı uygulamışlardır. Açık sonlu elemanlar metodunun yakınsama problemini çözdüğü ve çözüm süresini kısalttığı belirtilmiştir.

Literatürde civata bağlantılı kompozit yapılarla ilgili çalışmaların çoğu tek taraflı bağlantıları içermekte olup az sayıda çalışmada çift taraflı yapılar incelenmiştir. Ayrıca çalışmalarda kullanılan kademeli hasar analiz kodları ilgili araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olup ortak kullanıma kapalıdır. Dolayısıyla kompozit yapılara yönelik araştırma, geliştirme ve tasarım faaliyetleri için bu tarz yeteneklerin kazanılması önem arz etmektedir. Bu çalışmada, belirtilen yeteneği kazanarak kompozit yapıların davranışlarını detaylı inceleyebilmek hedeflenmiştir. Bu amaçla literatürde az çalışılmış olan tabakalı T300/5208 grafit/epoksi malzemeden imal edilmiş çift taraflı civata bağlantılı yapılarda hasarın oluşumunu ve ilerlemesini modellemek ve levha üzerindeki delik pozisyonunun çekme dayanımına etkisini incelemek üzere üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Hasarın oluşumunu ve ilerlemesini belirlemek amacıyla ANSYS APDL programlama dili kullanılarak bir kod hazırlanmıştır. Kodla literatürde yer alan çalışmalara göre farklı zayıflatma kuralı ve katsayıları ile yük arttırma oranı uygulanarak civata bağlantılı kompozit levhaların geometriye bağlı çekme dayanımı ve hasar şekilleri tespit edilmiştir.

## 2 Problem tanımı ve malzeme

İncelenen civata bağlantılı tabakalı kompozit levhaya ait geometri Şekil 1'de gösterilmiştir. Kompozit levha iki adet çelik levhaya bir adet civata ve somun ile bağlanmıştır. Kompozit levha bir uçundan sabit tutulurken çelik levhalara çekme kuvveti uygulanmıştır.



Şekil 1. Civata bağlantılı kompozit levha.

Figure 1. Bolted laminated composite plate.

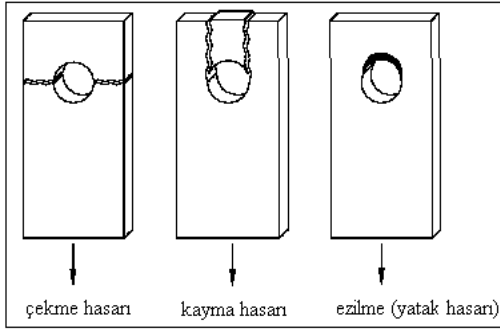
Kompozit levha T300/5208 grafit/epoksi olup  $[0_2/90_2]_s$  konfigürasyonuna sahip sekiz tabakadan oluşmaktadır. 0 derecedeki fiberler yüklemeye yönü olan x-ekseninde yerleştirilmiştir. E/D oranı için 1 ile 4 ve W/D oranı için de 2 ile 4 arasında farklı değerler verilerek geometrik etkilerin kompozit yapıda çekme kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Burada W; levhanın genişliğini, D; delik çapını ve E ise delik merkezinin kısa kenara olan uzaklığını göstermektedir. Civata çapı 5 mm olarak alınmış ve tüm analizlerde bu ölçü sabit tutulmuştur. Kompozit levha kalınlığı ise 3 mm olarak belirlenmiştir. Civata deliğe boşluksuz olarak yerleştirilmiştir. Çelik levhalar ve civata/somun bağlantıları elastik olarak modellenmiş olup, bu yapılara ait Young's modülü  $E=190$  GPa ve Poisson oranı  $\nu = 0.3$  alınmıştır. Kompozit malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri [12].

Table 1. Mechanical properties of composite material.

E <sub>1</sub> GPa	E <sub>2</sub> GPa	E <sub>3</sub> GPa	G <sub>12</sub> GPa	G <sub>23</sub> GPa	G <sub>13</sub> GPa	ν <sub>12</sub>	ν <sub>23</sub>	ν <sub>13</sub>	X <sub>T</sub> MPa	X <sub>C</sub> MPa	Y <sub>T</sub> MPa	Y <sub>C</sub> MPa	S MPa
181	10.3	10.3	7.2	3.5	7.2	0.28	0.52	0.28	1500	1500	40	246	68

Cıvata ile birleştirilmiş levhalarda meydana gelen hasar tipleri Şekil 2’de belirtilmiştir. Bu hasar şekilleri deliğin pozisyonuna ve kompozit levhalarda takviye yönüne bağlı olarak meydana gelmektedir.



Şekil 2. Cıvata ile birleştirilmiş levhalarda meydana gelen hasar tipleri [7].

Figure 2. Failure modes of bolted plates.

### 3 Sonlu elemanlar analizi

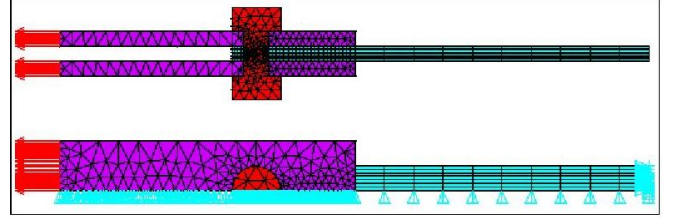
#### 3.1 Sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar modeli ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Çözüm süresini kısaltmak amacıyla cıvata ve somun yekpare olarak modellenmiştir. Cıvata/somun ve çelik levhalar tetrahedral elemanlar (SOLID 187) kullanılarak, kompozit levha ise tabakalı kübik elemanlar (SOLID 46) kullanılarak modellenmiş ve ağ yapısı oluşturulmuştur. Her bir tabaka bir eleman kalınlığında modellenmiştir. Delik çevresinde meydana gelen gerilmeleri doğru şekilde hesaplayabilmek amacıyla bu bölgede daha yoğun elemanlar kullanılmıştır. Delik çevresinde uygun eleman yoğunluğunun belirlenebilmesi amacıyla yakınsama testi yapılmış ve bu amaçla çeşitli sonlu elemanlar analizleri uygulanmıştır. Temas eden yüzeyler arasında sürtünme katsayısı 0.2 olarak uygulanmıştır. Temas modellemesinin doğrulanması amacıyla bir dizi analizler yapılmış ve buna göre uygun model belirlenmiştir [26]. Geometri ve yükleme şekli simetrik olduğundan modelin sadece yarısı modellenmiştir. Böylelikle çözüm süresi kısaltılmıştır. Kompozit levhanın bir ucu bütün yönlerde sabitlenmiştir. Z-X düzlemi boyunca simetri sınır koşulları uygulanmıştır.

Çelik levha ile kompozit levha ve cıvata/somun ile kompozit levha delik iç yüzeyi arasında ANSYS kütüphanesinde bulunan yüzey-yüzey temas elemanları (CONTA 174, TARGE 170) kullanılarak temas tanımlanmıştır. Penalty-Lagrange multipliers temas algoritması seçilmiştir.

Bu çalışmada cıvata ön gerilmesi uygulanmamış olup en kötü senaryo olan cıvatanın gevşemiş olma durumu dikkate alınmış, ön gerilme etkisinin ileriki çalışmalarda araştırılması hedeflenmiştir. Çelik levhaların uzak kenarlarına yükleme kademeli şekilde uygulanmıştır. İncelenen yapıya ait geometri, sonlu elemanlar ağ yapısı, uygulanan kuvvet ve simetri

koşullarına göre sabitlenen düğüm noktaları Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. İncelenen yapıya ait sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları [26].

Figure 3. Finite element model and boundary conditions for the structure under investigation.

#### 3.2 Hasar ilerleme algoritması

Cıvata bağlantılı kompozit levhalarda sonlu elemanlar analizlerinde kademeli arttırılarak uygulanan yüklemeye bağlı olarak hasarın başlamasının ve ilerlemesinin modellenmesi amacıyla ANSYS APDL dili kullanılarak bir kod [26] hazırlanmıştır. Hasar ilerleme analizi dört ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sonlu elemanlar modelinin oluşturulması, gerilme analizi, hasar analizi ve mekanik özelliklerin hasar şekline göre zayıflatılmasıdır. Geliştirilen kod yardımıyla üç boyutlu ve parametrik sonlu elemanlar modeli hazırlanabilmektedir. Gerilme analizi ile yükleme sonucunda kompozit malzemenin her tabakasındaki elemanlarda oluşan gerilme dağılımı elde edilmektedir. Hasar analizinde seçilen hasar kriterine göre hesaplama yapılarak her bir elemanın hasar durumu belirlenmektedir. Bu çalışmada hasar analizlerinde Hashin hasar kriteri uygulanarak her bir elemenda hasarın meydana gelip gelmediği her yükleme adımında kontrol edilmektedir. Hasar analizi sonucunda elemanlarda hasar tespit edilirse hasar şekline bağlı olarak o elemanta ait mekanik özelliklerinde Tablo 2’de belirtilen kurala göre zayıflatma uygulanmaktadır. Çözüm esnasında yakınsama problemi ile karşılaşılması amacıyla kompozit malzemeye ait elastik özellikler sıfıra indirgenmemiş fakat %1’e indirgenerek hasar benzetilmiştir. Hasara uğrayan elemanın hangi hasara maruz kaldığını gösteren renk kodu Tablo 2’de belirtilmiştir.

Analizlerde uygulanan Hashin hasar kriterleri [27] Denklem (1)-(5)’te belirtilmiştir.

Matris çekme hasarı, ( $\sigma_2 > 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 > 1 \quad (1)$$

Matris basma hasarı, ( $\sigma_2 < 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 > 1 \quad (2)$$

Fiber çekme hasarı, ( $\sigma_1 > 0$ )

Tablo 2. Malzeme özellikleri zayıflatma kuralı ve hasar şekli renk kodu.  
Table 2. Material property degradation rule and color code for failure mode.

Hasar şekli	İndirgenen malzeme özellikleri						Hasar renk kodu
	$E_1^f$	$E_2^f$	$E_3^f$	$G_{12}^f$	$G_{23}^f$	$G_{13}^f$	
Hasar yok	-	-	-	-	-	-	Beyaz
Matris çekme hasarı	-	$0.01 E_2^i$	$0.01 E_3^i$	-	-	-	Mavi
Matris bası hasarı	-	$0.01 E_2^i$	$0.01 E_3^i$	-	-	-	Turuncu
Fiber- matris kayma hasarı	-	-	-	$0.01 G_{12}^i$	$0.01 G_{23}^i$	$0.01 G_{13}^i$	Mor
Fiber çekme hasarı	$0.01 E_1^i$	$0.01 E_2^i$	$0.01 E_3^i$	$0.01 G_{12}^i$	$0.01 G_{23}^i$	$0.01 G_{13}^i$	Siyah
Fiber bası hasarı	$0.01 E_1^i$	$0.01 E_2^i$	$0.01 E_3^i$	$0.01 G_{12}^i$	$0.01 G_{23}^i$	$0.01 G_{13}^i$	Kırmızı

<sup>i</sup>: Hasar yok, <sup>f</sup>: Hasar sonrası, durum, (-): Hasar şeklinden etkilenmemiş.

Fiber-matris arasındaki kayma hasarı, ( $\sigma_1 < 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (3)$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (4)$$

Fiber basma hasarı, ( $\sigma_1 < 0$ )

$$\frac{\sigma_1}{X^c} > 1 \quad (5)$$

### 3.3 Hasar ilerleme algoritmasının doğrulanması

Analizlerde kullanılan kompozit hasar ilerleme ve sonlu elemanlar modellerinin doğruluğunun gösterilmesi için bu konuda kaynak olarak gösterilmiş bir deneysel çalışma seçilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.  $[0/90]_s$  konfigürasyonuna sahip, farklı W/D ve E/D oranları olan geometriler seçilmiş, pim bağlantılı kompozit levha incelenmiş ve Lessard [5] tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırma Tablo 3'te gösterilmiştir.

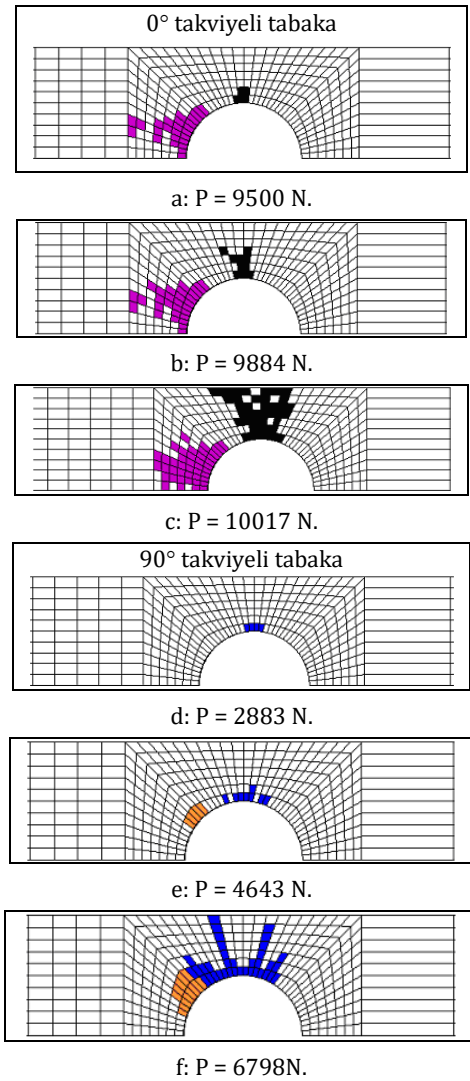
Tablo 3.  $[0/90]_s$  kompozit levha için elde edilen hasar yüklerinin karşılaştırması.

Table 3. Comparison of the failure loads for the composite laminate  $[0/90]_s$

W/D	E/D	Deneysel Hasar Yükü (N) [5]	Sayısal Hasar Yükü (N)
2	4	10017	10016
4	1	5185	5223
4	2	10287	11105

Örnek olarak W/D oranı 2 ve E/D oranı 4 için uygulanan yüklemeye bağlı olarak 0 ve 90 derece takviyeli tabakalarda meydana gelen hasar ilerlemesi Şekil 4'te gösterilmiştir. Yükleme 6798 N değerine ulaştığında 90 derece takviyeli tabakada hasar yüklemeye dik yönde serbest kenara doğru ilerlemiştir. Bu tabakada matris çekme hasarı meydana gelmiştir. 0 derece takviyeli tabakalarda ise yükleme 10017 N'a ulaştığında hem fiber çekme hasarı hem de fiber/matris kayma hasarı oluşmuştur. Fiber çekme hasarı yükleme yönüne 90 derece açıda, levhanın serbest kenarına doğru ilerlerken, fiber/matris kayma hasarı ise civata ile levha arasında meydana gelen bası gerilmesinden kaynaklanmış ve yükleme yönünde oluşmuştur. Bu konfigürasyon için hasar yükü 10017 N olarak belirlenmiştir. Lessard [5] tarafından yapılan çalışmada, aynı konfigürasyon için hasar yükü 10016 N olarak hesaplanmıştır. İncelenen geometriler için hesaplanan hasar yükleri karşılaştırıldığında Tablo 3'te gösterildiği gibi çok yakın

sonuçlar elde edilmiş olup hasar ilerleme kodunun uygunluğu ve geçerliliği doğrulanmıştır. Bu ön çalışmada, sonlu elemanlar ağ yapısı, kritik bölgelerdeki eleman yoğunluğu, uygulanan yükün artırım oranı ve malzeme özellikleri zayıflatma kuralında kullanılan katsayılar için çeşitli denemeler yapılarak en uygun değerler belirlenmiştir. Çekme dayanımının hassas şekilde belirlenmesi amacıyla yük artırma oranı %1 olarak seçilmiştir.

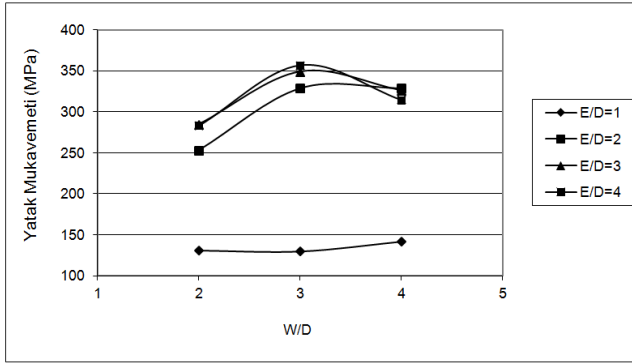


Şekil 4.  $[0/90]_s$  konfigürasyonu için hasar ilerlemesi.  
Figure 4. Damage propagation for the  $[0/90]_s$  configuration.



#### 4 Bulgular ve tartışma

Uygulanan hasar ilerleme modelinin ve sonlu elemanlar modellemesinin doğrulanmasından sonra  $[0_2/90_2]_s$  konfigürasyonuna sahip civata bağlantılı kompozit levha için W/D ve E/D oranlarının çekme dayanımına etkisi araştırılmıştır. W/D ve E/D oranları 2'den büyük olduğu durumlarda yatak hasarı meydana gelmiştir. E/D oranı 2'den küçük olduğu her durumda ise hasar kayma (yırtılma) şeklinde yüklemeye yönüne paralel ve levhanın kısa kenarına doğru ilerlemiştir. Şekil 5'te E/D oranı 1 ile 4 ve W/D oranı 2 ile 4 arasında değiştiği durumlar için yatak mukavemetindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 5. Yatak mukavemetindeki değişim.

Figure 5. Change in bearing strength.

E/D oranı 1-4 ve W/D oranı 2-4 aralığı için yapılan sonlu eleman analizlerinde tespit edilen hasar şekilleri ve maksimum çekme dayanımları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Kompozit bağlantıda oluşan hasar şekilleri ve hasar yükleri.

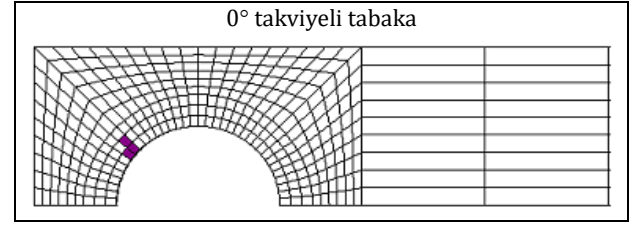
Table 4. Failure modes and failure loads for the composite joint.

	E/D	Hasar Şekli	Hasar Yüğü (N)
W/D=2	1	Kayma hasarı	1965 N
	2	Yatak hasarı	3797 N
	3	Yatak hasarı	4279 N
	4	Yatak hasarı	4244 N
W/D=3	1	Kayma hasarı	1947 N
	2	Kayma hasarı	4934 N
	3	Yatak hasarı	5347 N
	4	Yatak hasarı	5235 N
W/D=4	1	Kayma hasarı	2128 N
	2	Kayma hasarı	4934 N
	3	Yatak hasarı	4893 N
	4	Yatak hasarı	4713 N

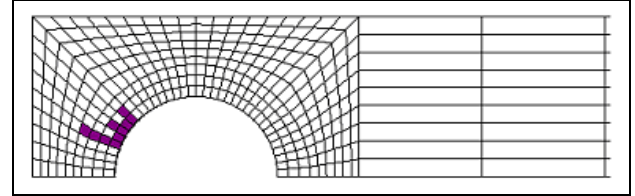
E/D oranı 1 için tüm W/D oranlarında yatak mukavemeti yaklaşık sabit olduğu analizlerde görülmüştür. W/D ve E/D oranı 3 olduğunda maksimum yatak mukavemeti elde edilmiştir. W/D ve E/D oranı 2'den büyük olduğu durumlarda yatak mukavemeti yaklaşık aynı çıkmıştır.  $[0_2/90_2]_s$  konfigürasyonu için E/D oranının, levhanın maksimum çekme mukavemetine etkileyen önemli bir parametre olduğu görülmüştür.

(W/D)=2 ve (E/D)=1 olduğu durumda (Şekil 6) ilk hasar oluşumu 90 derece takviyeli tabakalarda matris çekme ve bası hasarı şeklinde gerçekleşmiştir. Daha sonra 0 derece takviyeli tabakalarda hasar fiber/matris hasarı şeklinde meydana gelmiştir. 0 derece takviyeli tabakalar ana yük taşıyan tabakalar

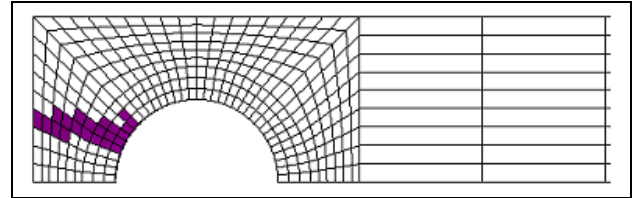
olduğundan dolayı yapının mukavemetini bu tabakalar belirlemiştir.



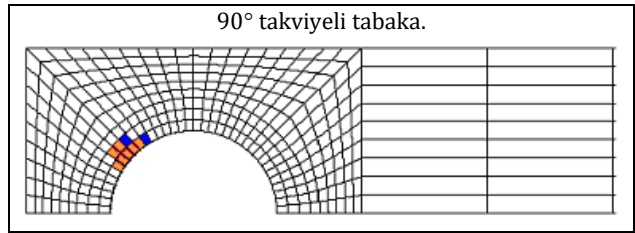
a: P = 1400 N.



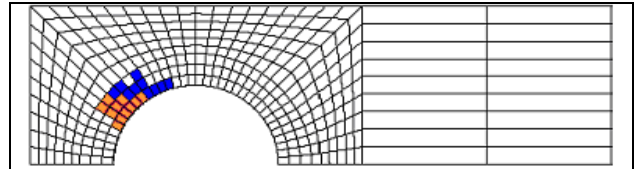
b: P = 1617 N.



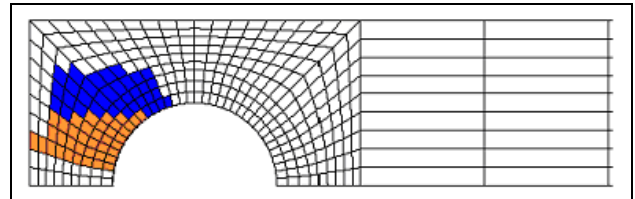
c: P = 1965 N.



d: P = 1400 N.



e: P = 1617 N.



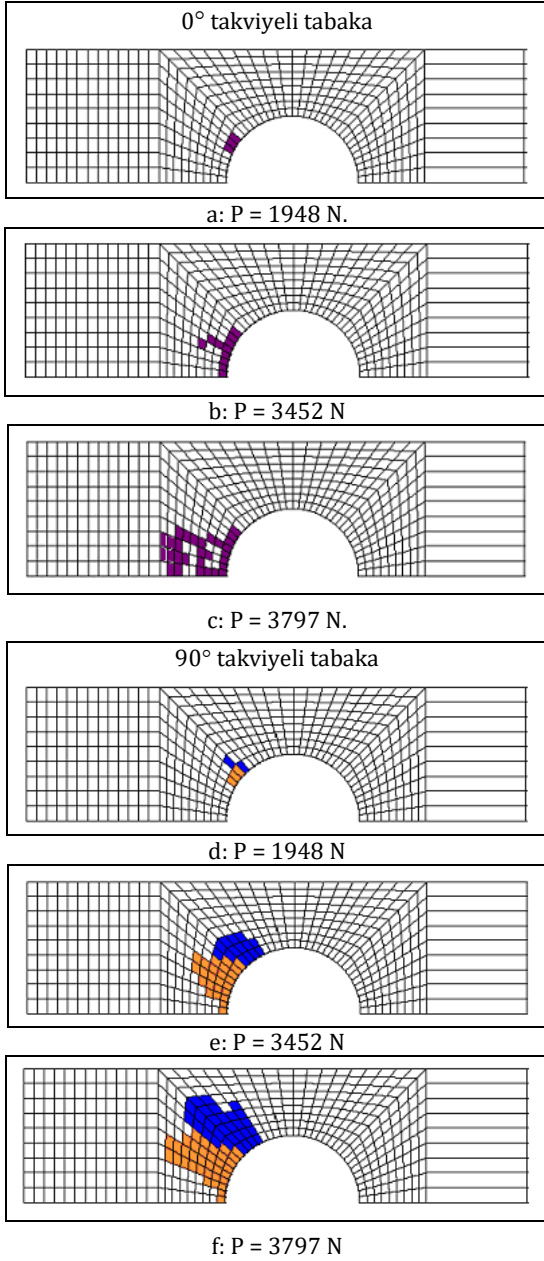
f: P = 1965 N.

Şekil 6.  $[0_2/90_2]_s$  konfigürasyonunda W/D=2, E/D=1 için hasar ilerlemesi.

Figure 6. Damage propagation for  $[0_2/90_2]_s$  configuration

W/D=2, E/D=1.

W/D ve E/D oranları 2 olduğu durumda Şekil 7'de gösterildiği gibi 0 derece takviyeli tabakalarda fiber/matris kayma hasarı, 90 derece takviyeli tabakalarda ise matris bası ve çekme hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 7.  $[0_2/90_2]_s$  konfigürasyonunda  $W/D = 2$ ,  $E/D = 2$  için hasar ilerlemesi.

Figure 7. Damage propagation for  $[0_2/90_2]_s$  configuration  
 $W/D = 2$ ,  $E/D = 2$ .

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada civata bağlantılı tabakalı kompozit yapıların çekme dayanımını yüksek hassasiyette belirleyebilmek amacıyla geliştirilmiş kademeli hasar ilerleme modeli kullanılarak üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Bir civata ile bağlanmış ve çekme kuvveti altındaki kompozit levhalar için sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve levhaların çekme dayanımları belirlenmiştir. Hasar ilerleme modellemesinde Hashin hasar kriteri uygulanmış, ANSYS APDL kullanılarak oluşturulan kod çalıştırılarak gerilme analizi uygulanmış, hasar ilerleme şekli ve çekme dayanımı tespit edilmiştir. Hasar ilerleme modelinin doğruluğu referans olarak alınmış bir deneysel çalışmanın sonuçları ile kıyaslanmış ve çok

yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Ek olarak hasar tipleri de doğru biçimde belirlenmiştir.

Uygulanan sonlu elemanlar analizlerine göre şu sonuçlar çıkartılmıştır:

- İncelenen çalışmalardaki benzer malzeme ve geometriye sahip yapılar için hasar durumu karşılaştırıldığında sayısal analiz sonucunda belirlenen hasar şekillerinin ve ilerlemesinin doğru olduğu görülmüş, seçilen hasar kriterinin ve malzeme özellikleri indirgeme kurallarının uygunluğu teyit edilmiştir,
- $W/D$  ve  $E/D$  oranları 2 olduğu durumda hasar levhanın serbest kenarına doğru kayma (yırılma) şeklinde ilerlemiştir,
- $W/D$  ve  $E/D$  oranları 2'den büyük olduğunda hasar ezilme (yatak hasarı) şeklinde gerçekleşmiştir,
- $[0_2/90_2]_s$  konfigürasyonuna sahip kompozit levhada net çekme hasarı meydana gelmemiştir,
- $W/D$  ve  $E/D$  oranları 3 olduğunda kompozit levha maksimum yatak (ezilme) mukavemetine ulaşmaktadır,
- Emniyetli tasarım için net çekme hasarı ve kayma hasarı olmayacak şekilde sadece yataklama hasarına imkan verecek geometrik ölçüler belirlenmelidir,
- Emniyetli tasarım için  $W/D$  ve  $E/D$  oranları 3'den büyük seçilmelidir,
- Kompozit malzemeler için kademeli hasar ilerleme modelinin uygunluğunun; sonlu elemanlar ağ yapısı, kritik bölgelerdeki eleman yoğunluğu, uygulanan yükün artırım oranı, malzeme özellikleri zayıflatma kuralı ve seçilen hasar kriterleri ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir,
- Yük artırma oranı %1 seçildiğinde çekme dayanımı hassas şekilde belirlenebilmiştir.

## 6 Conclusions

In this study, in order to determine the tensile strength of bolted laminated composite plates with high fidelity, three dimensional finite element analyses were performed by applying a newly developed progressive damage model. For single bolted composite plate under tensile loading, finite element analyses were performed and failure loads were determined. For progressive damage modeling Hashin failure criteria were applied, then stress analyses were carried out using a code written in ANSYS APDL. Both failure modes and failure loads were determined. In order to verify the accuracy of the progressive damage modeling, the results were compared with the results of an experimental study and very close results were obtained. In addition, failure modes were accurately determined.

According to the finite element analyses following results were obtained:

- When the failure conditions were compared to the studies with similar material and geometry, both failure modes and failure progress were accurately obtained with the present numerical analyses. Both the selected failure criteria and the material property degradation rule were verified,

- When both W/D and E/D ratios are equal to 2, damage progressed towards the free end of the plate with shear-out mode,
- When both W/D and E/D ratios are bigger than 2, bearing failure mode was obtained,
- For the  $[0_2/90_2]_s$  configuration no net-tension failure mode occurred,
- When both W/D and E/D ratios are equal to 3, composite plate has maximum bearing strength,
- For safe design, the geometric dimensions should be selected such that only bearing failure mode occurs and both net-tension and shear-out failure modes are avoided,
- For safe design W/D and E/D ratios should be selected larger than 3,
- It is found out that, for composite materials the accuracy of the progressive damage modeling is directly related to the finite element mesh, mesh density at the critical regions, loading rate, material property degradation rule and the selected failure criteria,
- When the loading rate is selected as 1% the tensile strength was precisely determined.

## 7 Kaynaklar

- [1] Nuismer RJ, Whitney JM. "Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations". *Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP*, 593, 117-142, 1975.
- [2] Chang KF, Chang KY. "A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations". *Journal of Composite Materials*, 21, 834-855, 1987.
- [3] Chang KF, Liu S, Chang KY. "Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to tensile loadings". *Journal of Composite Materials*, 25, 274-301, 1991.
- [4] Tan SC. "A progressive failure model for composite laminates containing openings". *Journal of Composite Materials*, 25, 556-577, 1991.
- [5] Lessard LB, Shkrieh MM. "Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure". *Journal of Composite Materials*, 29(5), 671-697, 1995.
- [6] Okutan B. "The effects of geometrical parameters on the failure strength for pin-loaded multi-directional fiber-glass reinforced epoxy laminate". *Composites Part B*, 33, 567-578, 2002.
- [7] İçten BM, Okutan B, Karakuzu R. "Failure strength of woven glass fiber-epoxy composites pinned joints". *Journal of Composite Materials*, 37, 1337-50, 2003.
- [8] İçten BM, Karakuzu R, Toygar ME. "Failure analysis of woven kevlar fiber reinforced epoxy composites pinned joints". *Composite Structures*, 73, 443-50, 2006.
- [9] Karakuzu R, Gülem T, İçten BM. "Failure analysis of woven laminated glass-vinylester composites with pin-loaded hole". *Composite Structures*, 72, 27-32, 2006.
- [10] Dursun T, Özbay M. "Tabakalı kompozit levhalarda hasar ilerleme modellenmesi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 65-68, 2008.
- [11] Wang HS, Hung CL, Chang FK. "Bearing failure of bolted composite joints part I: experimental characterization". *Journal of Composite Materials*, 30, 1284-313, 1996.
- [12] Hung CL, Chang FK. "Bearing failure of bolted composite joints. Part II: Model and Verification". *Journal of Composite Materials*, 30, 1359-1400, 1996.
- [13] Camanho PP, Matthews FL. "Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review". *Composites Part A*, 28A, 529-547, 1997.
- [14] Camanho PP, Matthews FL. "A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates". *Journal of Composite Materials*, 33(24), 2248-2280, 1999.
- [15] Tserpes KI, Papanikos P, KermanidisTh. "A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24, 663-675, 2001.
- [16] McCarthy CT, McCarthy MA, Lawlor VP. "Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances". *Composites: Part B*, 36, 290-305, 2005.
- [17] KermanidisTh, Labeas G, Tserpes KI, Pantelakis Sp. "Finite element modeling of damage accumulation in bolted composite joints under incremental tensile loading". *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2000*, Barcelona, 11-14 September 2000.
- [18] Perugini P, Riccio A, Scaramuzzino F. "Three-dimensional progressive damage analysis of composite joints". *Eighth International Conference On Civil and Structural Engineering Computing*, Vienna, Austria, 19-21 September 2001.
- [19] Tserpes KI, Labeas G, Papanikos P, Kermanidis Th. "Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates". *Composites Part B: engineering*, 33, 521-529, 2002.
- [20] Riccio A, Scaramuzzino F. "Influence of damage onset and propagation on the tensile structural behaviour of protruding composite joints". *4th GRACM Congress on Computational Mechanics*, Patras, Greece, 27-29 June 2002.
- [21] Ataş A, Mohamed GF, Soutis C. "Progressive failure analysis of bolted joints in composite laminates". *Plastics, Rubber and Composites*, 41(4/5), 209-214, 2012.
- [22] Ataş A, Soutis C. "Strength prediction of bolted joints in CFRP composite laminates using cohesive zone elements". *Composites: Part B*, 58, 25-34, 2014.
- [23] Turan K, Gür M, Kaman MO. "Progressive failure analysis of pin-loaded unidirectional carbon-epoxy laminated composites". *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 21(2), 98-106, 2014.
- [24] Zhang J, Liu F, Zhao L, Zhi J, Zhou L, Fei B. "Influence of end distances on the failure of composite bolted joints". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(5), 388-404, 2015.
- [25] Du A, Liu Y, Xin H, Zuo Y. "Progressive damage analysis of PFRP double-lap bolted joints using explicit finite element method". *Composite Structures*, 152, 860-869, 2016.
- [26] Dursun T. Cıvata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [27] Hashin Z. "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites". *Journal of Applied Mechanics*, 47, 329-334, 1980.