

Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda ilerlemeli hasar analizi

Kadir TURAN*, **Mustafa GÜR****

*Dicle Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 21280, Diyarbakır

** Fırat Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

Özet

Sunulan çalışmada, pim bağlantılı kompozit levhaların hasar davranışları deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Kompozit malzeme olarak tek yönde karbon fiber kullanılarak takviye edilmiş epoksi matris reçineli $[0^{\circ}/75^{\circ}]_2$ simetrik ve anti-simetrik tabaka dizilimine sahip levhalar kullanılmıştır. Sıcak presleme tekniği kullanılarak üretilen kompozit levhalarda epoksi reçine olarak %80 oranında CY 225 epoksi reçine ve %20 oranında Hy 225 sertleştirici kullanılmıştır. Presleme işlemi sonunda dört tabakadan oluşan 1,235 mm kalınlığında kompozit levhalar elde edilmiştir. Kompozit levhaların mekanik özellikleri ASTM standartlarına göre belirlenmiştir. Geometrik parametrelerin değişimi; pim deliği merkezinin levhanın serbest kenarına uzaklığının pim deliği çapına oranı E/D ve levha genişliğinin pim deliği çapına oranı W/D değerlerine göre incelenmiştir. Pim deliği çapı 6 mm olmak üzere, E/D oranı 1'den 5'e kadar artırılırken, W/D oranı 2'den 5'e kadar artırılmıştır. Sayısal çalışma, ANSYS 11.0 programında üç aşamadan oluşan bir alt program yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Ansys parametrik dizayn dili (APDL) kullanılarak hazırlanan programda öncelikle katı modelleme, sonlu elemanlara bölmeleme ve sınır şartlarının teşkili, ikinci bölümde gerilme analizi ve son bölümde ise hasar analizi yapılmıştır. Hasar analizinde, hasar yüklerini belirlemek için Hashin hasar kriteri kullanılırken hasar tipleri ve son hasar yükü malzeme indirgeme kuralları kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda hasar tiplerinin ve yüklerinin değişiminde E/D oranının etkili olduğu gözlemlenmiştir. E/D oranının 1 olduğu tüm numuneler için hasar tipi olarak kesme hasarı görülürken 2, 3, 4 ve 5 olduğu numunelerde ezilme hasarı görülmüştür. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında %1 ile %14 oranında değişen yakınsaklıkta sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit levhalar, İlerlemeli Hasar Analizi, Pimli bağlantılar, Sonlu Elemanlar metodu.

Progressive Failure Analysis in Pinned Joint Laminated Composite Plates

Extended abstract

Fiber reinforced composite plates are widely using automotive, aerospace and space craft industry. For joining composite to composite or composite to metal, mechanical fasteners are used. Pinned connections are a kind of mechanical fasteners and using commonly for joining composites. It is preferred because of low cost, simplicity for application, cheaper than other fasteners and facilitation of disassembly for repair.

For application of pinned connections a hole must be opened in the composite plates. Then, the stress concentration locations are appeared on the edge of the hole. The hole is causes stress concentration locations and often causes reduction of load capacity of composite plates. Because of complex failure modes of mechanical joints, designer must be have much more rigorous design knowledge and techniques than traditional methods.

In the present sudy, failure behaviour of pinned joint composite materials were analysed experimentally and numerically. The composite materials which were consist of unidirectional carbon fibers and epoxy matrix resin were used with $[0^{\circ}/75^{\circ}]_2$ symmetric and anti symmetric laminae layups. Numerical analysis was performed with using three dimensionally finite element methods in ANSYS software. In the progressive failure analysis, the Hashin failure criteria and material properties degradation rules were used for predicted failure loads and failure modes.

The composite plates produced in IZOREEL firm by supporting FUBAP (Firat University Scientific Research Unit). All laminates were manufactured by press-mould technique. As the matrix material, epoxy CY 225 and hardener HY 225 are mixed in the mass ratio at 100:80. Volume fraction of unidirectional carbon fiber is approximately 70 %.

A serial of experiments was performed for determining failure behavior of pin joined and mechanical properties of carbon/epoxy composite plates. The pin loading tensile tests were performed according to ASTM D 953-D standard test method.

The failure analysis was performed in ANSYS finite element software with using a computer code which was created with APDL codes. The stress analysis is ended; the stress component of each element is saved in the matrix form. Then each element is tested with failure criteria. If a failure is predicted on any element, material properties are modified by implementing degradation rules. This iteration is continued until catastrophic failure appears.

All of the specimens were loaded until catastrophic failure occurred and the general behavior of the composite plates was obtained from the load/displacement curves. The shear-out failure mode was observed for pin displacement value between 0,5-1,5 mm and the bearing failure mode was observed for pin displacement value between 1-3 mm. Generally, the failure loads affected the geometrical parameters (E/D and W/D). The failure loads were increased with increasing E/D and W/D ratios. However, in this study the failure modes varied with E/D ratios. When E/D ratios were equal 1, the failure mode was observed as shear-out mode. For other values of E/D ratios (i.e. 2, 3, 4, 5), the failure modes were observed as bearing failure. Because of the fiber orientation angle (θ°) of composite plates, failure modes of pinned connections were not impressed the W/D ratios and the net – tension failure was not observed.

Keywords: Composite Plates, Progressive Failure Analysis, Pinned Joints, Finite Element Method

Giriş

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler özellikle hava ve uzay taşıtlarında geleneksel malzemelerin yerine ağırlığı azaltmak amacı ile kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemelerin mekanik davranışları fiber takviye açısına bağlı olarak değiştiği için izotrop malzemelere göre daha karışıktır. Uygulama kolaylığı ve tamir gerektiğinde çözülebilir olması nedeni ile kompozit malzemelerin bir araya getirilmesinde sıklıkla pimli bağlantılar kullanılmaktadır. Gelişmiş özelliklerine rağmen pimli bağlantılar önemli bir dezavantaja sahiptirler. Bağlantının gerçekleştirilebilmesi için kompozit levhaya açılan delikler levha geometrisinde süreksizliklere yol açarak gerilme yığılma noktaları oluşturduğu için kompozit levha mukavemetinde düşmelere neden olmaktadır.

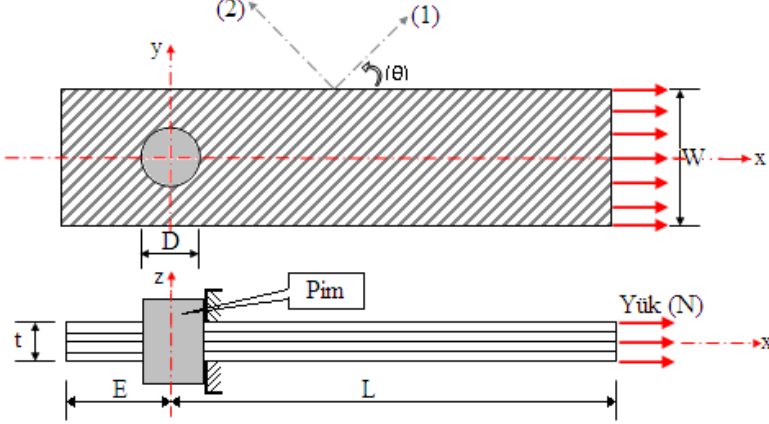
Pim bağlantılı kompozit levhaların hasar davranışlarının araştırıldığı çalışmalarda genellikle geometrik parametrelerin, fiber takviye açısının ve tabaka diziliminin hasar yükleri ve hasar tipleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Pim bağlantılarının gerçekleştirildiği geometrik parametreler; pim deliği merkezinin levhanın serbest kenarına uzaklığının pim deliği çapına oranı E/D ve levha genişliğinin pim deliği çapına oranı W/D parametreleridir. Alüminyum-cam elyaf-epoksi reçine bileşenlerinden oluşan sandviç yapılı kompozit levhalarda pim bağlantılarının hasar yükü üzerine etkileri Sayman ve İçten (2003) tarafından araştırılmıştır. Geometrik parametrelerin hasar yükü üzerine etkileri deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Aktaş ve Karakuzu (1999) tarafından yapılan çalışmada pim bağlantılı karbon/epoksi kompozit levhaların hasar davranışları deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Sonlu elemanlar metodunun kullanıldığı sayısal çalışmada hasar yüklerinin tespiti için Tsai – Hill hasar kriteri kullanılmıştır. Fiber takviye açısı ve tabaka diziliminin pim bağlantılı kompozit levhaların hasar yükü üzerine etkileri Okutan vd. (2001) tarafından araştırılmıştır. Örgülü cam fiber/epoksi reçineden oluşan tabakalı kompozit levhaların kullanıldığı çalışmada deneysel ve sayısal metotlar kullanılmıştır. Sayısal çözümleme ANSYS programında iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Tserpes vd.(2001) ANSYS programında üç boyutlu modelleme tekniğini kullanarak pim bağlantılı kompozit levhalarda son hasar yüklerini ve artık gerilme değişimini hesaplamışlardır. İki boyutlu sonlu elemanlar

metodunun kullanılarak pim bağlantılı kompozit levhaların ezilme hasar yüklerinin tespiti İçten ve Karakuzu (2002) tarafından yapılan çalışmada araştırılmıştır. Bu çalışmada hasar yüklerinin ve hasar tipinin tespitinde Hashin ve Hoffman hasar kriterleri kullanılmıştır. Okutan (2006) tarafından yapılan bir diğer çalışmada pim bağlantılı kompozit levhaların hasar yükleri ve hasar tipinin fiber takviye açısı, tabaka dizilimi ve takviye tipinin değişiminin etkileri araştırılmıştır. Camanho and Matthews (2000) hasar ilerlemesi ve hasar mukavemetinin tespiti için Hashin hasar kriterini kullanarak üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Pekbey (2007) tarafından yapılan çalışmada, pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde ön gerilme momentinin ve farklı bağlantı geometrilerinin hasar yüklerine etkisi $[0^{\circ}/90^{\circ}\pm 60^{\circ}]_s$ fiber takviye açısı ve tabaka dizilimine sahip tabakalı kompozit malzemeler kullanılarak incelenmiştir. Turan vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada pim bağlantılarının hasar yükü ve hasar tipinin fiber takviye açısı ile değişimi araştırılmıştır. ANSYS programında geliştirdikleri ilerlemeli hasar analizi alt programını kullanarak pim bağlantılı kompozit levhaların son hasar yükü ve hasar tipini üç boyutlu teknikler ile modellemişlerdir.

Bu çalışmada, pim bağlantılı kompozit levhaların hasar davranışları deneysel ve sayısal metotlar kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada $[0^{\circ}/75^{\circ}]_2$ simetrik ve anti-simetrik tabaka dizilimine sahip tekyönde karbon fiberler ile takviye edilmiş epoksi reçineli kompozit levhalar kullanılmıştır. Sayısal çalışma, ANSYS 11.0 programında üç boyutlu sonlu eleman teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. APDL (Ansys Parametrik Dizayn Dili) kodlarını kullanarak yazılmış olan bir alt program yardımı ile gerçekleştirilen sayısal çalışmada Hasar yüklerinin tespiti için Hashin hasar kriteri kullanılırken hasar ilerlemesini modellemek için malzeme indirgeme kuralları kullanılmıştır. Sayısal olarak yapılan çalışmada hasar yüklerinin tespitinde elde edilen yakınsama kadar hasar tipinin elde edilmesinde de oldukça net sonuçlara ulaşılmıştır.

Problem tanımı ve deneysel çalışma

Şekil 1’de pim bağlantısı kullanılarak bağlanmış olan kompozit levhanın geometrik özellikleri ve yükleme koşulları görülmektedir.

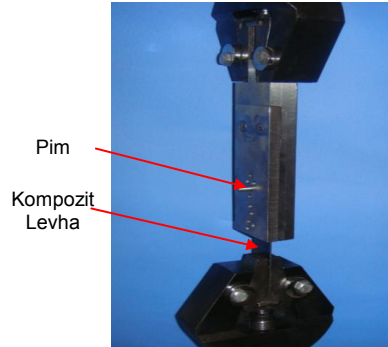


Şekil 1. Pim bağlantısı yükleme şartları ve geometrik özellikleri Turan vd. (2010).

D çapındaki pim sıkı geçme olarak pim deliğine yerleştirilmiş ve levhanın serbest ucundan orta eksenine paralel olacak şekilde düzgün yayılı çekme yükü uygulanmıştır. Pim deliği çapı $D = 6\text{ mm}$, levha boyu $L = 76\text{ mm}$ ve kompozit levha kalınlığı $t = 1,235\text{ mm}$ sabit değerler olarak alınmıştır. (1) ve (2) sırasıyla takviyeye paralel ve dik doğrultuyu göstermektedir. Geometrik parametreler; $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ ve $W/D = 2, 3, 4, 5$ olarak alınmıştır.

Kompozit levhalar 330 gr/m^2 yoğunlukta tek yönlü karbon fiber ve Ciba Geigy, Bisphenol A, CY-225 epoksi reçineden oluşmaktadır. Epoksi reçineye %20 oranında Ciba Geigy, Anhydride HY-225 sertleştirici katılmasıyla epoksi reçine elde edilmiştir. Her bir karbon fiber tabakasına reçine emdirilerek kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Takviye elemanı olarak dört tabaka halinde karbon fiberler yerleştirilmiştir. 150 bar basınç altında $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 3 saat bekletilerek $t=1,235\text{ mm}$ kalınlığında, dört tabakalı levhalar elde edilmiştir. Daha sonra tabakalı kompozitlere pim bağlantısını yapmak için $D=6\text{ mm}$ çapında delik açılmıştır (Şekil 1). Kompozit levhaların mekanik özellikleri ASTM

D 3039-76, ASTM 3410-75 ve ASTM D7078/D standartlarına uygun statik çekme, basma ve kayma testleri sonucunda elde edilmiştir. Deneysel olarak belirlenen kompozit levhaların mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Pim bağlantısı deneyleri ise ASTM D953 –D standardına göre $0,5\text{ mm/dak}$ çekme hızında yapılmıştır (Şekil 2).



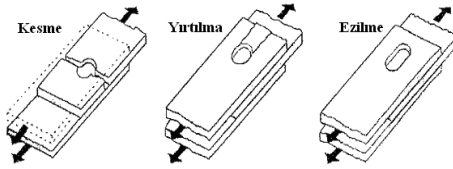
Şekil 2. Çekme test cihazına bağlanmış pim bağlantılı numune Turan (2009).

Kompozit levhaların açılan deliklerine yerleştirilmiş rijit pim özel aparat yardımıyla cihazın sabit çenesine mesnetlenmiş, levhaların delikten uzak kenarı ise cihazın hareketli çenesine bağlanarak x eksenine doğrultusunda aksel çekme yükü uygulanmıştır (Şekil 2). Deneyler sonucunda farklı takviye açılarına sahip her bir levhanın yük yer değiştirme grafiği çizilerek, hasar yükleri ve hasar tipleri tespit edilmiştir. İmalat öncesi ve sonrası ağırlıkların ve hacimlerin hesaplanması sonucunda karbon fiberlerin hacimsel yüzdesi yaklaşık %70 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 1. Karbon/epoksi tabakalı kompozit levhanın mekanik özellikleri Turan vd. (2010).

1 Yönünde Elastisite Modülü	E_1 (MPa)	172891
2 Yönünde Elastisite Modülü	E_2 (MPa)	10796,66
Kayma Modülü	G_{12} (MPa)	3638
Poisson oranı	ν_{12}	0,32
1 Yönünde çekme mukavemeti	X_c (MPa)	1440,105
2 Yönünde çekme mukavemeti	Y_c (MPa)	36,586
1 Yönünde basma mukavemeti	X_b (MPa)	- 419,946
2 Yönünde basma mukavemeti	Y_b (MPa)	- 115,405
Kayma mukavemeti	S (MPa)	56,34

Pim bağlantılı kopolit levhalarda kesme, yırtılma ve ezilme hasarı olmak üzere başlıca üç tip hasar davranışı gözlemlenmektedir.

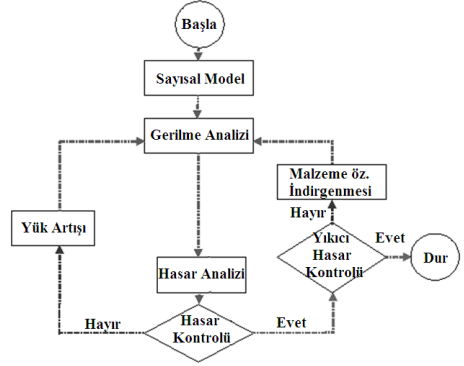


Şekil 3. Çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda görülmüş muhtemel hasar tipleri Turan (2009).

Sayısal çalışma

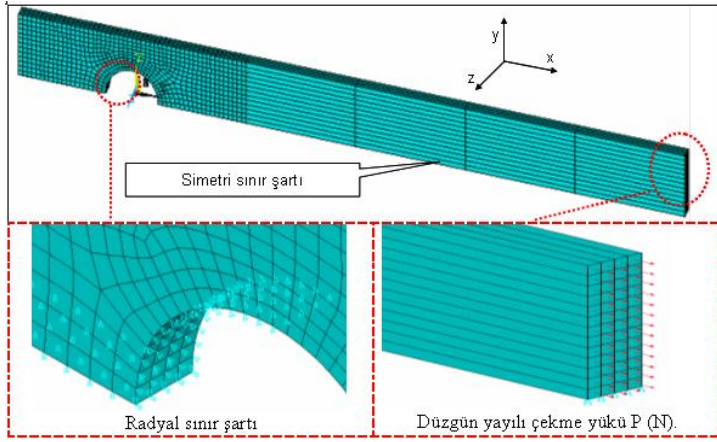
Sayısal çalışma, ANSYS sonlu elemanlar programını desteklemek üzere APDL (Ansys Parametrik Dizayn Dili) kodları ile hazırlanmış

olan alt program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümde kullanılan programın akış diyagramı Şekil 4'de verilmiştir.











Şekil 4. Sayısal çalışmada kullanılan programın akış diyagramı Turan (2009).

Üç aşamalı olarak çalışan programda birinci aşamada katı modeli oluşturulan problem sonlu elemanlara bölünerek sınır şartları uygulanmaktadır. Katı model üç boyutlu ve simetriden dolayı yarım model şeklinde oluşturulurken sonlu elemanlara bölme işleminde ANSYS yardım menüsünde tabakalı kompozit malzemeler için tanımlanmış olan Solid 46 elemanı kullanılmıştır ANSYS (2008). Pim sıkı geçme olarak bağlandığı için pim yerine radyal sınır şartı kullanılmıştır. Simetriklikten dolayı yarım olarak modellenen problemde simetrik olan yüzeye simetri sınır şartı uygulanmıştır. Şekil 5'de pim bağlantısı probleminin temsili olarak sonlu elemanlara bölünmüş ve sınır şartları uygulanmış olan katı modeli görülmektedir. Sonlu elemanlara bölme işleminde modelin delik kenarı sıkı elemanlara bölünmüş ve sonraki kısımda rastgele dağılımlı bir ağ yapısı kullanılmıştır. Pim deliği çevresinde yönlendirilmiş bir ağ yapısı ile çalışılması, ağ yapısına bağlı olarak çözüm verebileceğinden özellikle rastgele dağılımlı ağ yapısı tercih edilmiştir. Tablo 2 'de Hashin hasar teorisi bağıntıları, malzeme indirgeme kuralları ve malzeme renklendirmeleri görülmektedir.



Şekil 5. Problemin sonlu elemanlar modeli ve sınır şartı Turan vd. (2010).

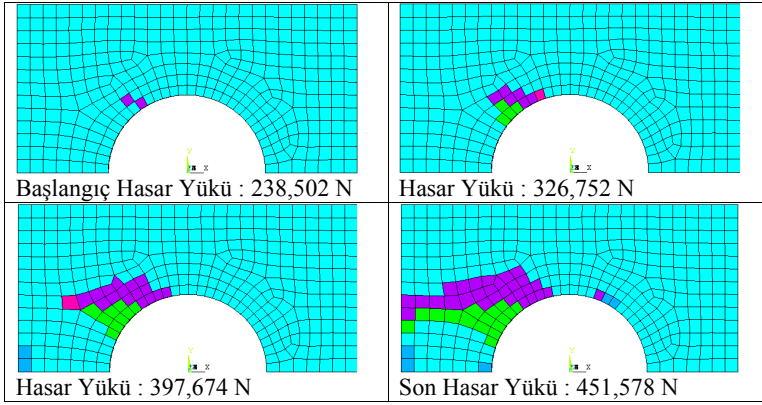
Tablo 2. Hashin hasar teorisi, malzeme indirgeme kuralları ve malzeme renkleri Turan vd. (2010).

Hasar Tipi	Hasar Şartı	Hasar Teorisi Bağıntısı	Malzeme İndirgeme ($I = 10^{-5}$)	Malzeme Rengi
Hasarsız	-	-	-	
Fiber Çekme Hasarı	$\sigma_1 > 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	$(E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, v_{12}, v_{13}, v_{23}) * I$	
Fiber Basma Hasarı	$\sigma_1 < 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right)^2 \geq 1$	$(E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, v_{12}, v_{13}, v_{23}) * I$	
Matriks Çekme Hasarı	$\sigma_2 > 0$	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	$(E_{22}, G_{12}, v_{12}) * I$	
Matriks Basma Hasarı	$\sigma_2 < 0$	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	$(E_{22}, G_{12}, v_{12}) * I$	
Fiber-Matrix Kayma Hasarı	$\sigma_1 < 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	$(G_{12}, G_{13}, G_{23}, v_{12}, v_{13}, v_{23}) * I$	
Ayrılma Çekme Hasarı	$\sigma_3 > 0$	$\left(\frac{\sigma_3}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	$(E_{33}, G_{13}, G_{23}, v_{13}, v_{23}) * I$	
Ayrılma Basma Hasarı	$\sigma_3 < 0$	$\left(\frac{\sigma_3}{X_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	$(E_{33}, G_{13}, G_{23}, v_{13}, v_{23}) * I$	

Sayısal hasar yükleri tespit edilirken gerilme sonucunda her eleman için tespit edilmiş olan analizinden faydalanılmaktadır. Gerilme analizi gerilme değerleri matris formatında

kaydedilmektedir. Gerilme analizi bittikten sonra her bir eleman için elde edilen gerilme değerleri Tablo 2’de yer alan Hashin hasar kriterine bağıntılarda yerine yazılarak hasar kontrolü yapılmaktadır. Yapılan hasar kontrolü sonucunda hasar tespit edilmemesi durumunda yük artırılarak analiz tekrarlanmaktadır. Hasar tespit edilmesi durumunda ise hasar tipine göre

malzeme indirgemesi yapıldıktan sonra analiz tekrarlanır. Malzeme özelliklerinin indirgenmesi; kompozit malzeme özelliklerinin hesaplama sonucu tespit edilen hasar tipine göre mekanik özelliklerinin I gibi çok küçük bir kat sayı ile çarpılarak rijitliğinin yok edilmesidir. I katsayısı 0’ a yakın kabul edilebilecek bir katsayı olarak 10^{-5} alınmıştır.



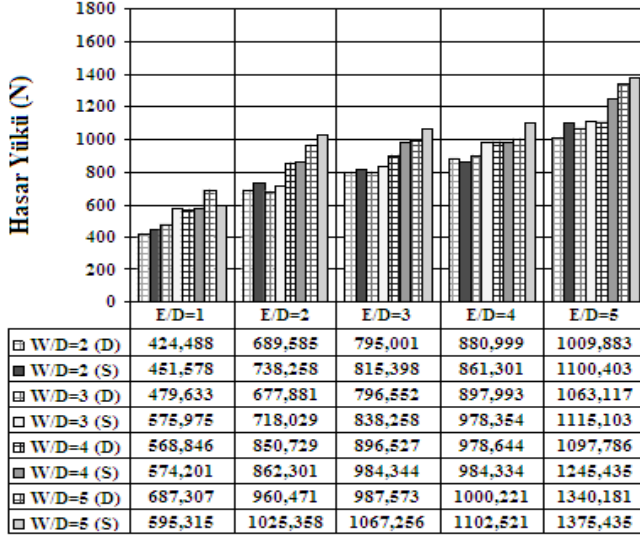
Şekil 6. $[0^{\circ}/75^{\circ}]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada $E/D=1$ ve $W/D=2$ için Hasar başlangıcı ve hasar ilerlemesi

Sonuçlar

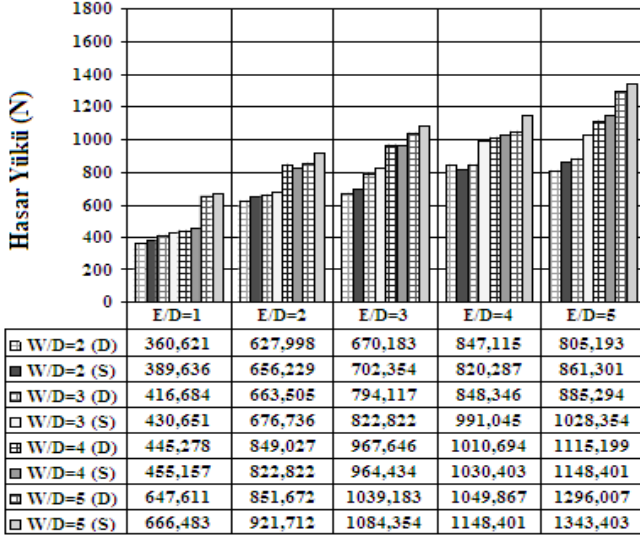
Şekil 7’de $[0^{\circ}/75^{\circ}]_s$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin (S) deneysel çalışma sonuçları (D) ile karşılaştırılması görülmektedir. $[0^{\circ}/75^{\circ}]_s$ tabaka dizilimi için en düşük sayısal hasar yükü $E/D=1$, $W/D=2$ olan levha için 451,578 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise $E/D=5$, $W/D=5$ olan levha için 1375,435 N olarak elde edilmiştir. Şekil 8’de ise $[0^{\circ}/75^{\circ}]_2$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 8’e göre en düşük sayısal hasar yükü $E/D=1$, $W/D=2$ olan levha için 389,636 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise $E/D=5$, $W/D=5$ olan levha için 1343,430 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlarının bir birlerine

yaklaşımında en uzak sonuç $[0^{\circ}/75^{\circ}]_2$ tabakalı kompozit levhada $E/D=5$, $W/D=3$ için %14 olarak elde edilirken en yakın sonuç ise $[0^{\circ}/75^{\circ}]_s$ tabaka diziliminde $E/D=3$, $W/D=4$ için % 1 olarak elde edilmiştir. Her iki tabaka diziliminde için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarında hasar yüklerinin E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Pim bağlantılı kompozit levhaların hasar tipleri incelendiğinde ise $E/D=1$ olan levhalarda herhangi bir W/D oranı için yırtılma hasarı gözlemlenirken diğer E/D oranları için ezilme hasarının gerçekleştiği deneysel ve sayısal çalışma sonucunda gözlemlenmiştir.



Şekil 7. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi Turan (2009).



Şekil 8. $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi Turan (2009).

Tartışma

Bu çalışmada pim bağlantılı karbon-epoksi kompozit levhaların hasar davranışları deneysel ve sayısal metotlar kullanılarak incelenmiştir. Bağlantı geometrisinin ve tabaka diziliminin etkileri incelenerek tablo ve grafikler halinde ifade edilmiştir. Çalışma sonuçlarından elde edilen çıkarımlar maddeler halinde ifade edilmiştir.

- E/D oranın 1'den 5'e artması sonucunda hasar yüklerinin en düşük % 193, en yüksek % 250 oranında arttığı tespit edilmiştir.
- W/D oranın 2'den 5'e artması sonucunda hasar yüklerinin en düşük % 113, en yüksek % 179 oranında arttığı tespit edilmiştir.
- Simetrik tabaka diziliminin antisimetrik tabaka dizilimine göre hasar yüklerinin genel olarak % 3 ile %20 oranında büyük olduğu hesaplanmıştır.
- Hasar tipleri üzerine E/D oranının etkili olduğu gözlemlenmiştir.
- Kesme hasarı gözlemlenmemiş olması her iki tabaka diziliminde de % 50 oranında 0° fiber takviye açısı bulunmasından kaynaklanmaktadır.
- Mekanik dayanım gerektiren konstrüksiyonlarda E/D oranı en az 2 ve üzeri ve W/D oranı da en az 3 ve üzeri olmalıdır.
- Sayısal ve deneysel çalışma sonuçları oldukça uyumludur.

Kaynaklar

- Icten B.M., Sayman O., (2003). Failure analysis of pin loaded aluminum-glass-epoxy sandwich composite plates, *Composites Science and Technology*, 63, 727-737.
- Aktas A., Karakuzu R., (1999). Failure analysis of two-dimensional carbon-epoxy composite plate pinned joint, *Mechanical Composite Material Structures*, 6, 347-361.
- Okutan B., Aslan Z., Karakuzu R., (2001). A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pi-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate, *Composite Science and Technology*, 61, 1491-1497.
- Tserpes K.I., Papanikos P., Kermanidis T.H., (2001). A three dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading, *Fatigue Fracture Engineering Materials and Structures*, 24, 663-675.
- Icten, B.,M., and Karakuzu, R., (2002). Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates, *Composites Science and Technology*, 62, 1259-1271.
- Baba B.O., (2006). Behavior of pin-loaded laminated composites, *Experimental mechanics*, 46, 589-600.
- Camanho P.P., Matthews F.L., (2000). A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates, *Composite Structures*, 50, 287-296.
- Pekbey, Y., (2007). Pim bağlantılı Tabakalı kompozit plakada ön gerilme momenti ile geometrik parametre değişiminin hasar analizine etkisi, 8. Uluslar arası kırılma konferansı, 554-562, İstanbul.
- Turan K., Kaman M.O. ve Gür M., (2010). Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının hasar tipine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 213-220.
- Turan K., (2009). Çözülebilir bağlantılı kompozit plakaların mekanik davranışlarının analizi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ansys (2008) 11.0 (Academic Teaching Introductory) Command References and Gui.

mühendislik dergisi

