



## Kompozit Yamalar ile Tamir Edilmiş Çatlaklı Sandviç Kirişlerin Eğilme Darbe Davranışları

### Flexural impact Response of Cracked Sandwich Beams Repaired by Composite Patches

Umut Çalışkan<sup>1\*</sup>, Recep Ekici<sup>1</sup>, M. Kemal Apalak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 38039 Kayseri, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 25/12/2020

Kabul / Accepted: 22/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 22/03/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

#### Öz

Bu çalışma, deneysel ve sayısal olarak kompozit yamalar ile tamir edilen çatlaklı sandviç kirişlerin eğilme darbe davranışını araştırmaktadır. Sandviç kiriş elemanları yüzey tabakaları, cam elyaf takviyeli kompozit, köpük çekirdek, PVC malzeme ve yapıştırıcı tabakalardır. Üst yüzey tabakasına çatlak oluşturularak hasar verilmiştir ve kompozit yama yapıştırılarak tamir edilmiştir. Düşük hızlı darbe davranışı, farklı yama malzemeleri, kalınlıkları ve darbe enerjileri açısından incelenmiştir. Sayısal darbe analizleri, kompozit sandviç kirişin hasar davranışını modellemek ve deneysel darbe testi sonuçlarını karşılaştırmak için yapılmıştır. PYTHON program dili ile parametrik modelleneme yapılmıştır. Sonlu elemanlar alt programı ABAQUS-VUMAT kullanılarak 3B Hashin hasar modelleri kompozit yama ve yüzey tabakalarına uygulanmıştır. Son olarak, hasarlı kirişin eğilme rijitliği yama uygulaması ile artırılmıştır. Sandviç kirişlerin hasar toleransları, temas kuvveti değişimleri, kinetik enerji varyasyonları ve darbe sonrası hasar modları dikkate alınarak farklı yama parametreleri için belirlenmiştir.

#### Anahtar Kelimeler

*“Kompozit sandviç kiriş, eğilme darbesi, 3B hasar analizi, yama uygulaması”*

#### Abstract

This study focused on the flexural impact response of cracked sandwich beams repaired by composite patches experimentally and numerically. The sandwich beam members are face-sheets, glass-fiber reinforced plastic (GFRP) composite material, foam core, PVC material, and adhesive layer. The cracked was created on the surface of the top face-sheet to damage it and it was repaired by bonding external composite patch. Low-velocity impact response was investigated in terms of different patch materials, thicknesses, and impact energies. The impact analysis was performed to model the damage behavior of the composite sandwich beam and to compare experimental impact test results. 3D Hashin damage models were used to obtain damage characteristic of composite laminates with patch application using the explicit finite element subroutine ABAQUS-VUMAT with scripting language via PYTHON programme language. Finally, the bending stiffness of the cracked beam was increased using the patch application. Damage tolerances of sandwich beams were determined for different patch parameters considering contact force variations, kinetic energy variations and after-impact damage modes.

#### Key Words

*“Composite sandwich beam, flexural impact, 3D damage analysis, patch application”*

## 1. Giriş

Kompozit malzemeler sağladıkları pek çok avantaj sayesinde havacılık endüstrisinde, deniz araçlarında, otomotiv sektöründe, yenilenebilir enerji, savunma sanayi ve bunun gibi birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte kompozitlerin onarım yöntemleri de sektöre bağlı olarak gelişme göstermiştir. Özellikle havacılık sektöründe kullanılan sandviç panellerin kompozit malzemeler ile tamir edilmesi, uygulanabilirlik ve kazandırdığı dayanım açısından son derece başarılı olmuştur. Kompozit malzemelerde onarım isteği iki farklı nedenden dolayı ortaya çıkar. Bunlardan en temeli, kullanımdan kaynaklı oluşan deformasyonlar ve darbeye bağlı uğramış olduğu hasarlardan dolayıdır. Bir diğeri ise de çok sık görülmese de malzemenin üretiminde ve tasarımı yetersizliğinden dolayı yapılan onarımlardır. Böyle durumlarda deforme olmuş bölgeden kaynaklı kullanıma elverişsiz olma durumu yalnızca hasarlı bölge tamir edilerek giderilir ve malzeme orijinaline yakın bir mukavemet değerine ulaşmış olur. Onarım işlemleri sayesinde; yeniden üretim, zaman ve maddi yönlerden çok büyük anlamda kazanımlar ve kolaylıklar sağlamaktadır.

Kompozit yamalarla tamir tekniği bir çok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Balaganesan ve Khan (Balaganesan vd., 2016) yakın zamanlarda darbe yüklerine maruz kalan tamir edilmiş kompozit levhaların enerji sönümlemesini araştırmışlardır. 'n' adet katmanla üretilmiş kompozit plaka için 'n+1' adet tabakadan oluşan kompozit yama kullanmışlardır. Kompozit yama ile tamir edilmiş kompozit plakalar merkezinden ve farklı bölgelerinden balistik testine maruz tutulmuştur. Numunelerin enerji sönümlemesi ve darbe hasarı için analizler yapılmıştır. Numerik analizlerle tamir edilen kompozit plakaların enerji sönümleme etme kapasitesi ortaya konulmuştur. Deneysel ve nümerik sonuçlar oldukça uyumludur. Literatürde kompozit yamalar kullanılarak birçok malzemenin ve özellikle kompozit malzemelerin tamir edilmesi ve bunların performanslarını ortaya koyan çalışmalar mevcuttur. Mall ve Conley (Mall & Conley, 2009) kompozit yamalar kullanılarak tamir edilen hasara uğramış ince ve kalın metalik panellerin modellenmesini ve doğrulamasını araştırmışlardır. İki boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak sunulan çalışmada kompozit yamalar kullanılarak tamir edilen metal panellerin hasar gelişimi tahmini yapılmıştır. Önceden hasara uğrayan alüminyum numunelerin yorulma testleri iki farklı kalınlıktaki (1 ve 6.35 mm) alüminyum numuneler için yapılmıştır. Tahmin edilen yorulma hasar gelişim oranları deneysel ve sayısal değerlerle uyumlu çıkmıştır. Shams ve El-Hajjar (Shams & El-Hajjar, 2013) karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitlerde hasarı yamalarla kapatarak tamir edilmesini sayısal ve deneysel olarak çalışmışlardır. Çizik şeklinde bulunan hasar, sonlu elemanlar programına tabaka tabak modellenerek aktarılmıştır ve yamalar katmanların gerilme durumu göz önüne alınarak yerleştirilmiş ve analizler yapılmıştır. Sonuçlar gösterdi ki yüzeye paralel yöndeki katman içi hasar gelişimi tamir parametrelerinin dikkatli seçimi ile yavaşlamıştır. Albedah vd. (Albedah vd., 2016) kompozit yamalar ile tamir edilen çatlak içeren alüminyum plakaların yorulma ömründe yük değişiminin etkisini araştırmışlardır. V şeklinde çentik açılan alüminyum 2024T3 ve 7075T6 alaşımlı numunelerin yorulma davranışları kompozit yamalar ile tamir edilerek deneysel olarak çalışılmıştır. Çentik açıldıktan sonra kompozit yama bir yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki yorulma yük değeri arttıkça kompozit yama ile tamir edildikten sonra numunelerde hasar ilerlemesi her iki alüminyum alaşımı içinde yavaşlamıştır.

Cheng vd. (Cheng vd., 2014) kompozit yamalar ile tamir edilen malzemelerin çekme davranışlarına deneysel olarak karar vermişlerdir. Çentikli kompozit plakaların yamalar ile tamir edilmesi sonucu çekme testi altında yük taşıma kapasitesini ve hasar proseslerini araştırmışlardır. Sonuçlar ortaya koymuştur ki tamir edilen malzemelerin hasar gelişimi yalnızca yamanın setliğine rijitliğine bağlı değildir aynı zaman da katman sırasına da bağlıdır. Tamir edilen malzemelerin hasar tipleri görsel muayene ve ses emilimi ile ortaya konulmuştur. Constantin vd. (Constantin vd., 2013) kompozit yamaların yapıştırılması ile tamir edilen alüminyum panellerin mekanik performanslarını araştırmışlardır. Numerik analizler deneysel sonuçlar kullanılarak kıyaslanmış ve tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir. Sayısal çalışma doğrulandıktan sonra çeşitli yama konfigürasyonları ile çalışmalar sürdürülmüştür. Yamanın yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcı tabakası modellenmiş ve gerilme dağılımlar dikkate alınarak yama konfigürasyonları çalışılmıştır. Errouane vd. (Errouane vd., 2014) çekme altındaki çatlak barındıran alüminyum plakaların kompozit yamalar ile tamirinin dizayn optimizasyonu için nümerik olarak çalışma yapmışlardır. Çalışma sonlu elemanlar metodu kullanılarak çatlak bölgesindeki gerilme yoğunluğu faktörünün tespiti açısından güzel sonuçlar vermiştir. Model doğrulandıktan sonra çeşitli yama konfigürasyonlarının ağırlık, genişlik ve kalınlık gibi analizler yapılmıştır. Bu yama konfigürasyonları da farklı çatlak boyutları altında gerçekleştirilmiştir ve çekme altında çatlak ilerlemesinde yama kullanımı oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Benyahia vd. (Benyahia vd., 2015) alüminyum 7075 T6 alaşımlı malzemelerde kompozit yamaların yapıştırılması ile tamir edilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kompozit yamalar yaşlandırma işlemine maruz bırakılarak hem yaşlandırılmış hem de yaşlandırılmamış numuneler için sayısal ve deneysel testler yapılmıştır. Deneysel çalışma göstermiştir ki kompozit yama ile tamir edilen malzemelerin yorulma ömrü uzamıştır. Yaşlandırılmış yamalar ile tamir edilen malzemelerin dayanımının azaldığı görülmektedir. Kompozit yamalar çatlak bölgesindeki gerilme yoğunluğu faktörünü azaltmıştır ve yapıştırıcı bölgesindeki gerilme büyüklükleri de azalmıştır. Sabelkin vd. (Sabelkin vd., 2007) kompozit yamaların yapıştırılması ile tamir edilen çatlak içeren alüminyum plakaları araştırmışlardır. Çatlak bulunan Alüminyum 7075-T6 panellerin mekanik ve yorulma gibi davranışları kompozit yamalar yapıştırılarak deneysel ve analitik olarak araştırmışlardır. Çatlak etrafında şekil değiştirme dağılımı, düzlem dışı deformasyon ve artık gerilme dağılımı ortaya konulmuştur. Çalışmanın sonucunda yamaların yapıştırılması ile tamir edilen yapıların yorulma ömrü açısından kalıcı dayanımı artış göstermiştir. Khalili vd. (Khalili vd., 2009) kompozit yamalar kullanılarak tamir edilen çatlak içeren alüminyum plakaların çentik darbe testi davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında karbon ve cam fiber takviyeli iki farklı yama malzemesi ve iki farklı katman sayısı 3 ve 5 olarak kullanmışlardır. Çatlak içeren alüminyum plakalarda ise 3 farklı çatlak boyu kullanmışlardır. Enerji sönümleme özellikleri araştırılan farklı konfigürasyonlar karşılaştırıldığında, 5 tabakalı karbon fiber içeren yama daha iyi sonuçlar vermiştir. Kwon ve Hall (Kwon & Hall, 2015) kompozit yamalarla tamir edilen çatlak içeren ince sertleştirilmiş plakaların analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Tek taraflı kompozit yama kullanarak tip I şekil değiştirme enerjisi oranı önceden tahmin etmek analitik model geliştirmişlerdir. Bunun yanında

sonlu elemanlar metodunu kullanarak da tip I şekil değiştirme enerjisi oranını tahmin etmişlerdir ve analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır, tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir.

Yukarıda anlatılan açık literatür özetinde, araştırmanın önemi açıkça belirtilmektedir. Kompozit malzemeler hayatımızda bu kadar önemli iken tamirleri de bir o kadar önem arz etmektedir. Literatürde kompozit yamalar kullanılarak tamir edilme prosesi açıkça görülmektedir ve bu şekilde bir uygulama oldukça yaygındır. Tamir edilen malzemelerin tamir sonrası darbe davranışı performanslarının ortaya konulması ile kompozit malzemelerin hasar tipleri irdelenmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmada 3 boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sandviç yapının sayısal modeli ilerleyen bölümlerde detaylıca anlatılmıştır. Çalışma sonucunda ise deneysel ve sayısal sonuçlar uyumlu olmuş, hasarlı kırımlerin darbe enerjisini sönümlemedeki kabiliyeti açıkça görülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneysel Yöntem

Kompozit yamalar yapıştırılarak tamir edilen çatlaklı kompozit sandviç kırımlerin düşük hızlı darbe testleri, oda koşullarında Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sandviç kırımlerin üst plakası ortadan kırılarak hasar oluşturulmuştur. Onarılmış kompozit yüzey plakaların düşük hızlı darbe performansı, farklı yama fiber malzemeleri (cam elyaf ve karbon elyaf) ve 1 ve 2 mm yama kalınlığı için 10, 20 ve 40 J'luk üç farklı darbe enerjisi altında araştırılmıştır. Test numuneleri darbe cihazına monte etmek için aparatlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Darbe testleri 10, 20 ve 40 J darbe enerjileri için en az iki kez tekrarlanmıştır. Hasarlı yüzey plakaları için cam elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Yama malzemeleri ise endüstride yaygın olarak kullanılan karbon ve cam elyaf kumaş olarak seçilmiştir. Kompozit yamalar, % 64 (karbon fiber) ve % 54 (cam) hacim fraksiyonu ile bir ortak matris, epoksi ve yaklaşık 1 mm (4 katman) ve 2 mm (8 katman) ile güçlendirilmiş vakum destekli reçine infüzyon işlemi ile üretilmiştir. Sandviç kırımlin çekirdek malzemesi 10 mm kalınlığında AIREX C70 serisi PVC köpük seçilmiştir. Deneysel testler için 10 mm çapında, 5.302 kg kütleli ve silindirik uç geometrisine sahip bir vurucu kullanılmıştır.

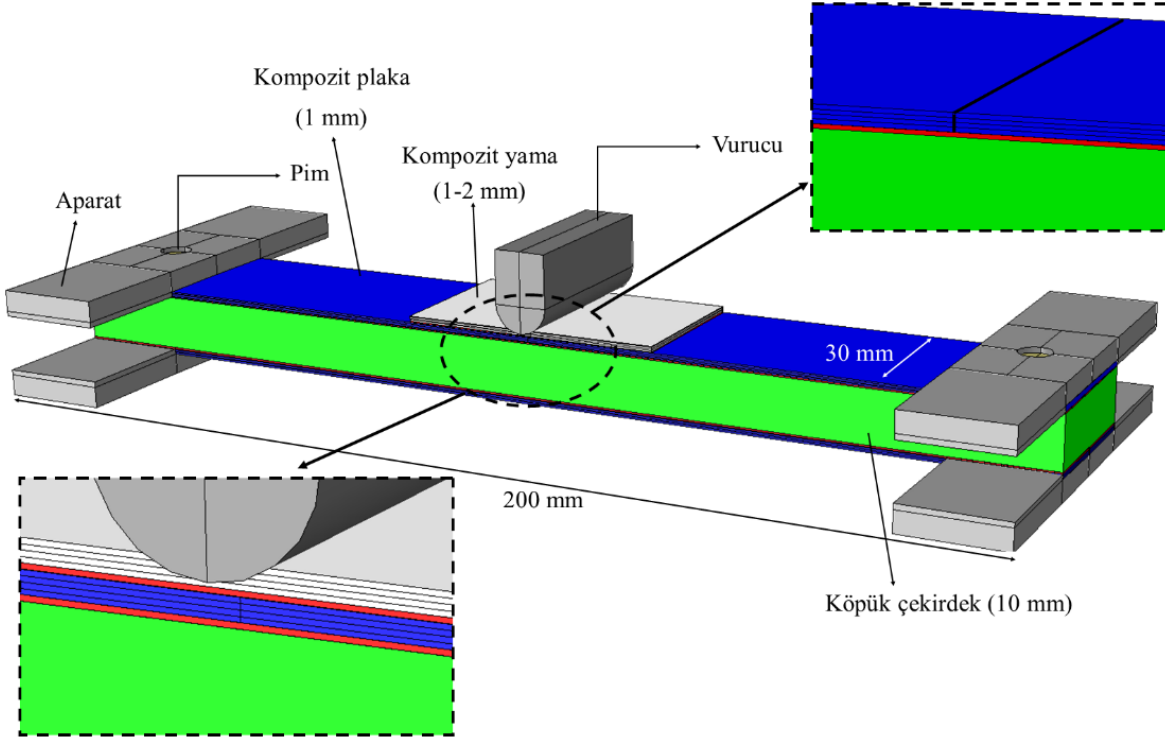
Bu çalışmada, cam ve karbon fiber yamalar, darbe enerjisi sönümleme kapasitesi ve hasar toleransı açısından araştırmak için kullanılmıştır. Yama malzemesi etkisine ek olarak yama kalınlığı etkisi de incelenmiştir. Hasarlı sandviç kırıml malzemeleri ve numune ile yama malzemesi, literatürde önemli bir yere sahip olan ve ticari ismi ARALDITE 2015 olan bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi uygulanmadan önce plakaların yapışma kalitesini olumsuz etkileyen kirleri çıkarmak için etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) kullanılmıştır. Mümkün olduğunca fazla hava kabarcığı olmaksızın eşit bir yapışkan kalınlığı elde etmek için yamalar ve hasarlı kırıml arasındaki yapışkan tabakaya eşit bir basınç uygulanmıştır. Bu amaçla, daha iyi bir yapıştırma kalitesi sağlamak için bir yapıştırma aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Kalınlık belirlemek için pimler kullanılarak yapıştırıcı kalınlığının 0,25 mm olması sağlanmıştır.

### 2.2. Sayısal Yöntem

Kompozit yamalar ile tamir edilen hasarlı kompozit sandviç kırımlerin darbe yükleri altındaki dinamik davranışı ABAQUS / Explicit® kullanılarak araştırılmıştır (Abaqus). Tamir edilmiş sandviçlerin darbe enerjisi sönümleme kabiliyetini geliştirmek için tasarım parametrelerinin etkileri de araştırılmıştır. Kompozit yama ile tamir edilmiş hasarlı sandviç kırımlin sonlu eleman modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Vurucu, geometrik bir süreksizliğe sebebiyet vermemesi ve düzgün bir eğilme durumu oluşturması için silindirik uçlu seçilmiştir. Rijit malzeme davranışı ve 3 boyutlu rijit elemanlar (R3D4) ile modellenmiştir. Vurucu ve numune arasında Mekanik temas algoritması olarak GENEL TEMAS ALGORİTMASI kullanılmıştır. Kompozit yüzey plakaları, 3B katı elemanlar (C3D8R), ortotropik elastik malzeme modeli ve kullanıcı tanımlı hasar modeli kullanılarak modellenmiştir. Kohezif bölge modeli 0.25 mm kalınlığındaki yapıştırıcı tabakaya uygulanmıştır. Kohezif bölge modelinde kullanılan Araldite 2015 yapıştırıcı malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1'te verilmiştir. Analizler, farklı darbe enerjileri altında farklı fiber yama malzemesi ve kalınlıkları için tekrarlanmıştır.

**Tablo 1.** ARALDITE 2015'in kohezif parametreleri ve mekanik özellikleri (Carneiro & Campilho, 2017)

Malzeme	Araldite 2015
Elastiklik Modülü (GPa),E	1.85
Kayma Modülü (GPa),G	0.56
Ayrılma Gerilmesi (Normal,MPa), $t_n^0$	21.63
Ayrılma Gerilmesi (Kayma,MPa), $t_s^0$	17.9
Ayrılma Tokluğu (Normal,N/mm), $G_n^c$	0.43
Ayrılma Tokluğu (Normal,N/mm), $G_s^c$	4.70

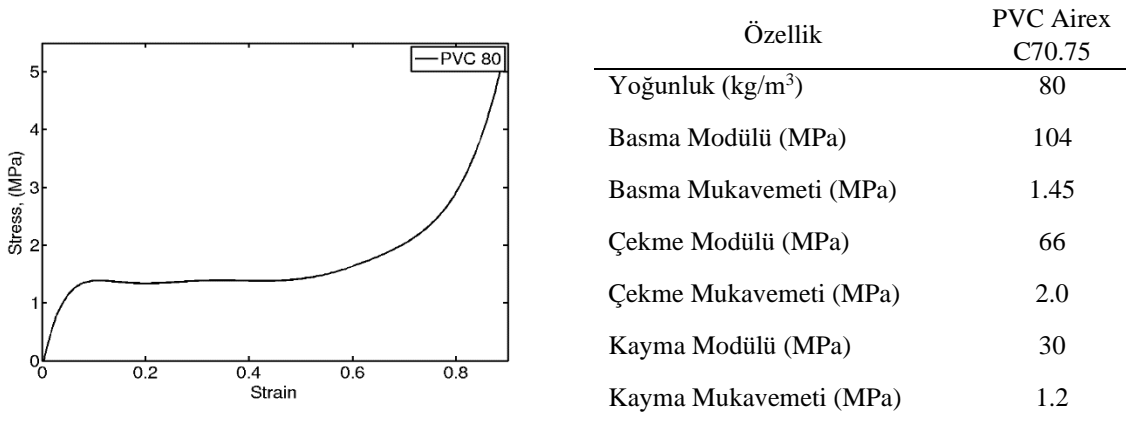


Şekil 1. Sayısal model ve ölçüleri

Günümüzde polimerik köpük malzemeleri oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Köpük malzemelerinin en belirgin karakteristik özellikleri; elastikiyet, hafiflik, rijitlik, yüksek gözeneklilik, yüksek çarpışma ve iyi enerji sönmleme yeteneğidir. Malzemelerin mekanik özellikleri köpük yapısına, köpük yoğunluğu ve geometrik özelliklerine göre değişir. Bu çalışmada kapalı hücreli PVC köpük malzemesi ABAQUS'ta modellemek için, 'Crushable Foam' modeli plastik davranış kullanılmıştır. Bir kapalı hücreli köpük malzemesinin akma yüzeyi şu şekilde tariflenmiştir (Zhou, 2012).

$$\varphi = \frac{1}{[1+(\frac{\alpha}{3})^2]} [q^2 + \alpha^2 \sigma_m^2] - \sigma_y^2 \leq 0 \quad (1)$$

Çalışmada kullanılan köpük malzemesinin basma testi sonucu elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisi ve mekanik özellikleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PVC C70.75 Köpük malzemesinin gerilme şekil değiştirme eğrisi ve mekanik özellikleri

#### Hasar Kriterleri ve Sayısal Modele Uyarlanması:

Kompozit tabakaların üç boyutlu hasar davranışı, kullanıcı tanımlı malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu model, çekme ve basma yükleri altındaki fiber ve matris hasarını içermektedir. VUMAT kullanıcı tanımlı malzeme modeli, hasarın başlamasını ve ilerlemesini öngören ortotropik bir malzeme modeli olarak kullanılmıştır. Kriterler aşağıda formüle edilmiştir (Hashin, 1980).

Fiber çekme hasarı:

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

Fiber basma hasarı:

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 \quad (3)$$

Matris çekme hasarı:

$$\left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_T^c}\right)^2 + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3)}{S_{23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 - \tau_{13}^2)}{S_{12}^2} \geq 1 \quad (4)$$

Matris basma hasarı:

$$\frac{\sigma_2}{Y_C} \left[ \left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

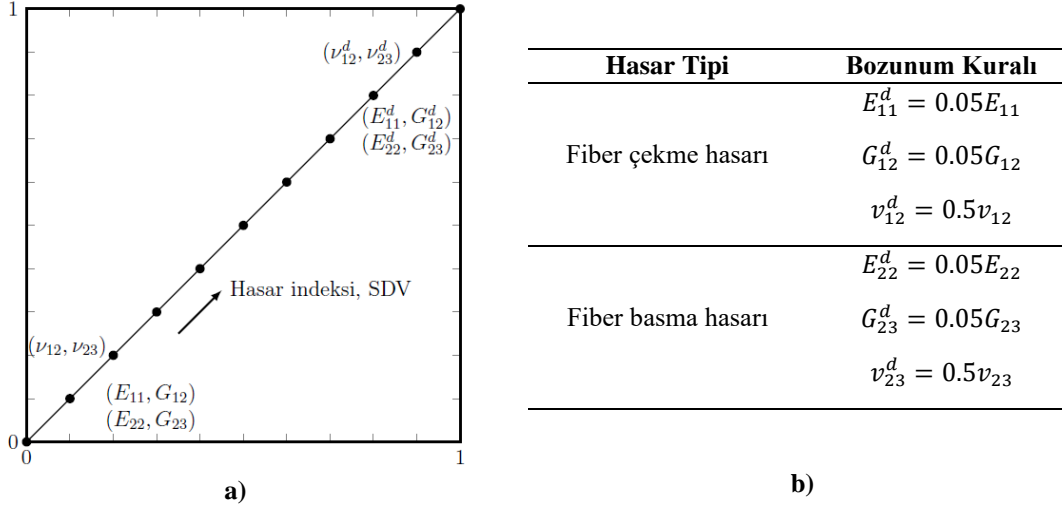
1, 2 ve 3 yönleri sırasıyla fiber, düşey ve kalınlık boyunca yönü tarif etmektedir.  $X_T$  fiber yönünde en büyük normal gerilme,  $X_C$  fiber boyunca basma mukavemetini,  $S_{12}$  katmanların kayma gerilmesi değeri olup deneysel olarak tespit edilen sabit değerlerdir.  $\sigma_1$ ,  $\tau_{12}$  ve  $\tau_{13}$  analizler sırasında çözüm adımlarından elde edilen gerilmeler olup sırasıyla fiber yönündeki normal gerilme değerini, 1-2 ve 1-3 düzlemlerindeki kayma gerilmelerini temsil etmektedir. Bu hasar kriterinin uygulanabilmesi için  $\sigma_1 > 0$  olması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve hasar parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Kompozit yamalar ile tamir edilmiş sandviç kirişlerin darbe analizlerinde kompozit plakalarda, fiber için basma ve çekme altındaki, matris için basma ve çekme altındaki hasar kriterleri kullanılmıştır. Hasar kriterleri ABAQUS yazılımına uygun kullanıcı tanımlı malzeme modeli FORTRAN dilinde, VUMAT alt kodu yazılarak uygulanmıştır. ABAQUS ilk yük iterasyonunu yapar, iterasyon sonunda hasar kriterlerinde kullanılacak parametreleri hesaplar. Malzemeye ait deneysel sabitler FORTRAN alt programında kullanılmıştır. Hasar kriterleri her bir yük iterasyonu sonunda ABAQUS tarafından her bir integrasyon noktasında hesaplanır ve yorumlanır. Hasar kriterine göre her bir integrasyon noktasında gerekli parametreler kullanılarak hesaplamalar yapılır. ABAQUS tarafında SDV olarak tariflenen hasar kriterleri [0 – 1] arasında indeks değişkenine göre hesaplanır. SDV’nin 1 olması demek artık o integrasyon noktası ile ilgili hasar kriterinde hasara uğradığı (fail) anlamına gelir. SDV’lere yazılan indekslere göre bir bozunum kuralı oluşturulmuş ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerine aktarılmıştır.

**Tablo 2.** Kompozit malzemelerin (Cam fiber/epoksi ve Karbon fiber/epoksi) mekanik özellikleri (Singh, 2015)

Özellik	Cam fiber/epoksi	Karbon fiber/epoksi
Boyuna elastisite modülü, $E_{11}$	40 (GPa)	150.9 (GPa)
Enine elastisite modülü, $E_{22} = E_{33}$	10 (GPa)	11.2 (GPa)
Düzlem içi kayma modülü, $G_{12} = G_{13}$	3.15 (GPa)	5.3 (GPa)
Düzlem dışı kayma modülü, $G_{23}$	4.32 (GPa)	1.4 (GPa)
Hacim oranı, $V_f$	0.54	0.54
Poisson oranı, $\mu_{12} = \mu_{13}$	0.3	0.29
Poisson oranı, $\mu_{23}$	0.21	0.33
Yoğunluk	1780 (kg/m <sup>3</sup> )	1710 (kg/m <sup>3</sup> )
Boyuna çekme mukavemeti, $X_T$	988 (MPa)	1858.3 (MPa)
Enine çekme mukavemeti, $Y_T = Z_T$	44 (MPa)	25.4 (MPa)
Boyuna basma mukavemeti, $X_C$	1432 (MPa)	576.8 (MPa)
Enine basma mukavemeti, $Y_C = Z_C$	285 (MPa)	107.3 (MPa)
Düzlem içi kayma mukavemeti $S_{12} = S_{13}$	60.6 (MPa)	79.5 (MPa)
Interlaminar kayma mukavemeti, $S_{23}$	22 (MPa)	22.9 (MPa)

Kompozit malzemede ki yük taşıma kapasitenin oluşan hasarlar sonucu azalması, oluşturulan bir bozunum (degradation) kuralı ile sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır. Bozunum kuralları, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin seçilen kriterlere göre lineer veya lineer olmayacak şekilde azaltılması ile oluşturulmaktadır. Kompozit malzemeler için uyarlanan hasar kriterlerinin değerlendirme sonuçlarına göre malzeme mekanik özellikleri güncellenir ve bu ilgili noktada malzeme davranışını belirler. Her iterasyonda güncelleme gerçekteşir ve malzemenin davranışı sürekli değişir. Çalışmalarda bozunum kurallarının sınırları deneysel şartlara göre doğruluk kazanmıştır. Bu çalışmada bozunum kuralı, iki farklı hasar kriterinin hasar indekslerine göre bir arada uygulanmıştır. Kompozit malzemede ki fiber basma ve çekme hasar kriterine göre malzemenin mekanik özellikleri azaltılarak modele uygulanmıştır. Elastik özelliklerde ki bu azalış, deneysel sonuçlara göre düzenlenmiştir. Kural uygulanırken şu yollar izlenmiştir: Kompozit malzemenin çekme altında yükü fiberin, basma altında ise yükü matris malzemesinin taşıdığı hükmünden yola çıkılarak, fiber çekme hasarına göre malzemenin fiber yönündeki mekanik özellikleri,  $E_{11}$ ,  $G_{12}$  ve  $\nu_{12}$ , deneysel sonuçlara göre karar verilen indirgeme parametrelerine göre lineer olarak azaltılmıştır. Fiber basma hasarına göre, fiber eksenine dik yöndeki mekanik özellikler,  $E_{22}$ ,  $G_{23}$  ve  $\nu_{23}$ , lineer olarak azaltılmıştır (şekil 3 b).

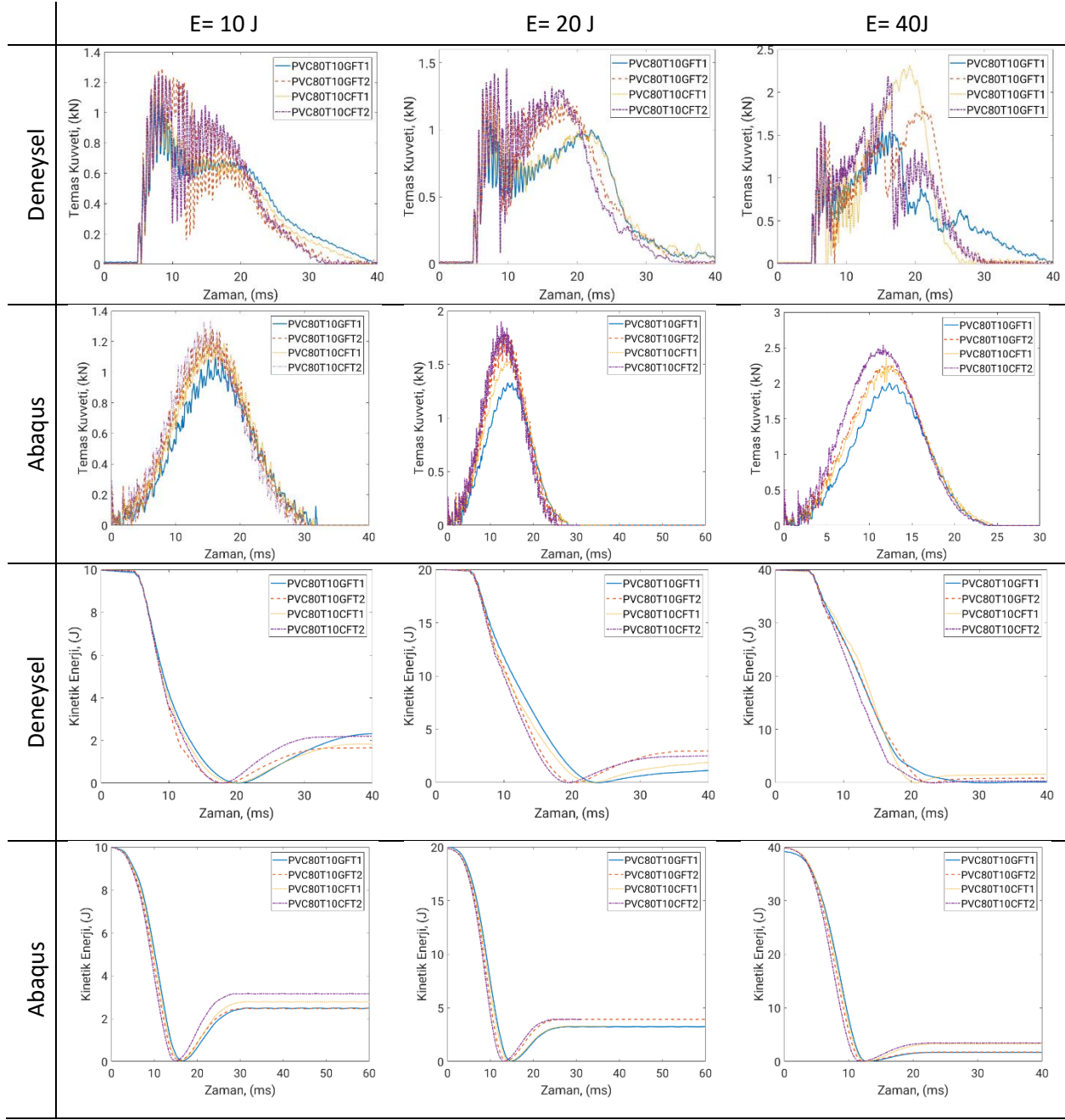


şekil 3. a) Bozunum kuralının sonlu elemanlar modeline uygulanması b) Hasara uğrayan malzeme özellikleri için bozunum kuralı

Kompozit malzeme için tariflenen hasar kriterinde belirtildiği gibi hasar indeksi (SDV) değerleri her bir integrasyon noktası için gerekli parametreler kullanılarak hesaplanır, tüm integrasyon noktalarını içerecek şekilde matris formunda kaydedilir. Her bir hasar tipine göre  $[0 - 1]$  arasında hasar düzeyini göstermek üzere hesaplanan bir değer atanır. Malzemenin mekanik özelliklerinin azalışı, artan hasar indekslerine göre değişmektedir. Bunun için lineer bir doğru tariflenmiş (şekil 3 a), bu doğru deneysel sonuçlara göre sonuç vermesi için 10 eşit parçaya bölünmüştür (Ara değerler interpolasyon ile hesaplanır). Malzemenin mekanik özelliklerinin bu doğruya göre yeni değerleri için Python programlama dilinde bir tablo oluşturulmuştur ve ortotropik elastik malzeme modeline aktarılmıştır.

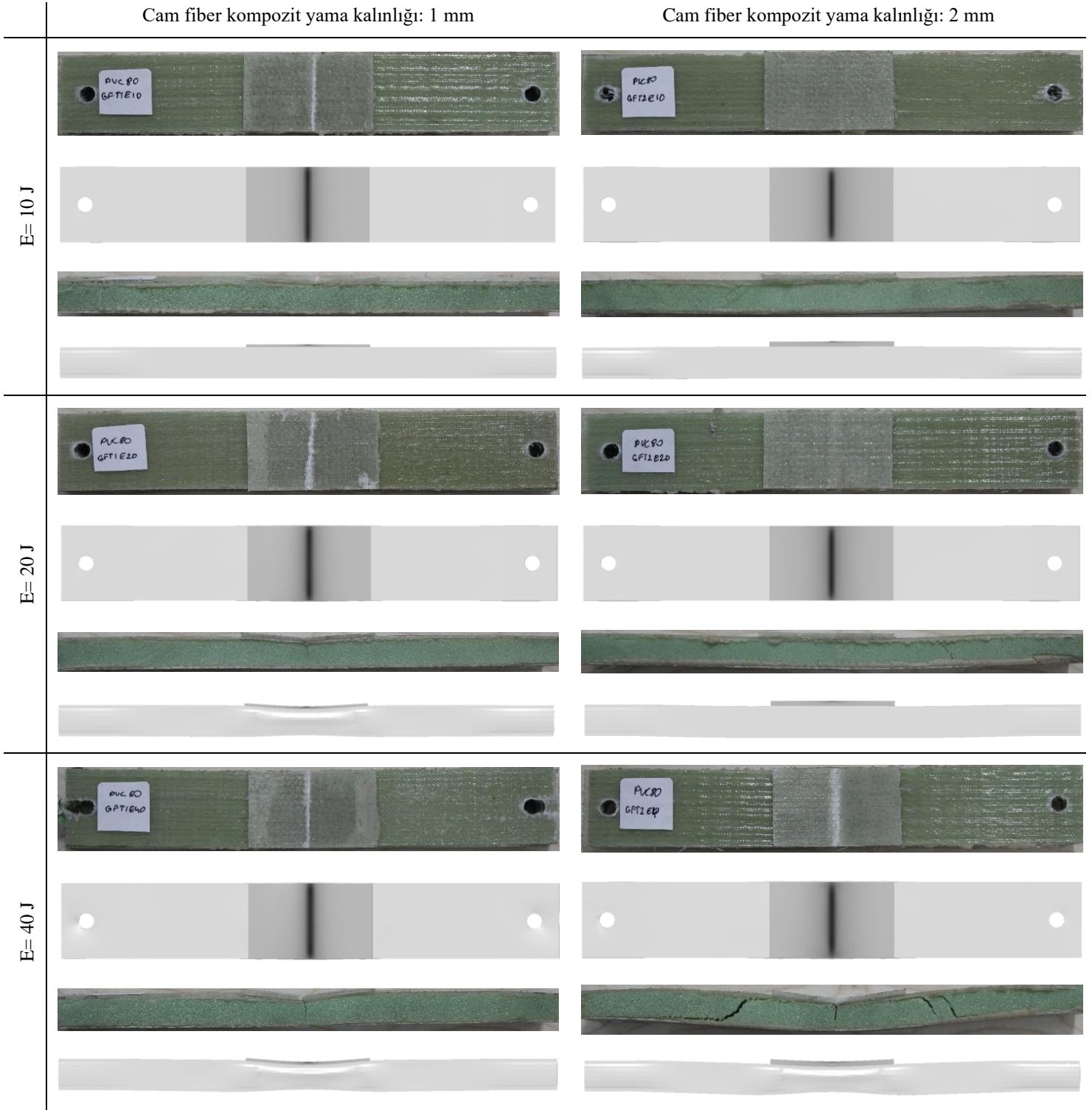
### 3. Bulgular ve Tartışma

şekil 4'de 1 mm ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki temas kuvvet-zaman ve kinetik enerjisi-zaman grafikleri verilmektedir. 1 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi yamalı çentikli sandviçler, en küçük temas kuvvetleri ortaya çıkarmıştır ve temas kuvveti değeri 1 kN değerlerindedir. Temas süreleri ise 40 ms civarındadır. En büyük temas kuvvetleri ise karbon fiber/epoksi yamalı sandviçlerde ortaya çıkmıştır. Darbe enerjisi arttıkça temas kuvvetlerinde de artış olmuştur. Grafiklerde ki dalgalanmalar kompozit malzemelerde meydana gelen hasarlar sonucu oluşmaktadır. En yüksek darbe enerjisinde ise ani düşüşlerden dolayı kirişlerde kırılmalar oluşmuştur. Kinetik enerji grafikleri dikkate alındığında ise kiriş konfigürasyonları arasında enerji sönümlenme kabiliyeti açısından önemli farklar yoktur. Darbe enerjisi arttıkça enerji sönümlenme kabiliyeti artmaktadır. En yüksek darbe enerjisinde ise gelen darbe enerjisinin neredeyse tümü sönümlenmiştir.



Şekil 4. 1 mm ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki sayısal ve deneysel temas kuvvet-zaman ve kinetik enerjisi-zaman grafikleri

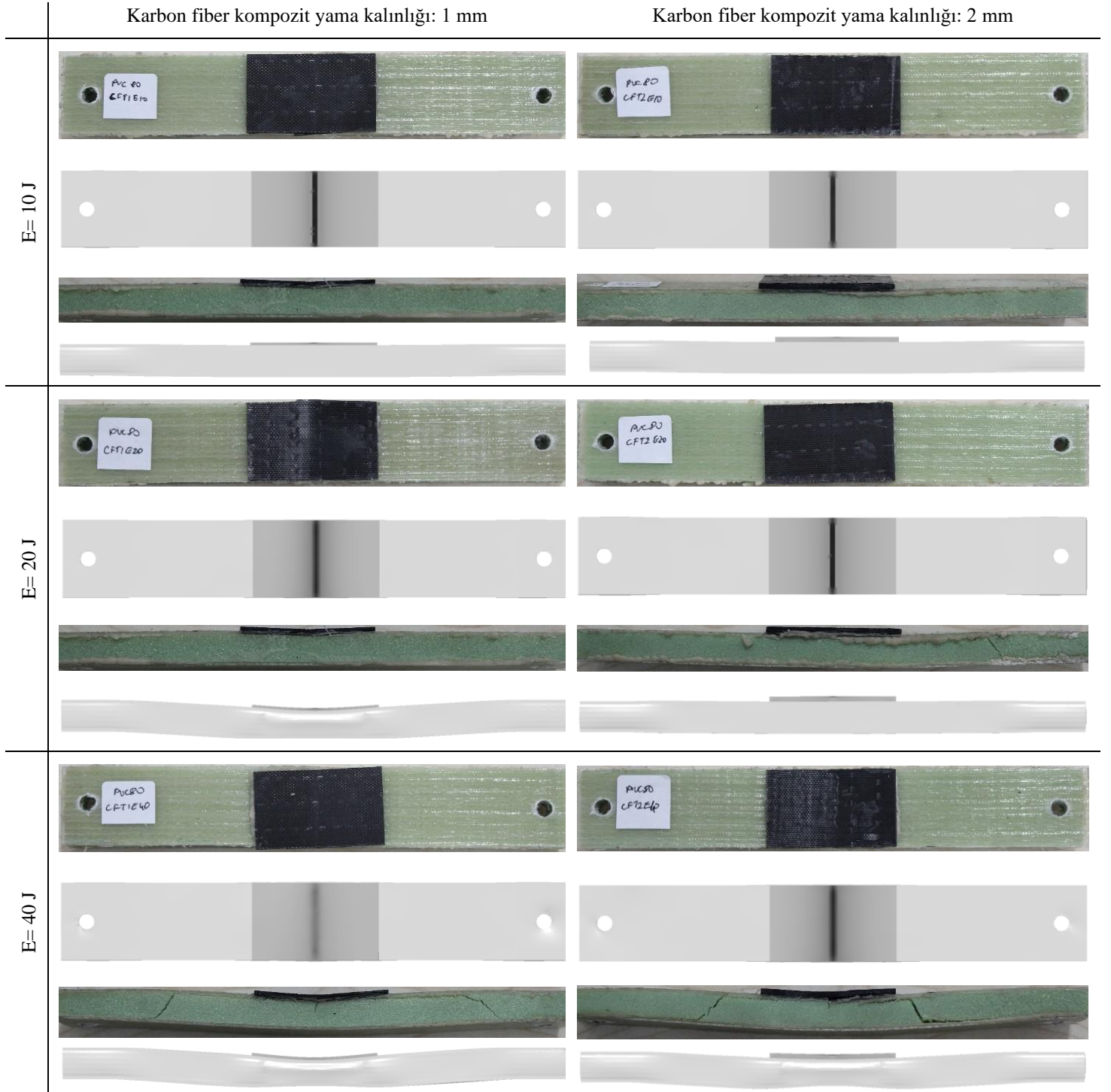
Şekil 5’de 1 ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki darbe sonrası deneysel hasar görüntüleri ve sayısal hasar görüntüleri verilmektedir. Şekil 5’de verilen hasar görüntüsü, tüm hasar parametreleri ve tüm tabakaların görüntü işleme ile üst üste getirilmesi ile elde edilmiştir. Yamalı kirişlerin vurucu ile temas eden yüzeylerinde kırılmalar meydana gelmiştir. Darbe enerjisi arttıkça hasarlar artarken, yama kalınlığı arttıkça hasar boyutları azalmaktadır. 40 J darbe enerjilerinde hasarın çekirdek malzemesine geçtiği görülmektedir. Yama kalınlığı 2 mm olduğunda ise yapı daha fazla rijitliği için çekirdek malzemesinde oluşan hasar daha da artmıştır. Sayısal analizlerde ise yama üzerinde oluşan hasar görüntüsü deneysel sonuçlar ile uyum göstermektedir. Sayısal analizlerde köpük malzemesi üzerine yoğunlaşmamış ve hasar modeli geliştirilmemiştir. Bu çalışmanın ilerideki hedefleri açısından önemli bir husustur. Yama kalınlığı 2 mm olduğunda ise sayısal analizlerde de hasar görüntüleri 1 mm yamalı kompozitlere benzerdir. Bu durum yapının rijitliğinin değişmediği anlamına gelmektedir ve köpük malzemesinin sayısal modeli ile ilgili bir durumdur.



**Şekil 5.** 1 ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi yamalı kompozit sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki sayısal ve deneysel darbe sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5'de 1 ve 2 mm kalınlıklı karbon fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki darbe sonrası deneysel hasar görüntüleri ve sayısal hasarı görüntüleri verilmektedir. Cam fiber/epoksi yamalarda görülen hasarlar, karbon fiber/epoksi yamalarda da ortaya çıkmıştır. Ancak hasar alanları karbon fiber renginden dolayı tam olarak görülmesi de çekirdek köpüklerde oluşan hasar bu durumu açıklamaktadır. Sayısal analizlerde ise bu durum açıkça gözükmemektedir. Yama kalınlığının artışı ile sandviç kirişler daha da rijitleşmiş ve çekirdek malzemede oluşan hasar artmıştır. Karbon fiber cam fibere göre daha elastik olduğu için kiriş daha fazla eğilmeye maruz kalmış ve köpük malzemesinde hasar artmıştır.





Şekil 6. 1 ve 2 mm kalınlıklı karbon fiber/epoksi yamalı kompozit sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki darbe sonrası sayısal ve deneysel hasar görüntüleri

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, farklı yama malzemesi ve kalınlıktaki kompozit yama ile tamir edilen kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışı araştırılmıştır. Temas kuvveti ve kinetik enerji geçmişleri ve çarpma sonrası hasar alanları ve bölgeleri üç farklı darbe enerjisi seviyesi altında incelenmiştir. Kompozit yamalar ve yüzey plakaları vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Yamalar ve sandviç kirişler, iki fazlı bir endüstriyel yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Sonlu eleman analizinde, fiber takviyeli kompozit yamalar ve yüzey plakaları üç boyutlu katı elemanlar ve ortotropik malzeme davranışı ile modellenmiştir. Ayrıca, üç boyutlu hasar kriterleri, hazırlanan kullanıcı tanımlı malzeme modeli (VUMAT) ve tariflenen bir bozunum kuralı ile modellenmiştir. FORTRAN dilindeki alt yordam ABAQUS yazılımına uyarlanmıştır. Kompozit malzemenin yük kapasitesindeki azalma elastik bozulma modeli ile sayısal

modele aktarılmıştır. Yapışkan katman için kohezif bölge modeli kullanılmıştır. Önerilen sayısal model, deneysel sonuçlarla başarılı bir şekilde uyum göstermiştir.

Artan darbe enerjisi ile maksimum temas kuvveti seviyelerinde artış olmuştur. Yama malzemesi değiştikçe, maksimum temas kuvveti seviyelerinde aşırı bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, yamanın kalınlığı arttıkça, maksimum temas kuvvetleri artmıştır. Kompozit malzemelerdeki hasar özellikle fiber kırılmaları olarak meydana geldiğinden en yüksek darbe enerjisi seviyeleri için temas kuvveti eğrilerinde ani düşüşler meydana gelmiştir. Yama kullanımının, temas kuvveti davranışı açısından çarpma davranışını aşırı derecede değiştirmemesi, ancak hasar alanları üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olması arzu edilir. Çarpma simülasyonları sırasında yük transferini yamadan sandviç kirişe aktaran, kohezif eleman modelinin başarısıdır.

#### **Teşekkür / Bilgilendirme**

Yazarlar, 216M519 Nolu Proje Kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) Teşekkür Eder.

#### **Referanslar**

- Abaqus/Explicit (version 6.14), User's manual, finite element software. available from <http://www.simulia.com>.
- Albedah, A., Khan, S.M.A., Benyahia, F. & Bouiadjra, B.B. (2016). Effect of load amplitude change on the fatigue life of cracked Al plate repaired with composite patch, *International Journal of Fatigue*, 88, 1-9.
- Balaganesan, G. & Khan, V.C. (2016). Energy absorption of repaired composite laminates subjected to impact loading, *Composites Part B*, 98, 39-48.
- Benyahia, F., Aminallah, L., Albedah, A., Bouiadjra, B.B. & Achour, T. (2015). Experimental and numerical analysis of bonded composite patch repair in aluminum alloy 7075 T6, *Materials and Design*, 73, 67-73.
- Carneiro, M.A.S. & Campilho, R.D.S.G. (2017). Analysis of adhesively-bonded T-joints by experimentation and cohesive zone models, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31, 1998–2014.
- Cheng, P., Gong, X.J., Aivazzadeh, S. & Xiao, X. (2014). Experimental observation of tensile behavior of patch repaired composites, *Polymer Testing*, 34, 146-154.
- Constantin, N., Sandu, M., & Sorohan, S. (2013). Restoration of the mechanical performance of damaged Al panels using bonded composite repair patches, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 42, 69-76.
- Errouane, H., Sereir, Z., & Chateaneuf, A. (2014). Numerical model for optimal design of composite patch repair of cracked aluminum plates under tension, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 49, 64-72.
- Hashin, Z. (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, 47(2), 329–334.
- Khalili, S.M.R., Ghadjar, R., Sadeghinia, M. & Mittal, R.K. (2009). An experimental study on the Charpy impact response of cracked aluminum plates repaired with GFRP or CFRP composite patches, *Composite Structures*, 89, 270-274.
- Kwon, Y.W. & Hall, B.L. (2015). Analyses of cracks in thick stiffened plates repaired with single-sided composite patch, *Composite Structures*, 119, 727-737.
- Mall, S. & Conley, D.S. (2009). Modeling and validation of composite patch repair to cracked thick and thin metallic panels, *Composites: Part A*, 40, 1331-1339.
- Sabelkin, V., Mall, S., Hansen, M.A., Vandawaker, R.M. & Derriso, M. (2007). Investigation into cracked aluminum plate repaired with bonded composite patch, *Composite Structures*, 79, 55-66.
- Shams, S.S. & El-Hajjar, R.F. (2013). Overlay patch repair of scratch damage in carbon fiber/epoxy laminated composites, *Composites: Part A*, 49, 148-156.
- Singh, H., Namala, K. K. & Mahajan, P. (2015). A damage evolution study of E-glass/epoxy composite under low velocity impact, *Composites Part B*, 76, 235-248.
- Zhou, J., Hassan, M.Z., Guan, Z. & Cantwell, W.J. (2012). The low velocity impact response of foam-based sandwich panels, *Composites Science and Technology*, 72(14), 1781 – 1790.