



DELİKLİ KOMPOZİT YAPILARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

K. Levend Parnas¹, Ozan Erartsın², M. Bilal Atar³, Gökhan Tursun⁴

¹ TED Üniversitesi, Ankara

^{2,3} Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

⁴ TUSAŞ TAI, Ankara

ABSTRACT

The results of a study for the prediction of failure behavior in advanced composite structures with holes are presented here. In the first part of the study, a materials test program based on coupon and fracture tests is conducted to obtain related mechanical properties. A finite element model is then constructed for simulating the behavior of advanced composite laminates with hole under tension. Two finite element models using continuum shell elements, one with and the other without the delamination failure were developed. In order to have a realistic simulation, the progressive failure analysis is applied. For an optimum model, test results and simulation results are discussed, thoroughly.

ÖZET

Burada delikli ileri kompozit yapılarda hasarın doğru tahmini için yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Çalışmanın ilk bölümünde, kullanılan kompozitlerin ilgili mekanik özelliklerini belirlemek için kupon ve çatlak ilerleme testlerinden oluşan bir malzeme test programı yürütülmüştür. Daha sonra, delikli kompozit yapıları incelemek için bir sonlu elemanlar analizi modeli oluşturulmuştur. Sürekli ortam kabuk elemanları (continuum shell) kullanarak delaminasyonu (tabaka ayrılmasını) hesaba katan ve katmayan sonlu eleman modelleri oluşturuldu. Gerçekçi bir simülasyon elde edebilmek için ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır. En uygun modeli belirlemek amacıyla, test sonuçları ve simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

GİRİŞ

Bu çalışmada öncelikli olarak malzeme veri tabanı oluşturmak için kupon ve çatlak ilerleme testleri yapılmıştır. Testlerden elde edilen çıktılar, delikli kompozit bir numunenin sonlu elemanlar metodu ile simülasyonun yapılmasında kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak delikli kompozit yapılar için tasarım metodolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Kompozit yapılarda genellikle bağlantı amaçlı delikler açılmaktadır. Bu delikler kompozitin sürekli yapısını bozduğu için yapıda beklenmeyen hasar oluşumlarına yol açabilmektedir. Delikli kompozit yapıların hasar tahmini simülasyonu, bu yapılardaki hasar durumunun belirlenebilmesi

için önemlidir. Gerçekçi bir hasar tespit metodolojisi geliştirmek, aynı zamanda daha az test faaliyetiyle güvenilirliği yüksek simülasyonlar yapmak için önemlidir.

Bu çalışmanın deneysel faaliyetleri ODTÜ ve TAI ortak çalışması olan “Kalın Kesitli İleri Kompozit Yapıların Tasarım Metodolojisi” adlı SANTEZ projesi kapsamında ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Katı Cisimler Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır.

Kupon test faaliyetleri ile malzeme veri tabanı oluşturulması, analiz edilen yapının deneysel çalışmaları ve sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyon yapılması bir tasarım sürecinin bütün basamaklarını oluşturmaktadır. Bu çalışma sayesinde hem deneysel faaliyetler anlamında önemli bir bilgi birikimi edinilmiş, hem de delikli kompozit yapılar için bir tasarım metodolojisi geliştirilmiştir.

Kompozit yapıların hasar tahmini çalışmaları, bu yapıların yaygınlaşmasıyla daha çok tartışılan bir konu olmuştur. Dünya genelinde yapılan hasar çalışmasında ele alınan başlıca hasar tahmin yöntemleri Tablo 1.’de sunulmuştur [1]:

Tablo 1:

1	Chamis	6	Puck	11	Zinoviev
2	Eckold	7	Rotem	12	Bogetti
3	Edge	8	Sun (L, NL)	13	Mayes (A, B)
4	Hart-Smith (1,2,3)	9	Tsai (A, B)	14	Cuntze (A, B)
5	McCartney (A,B)	10	Wolfe (A, B)	15	Huang

Bunlardan Puck kriterinin hasar tahmin başarısının yüksek olduğu deneysel çalışmalarda görülmüştür [1]. Puck kriteri, Hashin kriterinin Puck ve Schürmann tarafından geliştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Puck kriteri, Hashin kriterine göre tabakaların basma ve kayma yüklemesi altındaki hasar tahmininde iyileştirmeler içermektedir. Çekme yüklemesi altında Puck ve Hashin kriterleri benzer sonuçlar vermektedirler [1]. Hashin kriteri ise elyaf ve reçine hasarını ayrı olarak ele almaktadır [2].

Bu çalışmada toplamda 2 farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modeller Abaqus® programı yardımıyla sürekli ortam kabuk elemanı kullanılarak oluşturulmuş olup modellerden biri delaminasyonu hesaba katmakta, diğeri ise katmamaktadır. Yapılan analizlerde Abaqus® programında mevcut olan Hashin hasar kriteri kullanılmıştır. Analiz sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılıp uygun sonlu eleman analizi modeli önerilmiş ve deneylerle uyuşmayan noktalar tartışılmıştır.

MALZEME KARAKTERİZASYONU VE DENEYLER

Çalışma kapsamında malzeme veri tabanı oluşturmak ve simülasyon için gerekli kırılma enerji değerlerini hesaplayabilmek için bir malzeme karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Malzeme karakterizasyonu için gereken testler ASTM ve EN standartlarına göre yapılmıştır. Yapılan test faaliyetleri aşağıdaki gibidir:

Elyaf Çekme Testi: Elyaf yönünde elastisite modülü, üst çekme dayanımı ve gerinim pulu yardımıyla Poisson katsayısı elde edilmiştir. Standart ASTM D3039 [3]

Reçine Çekme Testi: Elyafa dik yönde elastisite modülü, üst çekme dayanımı ve gerinim pulu yardımıyla Poisson katsayısı elde edilmiştir. Standart ASTM D3039 [3]

İç Düzlem Kayma Testi: $\pm 45^\circ$ serimli numunenin çekilmesiyle, iç düzlem kayma modülü ve dayanımı elde edilmiştir. Standard ASTM D 3518 [4]

Çekme testlerinde elde edilen malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Çekme testlerinden elde edilen özellikler

	0°	90°
E [GPa]	48.6	10.3
ν (Poisson Katsayısı)	0.29	-
ϵ (Üst Çekme Gerinimi) [$\mu\epsilon$]	36292	5141
σ (Çekme Dayanımı) [MPa]	1764	52.6
G (Kayma Modülü) [GPa]	3.96	
τ (Kayma Dayanımı) [MPa]	90.2	
γ_{eff} (Etkin Üst Kayma Gerinimi) [$\mu\epsilon$]	22800	
γ_{ult} (Üst Kayma Gerinimi) [$\mu\epsilon$]	50000	

Elyaf Yönünde Basma Testi: Elyaf yönünde üst basma dayanımı elde edilmiştir. Standart EN 2850 [5]

Elyafa Dik Yönde Basma Testi: Elyafa dik yönde üst basma dayanımı elde edilmiştir.

Basma testlerinde elde edilen malzeme özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Basma testlerinde elde edilen özellikler

	0°	90°
E [MPa]	2475.60	2642.88
σ (Basma Dayanımı) [MPa]	1046.23	186.67

Mod I Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu Testi (Çift Konsol Kiriş Testi): Reçine çekme kırılma enerjisi elde edilmiştir. Standart ASTM D5528 [6]

Kırılma enerjisi standartta belirtilen 3 farklı yöntemle hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1: Mod I kırılma enerjisi

Mod II Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu Testi: Reçine kayma kırılma enerjisi elde edilmiştir. Bu çalışmada Mod II kırılma enerjisi, G_{II} , 0.47 N/mm olarak hesaplanmıştır.

Delikli Numune Çekme Testi: ASTM D5766 [7] standardına göre yapılan delikli kompozit numunenin üst yük ve uzama değeri elde edilmiştir. Bu amaçla 6 adet delikli numune test edilmiştir. Test sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir.

Şekil 2: Delikli numune çekme testi yük-deplasman grafiği

Test sonucunda $\pm 45^\circ$ ve 90° katmanlarında reçine hasarı, delik çevresinde delaminasyon ve en son noktada 0° katmanlarında elyaf hasarı gözlenmiştir. Şekil 3’te delikli kompozit numunenin çekme testi sonrasındaki görünümü verilmiştir.



Şekil 3: Levhanın kırılma sonrası görünümü

İLERLEMELİ HASAR ANALİZİ

Farklı tabakalardan oluşan kompozit levhalar, ilk tabaka kırıldıktan sonra sağlam tabakalar sayesinde yük taşıma kapasitesine sahip olmaya devam etmektedir. Bu nedenle tabakalı kompozitlerin analizinde ilk tabaka kırılması metodu kullanılması aşırı emniyetli tasarımlara yol açmakta, dolayısıyla kompozit malzeme kullanımının getirdiği düşük ağırlık ve düşük özgül mukavemet gibi avantajlardan yeterince faydalanılamamaktadır. İlerlemeli hasar analizinde ise analiz, tabaka yük taşıyabileceği sürece sürdürülür ve tabakanın maksimum yük taşıma kapasitesi belirlenir. Bu çalışmada incelenen dairesel delikli levhadan örnek verilecek olursa, 90° elyaf takviyeli tabakalar kırıldığında 0°, +45° ve -45° elyaf takviyeli tabakalar hala yük taşıyabilmektedir.

İlerlemeli hasar sonlu eleman analizinde, levhada bulunan her bir elemanın levhaya uygulanan yük ve sınır şartları altında gerilme değerleri belirlenir. Belirlenen gerilme değerlerinin elemanlarda hasar başlangıcına yol açıp açmadığı, hasar başlangıcı kriterine göre kontrol edilir. Hasar görülen elemanların elastik modül, kayma modülü gibi mekanik özellikleri kullanılan hasar ilerleme modeline göre indirgenir ve aynı yük altında mekanik özellikleri indirgenmiş levhanın yeni gerilme dağılımı hesaplanır. Aynı yük altında başka elemanlarda hasar başlangıcı olmaması durumunda ise yük artırılır ve bahsedilen süreç tekrar edilir.

İlerlemeli hasar analizinde hasar, tabaka içi ve tabakalar arası hasar olmak üzere ikiye ayrılarak incelenebilir.

Tabaka İçi Hasar

Tabaka İçi Hasar Başlangıcı Kriteri

Hasar başlangıcı, malzemede bir elemanın mekanik özelliklerinin indirgenmeye başladığı andır. Bu çalışmada Abaqus® sonlu eleman analizi yazılımında mevcut olan 2 boyutlu Hashin kriteri kullanılmıştır. Hashin hasar başlangıç kriteri, yüklerin uygulanmasına göre elyaf çekme, elyaf basma, reçine çekme ve reçine basma olmak üzere 4 alt modu içerir [8]. Hasar indeksi, elemanlarda hasar başlangıcı gerçekleşmiş ise 1, gerçekleşmemişse hasar başlangıcına yakınlığına göre artan ve 1'den küçük bir değerdir. 2 boyutlu Hashin hasar başlangıç kriterinin modları aşağıda verilmiştir:

Elyaf çekme modu hasar indeksi:

Elyaf basma modu () hasar indeksi:

Reçine çekme modu hasar indeksi:

Reçine basma modu hasar indeksi:

: Elyaf doğrultusundaki çekme mukavemeti

: Elyaf doğrultusundaki basma mukavemeti

: Elyafa dik doğrultudaki çekme mukavemeti

- : Elyafa dik doğrultudaki basma mukavemeti
- : Elyaf doğrultusundaki kayma mukavemeti
- : Elyafa dik doğrultudaki kayma mukavemeti
- : Kayma gerilmesinin elyaf çekme modundaki hasara etkisini belirleyen katsayı
- : Gerilme tensörü elemanları, 11: elyaf doğrultusu, 22: elyafa dik doğrultu 12: tabaka içi

Tabaka İçi Hasar İlerlemesi Modeli

Kabuk elemanları ile yapılan analizlerde, Abaqus®’te mevcut olan enerjiye dayalı doğrusal hasar ilerleme modeli kullanılmıştır [8]. Şekil 4’te gösterilen enerjiye dayalı hasar ilerleme modeline göre hasar başlangıcı gerçekleşen bir elemanın bir moddaki gerilim miktarı, dolayısıyla mekanik özellikleri, ilgili modun kırılma enerjisine göre kademeli olarak doğrusal şekilde azaltılır. Belli bir moddaki yükleme altında bir elemanın etkin gerilme – etkin gerinim grafiğinin altında kalan alan o modun kırılma enerjisi kadardır. Etkin gerilme, , her bir hasar modu için ayrı ayrı tanımlanmış olup tabaka gerilmelerine bağlıdır. Bir hasar modunda açığa çıkan enerji (kırılma enerjisi) malzemenin karakteristik özelliğidir ve ancak deneylerle belirlenir. Delikli levhanın çekme analizi ile ilgili olan elyaf çekme kırılma enerjisi, , kompakt çekme, reçine çekme kırılma enerjisi, , ise çift konsol kiriş testi (Double Cantilever Beam – DCB) ile belirlenebilmektedir. Ancak kompakt çekme deneyi yapılmadığı için kırılma enerjileri [9]’da örneklendiği gibi nümerik zorluğa yol açmayacak (Şekil 1’deki doğrunun eğimi çok fazla olmayacak) bir büyüklükte seçilmiştir.

Tabakalar Arası Hasar

Tabakalar Arası Hasar

Tabakalar arası hasar, yapışkan ara eleman yöntemi (*cohesive zone method*) ile modellenmiştir. Tabakalar arası bölgeye ait arayüz modülü, dayanım gibi özellikler [9]’de belirtilen prosedüre uygun olarak belirlenmiştir. Arayüzün kırılma tokluğu ise kırılma tokluğu testi ile elde edilmiştir.

Tabakalar Arası Hasar Başlangıcı Kriteri

Tabakalar arasındaki hasar başlangıcının tespiti için *karesel gerilme kriteri* (*quadratic stress criterion*) kullanılmıştır. Bu kriter gere göre hasar başlangıcı, tabakalar arası gerilmelerin 2. derecelerinin bir kombinasyonunun, tabakalar arası dayanım değerlerinin 2. dereceleri tarafından belirlenen bir dayanım limitini aşmasıyla gerçekleşir.

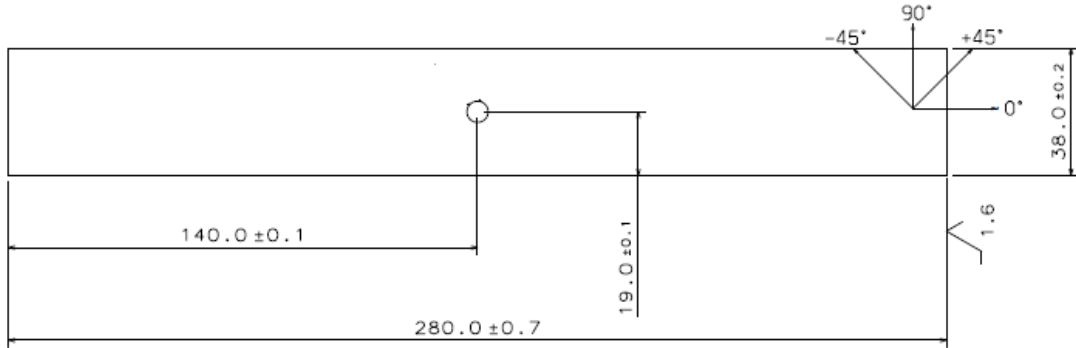
Tabakalar Arası Hasar İlerlemesi Kriteri

Tabakalar arası hasar ilerlemesinde tıpkı tabaka içi hasar ilerlemesi modelinde olduğu gibi doğrusal hasar ilerlemesi modeli kullanılmıştır. Bu modele göre tabakalar arası bölgeye ait esneklik katsayıları, artan tabakalar arası deplasmanla birlikte doğrusal olarak azalmaktadır.

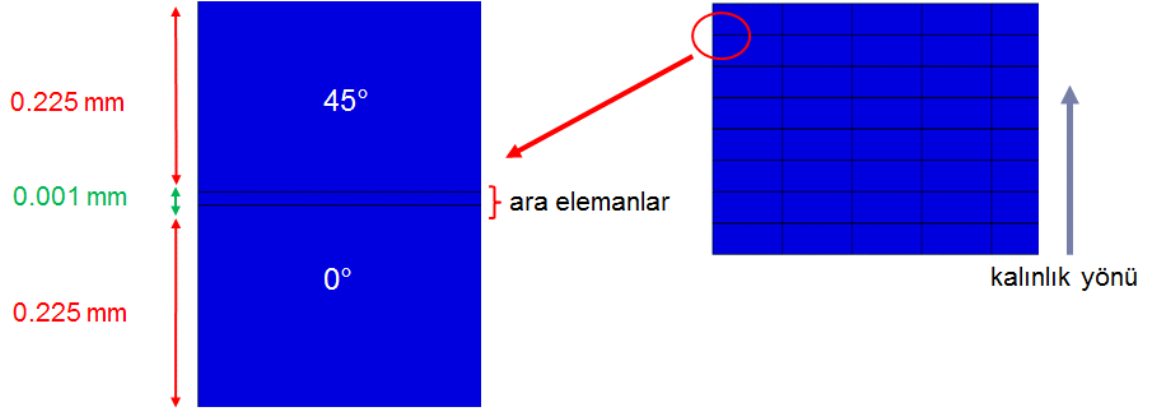
Sonlu Eleman Modeli

Bu çalışmada, üstten görünüşü Şekil 5'te sunulan $[45/0/-45/90]_{2S}$ dizilimine sahip, 16 tabakalı, toplam kalınlığı 3,6 mm olan, S2/MTM49L tek yönlü cam elyaf/reçine prepregden yapılmış kompozit numune kullanılmıştır.

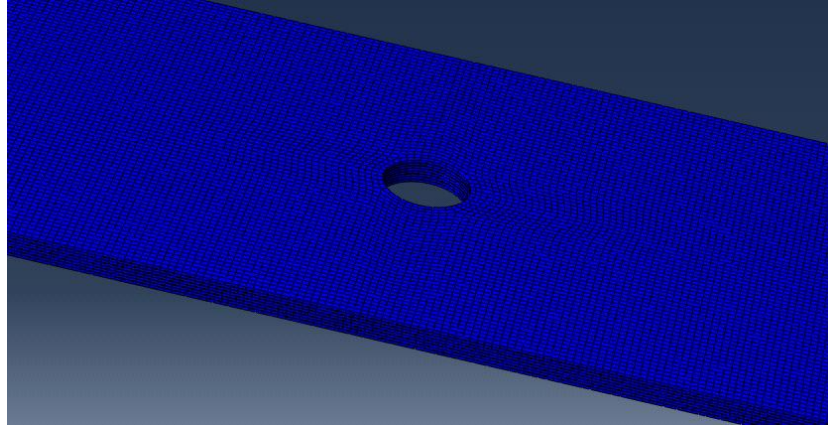
Delikli levhanın sonlu eleman modelleri Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Levha, Abaqus® Explicit ile çift duyarlıklı çözücü (*double precision solver*) kullanılarak modellenmiştir. Çift duyarlıklı çözücü kullanımı, eksplisit modelin çözümünde ihtiyaç duyulan zaman artış aralığı sayısının fazlalığından dolayı kullanılmıştır, tek duyarlıklı çözücüde elemanların düşük deplasman mertebelerinde aşırı deformasyonu görülmüştür. Yarı-statik yüklemeyi eksplisit çözücüde doğru simüle etmek için analiz boyunca kinetik enerjinin iç enerjiden oldukça düşük olmasını sağlayacak şekilde yükleme hızı düşük seçilmiştir. Analiz süresince yapıda oluşan iç enerji ve kinetik enerji değişimi Şekil 8'de görülmektedir. Modelde sadece 0,4 mm eleman boyu kullanılmıştır. Her yerde sık ağ kullanılması aşırı eleman deformasyonu sorununu ortadan kaldırmıştır. Delaminasyonlu ve delaminasyonsuz iki modelde de tabaka içi bölgede kalınlık doğrultusunda tabaka başına 1 eleman kullanılmıştır. Tabaka içinde kullanılan eleman 8 düğümlü sürekli ortam kabuk elemanıdır (SC8R). Delaminasyonlu modelde tabakalar arasına tabakalı yapının elastik modülünü etkilemeyecek kalınlıkta (0,001 mm) 8 düğümlü yapışkan ara elemanlar (COH3D8) eklenmiştir. Levhanın iki ucunda bulunan 80 mm uzunluğundaki tutma bölgeleri analize dahil edilmemiş, deplasman doğrudan levhanın kesitine uygulanmıştır. Analizde gerekli olan elastisite modülü, kayma modülü, çekme, basma ve kayma mukavemeti ve kırılma toklukları değerleri için malzeme test programında elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.



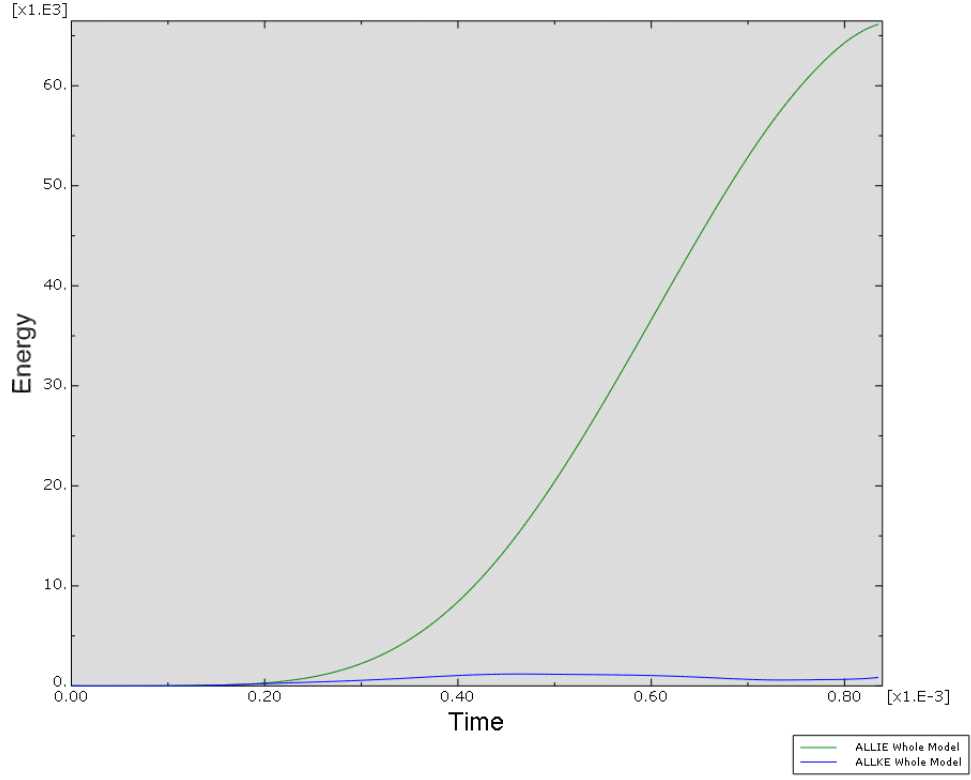
Şekil 5: Delikli levhanın üstten görünümü



Şekil 6: Kalınlık yönünde delaminasyonlu model detayı

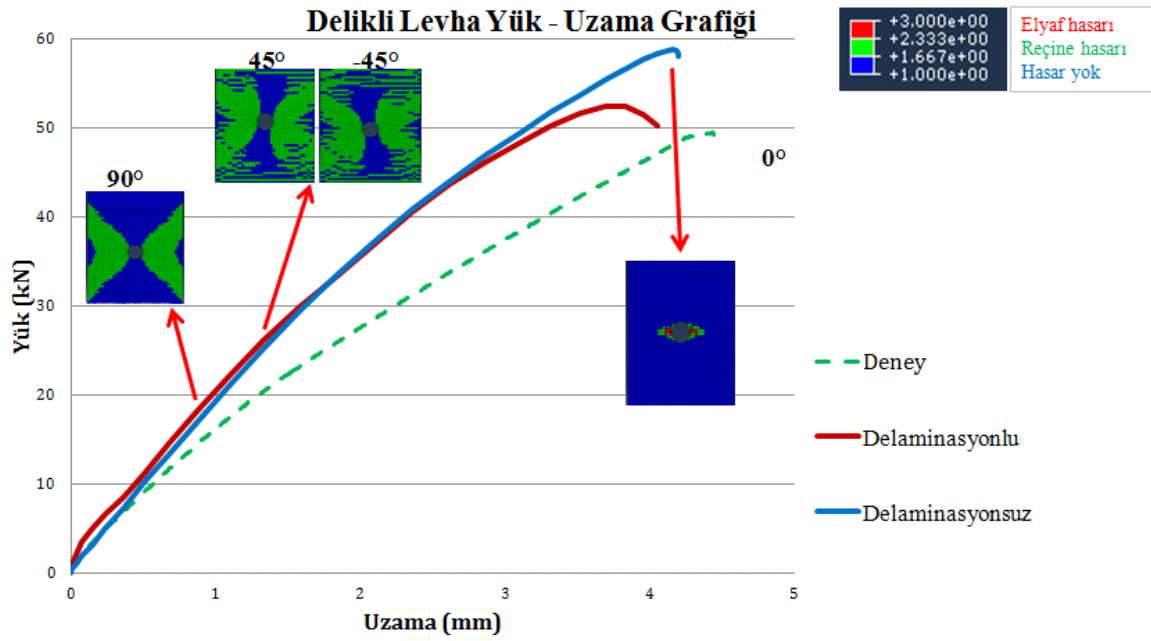


Şekil 7: Sonlu eleman modeli ve eleman büyüklükleri



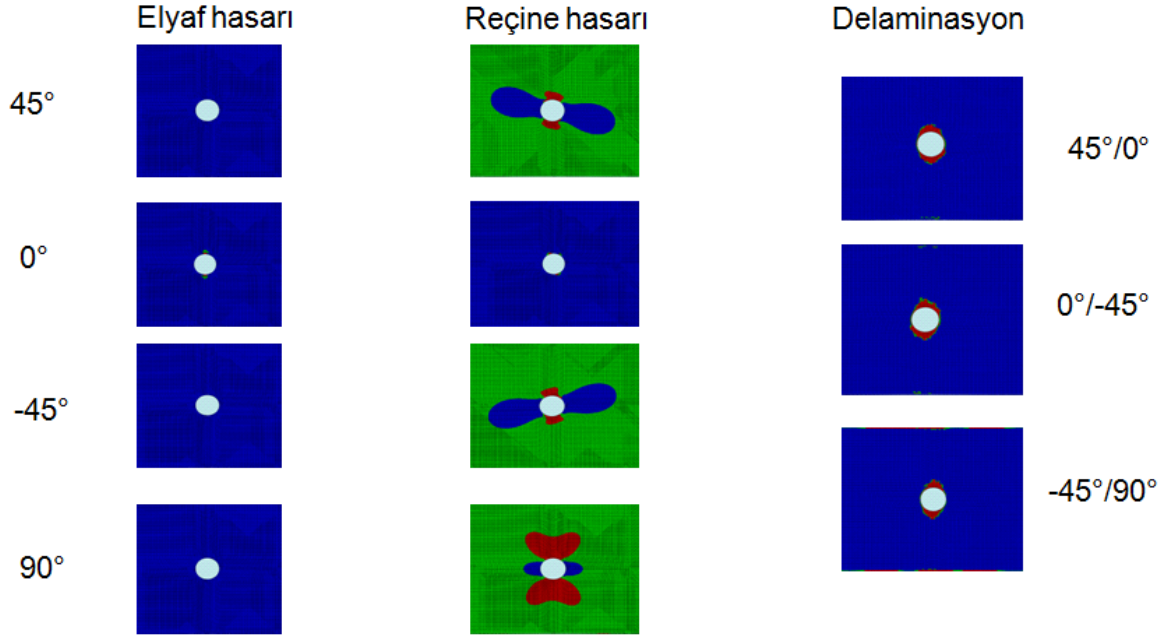
Şekil 8: Modelde iç enerji ve kinetik enerji değişimi

SAYISAL SONUÇLAR

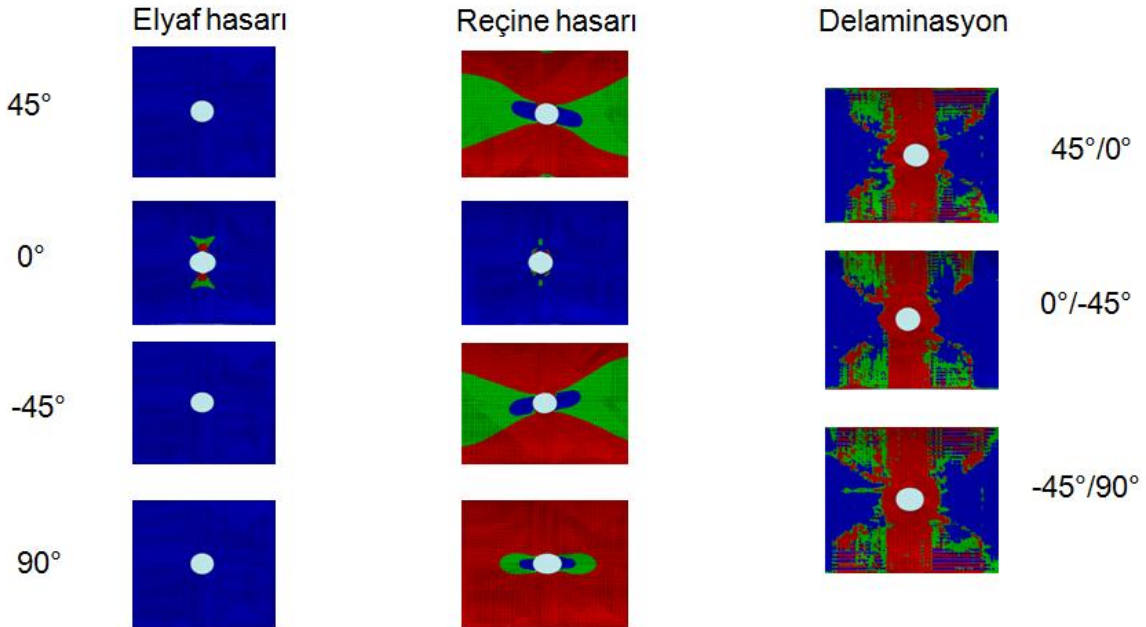


Şekil 9: Deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 9’da deneysel yük-deplasman grafiğini temsilen numunelerden sadece birine ait yük-deplasman grafiği kullanılmıştır. Diğer numuneler de grafiği verilen bu numune ile benzer sonucu vermiştir. Şekil 10 ve 11’de kullanılan renk kodunda ilgili hasar biçimine göre (reçine veya elyaf hasarı) mavi renk hasarsız veya az hasarlı bölgeyi, kırmızı renk tam hasarlı bölgeyi, yeşil renk ise orta derecede hasarlı bölgeyi temsil etmektedir.



Şekil 10: Delaminasyonlu modelde %85 nihai yükte hasar durumu



Şekil 11: Delaminasyonlu modelde nihai yükte hasar durumu

Şekil 9’da görüldüğü üzere deney ve simülasyon sonucunda benzer yük-deplasman grafiği elde edilmiştir. Delaminasyonsuz modelde nihai yük, deneysel nihai yükten %20 daha fazla olmasına rağmen delaminasyonun hesaba katılması ile simülasyondan elde edilen nihai yük, deneysel nihai yükün %6 fazlasına kadar yaklaşmıştır. Nihai yükteki bu düşüşe, delaminasyon kaynaklı enerji kaybı neden olmuştur. Analiz sonucuna göre delaminasyon bütün tabakalar arasında, deliğin etrafında gerçekleşmiştir. Şekil 11’de takviye açısı 0°’den farklı olan tabakalarda, sadece reçine hasarının gerçekleştiği ve elyaf hasarının da sadece 0° takviye açılı tabakalarda gerçekleştiği görülmüştür. Bu hasar biçimi deney sonunda elde edilen hasar biçimi ile örtüşmektedir. Deney sonucunda üstteki 45° açılı tabakanın sadece elyaf çekme modunda hasara uğradığı ve delik etrafındaki delaminasyon olduğu gözlemlenmektedir. Laminat seviyesinde yapılan testlerin sonlu eleman analizinin sonuçlarıyla uyumluluğu, geliştirilen tasarım metodolojisi ile delikli kompozit laminatlarda hasar karakterizasyonunun başarıyla yapıldığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] P.D. Soden, A.S. Kaddour, M.J. Hinton, *Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites*, 2004: s. 1223-1249.
- [2] C. Lee, J. Kim, S. Kim, D. Ryu, J. Lee, Initial and progressive failure analyses for composite laminates using Puck failure criterion and damage-coupled finite element method, *Composite Structures*. 121 (2015) 406-419. doi:10.1016/j.compstruct.2014.11.011
- [3] ASTM Standards, D3039 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
- [4] ASTM Standards, D3519 Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate
- [5] EN Standards, EN 2850 Aerospace series carbon fibre thermosetting resin unidirectional laminates compression test parallel to fibre direction.
- [6] ASTM Standards, D5528 Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites.
- [7] ASTM Standards, D5766 Open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates.
- [8] *Damage and Failure for Fiber-Reinforced Composites: Abaqus/CAE V6.14 Analysis User's Guide*
- [9] K. Song, C. G. Davila, *Guidelines and Parameter Selection for the Simulation of Progressive Delamination*. 2008 Abaqus Users' Conference