

DİRSEK YAPILI KOMPOZİT KİRİŞLERDE KARBON NANOTÜP KATIMININ DAYANIMA ETKİLERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Arca M. A.¹ ve Uyar İ.²
Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Çöker D.³
Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Üstün mekanik özellikleri nedeniyle kompozit yapılarda toklaştırma malzemesi olarak karbon nanotüp (KNT) kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bununla birlikte kompozit yapıların kırılmaya karşı güçlendirilmesinde KNTlerin üstün özelliklerinin etkileri henüz tam olarak kavranmamıştır. Bu çalışmada epoksi reçineye KNT katımının dirsek yapılı kompozit malzemelerin bükümlü kiriş dayanımına (BKD) etkilerinin incelenmiştir. Baz ve epoksi reçineye KNT katımlı [0/90] karbon fiber dokuma 90° bükümlü laminantlar el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Dirsek yapılı kompozit kirişler 4 nokta bükme deneyine tabi tutulmuş ve yük deplasman eğrileri kaydedilmiştir. Dijital görüntü korelasyon yöntemi ile laminantın bükümlü yüzeyindeki deformasyon alanı elastik bölgede kırılma başlangıcına kadar görüntülenmiştir. Kırılma başlangıcında hızlı kamera sistemi ile (bu deneylerde en çok 28 000 fps) resimleri çekilerek kırılma düzeni görüntülenmiştir. Deney sonuçlarında KNT eklenmesiyle BKD değerinde düşüş gözlenmiş, bu duruma neden olabilecek mekanizmalar tartışılmıştır. Ayrıca yük deplasman davranışının baz malzemede gözlenen tek düşüş yerine çoklu düşüş göstermesi ve çatlak boylarında kılma olmasıyla malzemenin hasar toleransının artmış olduğu gözlenmiştir.

GİRİŞ

Havacılık ve rüzgar enerjisi endüstrilerinde kompozit malzemelerin kompleks geometrilerde birincil yük taşıyıcı parçalar olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kompozit malzemelerin anizotropik davranışları malzeme tepkisini ve kırılma davranışını metal yapı parçalarından farklılaştırmaktadır. Kompozit malzemelerin dirsek yapısı gibi kompleks geometrilerde yük taşıma uygulamalarında kullanılması, yarıçaptaki delaminasyona neden olan zayıflıklarından dolayı elverişli değildir [Edwards, Thompson, 2005]. Yarıçaptaki zayıflık, katmanların ayrılmasından kaynaklanan ve mekanik toklukta gözle görülür kayba sebebiyet veren delaminasyon problemine neden olmaktadır. Delaminasyon problemi düzlem dışı kesme gerilimleri ve kompozit yapının bükümlü geometrisinden kaynaklanan normal gerilimlerin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Nano ölçekteki geometrileri ve üstün mekanik özellikleri Karbon nanotüplerin (KNT) kompozit yapılarda ilave ağırlık yaratmayan toklaştırma malzemesi olarak kullanımını yaygınlaştırmaktadır [De Volder, 2013; Seyhan, Tanoglu ve Schulte, 2008]. Bununla birlikte, kompozit yapıların kırılmaya karşı güçlendirilmesinde KNTlerin üstün özelliklerinin etkileri henüz tam olarak kavranamamıştır. Literatürde Avalon ve Donalson'nun çalışmalarında kompozit malzeme reçinesine %5 KNT katımının BKD ve maksimum kırılma gerilimine etkisinin olmadığı, sadece malzemenin ani yük düşüş davranışının yapış-kay davranışı yönünde değiştiği gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak maksimum radyal gerilimin herhangi bir parametreden (çap, kalınlık ve KNT) bağımsız olduğunu gösterilmiştir [Avalon ve Donalson, 2010]. Yao ve ark. çalışmalarında 90° bükümlü laminantların

¹ Proje araştırmacısı, ODTU Havacılık ve Uzay Müh. Bölümü, E-posta: aydan.arca@metu.edu.tr

² Proje araştırmacısı, ODTU Havacılık ve Uzay Müh. Bölümü, E-posta: imren.uyar@metu.edu.tr

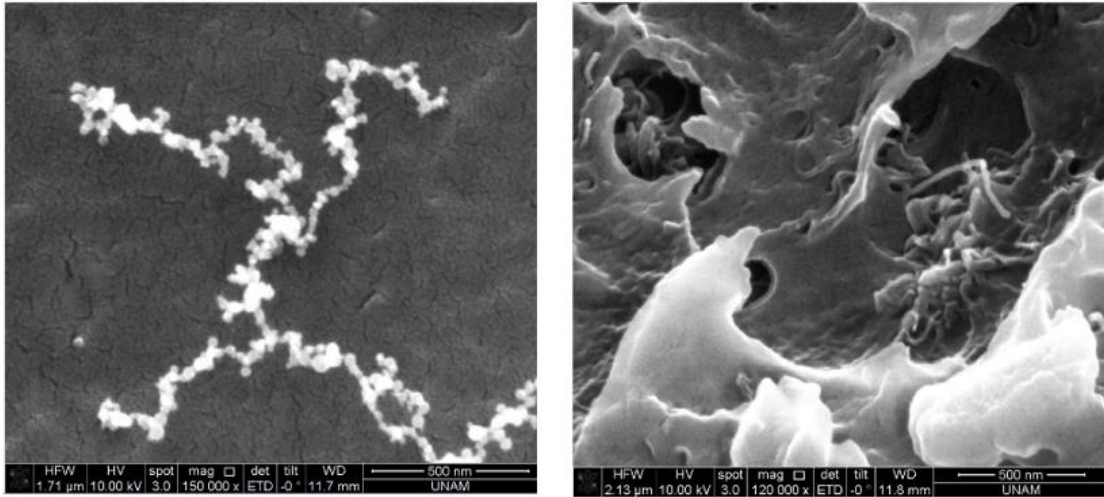
³ Doç Dr., ODTU Havacılık ve Uzay Müh. Bölümü, E-posta: coker@metu.edu.tr

farklı et kalınlıkları ve iç yarıçaplar ile BKD ve deformasyon alanı değişimini Dijital Nokta Korelasyon yöntemi ile incelemiştir. Artan yarıçap ve kalınlığın bükümlü kiriş dayanımının arttırdığı ve ayrıca artan et kalınlığı ile laminaların kırılma mekanizmalarının daha stabil hale geldiği gözlenmiştir. Bunun yanında dijital nokta korelasyon sonuçları maksimum gerininin çatlağın olduğu ve ilerlediği bölgelerde yoğunlaştığı gözlenmiştir[Hao, Ge, Ma, ve Shi, 2012].

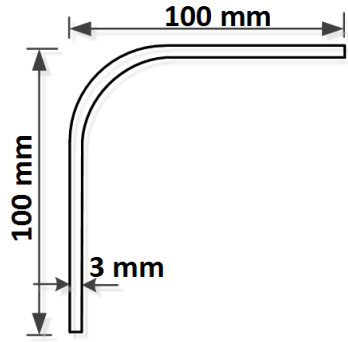
Bu çalışmanın amacı dirsek yapılı kompozit kirişlerin bükümlü kiriş dayanımına KNT katımının etkilerinin deneysel olarak incelenmesini amaçlamaktadır. Deformasyon alanının ve kırılma düzenin gösterilmesi için yüksek hızlı kamera ve kameralarla koordineli çalışan DIC sistemi kullanılmıştır. Örgü karbon fiber/epoksi dirsek yapılı kirişler baz ve KNT katımlı olarak el ile yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Dirsek yapılı kompozit kirişlerin dört nokta bükme deneyleri ASTM D6415/D6415M – 06a [ASTM D6415/D6415M – 06a, 2007] standardına uygun olarak yapılmıştır.

MALZEME

Dört nokta bükme deneyleri [0/90] örgü dokuma malzeme ve [0/90] KNT takviyeli örgü dokuma malzeme olacak şekilde iki farklı karbon/epoksi kompozit laminant numunesi kullanılarak yürütülmüştür. Örgü malzeme işleme kolaylığı ve el ile yatırma yöntemine uygun olması nedeniyle tercih edilmiştir. Baz malzemede HexPly® AS4 5HS 0.28 mm katman kalınlıklı önceden reçine yedirilmiş örgü karbon fiber dokuma kullanılmıştır. KNT katımlı numunelerin üretiminde HexPly® AS4 5HS 0.35 mm katman kalınlığına sahip kuru örgü karbon fiber dokuma kuru kumaş ile Araldite LY5052/Aradur LY5052 ve yüksek yüzdeli KNT içeren EPOCYL™ NCR128-02 sıvı bisphenol-A epoksi reçine sistemi ile birlikte kullanılmıştır. KNT malzemele %3 karbon nanotüp katımı bahsedilen iki reçine sisteminin baz ve KNT içeren reçinelerin sırasıyla 6'ya 1 oranında karıştırılması ile elde edilmiştir. EPOCYL™ NCR128-02 sıvı bisphenol-A epoksi reçine Nanocly tarafından üretilmekte ve %20 oranında KNT içermektedir. Şekil 1'de %20 KNT içeren reçinenin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen görüntüleri verilmiştir. İlk şekilde reçine içerisinde toplanmış halde bulunan KNT ve ikinci resimde düzgün dağılım sağlanmış, ayrık KNTler reçine içerisinde görülmektedir. Baz malzeme için 12 kat prepreg dokuma kumaş kullanılmış, KNT katımlı malzeme için 8 kat kuru dokuma kumaş 6'ya 1 oranında karıştırılarak %3 oranında KNT katımı sağlanan reçine sistemi ile birlikte kullanılmıştır. Katmanlar el ile serme yöntemi ile serilmiştir ardından vakum torbalama yöntemi ile sertleşmesi sağlanmıştır. Numunelerin geometri ve final boyutları şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1: %20 KNT İçerikli EPOCYL™ NCR128-02 Sıvı Bisphenol-A Epoksi Reçine SEM Görüntüleri



(a)

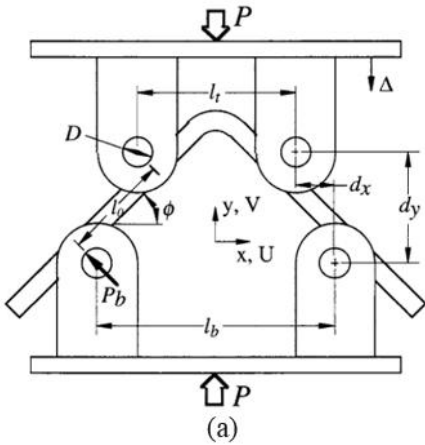
| | Baz malzeme | KNT katımlı malzeme |
|----------------------|-------------|---------------------|
| Katman sayısı | 12 | 8 |
| Boyutlar (mm) | L1=L2=100 | L1=L2=100 |
| | b=25 | b=25 |
| | t=3 | t=4,5 |
| Numune sayısı | 2 | 3 |

(b)

Şekil 2: (a) Numune Üretim Geometrisi, (b) Numune Uzunlukları ve Testlerde Kullanılan Numune Sayısı

DENEYSEL YÖNTEM

Laminanın bükümlü bölgesinde saf moment yükünün yaratıldığı dört nokta bükme deneyleri ASTM D6415/D6415M – 06 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 1b'de gösterilmektedir. Deneylerde Shimadzu Autograph AGS-J 10 kN uzama kontrollü çekme cihazı ve delaminasyon başlangıcı ve ilerleyişinin görüntülenmesi için Photron SA5 milyon kare yüksek hızlı kamera (7000 fps'ye kadar 1MP tam kare, indirgenen çözünürlüklerde 1,000,000 fps) sistemi kullanılmıştır. Hızlı kamera ile bağlantılı çalışan dijital görüntü korelasyon (DIC) metodu deformasyon alanını ve kırılmadan önceki maksimum gerilim yoğunlaşmalarını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Tam kare gerilim ölçümleri GOM tarafından geliştirilen ARAMIS yazılımı ile yapılmıştır. Test sırasında numunenin düzenek içindeki pozisyonu Şekil 3a'da, deney düzeneği Şekil 3b'de gösterilmektedir. Numunenin ön yüzeyi resimlerde kırılmayı (delaminasyon) görünür kılmak için beyaz boya ile boyanmaktadır. DIC testlerinde numunenin ön yüzeyi önce beyaza daha sonra DIC sisteminde deformasyon ölçümü hesaplamalarında kullanılan faset alanını oluşturan nokta düzeni yaratmak amacıyla siyah sprey boya ile boyanmaktadır. Çatlama sesinin duyulması ve yük düşüşü ile hızlı kamera resimleri çekilerek kırılma düzeni görüntülenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3: (a) 4 Nokta Bükme Deney Düzeneği Şeması; (b) Test Düzeneği Fotoğrafı.

Bükümlü kiriş dayanımı temel olarak birim uzunlukta oluşan moment olarak tariflenir. Malzemenin bükümlü kısmında oluşan moment malzemenin bir kolundaki yükleme piminden uygulanan yük ile aynı koldaki destek ve yükleme pimlerinin arasındaki uzaklığın çarpımı ile aşağıdaki denklemde gösterildiği üzere hesaplanır. Kol üzerindeki iki pim arası uzaklık Şekil 3a'da gösterilen yükleme düzeneği ve numune geometrisinden hesaplanmaktadır.

$$CBS = \frac{Pl_0}{w} = \frac{P}{2w \cos(\varphi)} \left(\frac{d_x}{\cos(\varphi)} + (D + t) \tan(\varphi) \right)$$

BKD denkleminde bulunan değişkenler P (yük) ve φ değerleridir. Pim yükü ilk yük düşüşünde ulaşılan maksimum yük olarak tariflenir ve ölçüm makinasında okunan değer alınır. Φ değeri makinada okunan mesafe değerinden (Δ) destek pimi ve yükleme pimi arasındaki düşey mesafenin (d_y) çıkarılması ile aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır.

$$d_y = d_{yi} - \Delta$$

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{-d_x(D + t) + d_y \sqrt{(d_x^2 + d_y^2 - D^2 - 2Dt - t^2)}}{d_x^2 + d_y^2}$$

Kompozit laminaların Interlaminar gerilim hesaplamasında kullanılan denklemler Lekhnitskii tarafından geliştirilmiştir.

$$\sigma_r = -\frac{CBS}{(r_o^2 g)} \left(1 - \frac{1 - \rho^{k+1}}{1 - \rho^{2k}} \left(\frac{r_m}{r_o} \right)^{k-1} - \frac{1 - \rho^{k-1}}{1 - \rho^{2k}} \left(\frac{r_m}{r_o} \right)^{k+1} \rho^{k+1} \right)$$

Denklem içerisindeki değişkenler:

$$g = \frac{1 - \rho^2}{2} - \frac{k}{k+1} \frac{(1 - \rho^{k+1})^2}{1 - \rho^{2k}} + \frac{k\rho^2}{k-1} \frac{(1 - \rho^{k-1})^2}{1 - \rho^{2k}}$$

$$k = \left(\frac{E_\varphi}{E_r} \right)^{0.5}$$

$$\rho = \frac{r_i}{r_o}$$

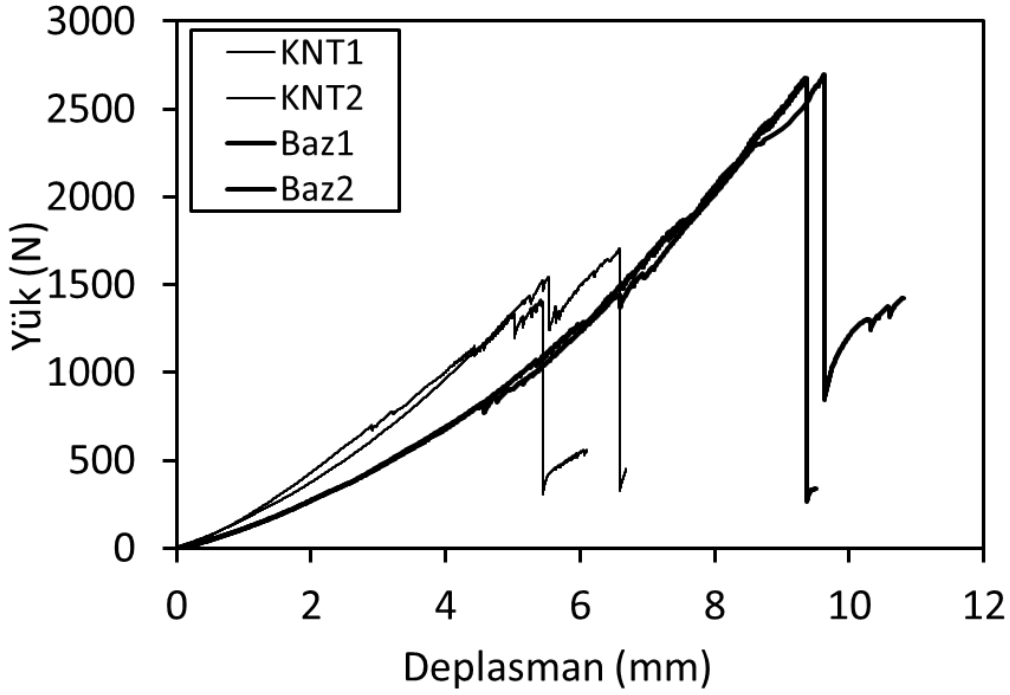
Standartta verilen yaklaşık maksimum interlaminar gerilim hesaplaması aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_r^{max} = \frac{3CBS}{2t\sqrt{r_i r_o}}$$

Yaklaşık hesaplanan değerlerin doğruluk oranının E_φ/E_r oranı yükseldikçe ve r_i/r_o oranı düştükçe arttığı belirtilmektedir. Interlaminar mukavemet hesaplanırken E_φ/E_r oranının 20'den küçük olması durumunda aşağıdaki denklemin %2'den az bir hata payıyla sonuç verdiği gözlenmiştir [ASTM D6415/D6415M – 06a, 2007].

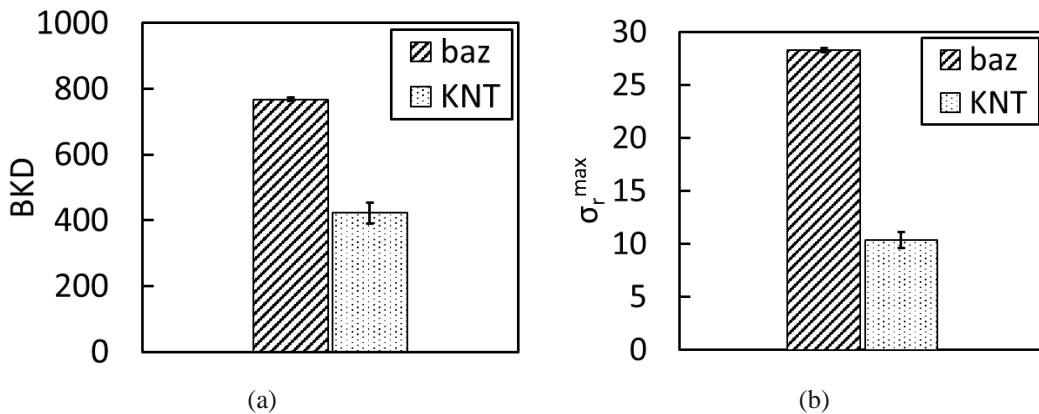
DENEYSEL UYGULAMALAR

Baz malzeme (kalın çizgi) ve KNT katımlı malzeme (ince çizgi) için 4 nokta bükme deneyi yük deplasman eğrileri Şekil 3'te gösterilmektedir. KNT katımlı laminantta sertlik artışı gözlenmesine rağmen baz laminantta 2600 N olan kırılma yükü 1700 N'a düşmektedir. Görünen en büyük fark baz laminantlarda görülen tek yük düşmesine karşı olarak KNT katımlı numunelerde iki yük düşmesi gözlenmesidir. İlk yük düşümünde birinci delaminasyon oluşmakta ve KNT katımlı laminant yük taşımaya sertliği değiştirmeden devam etmektedir. İkinci yük düşümünde çoklu delaminasyon ile birlikte katstrofik kırılma oluşmaktadır.



Şekil 4: Baz Numune ve KNT Katımlı Numune Yük Deplasman Eğrileri

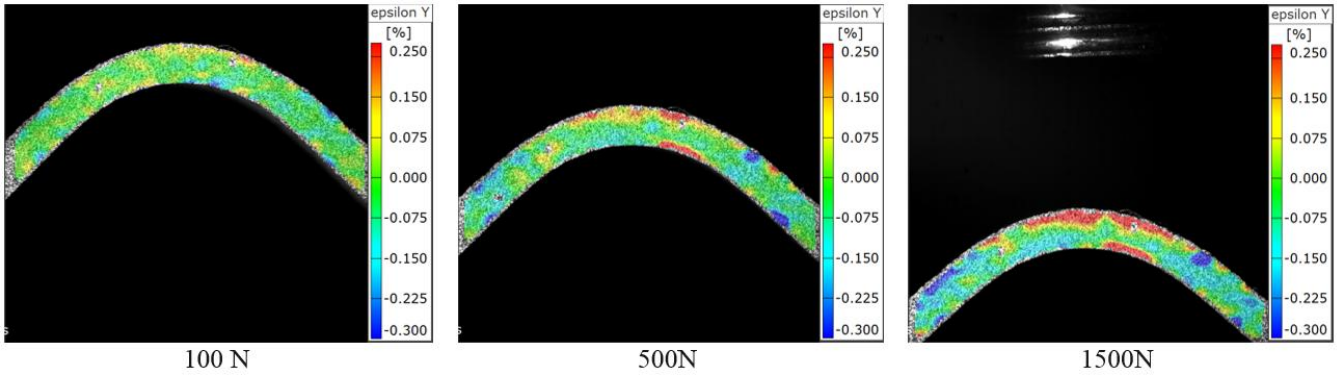
Bükümlü kiriş dayanımı ve maksimum radyal gerilim hesaplamaları şekil 9a ve 9b'de sırasıyla gösterilmektedir. KNT katımlı laminantların bükümlü kiriş dayanım değerinde %50 ve maksimum radyal gerilim değerinde %64 düşüş gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar KNT katımının BKD ve radyal stress üzerinde hiçbir etki görülmeyen çalışma [4] ile karşıtlık göstermektedir. Baz laminant BKD ortalama değeri 800 Nmm/mm olarak hesaplanırken, KNT katımlı malzemede dayanım 400 Nmm/mm'ye kadar düşmektedir. Ayrıca KNT katımlı numunelerin dört nokta bükme deneyleri sonuçları baz laminantlarla karşılaştırıldığında büyük standart sapma gözlenmektedir. Bu sonuç KNTlerin yer değiştirmelerinin ve yüksek yoğunluklu kümeler halinde yoğunlaşmalarının katmanlar arası heterojenlik yaratacağı ve dayanımda varyasyon ve bozulmaya yol açan, izotropik olmayan mekanik özellikler ortaya çıkaracağı düşüncesini desteklemektedir.



Şekil 5: Baz ve KNT Katımlı Malzemelerin (a) Bükümlü Kiriş Dayanımı. (b) Maksimum Radyal Gerilim Sonuçları.

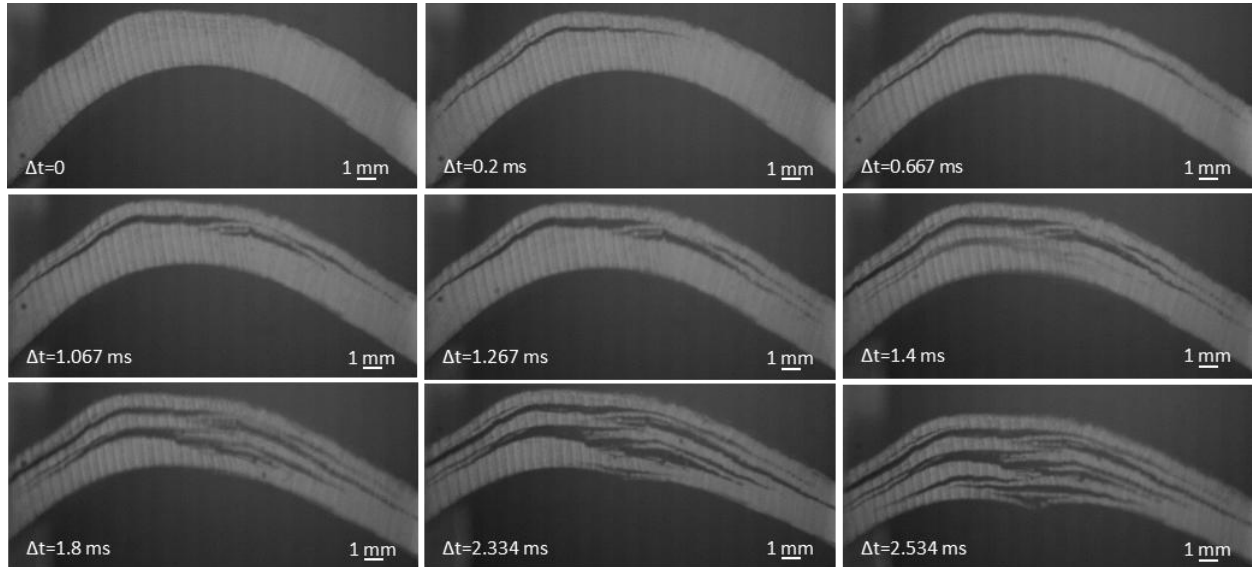
DIC analizleri 1500 N'a kadar her 20 N yük artışında bir 7000 fps'de (tam kare) çekilen resimlerle yapılmıştır. DIC deneyleri dirsekli bölüme odaklanmak ve deformasyon alanını ayrıntılı şekilde görüntülemek amacıyla 25mmx25mm ölçüm hacminde gerçekleştirilmiştir. Yüksek çerçeve hızlarında kamera çözünürlüğü DIC sistemi ile gerilim varyasyonunu analizi için yeterli olmayan 256x180 piksele indiğinden, hızlı kamera testleri ve DIC testleri ayrı olarak yapılmıştır. 100 N, 500

N ve 1500 N yüklerde çekilen DIC görüntüleri Şekil 6'da verilmektedir. Delaminasyona neden olan açılma gerilime karşılık gelen Epsilon Y geriniminin dış yarıçapa yakın katmanlarda yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. DIC sonuçlarına bağlı olarak delaminasyon başlangıcı dirsek bölgesinin üst tarafında dış yarıçapa yakın katmanlar arasında beklenmektedir.



Şekil 6: Açılma Gerilimlerinden Sorumlu Epsilon Y Gerinimleri Gösteren Tam Kare DIC Görüntüleri a)100 N, b)500 N ve c)1500 N

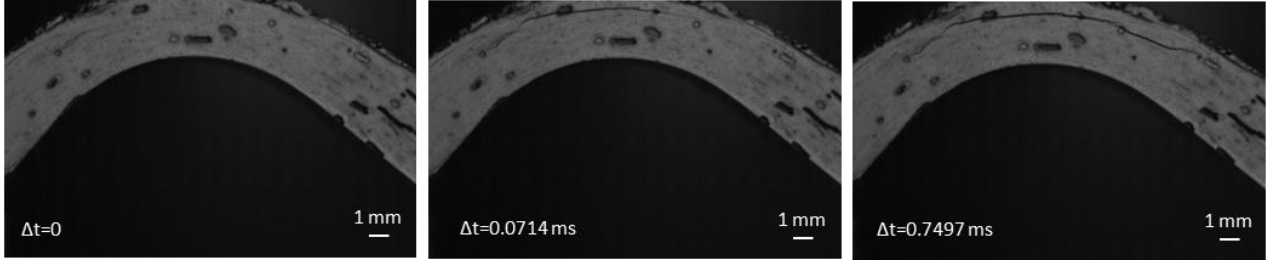
Deney sırasında kırılma anında çekilen yüksek hızlı kamera resimleri baz ve KNT katımlı laminantlar için Şekil 7 ve 8'de sırasıyla verilmiştir. Baz laminantların kırılma resimleri 15000 fps'de ve KNT katımlı laminantların kırılma resimleri 28000 fps'de çekilmiştir. Şekil 7'de sıralı dokuz resim baz laminantın tek yük düşüşünde oluşan katastrofik kırılma düzenini göstermektedir. İlk delaminasyon dış yarıçapa yakın, 3. ve 4. katmanlar arasında başlamaktadır. Bu sonuç maximum gerilimlerin üst yüzeye yakın katmanlarda yoğunlaştığını gösteren (Şekil 6) DIC sonuçları ile tutarlılık göstermektedir. İlk delaminasyonun merkezden kollara doğru büyümesiyle beraber ikinci ve ardından üçüncü delaminasyon sıralı olarak dış yarıçaptan iç yarıçapa doğru üç katman aralığı ile tek bir yük düşüşünde oluşmuştur (Şekil 7). İlerleme sırasında farklı çatlakların birleştiği ve ayrıca fiber köprüleme gözlemlenmiştir.



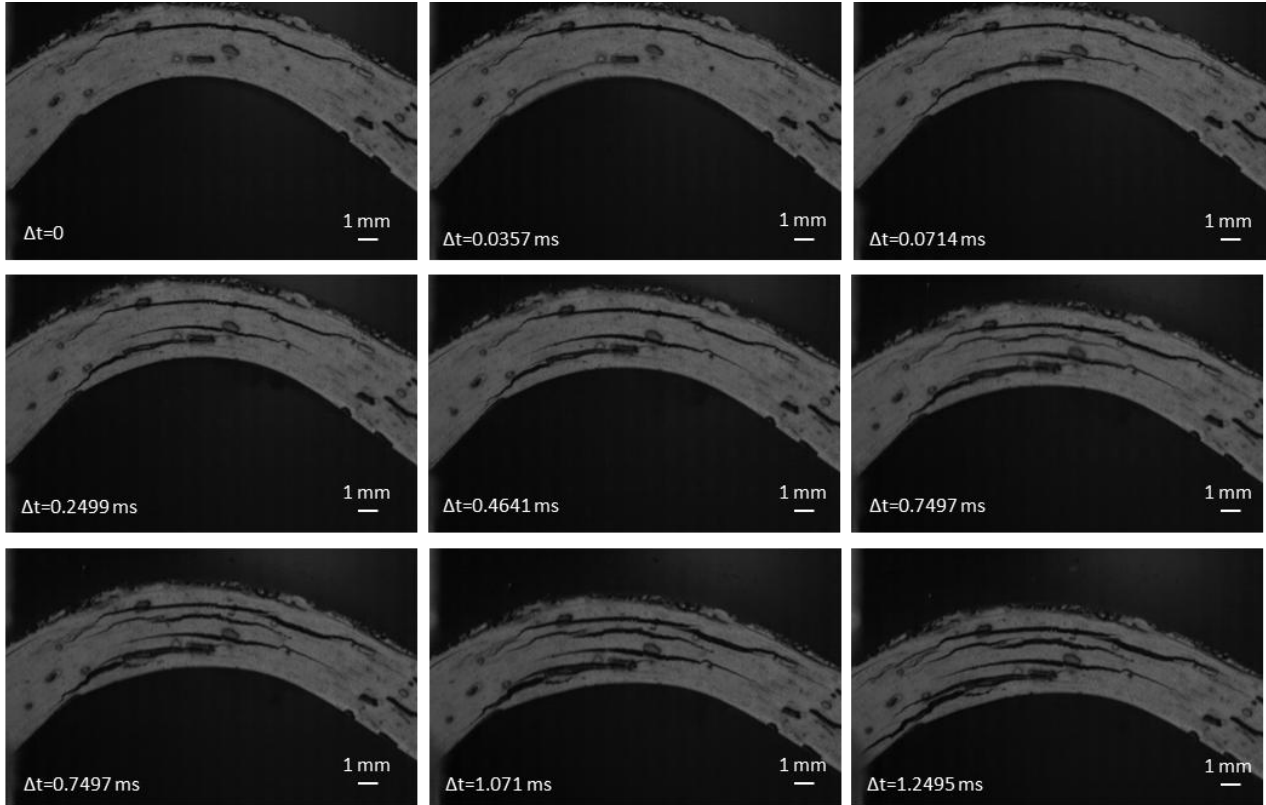
Şekil 7: Baz Laminant Kırılma Düzenini Gösteren 15000 fps'de Çekilmiş Hızlı Kamera Resimleri.

KNT katımlı laminantın iki yük düşüşüyle başlayan kırılma düzeni baz laminantlardan farklı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8 ve 9'da KNT katımlı numunelerin ilk ve ikinci yük düşüşündeki kırılma düzeni sırasıyla gösterilmiştir. İlk yük düşüşünde delaminasyon baz laminanta benzer şekilde gibi dış yarıçapa yakın olan ikinci ve üçüncü katmanlar arasında oluşmakta ve kollara her birine hafifçe ilerlemektedir. Malzeme tekrar yüklendikten sonra daha fazla delaminasyonun olduğu ikinci bir

yük düşüşü görülmüştür (Şekil 7b). Bu yük düşüşü sırasında ilk delaminasyon ilerlemeye devam etmiş, son laminada ikinci bir delaminasyon oluşmuş ve farklı laminalar arasında ilerlemiştir. Üçüncü çatlak ikinci çatlakın üzerinde orta katmana yakın oluşmuştur. Birinci ve üçüncü delaminasyon arasında oluşan dördüncü çatlaktaki kıvrımlanma açıkça görülebilmektedir. Bununla birlikte ana çatlakların arasında ikincil çatlakların kıvrılarak zayıf KNT kümelerine katmanlararsı çatlak yolunu değiştirerek ilerlediği görülmektedir. Çatlak birleşmesi ya da fiber köprüleme görülmemektedir. Bunlarla birlikte baz laminantlarla karşılaştırıldığında total delaminasyon uzunluğunun daha kısa olduğu görülmektedir.



Şekil 8. KNT Katımlı Numunenin İlk yük düşüşünde 28000 fps ile Çekilmiş Kırılma Düzeni Resimleri.



Şekil 9: KNT Katımlı Numunenin ikinci yük düşüşü sırasında 28000 fps ile Çekilen Kırılma Düzeni Resimleri

SONUÇ

Bu çalışmada dört nokta bükme deneyleri karbon fiber/epoksi örgü laminantların bükümlü kiriş dayanımı ve maksimum kırılma geriliminin %3 CNT katımıyla değişimini incelenmiştir. Reçine içine KNT katımı %20 KNT içeren EPOCYL™ NCR128-02 sıvı bisphenol-A epoksi reçine ile baz reçinenin 6'ya 1 oranında karıştırılmasıyla sağlanmıştır. Deney sonuçlarında baz laminantlara göre KNT katımlı laminantlarda daha yüksek standart sapma görülmüştür. Bu sonuç KNTlerin yer değiştirmelerinin ve yüksek yoğunluklu kümeler halinde yoğunlaşmalarının katmanlar arası heterojenlik yaratacağı ve izotropik olmayan mekanik özelliklerin sonuçlarda varyasyonlara neden

olacağı düşüncesini desteklemektedir. Bükümlü kiriş dayanımında yaklaşık %50 ve maksimum radyal geriliminde yaklaşık %64 oranında düşüş gözlenmesine rağmen kırılma mekanizmasında tek yük düşüş davranışının çoklu yük düşüş davranışına değiştiği ve sertliğin arttığı gözlemiştir. Yüksek hızlı kamera görüntüleri incelendiğinde baz ve KNT katımlı laminantların kırılma düzenlerinin farklı olduğunu göstermiştir. Bunun yanında KNT katımlı malzeme baz malzeme ile karşılaştırıldığında çatlak uzunluklarının daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak reçineye KNT katımının kırılma tokluğunu arttırdığı ve çatlak büyümesi için daha fazla enerji harcanmasına neden olduğundan KNT katımlı malzemede çatlak boylarının baz malzemeye göre daha kısa olduğu söylenebilir. Ayrıca dayanımın ve maksimum gerilim kırılmadaki maksimum yüke bağlı olmasıyla birlikte, bu çalışmada kullanılan KNT katımlı malzemelerde baz malzemeye göre farklı ve daha az katman kullanılmasının dayanım değişiminde rol oynadığı ve kırılma yükü değerini etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu çalışma ile KNT katımının dayanıma etkisi kesin olarak söylenememekle birlikte, malzemenin kırılma tokluğunu arttırdığı ve kırılma düzenini çoklu yük düşüşü davranışına değiştirerek malzemenin hasar toleransını arttırdığı gözlenmiştir.

Kaynaklar

- Avalon S.C., ve Donalson S.L., 2010. *Strength of composite angle brackets with multiple geometries and nanofiber-enhanced resins*, Journal of Composite Materials, cilt. 45(9), s. 1017-1030.
- ASTM D6415/D6415M – 06a, 2007. *Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite*, West Conshohocken, PA,19428 USA: ASTM International .
- De Volder F.L.M. et al. 2013. *Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications*, Science; cilt.339: s.535 – 539.
- Edwards T., Thompson J., 2005, *Spar Corner Radius Integrity for the A400M Wing*, Applied Mechanics and Materials, cilt.3-4, s.197-204,
- Hao W., Ge D., Ma Y., Yao X. and Shi Y., 2012. *Experimental investigation on deformation and strength of carbon/epoxy*, Polymer Testing, cilt.31, s.520-526.
- Seyhan A.T., Tanoglu M. ve Schulte K., 2008. *Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites*, Engineering Fracture Mechanics, cilt. 75, s. 5151-5162.