

TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARDA HASAR İLERLEME MODELLEMESİ

Tolga DURSUN ve Mahmut ÖZBAY*

ASELSAN A.Ş., Ankara

*Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570 Ankara

tdursun@mgeo.aselsan.com.tr, ozbaym@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 07.02.2007; Kabul/Accepted: 22.08.2007)

ÖZET

Bu çalışmada, tabakalı kompozit levhaların kopma dayanımını yüksek doğrulukta tespit edebilmek amacıyla hasar ilerleme modeli geliştirilmiştir. Hasar ilerleme modeli sonlu eleman analiz uygulamalarına uygun olarak hazırlanmıştır. Geliştirilen bu model sonlu eleman analizlerinde kullanılarak, ortasında delik bulunan ve düzlemsel yüklemeye maruz kalan kompozit levhaların kopma dayanımı hesaplanmıştır. Analiz sonuçları literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış ve çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hasar ilerleme modeli, kompozitler, sonlu eleman analizi.

PROGRESSIVE DAMAGE MODELING FOR LAMINATED COMPOSITE PLATES

ABSTRACT

In this study, a progressive damage model was developed to determine the failure strength of laminated composite plates with high accuracy. Progressive damage model was prepared to be applicable in finite element analyses. Using this model in finite element analyses, failure strengths of composite plates with a centered hole and loaded in plane were determined. Results of the analyses were compared with the experimental studies available in literature and an excellent agreement was found between the results of the analyses and experimental data.

Keywords: Progressive damage model, composites, finite element analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler metallere göre yüksek özgül mukavemet ve katılık özelliklerine sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı son yıllarda özellikle havacılık ve savunma sanayinde kullanım alanları artmaktadır. Kompozit yapılar birbirlerine veya metallere civata/somun veya yapıştırma tekniği ile birleştirilir. Civata/somun bağlantısının yapıştırma tekniğine göre büyük avantajı montaj/demontaj işleminin çok daha kolay olmasıdır. Civata/somun bağlantısının dezavantajı ise yapı üzerine açılan deliklerdir. Bu deliklerin kenarlarında gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet değerlerine sahip olmalarına karşın gevrek yapıda olmaları ve anizotropik özelliklerinden dolayı gerilme yığılmalarına karşı çok hassastırlar. Kompozit yapılarda ayrıca yüklemeye göre çeşitli hasar şekilleri meydana gelmektedir. Bunlara

örnek olarak elyaf kopması, matris çatlaması, delaminasyon sayılabilir.

Hafif, sağlam ve yüksek güvenilirlikte kompozit yapılar oluşturabilmek için, kompozit malzemelerin yüklemeye altındaki davranışlarını çok iyi bilmek gereklidir. Bunun için de kompozit yapıların kopma dayanımını belirlemek amacıyla çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalara ihtiyaç vardır. Literatürde bu konuda çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Nuismer, R.J. ve Whitney, J.M [1] kompozit yapıların kopma dayanımı ile ilgili iki kriter geliştirmişlerdir. Birinci hasar kriterine göre delik kenarından belli bir "d" uzaklığındaki gerilme, malzemenin kopma mukavemetine eşit veya büyük olur ise levhada kırılma gözlenir. Geliştirilen ikinci kriterine göre ise, delik kenarından belli bir "a" mesafesine kadar olan uzaklıktaki ortalama gerilme değeri, malzemenin kopma mukavemetine eşit veya büyük olursa levhada

kırılma gözlenir. Belirlenen “d” ve “a” mesafelerinin malzeme özelliği olduğu, levha geometrisinden ve gerilme dağılımından bağımsız olduğu belirtilmiştir. Bu kriterlerde hasarın ilerleme şekli ve hasar modu belirli değildir. Chang [2,3], kompozit yapılarda hasar şeklinin belirlenmesi ve hasarın ilerleme yönü üzerinde çalışmıştır. Chang tarafından geliştirilen hasar kriteri ve hasar ilerleme modeli sonlu eleman analizlerine uyarlanmış ve çeşitli konfigürasyonlarda üretilen kompozit levhalarda kullanılmış, elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. Tan [4], çalışmasında Tsai-Wu hasar kriterini kullanmış ve sonlu eleman analizleri ile ortasında delik bulunan çeşitli kompozit levhalarda hasar ilerleme şeklini belirlemiştir. Fakat Tsai-Wu hasar kriteri, hasar şeklini belirlemede uygun olmayan bir kriterdir. Ortasında delik bulunan ve pimden yüklenmiş kompozit levhalar için çeşitli hasar ilerleme modelleri geliştirilmiş ve iki boyutlu sonlu eleman analizleri yapılarak kompozit levhaların kopma dayanımları hesaplanmıştır [5-7].

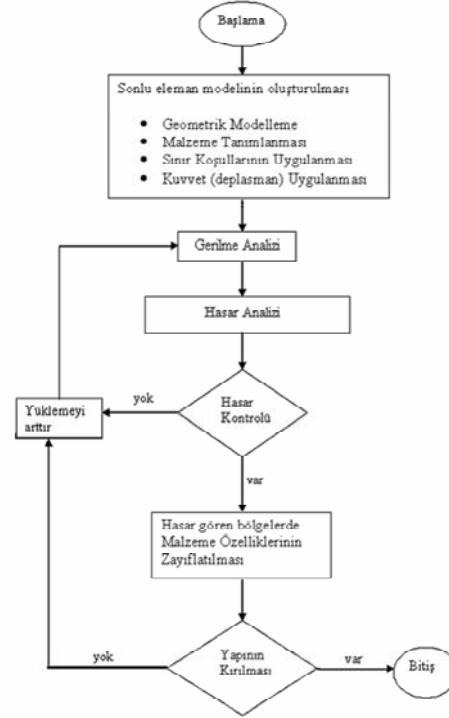
Bu çalışmada, tabakalı kompozit levhalarda hasar ilerlemesini modelleyebilmek amacıyla ve sonlu eleman analizlerinde uygulamak üzere bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen program ile kullanıcıya bağlı olarak hasar kriterleri, malzeme zayıflatma kuralları ve kuvvet arttırım oranları değiştirilebilmektedir. Hasar ilerleme modeli kullanılarak ortasında delik bulunan ve düzlemsel yüklemeye maruz kalan kompozit levhalar için hasar analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda kompozit levhaların kopma dayanımı ve hasar şekilleri tespit edilmiştir.

2. HASAR İLERLEME MODELİ (PROGRESSIVE DAMAGE MODEL)

Tabakalı kompozit levhaların hasar analizleri için geliştirilen hasar ilerleme programı [8], ANSYS Parametric Design Language (APDL) kullanılarak hazırlanmıştır. Program, iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde kullanılabilir. İstenilen hasar kriterleri seçilerek programa adapte edilebilmekte, malzeme zayıflatma kuralları ve kuvvet arttırım oranı kullanıcıya bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Hasar ilerleme algoritması Şekil 1’de belirtilmiştir.

Kompozit malzemeler için geliştirilen hasar ilerleme modelinde Hashin hasar kriteri kullanılmıştır. Hashin hasar kriteri, kompozit yapılarda hasar şeklini ayırt etmektedir. Dolayısıyla hasar ilerleme modellerine uygulanması en uygun kriterdir. Bu teoriye göre matris yapıda veya fiberde bir hasarın olup olmadığı tespit edilebilmektedir [9]. Uygulanan hasar kriterleri aşağıda belirtilmiştir.

Matris çekme hasarı, ($\sigma_2 > 0$)



Şekil 1. Hasar ilerleme algoritması (Algorithm for progressive damage) [8]

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

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

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

Fiber çekme hasarı, ($\sigma_1 > 0$)

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

Fiber basma hasarı, ($\sigma_1 < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^C}\right) > 1 \quad (5)$$

Hasar ilerleme programında kullanılan malzeme zayıflatma kuralları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Malzeme özelliklerinin indirgenmesi (Degradation of material properties)

Malzeme Sabitleri	HASAR ŞEKİLLERİ				
	Matris Çekme Hasarı	Matris Basma Hasarı	Fiber Çekme Hasarı	Fiber Basma Hasarı	Fiber-Matris Kayma Hasarı
E_1	Değişim yok	Değişim yok	$0.01E_1$	$0.01E_1$	Değişim yok
E_2	$0.01 E_2$	$0.01 E_2$	$0.01 E_2$	$0.01 E_2$	Değişim yok
G_{12}	Değişim yok	Değişim yok	$0.01G_{12}$	$0.01G_{12}$	$0.01G_{12}$

3. SONLU ELEMANLAR MODELİ VE ANALİZLER (FINITE ELEMENT MODEL AND ANALYSES)

Geliştirilen hasar ilerleme programının ve sonlu eleman analizlerinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla literatürde yer alan ve bu konuda yapılan çalışmalarda kaynak olarak gösterilmiş çalışmalar [2] ile karşılaştırmalar yapılmıştır. İlk olarak, ortasında delik bulunan ve $[(\pm 45)_6]_s$ konfigürasyonuna sahip karbon/epoksi levha incelenmiştir (Şekil 2). Delik çapı 6,35 mm, levha genişliği 25,4 mm ve levha kalınlığı 3,175 mm alınmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2’de belirtilmiştir.

Ortasında delik bulunan kompozit levhaya iki ucundan çekme kuvveti uygulanmıştır (Şekil 2).

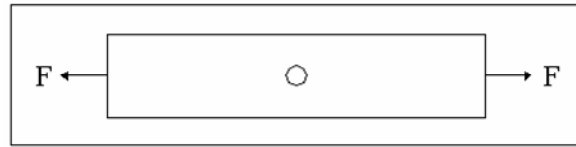
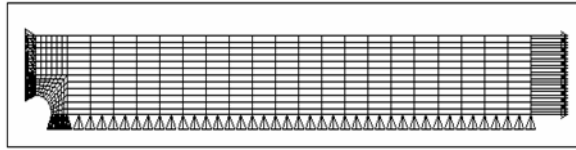
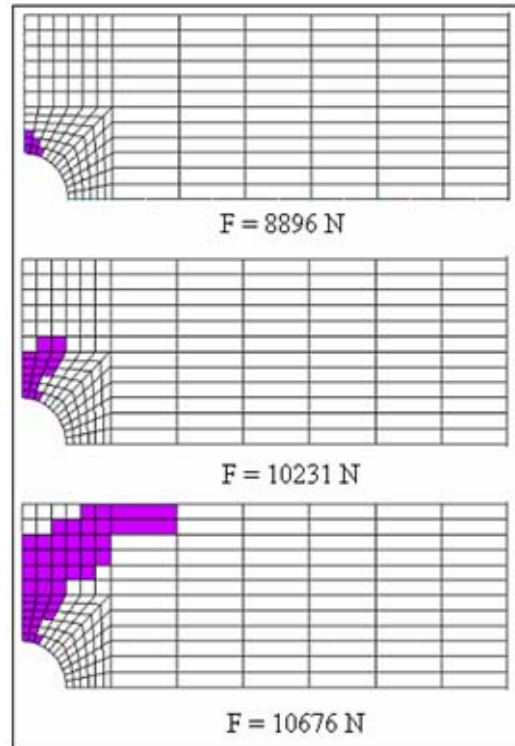
Hazırlanan sonlu elemanlar modeli ve uygulanan sınır koşulları Şekil 3’te gösterilmiştir. Geometri ve yükleme simetrik olduğundan yapının sadece $\frac{1}{4}$ ’ü modellenmiş ve simetri sınır koşulları uygulanmıştır. İki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Analizlerde ANSYS eleman kütüphanesinde yer alan SHELL 99 doğrusal, tabakalı eleman tipi kullanılmıştır.

Kuvvet arttırım oranı değiştirilerek yapılan hasar analizleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve en uygun oranın % 2.5 olduğu tespit edilmiştir. Kuvvet arttırım oranı düşürüldükçe daha doğru sonuçlar elde edilmektedir fakat bu durum sonlu eleman analizlerinin çözüm süresini oldukça arttırmaktadır. Çalışmada yer alan analizlerde arttırım oranı % 2.5 olarak alınmıştır.

Tablo 2. Malzeme özellikleri (Material properties)

E_x (GPa)	147
E_y (GPa)	11,4
G_{xy} (GPa)	6,18
ν_{xy}	0,3
X^I (MPa)	1730
X^C (MPa)	1379
Y^I (MPa)	66,5
Y^C (MPa)	268
S (MPa)	134
E_x (GPa)	147
E_y (GPa)	11,4

Uygulanan kuvvete bağlı olarak levhada meydana gelen hasar durumu Şekil 4’te belirtilmiştir. Mor renk ile gösterilen bölgede fiber kopması meydana gelmiştir. Hasar, gerilmenin maksimum olduğu delik kenarında başlamış ve fiber doğrultusunda levha kenarına doğru ilerlemiştir. Uygulanan kuvvet 10676 N’a ulaştığında levhada yırtılma meydana gelmiştir. Makale sonucuna göre [2] % 4 oranında fark bulunmuştur.

**Şekil 2.** Test numunesi (Test specimen)**Şekil 3.** Sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları (Finite element model and boundary conditions)**Şekil 4.** $[(\pm 45)_6]_s$ malzemesinde meydana gelen hasar ilerlemesi (Progressive damage for material $[(\pm 45)_6]_s$)

İkinci örnek olarak, [(0/90)₆]_s konfigürasyonuna sahip, ortasında delik bulunan ve T300/1034-C karbon/e poksi malzemeden üretilmiş kompozit levha analiz edilmiştir. İlk analizdeki geometri ve sınır koşulları ikinci örnekte de aynen uygulanmıştır. Analiz sonucuna göre meydana gelen hasar durumu Şekil 5'te gösterilmiştir. Maksimum gerilmenin olduğu delik kenarında, mor renk ile gösterilen bölgede, takviye açısının 90 derece olduğu tabakalarda matris kırılması meydana gelmiştir.

Kuvvet arttırıldıkça matris kırılması 90 derece takviye açılı tabakalarda hızla ilerlemiştir. Kırmızı renk ile gösterilen bölgelerde ise 0 derece takviye açılı tabakalarda fiber kopması ve 90 derece takviye açılı tabakalarda matris kırılması meydana gelmiştir. Analiz sonucuna göre kompozit levhada kopma 35386 N kuvvet uygulandığında gerçekleşmiştir. Makale sonuca göre [2] % 6 oranında farklı sonuç elde edilmiştir.

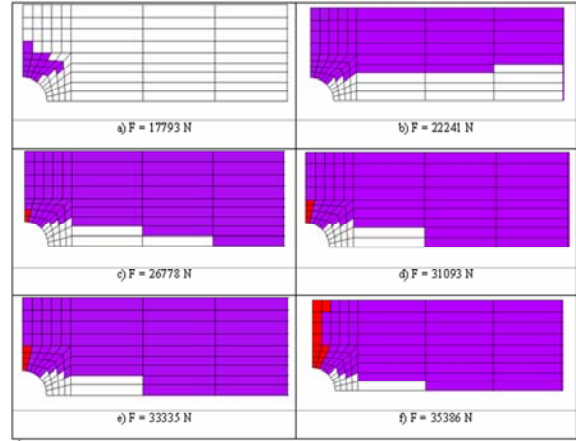
4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada tabakalı kompozit malzemelerin kopma dayanımını yüksek doğrulukla tespit edebilmek için hasar ilerleme modeli geliştirilmiştir. Hasar ilerleme modeli sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır. Ortasında delik bulunan ve çekme yüküne maruz kalan karbon/epoksi levhalar için analizler yapılmış ve levhaların kopma dayanımları tespit edilmiştir. Analizlerde [(±45)₆]_s ve [(0/90)₆]_s konfigürasyonları seçilmiştir. Analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve tam uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda hasar şekilleri de doğru şekilde bulunmuştur.

[(±45)₆]_s konfigürasyonlu kompozit levhada fiber çekme hasarı delik kenarında başlamış ve fiber doğrultusunda ilerleyerek levhanın serbest kenarına ulaşmış ve kopma 10676 N'da meydana gelmiştir. [(±45)₆]_s konfigürasyonunda uygulanan yük, maksimum çekme kuvvetinin %83'üne ulaştığında hasar başlamıştır.

Hasarın başlamasıyla levhanın kopması arasındaki yük farkı çok az olduğu için kopma aniden meydana gelmiştir. [(0/90)₆]_s konfigürasyonunda ise öncelikle matris çekme hasarı delik kenarında başlamış daha sonra tüm levhaya ilerlemiştir. Kuvvet 26778 N'a ulaştığında delik kenarında fiber çekme hasarı başlamış ve 35386 N'da levha kopmuştur. Kompozit levhada fiber çekme hasarı, maksimum çekme mukavemetinin %76'sına ulaştığında başlamıştır.

İki konfigürasyon karşılaştırıldığında, [(0/90)₆]_s konfigürasyonlu kompozit levhanın çekme mukavemetinin [(±45)₆]_s konfigürasyonlu levhaya göre 3 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. [(0/90)₆]_s malzemesinde meydana gelen hasar ilerlemesi (Progressive damage for material [(0/90)₆]_s)

Yapılan analizlerde hasar ilerleme modelinin doğruluğunun; hazırlanan sonlu eleman ağ yapısına, kullanılan eleman sayısına, uygulanan kuvvetin arttırım oranına, malzeme özellikleri indirgenme kuralına ve seçilen hasar kriterlerine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Nuismer, R.J. and Whitney, J.M. "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations", **Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP 593**, 117-142, 1975.
2. Chang, K.F, Chang, K.Y., "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations", **Journal of Composite Materials**, Cilt 21, 834-855, 1987.
3. Chang, K.F, Liu, S., Chang, K.Y., "Damage Tolerance of Laminated Composites Containing an Open Hole and Subjected to Tensile Loadings", **Journal of Composite Materials**, Cilt 25, 274-301, 1991.
4. Tan, S. C., "A Progressive Failure Model for Composite Laminates Containing Openings", **Journal of Composite Materials**, Cilt 25, 556-577, 1991.
5. Lessard, L.B., Shkrieh, M.M., "Two-Dimensional Modeling of Composite Pinned-Joint Failure", **Journal of Composite Materials**, Cilt 29, No. 5, 671-697, 1995.
6. Camanho, P.P., Matthews, F.L., "Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP : a Review", **Composites Part A**, Cilt 28A, 529-547, 1997.
7. Camanho, P.P., Matthews, F.L., "A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates", **Journal of Composite Materials**, Cilt 33, No. 24, 2248-2280, 1999.
8. Dursun, T., **Civata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
9. Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", **J. Applied Mechanics**, Cilt 47, 329-334, 1980.