



Kompozit Malzemeler için İlerlemeli Hasar Analizinde Çözümü Etkileyen Faktörler

Mete Onur KAMAN*

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ
mkaman@firat.edu.tr ORCID: 0000-0003-0178-6079, Tel: (424) 237 00 00 (5315)

Kadir TURAN

Dicle Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
kturan@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0002-4065-9649, Tel: (412) 248 84 01 (3603)

Geliş: 10.04.2018, Kabul Tarihi: 31.05.2018

Öz

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin hasarları anizotropik yapıları gereği geleneksel malzemelere göre daha karmaşık ve ayrıntılıdır. Matris ve fiberin ayrı ayrı çekme, basma ve kayma hasarlarının belirlenmesine olanak sağlayan Hashin hasar kriteri, ilerlemeli hasar analizi için kullanılır. İlerlemeli hasar analizinde; her bir elemandaki yüklenme sonrası elde edilen gerilme değerleri, ilgili malzeme dayanım değerlerine göre hasar formülünde kullanılarak hasar kontrolü yapılır. Eğer elemanda hasar elde edilirse o elemana ait mekanik özellikler sıfıra yakın değerler ile çarpılarak, malzeme özellikleri indirgenir. Devamında indirgenmiş elemanlar içeren model tekrar yüklenerek hasarın ilerlemesi sağlanır. Hasar analizinde uygulanacak yüklemenin veya yer değiştirmenin belirli bir oranda artırılması gereklidir. Sonlu eleman modelindeki eleman sayısının da ayrıca optimizasyonu yapılmalıdır. Her iki durum da hasar ilerlemesini etkileyebilen faktörlerdir. Bu çalışmada çekme yükü etkisinde, ortasında dairesel delik bulunan fiber takviyeli kompozit levhalarda hasar ilerlemesini etkileyen faktörler incelenmiştir. Hashin hasar kriteri kullanılarak yapılan çalışmada levha kenarına üniform yer değiştirme uygulanarak levhada oluşan reaksiyon kuvvetleri hesaplanmıştır. Kompozit levhanın sonlu eleman sıklığı ve ilerleme adımına karşılık levhada oluşan reaksiyon kuvvetleri yer değiştirme değerleri ile birlikte grafikler halinde sunulmuştur. Uzama artışı miktarının artırılması levhada meydana gelen maksimum reaksiyon kuvvetini artırmıştır. Delik çevresinde eleman boyutunun artırılması da reaksiyon kuvvetini artırmıştır. Ancak bu artış uzama adımı sayısının artışı kadar etkili değildir.

Anahtar Kelimeler: Fiber takviyeli kompozitler; ilerlemeli hasar; Hashin; gerilme analizi; levha;

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Fiber takviyeli kompozit malzemeler artık günümüzde havacılık ve uzay sanayinin yanı sıra otomobil sektöründe de kullanım oranını artıracak kadar yaygınlaşmıştır. Geleneksel malzemelere göre kırılma davranışı daha karmaşık olan bu tip malzemelerin hasar ilerlemesini incelemek bu noktada büyük önem taşır. Anizotropik malzemelerde hasarı belirlemek amacıyla *Tsai Hill*, *Tsai-Wu* gibi hasar teorileri geliştirilmiştir (Kaw, 2006). Ancak bu tip hasarlar kompozit yapı içerisindeki hasarların matris mi yoksa fiber hasarı mı olduğu konusunda herhangi bir açıklama yapmaz. *Hashin* (Hashin, 1980), *Puck* (Lee vd., 2015) gibi hasar teorileri ise yapıda meydana gelen hasarın fiber veya matriste meydana geldiğini belirttiği gibi çekme, basma, kayma veya tabakalar arası ayrılma durumunu da açıklamaktadırlar. Özellikle sonlu elemanlar metodunun gelişmesine paralel olarak bu tip hasar kriterlerini içeren hasar analizi çalışmaları büyük hız kazanmıştır. Kompozitler için ara yüzey eleman (interface element) (Bai vd., 2017; Riccio vd., 2017) ve ilerlemeli hasar (progressive failure) (Liu vd., 2014; Warren, vd., 2016) teknikleri güncel metotlar arasındadır. Ara yüzey eleman modelinde hasar bölgesi çalışma öncesinde belirlenmektedir ve maksimum hasar gerilmesinin aşıldığı durumlarda ilgili yüzeylerde kompozitin tabakaları arasında ayrılma (delamination) hasarının oluşması sağlanır (Yang vd., 2017). Ancak ilerlemeli hasarda çözüm başlangıcında hasarın hangi yönde ilerleyeceği bilinmemektedir. Eğer ilgili sonlu elemanda hasar elde edilirse o elemana ait mekanik özellikler sıfıra yakın değerler ile çarpılarak, malzeme özelliklerinin indirgenmesi sağlanır (Cheng vd., 2017). Devamında indirgenmiş elemanlar içeren model tekrar yüklenerek hasar ilerletilir.

Kompozit malzemelerin hasar davranışında *Hashin* hasar kriteri deneysel sonuçlarla uyumlu bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca bu kriterin

farklı kriterlerle karşılaştırması yapılmakta (Duarte vd., 2017) ve modifikasyonları geliştirilmektedir (Gu ve Chen, 2017). Coelho ve diğerleri (2017) ortasında dairesel delik bulunan kompozit levhalarda ilerlemeli hasar analizini *ABAQUS* sonlu elemanlar paket programı ile gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde hasar başlangıcı ve nihai hasarı *Hashin* hasar kriterine göre incelemiş olup, farklı modeller için analizlerini literatür ile doğrulamışlardır. İki tabakalı karbon/bizmaleimit kompozit levhaların hidro-termal şartlarda ilerlemeli hasar analizi Zhang ve diğerleri (2015), tarafından gerçekleştirilmiştir. *Hashin* hasar kriterinin kullanıldığı çalışmada sayısal sonuçların doğruluğu deneysel verilerle kontrol edilmiştir. Shen ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada ise deniz araçlarında kullanılan L-tipi bağlantıların basınç yükü altındaki hasar davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Hasar başlangıcı ve ilerlemesi *Hashin* kriterine göre kontrol edilmiştir. Xiao ve diğerleri (2017), dairesel delikli CCF300/QY8911 ve T300/QY8911 kodlu kompozitlerde hasar mekanizmalarını, delaminasyon ilerlemelerini ve artık gerilmeleri, deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. İki ve üç boyutlu olarak gerçekleştirilen sayısal çalışmada *Hashin* ve *Tsai-Wu* hasar kriterlerine göre çözümler karşılaştırılmıştır. Alüminyum tabaka ve cam fiber kompozit levhanın birleştirilmesinden meydana gelmiş olan hibrit kompozitlerin hasar davranışları Sharma ve diğerleri (2017) tarafından araştırılmıştır. Delaminasyon etkisi de ayrıca çalışmada incelenmiştir. Özellikle pim bağlantılı kompozitlerin hasar davranışının modellenmesinde de deneysel verilerle uyumlu sonuçları nedeniyle sıklıkla *Hashin* kriteri tercih edilmektedir (Mandal ve Chakrabarti, 2018). Havşa açılmış civata ile tek tesirli bindirme bağlantısı yapılmış kompozit levhalarda ilerlemeli hasar analizi Liu ve diğerleri (2016) tarafından yapılmıştır. Tabakalar arası hasar için kohezif kabuk eleman, fiber ve matris hasarları için ise üç boyutlu katı eleman kullanılmış olup, malzeme mekanik özelliklerinin indirgemesi

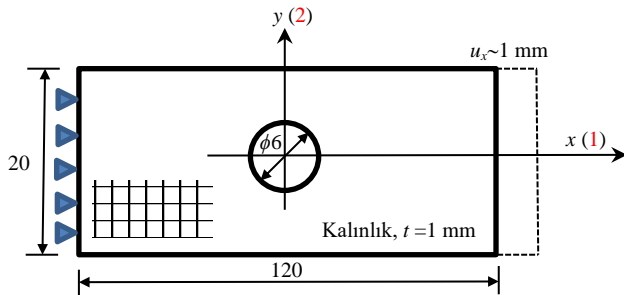
Camanho kuralına göre gerçekleştirilmiştir. Sola ve diğerleri (2016) kompozit malzemelerde pim ezilme davranışını *Hashin* hasar kriterine göre incelemişlerdir. Analizlerinde delik çevresinde lokal olmayan efektif gerilmeleri de dikkate almışlardır.

Çalışmaların sayısal bölümünde, *Hashin* hasar kriterinin uyumluluğu ve kontrolü yapılan deneysel çalışmalarla kontrol edilmektedir. Ancak sonlu elemanlar yönteminde sonlu eleman ağı ve yükleme adımlarının sıklığının çözüm sonuçlarının direkt olarak etkilediği bilinmektedir ve optimizasyonu özel bir analiz gerektirir. Ayrıca nihai hasar yüküne, genellikle indirgenmiş eleman bölgesinin sonlu eleman ağı üzerinde deney ile uyumlu ilerlemesine göre karar verilmektedir (Turan vd., 2015; Turan ve Orcen, 2017). Bu çalışmada ise, çekme yükü etkisindeki ortasında dairesel delik bulunan kompozit levhada sayısal nihai hasar değeri, çekme testlerinde olduğu gibi kırılma sonucu maksimum reaksiyon kuvvetinin düşmeye başladığı nokta kontrol edilerek belirlenmiştir. İlerlemeli hasar analizi için *Hashin* hasar kriteri kullanılmış, levhanın istenilen uzama miktarına karşılık hesaplanan reaksiyon kuvvetleri kullanılarak levhaya ait sayısal yük yer-değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Yükleme adımlarının ve sonlu eleman ağı sıklığının reaksiyon kuvvetleri üzerindeki etkisi grafikler halinde sunulmuştur.

Materyal ve Yöntem

Problem Tanımı

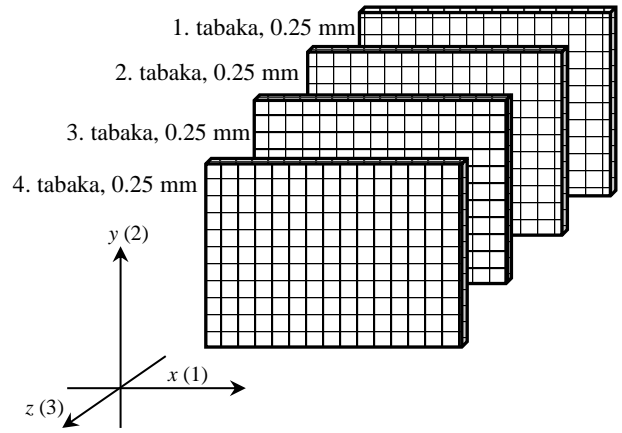
İlerlemeli hasar analizi gerçekleştirilecek olan kompozit levhanın boyutları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ortasında dairesel delik bulunan

tabakalı kompozit levha.

Levha malzemesi çapraz örgü dokuma, karbon/epoksi kompozit olarak seçilmiştir. $[0^\circ]_4$ dizilimli kompozitin fiber takviye açısı, levhanın yükleme doğrultusuna paraleldir (Şekil 2). Toplam 1 mm kalınlıktaki kompozitin sol tarafı sabit mesnetlenmiş olup ($u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0$) sağ tarafındaki kenarın fiber doğrultusunda toplam 1 mm'nin üzerinde uzayacağı kabul edilmiştir ($u_x \neq 0, u_y = 0, u_z = 0$). Analizlerde kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1'deki gibi seçilmiştir.



Şekil 2. $[0^\circ]_4$ dizilimli dokuma karbon/epoksi kompozit levha.

Tablo 1. Tabakalı kompozitin mekanik özellikleri

E_1 , fiber doğrultusundaki (1) elastisite modülü	37000 MPa
E_2 , fibere dik doğrultudaki (2) elastisite modülü	37000 MPa
G_{12} , 1-2 düzlemindeki kayma modülü	878 MPa
ν_{12} , 1-2 düzlemi için Poisson oranı	0.25
X_t , fiber doğrultusundaki (1) çekme dayanımı	570 MPa
Y_t , fibere dik doğrultudaki (2) çekme dayanımı	570 MPa
S , 1-2 düzlemindeki kayma dayanımı	68.9 MPa
X_c , fiber doğrultusundaki (1) basma dayanımı	242 MPa
Y_c , fibere dik doğrultudaki (2) basma dayanımı	242 MPa

basma dayanımı	
----------------	--

Hashin Hasar Kriteri

Hashin hasar kriteri kompozit tabakasında meydana gelen hasarın matriste veya fiberde olduğunu ayrıca, çekme, basma veya kayma hasarı olduğunu belirtmektedir. Buna göre eğer sayısal çözümde herhangi bir elemenda hesaplanan gerilmelere göre fiber çekme hasarı,

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

durumunda $\sigma_1 > 0$ şartı için, fiber basma hasarı,

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

için $\sigma_1 < 0$ olduğu zaman, matris çekme hasarı,

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

durumunda $\sigma_2 > 0$ için, matris basma hasarı,

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

durumunda $\sigma_2 < 0$ halinde, matris kayma hasarı ise,

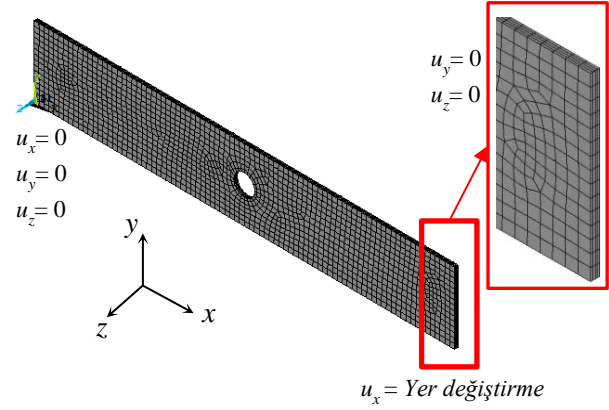
$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

eşitliği sağlandığı zaman $\sigma_1 < 0$ için ortaya çıkar (Hashin, 1980). Denklemlerdeki σ_1 ve σ_2 fiber ve fibere dik doğrultudaki normal gerilmeler, τ_{12} , τ_{23} ve τ_{13} ise sırasıyla 1-2, 2-3 ve 1-3 düzlemlerindeki kayma gerilmeleri bileşenleridir.

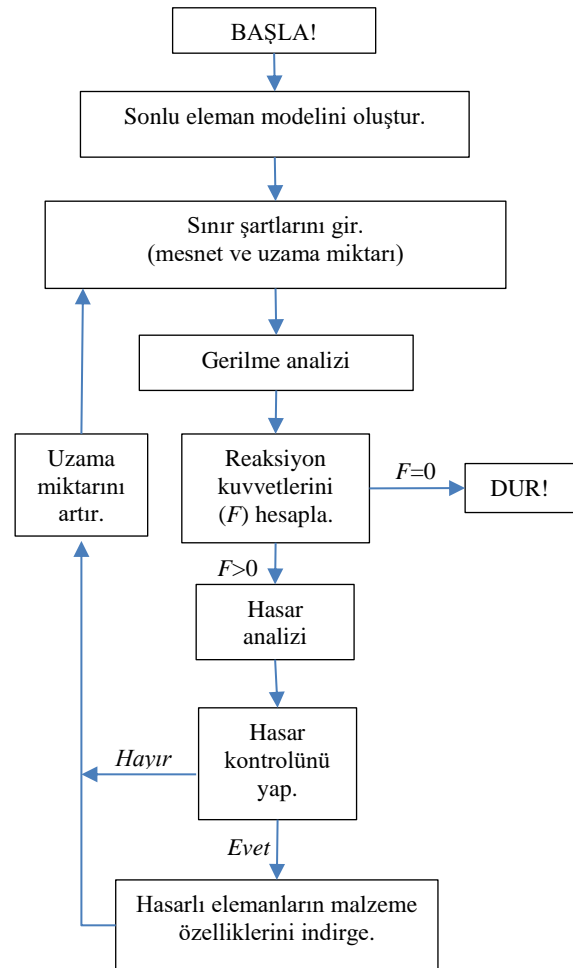
Sonlu Eleman Modeli

Farklı modeller için sonlu eleman ağ yapılarında ~27000 düğüm ve ~6000 eleman bulunmaktadır. *Solid186* eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 4). Levhanın sağ kenarındaki uzama, 0.1 mm, 0.05 mm ve 0.025 mm'lik alt adımlarla kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Toplam 1 mm kalınlığındaki $[0^0]_4$ kompozit levhayı oluşturan dört tabaka karbon fiber 0.25 mm kalınlıkta ayrı hacimler halinde tanımlanmış olup, tabakaların

birbirine mükemmel bağlı olduğu kabul edilmiştir. Kompozit malzemelerin ilerlemeli hasar analizini sonlu eleman paket programında gerçekleştirebilmek için alt programların yazılarak paket program içerisinde kullanılması gerekir (Bai ve Zhang, 2016).



Şekil 4. Tabakalı kompozit levhanın sonlu eleman modeli.



Şekil 5. Hashin ilerlemeli hasar analizi döngüsü.

Bu çalışmada, ANSYS sonlu eleman programında APDL (Parametric Design Language) alt kodlar kullanılarak hasarın ilerletilmesi yer değiştirme adımları sayesinde gerçekleştirilmiştir. İlerlemeli hasar analizi için yazılan kodlara ait program döngüsü Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 5'te verilen döngüye göre sonlu eleman modelinde her bir eleman için hasar kontrolü yapıldıktan sonra ilgili elemanın malzeme özelliklerinin indirgenmesi gerekir. Malzeme özellikleri indirgenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. İndirgeme; aşağıda 6 nolu denklemde görüldüğü gibi, malzemenin başlangıçtaki hasarsız mekanik özelliğinin (MP) bir katsayı ile ($\eta \ll 1$) çarpılarak düşürülmesi kuralına dayanır.

$$MP_{hasarlı} = \eta(MP_{hasarsız}) \quad (6)$$

Bu çalışmada kullanılan malzeme indirgeme kuralı Tablo 2'de sunulmuştur. Fiber çekme ve basma hasarı yapı için baskın ve yıkıcı hasar olduğundan dolayı malzemenin tüm mekanik özellikleri indirgenirken, matris çekme ve basma hasarlarında fibere dik doğrultudaki elastisite modülü ve Poisson oranı, matris kayma hasarı durumunda ise kayma modülü ve Poisson oranı indirgenir. Çalışmada indirgeme katsayısı $\eta = 0.00001$ olarak alınmıştır.

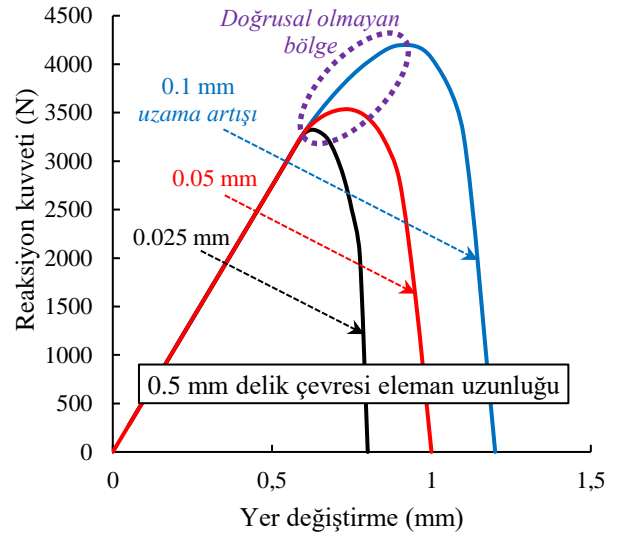
Tablo 2. Malzeme mekanik özellikleri için indirgeme kuralı

Hasar tipi	İndirgenecek özellik (MP)
Fiber çekme	$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$
Fiber basma	$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$
Matris çekme	E_2, ν_{12}
Matris basma	E_2, ν_{12}
Matris kayma	G_{12}, ν_{12}

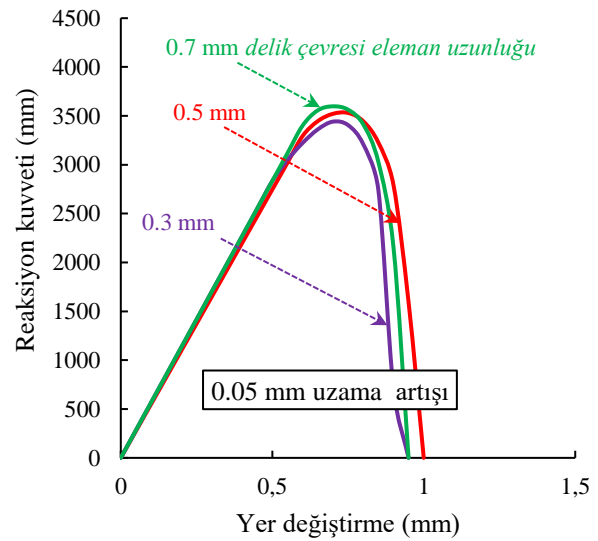
Sonuçlar

Ortasında dairesel delik bulunan kompozit levhanın ANSYS sonlu elemanlar paket programında yapılan ilerlemeli hasar analizi sonucunda toplam ~1 mm uzama için elde edilen sayısal yük-uzama grafiği Şekil 6'da

gösterilmiştir. Şekil 6'da verilen grafikte dikdörtgen levhanın dört dik kenarı ve delik çevresi boyunca eleman uzunluğu 0.5 mm'dir. Farklı uzama adımları için (0.025 mm, 0.05 mm ve 0.1 mm) kompozit levhada elde edilen reaksiyon kuvvetinin yer değiştirme ile değişimi verilmiştir. Grafiğe göre uzama artış miktarının artması hasar başlangıcından önce reaksiyon kuvvetinin şiddetinde herhangi bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Ancak hasar başlangıcı ile birlikte uzama adımının artırılması maksimum reaksiyon kuvvetinin değerini artırmaktadır. Ayrıca maksimum hasar yükünün elde edildiği uzama miktarını da artırmaktadır.



Şekil 6. Reaksiyon kuvvetlerinin farklı uzama aralıkları için yer değişimi ilişkisi.

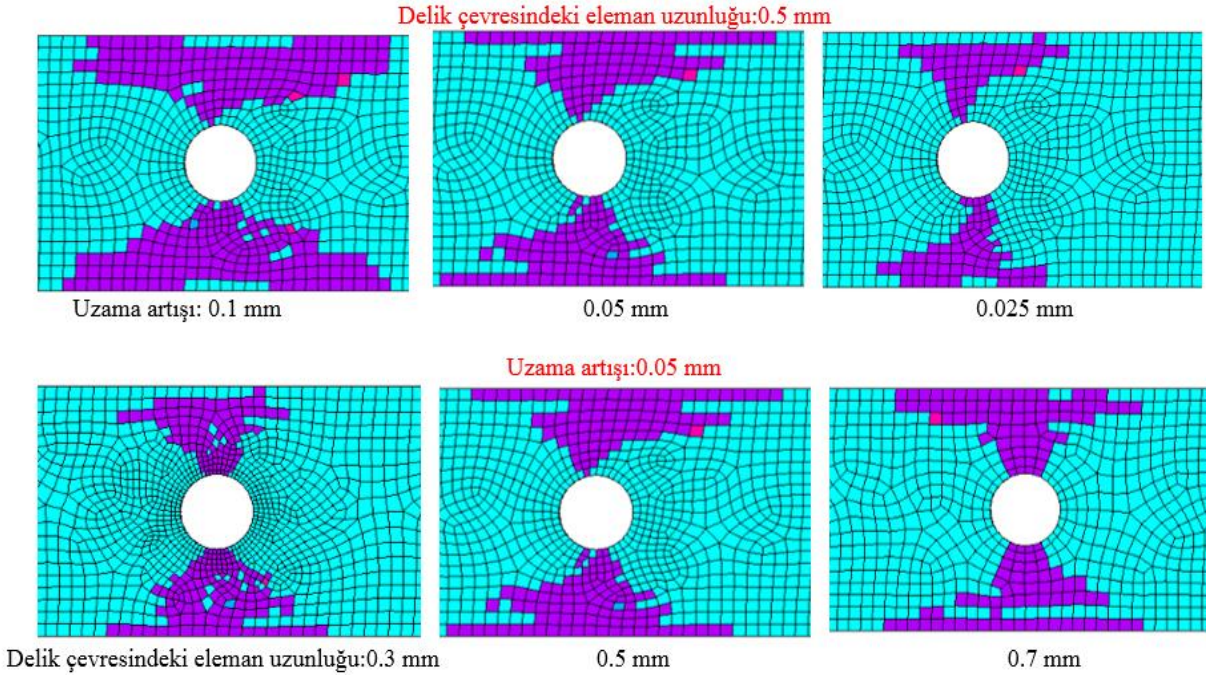


Şekil 7. Reaksiyon kuvvetlerinin delik kenarı boyunca farklı eleman uzunlukları için yer değişimi ilişkisi.

Hasar başlangıcından itibaren kuvvet-yer değiştirme grafiğinde maksimum yüke kadar doğrusal olmayan bölge bulunmaktadır. Bu bölge uzama adımı miktarının artışına bağlı olarak artmaktadır. Şekil 7’de 0.05 mm uzama artış miktarında, delik çevresindeki farklı eleman uzunlukları için kompozit levhanın

reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri sunulmuştur.

Delik çevresinde eleman boyutunun artırılması da reaksiyon kuvvetini artırmıştır. Ancak bu artış uzama artış miktarı kadar etkili değildir. Uzama artış miktarının değişiminin yanında delik çevresindeki sonlu eleman sıklığının değişimi reaksiyon kuvvetinin miktarını daha düşük seviyede etkilemiştir (Tablo 3).



Şekil 8. Delik çevresinde meydana gelen nihai fiber çekme hasarları.

Tablo 3. Maksimum reaksiyon kuvvetinin delik çevresi eleman uzunluğu ve uzama adımı ile değişimi

Uzama adımı (mm)	Delik çevresi eleman uzunluğu (mm)	Maksimum reaksiyon kuvveti (N)
0.7	0.05	3598
0.5	0.025	3446
0.5	0.05	3521
0.5	0.1	4064
0.3	0.05	3441

Şekil 6 ve 7’de kullanılan tüm sayısal modeller için reaksiyon kuvvetinin sifıra düştüğü son çözüm adımındaki hasar resimleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Yeşil renkler hasarsız elemanı,

mor renkler fiber çekme hasarını, pembe renkler ise matris basma hasarına uğramış olan sonlu elemanı temsil etmektedir. Uzama doğrultusuna bağlı olarak kompozit levhada meydana gelen baskın hasar tipi fiber çekme hasarıdır. Çekme gerilmelerinin maksimum olduğu düşey doğrultudaki delik kenarları civarında başlayan fiber çekme hasarı bu doğrultuda ilerleyerek büyümüştür. Hasar levha kenarına ulaştığı durumda ise yük sıfırlanmıştır. Verilen resimlerde reaksiyon kuvvetleri sifıra ulaştığı andaki levha hasar resimlerini temsil etmektedir. Uzama adımının artması maksimum reaksiyon kuvvetini artırmasının sebebi Şekil 8’den görülmektedir. Buna göre uzama adımının artışına bağlı olarak yüksek yük

adımları artışları hasar başlangıcından itibaren delik çevresinde bir seferde çok fazla miktarda elemanın hasara uğramasına sebep olurken, küçük uzama adımlarında bu durum tam tersidir. Böylece büyük uzama adımlarında hesaplanmayan ara adımlar nedeniyle hasar başlangıcı sonrasında maksimum yüke kadar daha fazla reaksiyon kuvveti artışı sağlanmaktadır. 0.025 mm uzama adımı için elde edilen son hasar resmi incelendiğinde; hasarın, 0.1 mm uzama adımındaki hasara göre düşey doğrultuda daha dar bir bölgede yayıldığı gözlemlenebilir. Delik çevresinde sonlu eleman sıklığının hasarlı eleman dağılımına etkisi incelendiğinde ise delik çevresindeki hasarların genel olarak benzer olduğu görülmektedir. Bu durum zaten maksimum hasar yüklerinin birbirlerine benzer değerlerde olmasının da sebebidir (Şekil 7). Delik çevresinden uzaklaşır, levha serbest kenarına yaklaştıkça hasarlarda eleman boyutunun küçülmesine bağlı olarak kısmi azalmalar gözlenmiştir. Bu durum ise maksimum hasar yükü sonrasındaki reaksiyon kuvvetlerindeki değişime sebep olmuştur (Şekil 7). Benzer durum uzama adımı miktarının değişimi için incelendiğinde maksimum yük sonrası daha büyük farkların oluştuğu görülebilir (Şekil 6).

Sonuçlar

Ortasında dairesel delik bulunan tabakalı kompozit levhalarda ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- İlerlemeli hasar analizinde *Hashin* hasar kriteri kullanılması sonucu oluşan hasarlı elemanların etkisiyle elde edilen reaksiyon kuvvetlerindeki azalma deneysel çalışmalardaki gibi yük-uzama grafiğine yansıtılmıştır. Böylece deneysel çalışma sonucu elde edilecek yük-uzama grafiği ile eşleştirilecek olan sayısal yük-uzama değerleri yardımıyla hasar davranışı sayısal olarak daha kolay yorumlanabilecektir.
- Hasar analizinde yük veya uzama miktarının artırılması hasar başlangıcı sonrasında reaksiyon kuvvetlerini önemli oranda etkilemektedir. Adım

aralığının büyük seçilmesi maksimum hasar yükünü artırmaktadır.

- Analizlerde delik çevresindeki sonlu eleman ağ sıklığının artırılması kısmi olarak maksimum hasar yükünü azaltmaktadır. Bu nedenle yük veya yer değiştirme cinsinden ilerleme adımı, reaksiyon kuvvetleri üzerinde, bu aşamada delik çevresindeki eleman sıklığından daha önemli bir parametredir.
- Çalışmada incelenen bu parametrelerin yanı sıra malzeme mekanik özellikleri, sınır ve yükleme şartları da doğru bir şekilde tanımlanması gereken diğer etmenlerdir. Daha karmaşık deneysel çalışmalar için ilerlemeli hasar analizi yapılması durumunda, basit ve temel modeller için ideal yük ilerleme adımı ve sonlu eleman ağı sıklığı deneysel ve sayısal yük-yer değiştirme grafiği eşleştirmesiyle belirlenmelidir. Devamında gerçek problem için sayısal çözümler yapılmalıdır.

Kaynaklar

- Bai, J.B., Sheno, R.A., Yun, X.Y. ve Xiong J.J., (2017). Progressive damage modelling of hybrid RTM-made composite P-joint under four-point flexure using mixed failure criteria, *Composite Structures*, **159**, 327-334.
- Bai, Y. ve Zhang, X.Z., (2016). Progressive failure analysis of open-hole composite hoops under radial loading, *Composites Part B*, **97**, 336-343.
- Cheng, X., Wang, S., Zhang, J., Huang, W., Cheng, Y. ve Zhang, J., (2017). Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method, *Composite Structures*, **160**, 8-15.
- Coelho, A.M.G., Mottram, J.T. ve Harries, K.A., (2015). Finite element guidelines for simulation of fibre-tension dominated failures in composite materials validated by case studies, *Composite Structures*, **126**, 299-313.
- Duarte, A.P.C., Díaz Sáez, A. ve Silvestre, N., (2017). Comparative study between XFEM and Hashin damage criterion applied to failure of composites, *Thin-Walled Structures*, **115**, 277-28.

- Gu, J. ve Chen, P., (2017). Some modifications of Hashin's failure criteria for unidirectional composite Materials, *Composite Structures*, **182**, 143-152.
- Hashin, Z., (1980). Failure criteria for unidirectional composites, *Journal of Applied Mechanics*, **47**, 2, 329-334.
- Kaw, A.K., (2006). *Mechanics of composite materials*, Second Edition, 466, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Lee, C.S., Kim, J. H., Kim, S.K., Ryu, D.M. ve Lee, J.M., (2015). Initial and progressive failure analyses for composite laminates using Puck failure criterion and damage-coupled finite element method, *Composite Structures*, **121**, 406-419.
- Liu P., Cheng, X., Wang, S., Liu, S., Cheng, Y., (2016). Numerical analysis of bearing failure in countersunk composite joints using 3D explicit simulation method, *Composite Structures*, **138**, 30-39.
- Liu, P.F., Xing, L.J. ve Zheng J.Y., (2014). Failure analysis of carbon fiber/epoxy composite cylindrical laminates using explicit finite element method, *Composites: Part B*, **56**, 54-61.
- Mandal, B. ve Chakrabarti, A., (2018). Numerical failure assessment of multi-bolt FRP composite joints with varying sizes and preloads of bolts, *Composite Structures*, **187**, 169-178.
- Riccio, A., Costanzo, C.D., Gennaro, P.D., Sellitto, A., Raimondo, A., (2017). Intra-laminar progressive failure analysis of composite laminates with a large notch damage, *Engineering Failure Analysis*, **73**, 97-112.
- Sharma, A.P., Khan, S.H. ve Parameswaran, V., (2017). Experimental and numerical investigation on the uni-axial tensile response and failure of fiber metal laminates, *Composites Part B*, **125**, 259-274.
- Shen, W., Yan, R., Luo, B., Zhu, Y. ve Zeng, H., (2017). Ultimate strength analysis of composite typical joints for ship structures, *Composite Structures*, **171**, 32-42.
- Sola, C., Castanié, B., Michel, L., Lachaud, F., Delabie, A. ve Mermoz, E., (2016). On the role of kinking in the bearing failure of composite laminates, *Composite Structures*, **141**, 184-193.
- Turan, K., Kaman, M.O. ve Gur, M., (2015). Progressive failure analysis of laminated composite plates with two serial pinned joints, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **22**, 839-849.
- Turan, K. ve Orcen, G., (2017). Failure analysis of adhesive-patch-repaired edge notched composite plates, *Journal of Adhesion*, **93**, 328-341.
- Warren, K.C., Lopez-Anido, R.A., Vel, S.S., ve Bayraktar, H.H., (2016). Progressive failure analysis of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt, double-shear bearing, *Composites Part B*, **84**, 266-276.
- Xiao, M., Yongbo, Z., Zhihua, W. ve Huimin, F., (2017). Tensile failure analysis and residual strength prediction of CFRP laminates with open hole, *Composites Part B*, **126**, 49-59.
- Yang, Y., Liu, X., Wang, Y.Q. ve Gao, H., Li, R., Bao, Y., (2017). A progressive damage model for predicting damage evolution of laminated composites subjected to three-point bending, *Composites Science and Technology*, **151**, 85-93.
- Zhang J., Qi, D., Zhou, L., Zhao, L., Hua, N., (2015). A progressive failure analysis model for composite structures in hygrothermal environments, *Composite Structures*, **133**, 331-342.

Factors Affecting Solution in Progressive Damage Analysis for Composite Materials

Extended abstract

Damage of the fiber reinforced composite materials is more complex and detailed than conventional materials due to their anisotropic nature. The Hashin failure criterion is used for progressive failure analysis, which allows the determination of the tensile, compression and shear failure of the matrix and fiber separately.

In progressive failure analysis; the failure values are determined by using the failure formulas according to the corresponding material strength values. If the element is damaged, the mechanical properties of that element are multiplied by values close to zero, reducing the material properties. The plate with the degraded elements is then loaded again to allow the damage to proceed.

The load or displacement to be applied in the failure analysis needs to be increased in a certain area. The number of the finite elements in the numerical model must also be optimized. Both conditions are factors that can affect failure progression. In this study, the factors affecting the failure progression in fiber reinforced composite plates under tensile load with circular hole in the center were investigated. In the study using the Hashin failure criterion, the reaction forces generated in the plate were calculated by applying a uniform displacement to the edge of the plate. The variation of reaction forces with the displacement values are presented in graphs for different displacement progress steps and finite element dimensions around the circular hole edge.

The plate material was selected as woven carbon/epoxy composite. The fiber reinforcement angle of the composite is parallel to the loading direction of the plate. The left side of the composite with a total thickness of 1 mm is simply supported. It is assumed that the right side of the composite has a displacement of more than 1 mm in the total fiber direction.

There are ~27000 nodes and ~6000 elements in the finite element mesh structures for different models. Solid 186 element type was used. The elongation at

the right side of the plate was gradually achieved with the lower steps of 0.1 mm, 0.05 mm and 0.025 mm. Composite material is defined as linear elastic. Four layers of carbon fiber composite plates with a total thickness of 1 mm were defined as separate volumes with a thickness of 0.25 mm, and the layers were assumed to be perfectly bonded together.

The reduction in the reaction forces obtained by the action of the damaged elements resulting from the use of the Hashin failure criterion in the progressive failure analysis is reflected in the load-elongation graph as in the experimental works. Thus, damage behavior can be interpreted numerically more easily with the aid of the numerical load-displacement values to be matched with the load-displacement graph to be obtained from the experimental study result.

Increasing the amount of load or displacement in failure analysis significantly affects the reaction forces at the beginning of the damage. Coarse selection of the step range increases the maximum failure load.

In analyzes, increasing the finite element mesh density around the hole partially reduces the maximum failure load. For this reason, the variation of the displacement step is more important parameter than the element dimension around the hole at this stage.

In addition to these parameters studied in the study, the mechanical properties of the material, boundary and loading conditions are also other factors that need to be defined correctly. In the case of progressive failure analysis for more complex experimental studies, the ideal load step and the finite element mesh density for basic models should be determined by experimental and numerical load-displacement graph matching. Then, numerical solutions must be made for the real problem.

Keywords: *Fiber reinforced composites, progressive failure, Hashin, stress analysis, plate*