

Dönen ve Sıcaklık Etkisindeki Termoplastik Matrisli Kompozit Diskteki Isıl Gerilmeler

Faruk ŞEN^a, Aytaç ÜÇKARDAŞ^b

^aMuğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Teknoloji Fak. Enerji Sistemleri Mühendisliği Böl. Muğla

^bAksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray

ÖZET

Bu çalışmada, termoplastik kompozit bir disk modeli oluşturulmuştur. Kompozit malzeme, termoplastik matrisle sahiptir ve bu termoplastik matris çelik fiberler kullanılarak takviye edilmiştir. Kompozit disk probleminin çözümü, sonlu elemanlar metodu (FEM) ile yapılmıştır. Bu nedenle, modelleme ve analizler için ANSYS programı kullanılmıştır. Bu çalışmada, bir yenilik olarak kompozit disk modeli önceki çalışmalardan farklı olarak, üç boyutlu yapılmıştır. Üç boyutlu modele yapısal sınır şartları, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105 ve 115 °C değerlerinde uniform sıcaklıklar ve 10, 20, 30 rad/sn değerlerinde açısal hız uygulamıştır. Uygulanan uniform sıcaklıklar ve açısal hızlar nedeniyle üç boyutlu kompozit disk üzerinde oluşan, ısıl gerilmeler ve elastik şekil değiştirmeler ve bunların model üzerindeki dağılımları bulunmuştur. Uygulanan farklı uniform sıcaklıklar ve açısal hızlara göre hesaplanan sonuçlar ve elde edilen dağılımlar, birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre, üç boyutlu termoplastik kompozit diskte meydana gelen gerilmeler ve şekil değiştirmelerin değerleri ve dağılımları, kesinlikle uniform sıcaklık ve açısal hız değişimine bağlıdır.

Anahtar kelimeler: Termoplastik kompozit disk, Isıl gerilme, FEM, ANSYS.

Thermal Stresses in Thermoplastic Matrix Composite Disc Under Rotation and Temperature

ABSTRACT

In this work a thermoplastic disc model was created. The composite material was thermoplastic matrix and it was reinforced using steel fibers. The solution of composite disc problem was done via finite element method (FEM). Therefore, ANSYS program was utilized for both modeling and analyses. As an innovation, the composite disc was created as three dimensional as a dissimilarity from earlier studies. The structural boundary conditions, uniform temperatures as 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105 and 115 °C and angular velocities as 10, 20 and 30 were performed on three dimensional model. The values of thermal stresses and elastic thermal strains were computed and its distributions were determined on the disc. Computed results and obtained distributions related to apply various uniform temperatures and angular velocities were compared with each other. According to these results, magnitudes and distributions of thermal stresses were strictly associated changing of uniform temperatures and angular velocities.

Keywords: Thermoplastic composite disc, Thermal stress, FEM, ANSYS.

1. GİRİŞ

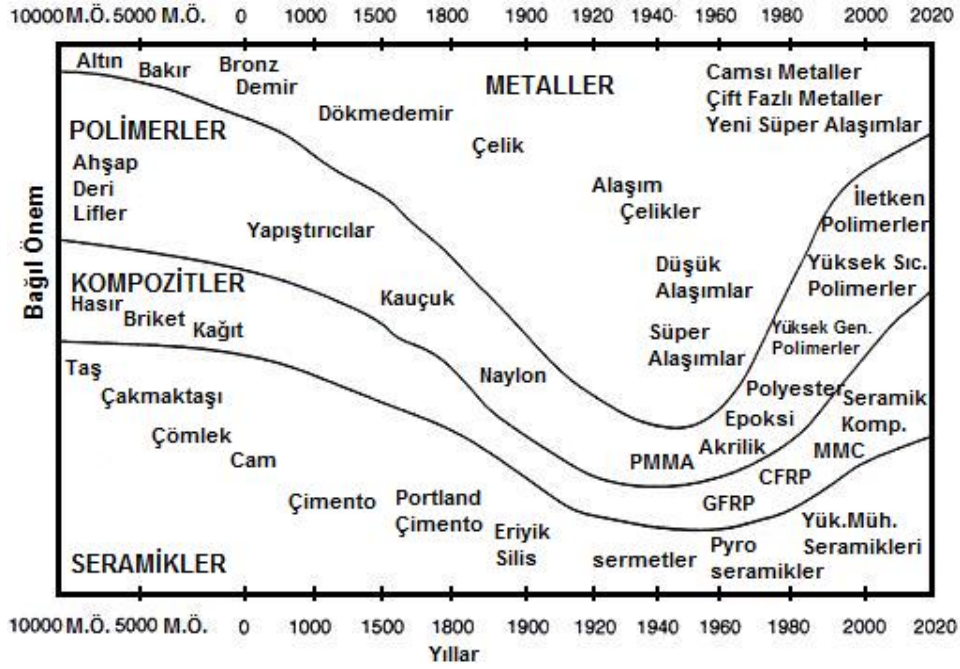
Günümüzde yaygın olarak kullanılan yapı elemanları, metaller, polimerler, kompozitler ve seramikler olmak üzere dört gruptadır. Bu malzemeler çok eski çağlardan beri kullanılmaktadır. İ.Ö. 10000 yıllarından 2020 yılına kadar bu malzemelerin kullanımındaki dağılım ve birbirlerine göre tarihe bağlı değişen önemleri Şekil 1'de gösterilmiştir [1]. Polimerlerin kullanım alanlarının çeşitlenerek artması dolayısıyla kullanımlarının gerektirdiği ısıl, mekanik ve elektriksel özellikleri sağlayan polimerlerin

geliştirilmesi ya da mevcut polimerlerin katkı maddeleri ile istenilen özelliklere getirilmesi önem kazanmış ve bu yönde yapılan çalışmalar artmıştır [2]. Cam lifleriyle donatılı sentetik reçine matrisli malzemeler için dilimizde "Cam Takviyeli Plastik (CTP)" adı yerleşmiştir. Cam takviyeli plastiklerin üretiminde, en çok kullanılan malzeme olan polyesterin yanı sıra, günümüzde, diğer termoset ve termoplastik reçinelerde kullanılmaktadır [3]. Fiber takviyeli kompozitlerin günümüzde kullanıldığı başlıca yerler, hava araçları, uzay araçları, uydular, gemiler, denizaltılar, otomobiller, kimyasal işlem donanımları, sportif araçlar, alt yapı sistemleri, tıbbi protezler ve mikro elektronik aletlerdir [4].

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: faruksen@mu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2013.16.3 97-104



Şekil 1. Tarih boyunca malzemelerdeki gelişmelerin birbirine göre önemi [1]

Kompozit malzemelerin ısıl gerilme analizi ile ilgili daha önceden çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sen [5] tarafından termoplastik matrise sahip ve çelik tellerle takviye edilmiş tabakalı kompozit plaklarla ilgili yapılan çalışmada, sıcaklık yükü nedeniyle kompozit plakalarda oluşan ısıl gerilmeler incelenmiştir. Çözüm için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Elasto-plastik olarak yapılan çalışmada, termoplastik kompozit plakanın orta kısmına bir delik oluşturulmuş ve ısıl gerilmeler üzerine, delik etkisi incelenmiştir. Ayrıca artık gerilmeler de hesap edilmiştir. Sen [6] bir başka çalışmada, çelik tellerle takviye edilmiş termoplastik matrise sahip kompozit bir diskte meydana gelen ısıl gerilmeleri elde etmiştir. Çalışma, elastik-plastik olarak yapılmıştır ve artık gerilmeler de elde edilmiştir. Isıl gerilmeler, kompozit diske uygulanan uniform sıcaklıklar etkisiyle meydana getirilmiştir. Sen [7] tarafından sonlu elemanlar metodu ve ANSYS programı kullanılarak yapılan çalışmada, üzerinde çok sayıda delik bulunan bir kompozit diskin ısıl gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, elastik-plastik ve artık ısıl gerilmeler hesaplanmıştır. Isıl gerilmeler, uygulanan uniform sıcaklık yükü tesiriyle oluşturulmuştur. Kompozit malzemenin radyal ve teğetsel doğrultulardaki farklı ısıl genleşme katsayıları nedeniyle, ısıl gerilmelerin meydana geldiği görülmüştür. Isıl gerilmelerin ve artık gerilmelerin değerlerinin uygulanan uniform sıcaklık yüklemelerine bağlı olarak değişim gösterdiği gözlenmiştir. Kaynak ve arkadaşları [8] yaptıkları çalışmada, polimer matrisli ve kısa fiberlerle, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiş bir kompozit diskteki ısıl gerilmeleri hesaplamışlardır. Isıl gerilmeler uniform sıcaklık etkisiyle meydana getirilmiştir. Çözüm için iki boyutlu sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmıştır. Bu amaç

için ANSYS yazılımından yararlanılmıştır. Sen ve arkadaşları [9], termoplastik kompozit bir diskteki ısıl gerilmeleri, geliştirdikleri FORTRAN programı ile analitik olarak ve aynı zamanda ANSYS yazılımını kullanmak suretiyle nümerik olarak elde etmişlerdir. Isıl yük olarak diske parabolik sıcaklık dağılımı uygulamışlardır. Çalışmadan elde edilen verilere göre analitik ve nümerik çözümün birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Analitik ve nümerik çözümler arasındaki bu uyum oldukça önemlidir.

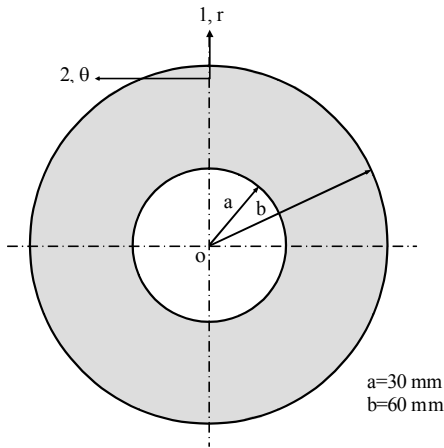
Çallıoğlu [10] uniform ve lineer gibi azalan veya artan sıcaklıklar etkisindeki dönen kompozit bir diskteki ısıl gerilmeleri hesaplamıştır. Dönen disk içerisindeki teğetsel ve radyal gerilmeler üç farklı sıcaklık profili için hesaplanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre düşük sıcaklıklarda tüm disk için, teğetsel gerilmelerin, radyal gerilmelerden daha büyük değerlerde olduğu fakat sıcaklık arttırıldığında diskin iç yüzeyinde azalma gösterdiği anlaşılmıştır. Bu çalışmada, Nylon 6 termoplastik matrise sahip, cam lifleri ile takviye edilmiş ve enjeksiyon yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiş bir kompozit malzemenin yapılmış, kompozit disk analiz edilmiştir. Çallıoğlu [11] tarafından yapılan benzer konudaki diğer bir çalışmada ise epoksi matrise sahip ve cam lifleri ile takviye edilmiş kompozit malzeme kullanılmıştır. Çallıoğlu ve arkadaşları [12], kompozit dönen bir disk için elastik-plastik gerilme analizini analitik olarak gerçekleştirmişlerdir. Plastik bölgenin dağılımını görmek için bir kaç farklı açısız hız dikkate alınmıştır. Çalışmada artık gerilmeler de hesaplanmıştır. Hem elastik gerilmeler hem de plastik gerilme analizi sonuçlarına göre diskin iç yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin, diskin dış yüzeyinde meydana gelen

gerilmelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Diskin iç yüzeyinde meydana gelen artık gerilmelerin değerlerinin, diskın dış yüzeyinde meydana gelen artık gerilmelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Altan ve Topçu [13], tarafından yapılan çalışmada, metal matrise sahip çelik tellerle takviye edilmiş kompozit dönen diskteki ısı gerilmeler, analitik çözüm ve FEM kullanılmak suretiyle hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, daha önceden genel olarak iki boyutlu olarak çalışılmış olan kompozit disklerdeki ısı gerilmelerin üç boyutlu olarak incelenmesidir. Çalışmada, termoplastik matrise sahip bir kompozit disk ve bu diske uygulanan sıcaklıklar ve açısal hız ile oluşturulan gerilme analizi gerçekleştirilmiştir.

2. PROBLEMİN TANIMLANMASI

Ortasında dairesel bir delik olan ve Şekil 2’de gösterilen iç yarıçapı $a=30$ mm ve dış yarıçapı $b=60$ mm olan bir termoplastik kompozit disk modellenmiştir. Daha önceki çalışmalarda modelleme ve çözümler iki boyutlu olarak yapılmıştır. Bu çalışmada ise kompozit diskın $t=4$ mm kalınlığında olduğu varsayılmış ve bu suretle, diskın modellenmesi ve dönme ile birlikte ısı gerilme probleminin çözümü üç boyutlu olarak yapılmıştır.

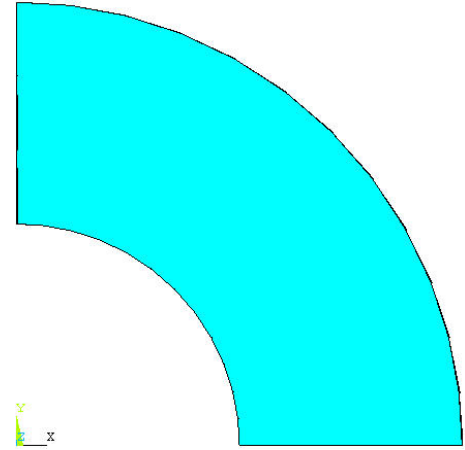


Şekil 2. Kompozit diskın boyutları

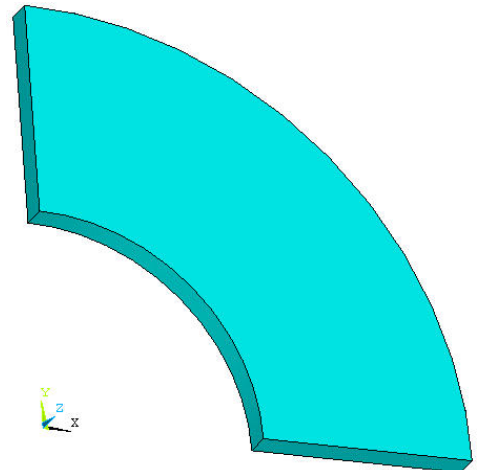
Termoplastik matrise sahip kompozit diskın bu nümerik çözümdeki malzeme özellikleri için literatürden yararlanılmıştır. Bu nedenle, daha önce Çallıoğlu [10] tarafından kompozit disklerle ilgili yapılan çalışmada kullanılan malzeme özellikleri kullanılmıştır. Bahsedilen çalışmadan alınan termoplastik kompozit malzemenin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir [10]. Çallıoğlu çalışmasında [10], bu kompozit malzemeyi, termoplastik (Nylon 6) matrisin içerisine %40 oranında konulan kısa cam fiberler ile enjeksiyon kalıplama yöntemiyle ürettiğini ifade etmektedir. Ürettiği bu malzemenin mekanik özelliklerini deneysel olarak bulmuştur (Tablo 1) [10]. Kompozit malzemenin yoğunluğu $\rho=1,6$ g/cm³, fiber doğrultusundaki çekme mukavemeti (X) 235 MPa ve ergime derecesi 280 °C’dir [10].

Tablo 1. Termoplastik kompozit malzemenin özellikleri [10]

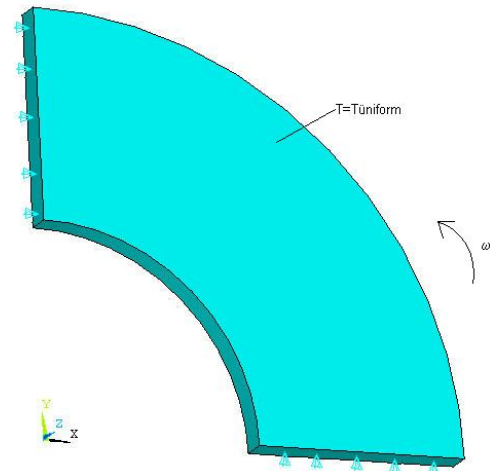
E1 (MPa)	E2 (MPa)	G12 (MPa)	ν_{12}	X (MPa)	α_1 (1/°C)	α_2 (1/°C)
20,000	12,000	8000	0,35	235	9×10^{-6}	114×10^{-6}



a) Disk modelin önden görünüşü



b) Disk modelin üç boyutlu görüntüsü

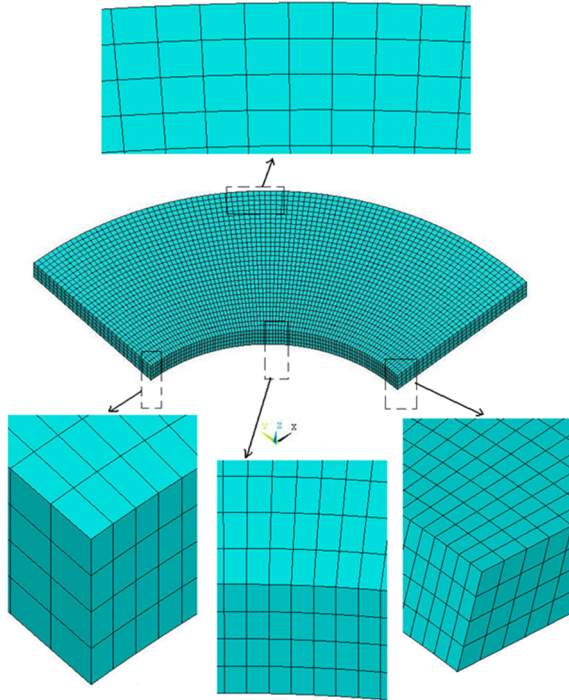


c) Sınır şartlarının uygulanması

Şekil 3. Üç boyutlu kompozit disk modeli ve sınır şartlarının uygulanması

Bu şekilden görüldüğü gibi diskin $\frac{1}{4}$ 'üne uygun olarak yapısal sınır şartları uygulanmıştır. Daha sonra kompozit disk üzerine ısıl yük olarak üniform sıcaklık yükü etki ettirilmiştir. Gerçek uygulamalarda tek yük yerine genellikle iki ve daha fazla yükün kompozit diskleri etki ettiği bilinmektedir. Problemin çözümünün gerçek şartlara daha uygun olması amaçlandığından dolayı, uygulanan üniform sıcaklık yüküne ilave olarak kompozit diskin bir dönme hareketine sahip olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle, sırasıyla belirli üniform sıcaklıklar etkisindeki kompozit diske, ikinci yük olarak çeşitli değerlerde açısal hızlar (ω) etki ettirilmiştir. Üniform sıcaklıklar olarak 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105 ve 115 °C değerlerinde ısıl yükler ve 10, 20, 30 rad/sn değerlerinde açısal hız uygulanmıştır.

Üç boyutlu kompozit diskin sonlu elemanlara bölünmesi amacıyla ANSYS arşivinde bulunan SOLID45 eleman tipi kullanılmıştır. Diskin sonlu elemanlara bölünmüş hali Şekil 4'te gösterilmiştir. Sonlu elemanların detaylarını daha iyi bir şekilde gösterebilmek için disk modeli üzerindeki bazı bölgeler büyütülmüştür. Şekil 4'ten açıkça görüldüğü gibi üç boyutlu dörtgen elemanlardan oluşan muntazam bir sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlara bölme işlemi sonucunda, üç boyutlu $\frac{1}{4}$ termoplastik matrisli kompozit disk modeli üzerinde, 11400 eleman ve 14480 düğüm noktası meydana getirilmiştir.



Şekil 4. Sonlu elemanlara ayrılmış üç boyutlu kompozit disk

3. BULGULAR

3.1. Normal Gerilme Bulguları

Üç boyutlu olarak modellenen ve analiz edilen diskin uygulanan her bir üniform sıcaklık yükü ve dönme hızlarına bağlı olarak elde edilen normal gerilmelerin değişimlerini gösteren, üç boyutlu grafikler, kompozit diskin iç ve dış yüzeyleri dikkate alınarak, sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu grafiklerden, normal gerilmelerin değerlerinin uygulanan üniform sıcaklık miktarındaki artışa ve uygulanan açısal hızdaki artışa bağlı olarak arttığı açıkça görülmektedir.

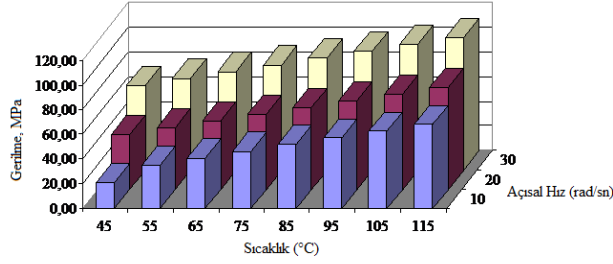
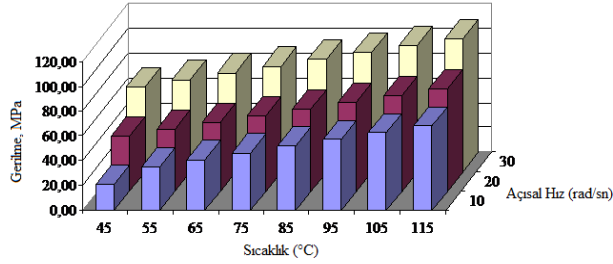
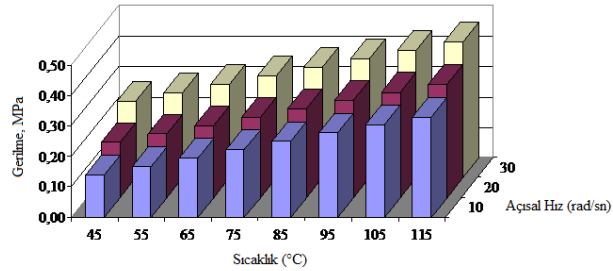
Uygulanan üniform sıcaklıklar dikkate alındığında, en düşük normal gerilmeler 45 °C üniform sıcaklık yükü uygulandığında oluşurken, en yüksek gerilmeler 115 °C üniform sıcaklık uygulandığında oluşmuştur. 10 rad/sn dönme hızına bağlı olarak, 115 °C üniform sıcaklık yükü için çekme ve basma şeklindeki en yüksek ısıl gerilme değerleri sırasıyla 67,71 MPa ve -37,22 MPa olarak hesaplanmıştır. 20 rad/sn dönme hızına bağlı olarak, 115 °C üniform sıcaklık yükü için çekme ve basma şeklindeki en yüksek ısıl gerilme değerleri sırasıyla 82,40 MPa ve -30,57 MPa olarak hesaplanmıştır. 30 rad/sn dönme hızına bağlı olarak, 115 °C üniform sıcaklık yükü için çekme ve basma şeklindeki en yüksek ısıl gerilme değerleri sırasıyla 106,88 MPa ve -19,49 MPa olarak hesaplanmıştır.

Uygulanan açısal hızlar dikkate alındığında en düşük değerli gerilmeler 10 rad/sn açısal hız için hesaplanırken, en yüksek değerli gerilmeler 30 rad/sn açısal hız uygulandığında hesaplanmıştır.

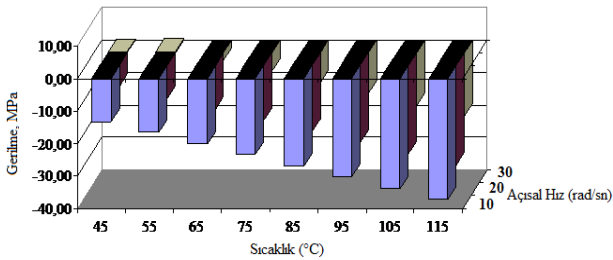
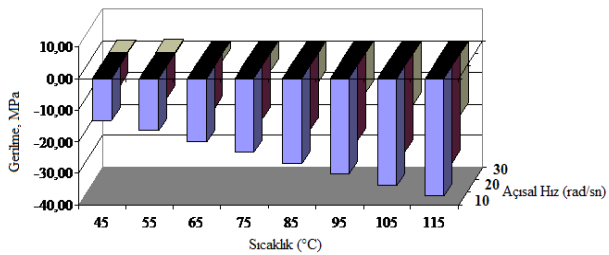
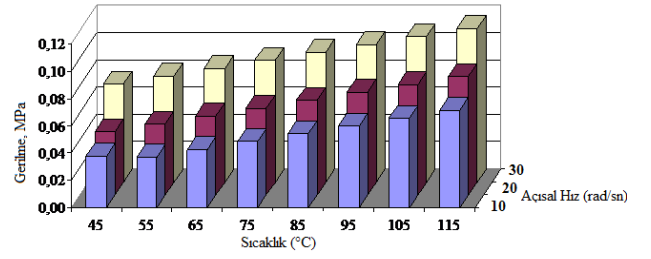
Şekil 5'e göre üç boyutlu termoplastik kompozit diskin, iç yüzeyinde her doğrultuda çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Radyal ve teğetsel doğrultularda meydana gelen gerilmeler oldukça yüksek değerlerdedir, bununla birlikte z-yönünde oluşan gerilmeler diğer doğrultularda elde edilen gerilmeler yanında çok küçüktür ve ihmal edilebilecek seviyededir.

Şekil 6'ya göre üç boyutlu termoplastik kompozit diskin, dış yüzeyinde radyal ve teğetsel doğrultularda basma gerilmeleri meydana gelmiş, fakat z-doğrultusunda çekme gerilmeleri meydana gelmiştir. Fakat z-doğrultusunda meydana gelen çekme gerilmelerinin değerleri, mutlak değer olarak dikkate alındığında, diğer doğrultularda meydana gelen gerilmelerden daha düşük değerlerdedir.

Şekil 5 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğinde, termoplastik kompozit diskin iç yüzeyinde radyal ve teğetsel doğrultularda meydana gelen çekme gerilmeleri, dış yüzeyinde meydana gelen basma gerilmelerinden mutlak değer olarak daha yüksek değerdedir. Ayrıca, kompozit diskin dış yüzeyinde ve z-yönünde meydana gelen çekme gerilmeleri (Şekil 6-c), kompozit diskin iç yüzeyinde ve z-yönünde meydana gelen çekme gerilmelerinden (Şekil 5-c) daha düşük değerlerdedir.

a) Radyal yöndeki en yüksek değerli normal gerilmeler (σ_r)b) Teğetsel yöndeki en yüksek değerli normal gerilmeler (σ_θ)c) z-yönündeki en yüksek değerli normal gerilmeler (σ_z)

Şekil 5. Termoplastik kompozit diskin iç yüzeyinde meydana gelen normal gerilmeler

a) Radyal yöndeki en yüksek değerli normal gerilmeler (σ_r)b) Teğetsel yöndeki en yüksek değerli normal gerilmeler (σ_θ)c) z- yönündeki en yüksek değerli normal gerilmeler (σ_z)

Şekil 6. Termoplastik kompozit diskin dış yüzeyinde meydana gelen normal gerilmeler

3.2. Elastik Şekil Değiştirme Bulguları

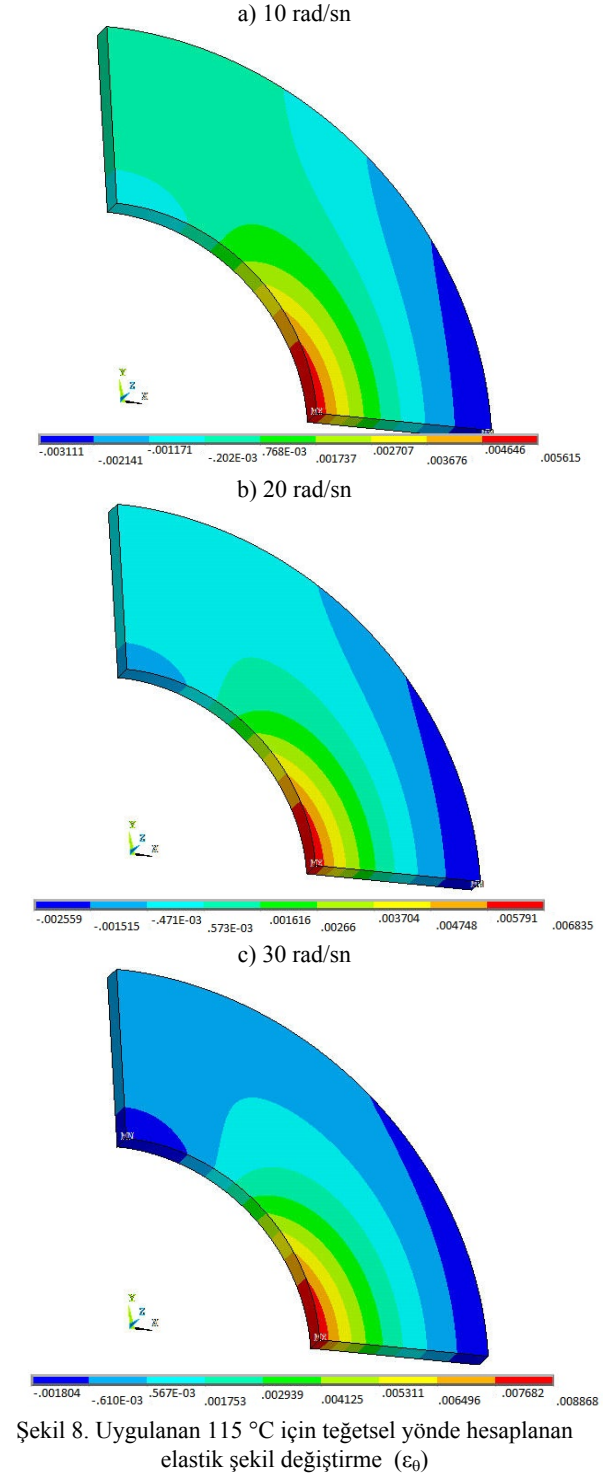
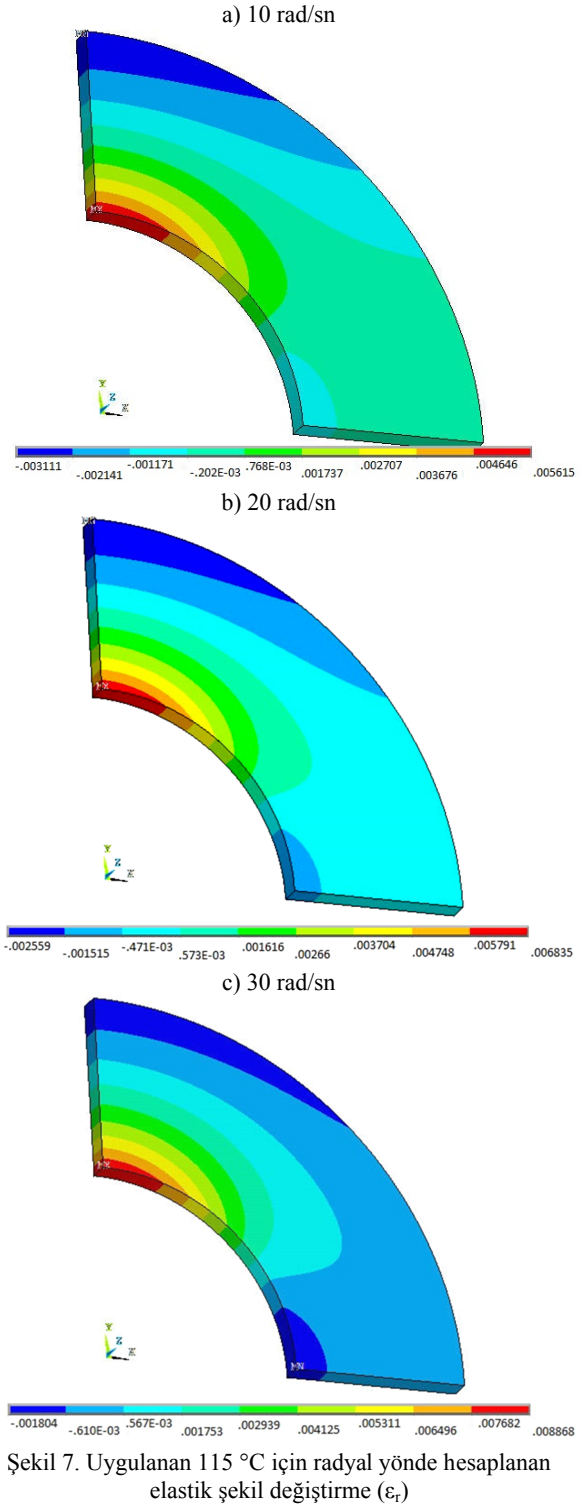
Yukarıda anlatıldığı gibi üç boyutlu termoplastik kompozit diske 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105 ve 115 °C değerlerinde sekiz farklı değerde uniform sıcaklıklar ve 10, 20, 30 rad/sn değerlerinde üç farklı değerde açısal hız uygulamıştır. Uygulanan her bir sıcaklık ve açısal hız için analizler sırasıyla tek tek yapılmıştır. Bu çalışmada, elastik şekil değiştirmeler verilirken, tüm grafiklerin kullanılması yerine, uygulanan en yüksek üniform sıcaklık değeri olan 115 °C ve üç açısal hız için elde edilen dağılımlar, radyal, teğetsel ve z-yönleri için sırasıyla Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.

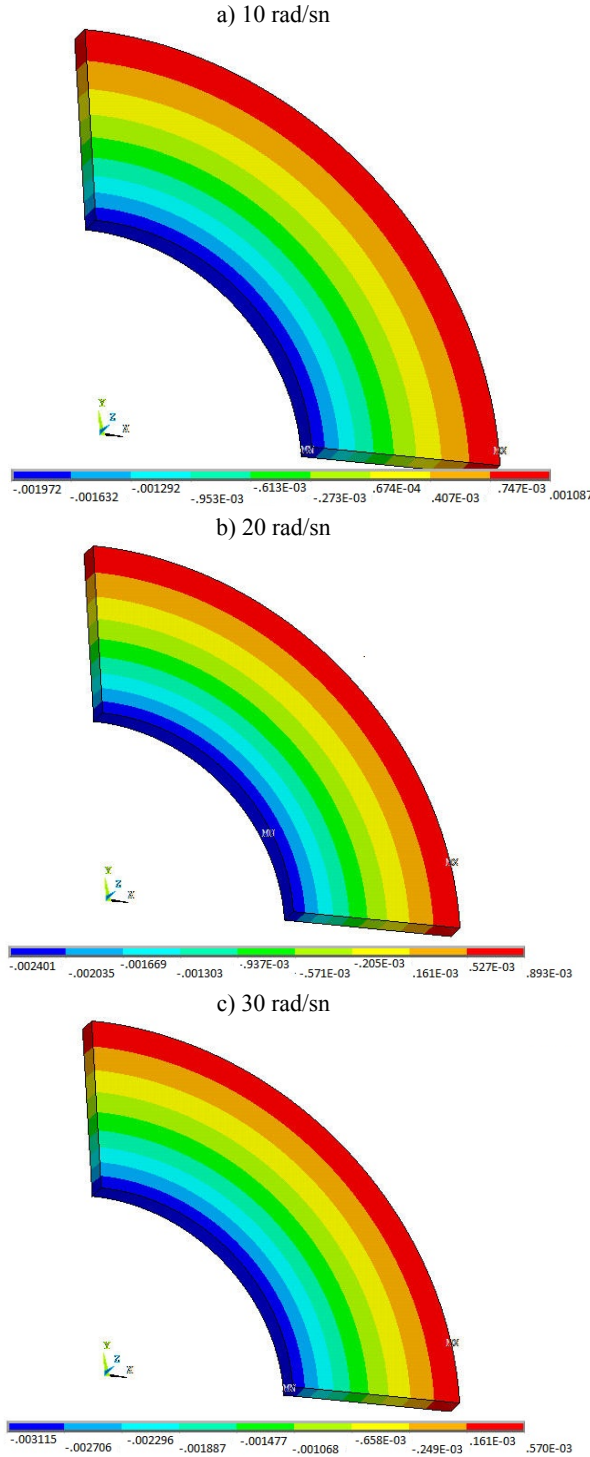
Bu şekillerden, z-yönünde meydana gelen elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin, radyal ve teğetsel yönlerde elde edilen elastik şekil değiştirmelerin değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Elastik şekil değiştirmelerin dağılımları, her yön için farklı şekilde oluşmaktadır. Ayrıca, z-yönündeki elastik şekil değiştirmelerin disk üzerindeki dağılımı, radyal ve teğetsel doğrultudaki elastik şekil değiştirme dağılımlarından oldukça farklıdır.

Açısal hızlar dikkate alındığında, elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin açısal hızın miktarındaki artışa bağlı olarak, artış gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, maksimum değerleri göz önüne alınmak suretiyle, en düşük değerli elastik şekil değiştirmeler 10 rad/sn açısal hız uygulaması için hesaplanırken, en yüksek değerli şekil değiştirmeler ise 30 rad/sn açısal hız uygulaması için hesaplanmıştır. Bu bulgunun, her üç yön içinde geçerli olduğu görülmektedir.

Üç boyutlu kompozit disk üzerinde hem çekme hem de basma şeklinde elastik şekil değiştirmeler meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bir başka şekilde ifade etmek gerekirse sıcaklık ve açısal hız etkisiyle, diskin bazı kısımları uzama gösterirken, bazı kısımları ise büzülme göstermektedir. Radyal ve teğetsel yönler için üç boyutlu diskin iç yüzeyinde çekme (uzama), diskin dış yüzeyinde ise basma (büzülme) meydana geldiği görülmektedir (Şekil 7 ve Şekil 8). Fakat z-yönünde, diskin iç yüzeyinde basma ve dış yüzeyinde ise çekme şeklinde şekil değiştirmeler meydana gelmiştir (Şekil 9). Analizde dikkate alınan malzemenin cam lifleri ile takviye edilmiş termoplastik matrisli bir kompozit malzeme olması (Tablo 1) ve dolayısıyla kompozit malzemelerin sahip olduğu anizotropik malzeme özelliklerinin, üç boyutlu kompozit diskin iç ve dış yüzeyinde, birbirinden farklı olarak meydana

gelen uzama ve büzülme davranışlarının temel nedeni olduğu değerlendirilmektedir.





Şekil 9. Uygulanan 115 °C için z-yönünde hesaplanan elastik şekil değişimi (ϵ_z)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, termoplastik matrise sahip ve çelik fiberlerle takviye edilmiş, ortasında dairesel delik bulunan bir kompozit disk problemi çözülmüştür. Önceki yapılan çalışmalardan farklı olarak kompozit disk üç boyutlu olarak modellenmiş ve üç boyutlu analiz edilmiştir. Oluşturulan disk modeline, üç boyuta uygun sınır şartları, sekiz farklı değerde uniform sıcaklıklar ve üç farklı değerde açısal hız uygulanmıştır. Uygulanan

uniform sıcaklıklar ve açısal hızların etkisiyle, kompozit diskte oluşan gerilmeler ve elastik şekil değişimleri hesaplanmış ve bunların disk üzerindeki dağılımları elde edilmiştir. Çözümde, ANSYS programı ve dolayısıyla sonlu elemanlar metodu kullanılmış, çözümler sonucunda aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

Uniform sıcaklık yükünün artışına bağlı olarak, gerilmeler ve elastik şekil değiştirmelerin değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Dolayısıyla, en düşük gerilmeler 45 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilirken, en yüksek değerli gerilmeler 115 °C uniform sıcaklık yükü için hesaplanmıştır.

Açısal dönme hızındaki artışa bağlı olarak gerilmelerin arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, uygulanan açısal hız dikkate alındığında, en düşük gerilmeler 10 rad/sn açısal hızlar için hesaplanırken, en yüksek değerli gerilmeler 30 rad/sn açısal hızlar uygulandığı zaman hesaplanmıştır. Açısal hızdaki artışın, gerilmelerin değerlerinde aşırı bir artışa neden olduğu görülmüştür.

Termoplastik matrise sahip olan üç boyutlu kompozit diskin anizotropik malzeme özelliklerinden dolayı hem radyal yönde hem de teğetsel yönde yüksek değerli gerilmeler oluşmuştur. Oluşan gerilmelerin, kompozit diskin iç ve dış yüzeyinde değişik formlarda meydana geldiği görülmüştür. Bir başka ifadeyle, üç boyutlu kompozit disk üzerinde hem çekme hem de basma şeklinde gerilmeler meydana gelmiştir.

Analizlerin üç boyutlu model için yapılmasından dolayı, z-yönünde de gerilmeler ve elastik şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Fakat z-yönü için hesaplanan gerilmeler ve elastik şekil değiştirmelerin değerlerinin, radyal ve teğetsel yönlerde hesaplanarlardan daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, modelleme aşamasında uygulanan sınır şartlarıdır. Elastik şekil değiştirmelerin z-yönündeki dağılımlarının, radyal ve teğetsel yönlerden oldukça farklı olduğu görülmüştür.

Elastik şekil değiştirmelerin miktarlarının da artan uniform sıcaklık artışına ve açısal hızdaki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Staab, G. H. 1999. Laminar Composites (1th ed.). US: Butterworth-Heinemann.
2. Tavman, İ.H., Turgut, A. Mikro ve nano boyutlu tanecik katkılı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, Proceedings of 11th International Materials Symposium, April 19-21, 2006, Denizli, Türkiye 570-575.
3. <http://www.bilgiustam.com/kompozit-malzemeler-hakkinda-hersey/#ixzz1dDnyEUCN> 09.11.2011. 21:20.
4. Tong, L., Mouritz, A.P. and Bannister, M. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, Elsevier, UK. (2002).
5. Sen, F. An investigation of thermal elasto-plastic stress analysis of laminated thermoplastic composites with a circular hole under uniform temperature loading, Science and Engineering of Composite Materials, 13, 213-224, (2006).
6. Sen, F. The estimation of elasto-plastic thermal and residual stresses in a thermoplastic composite disc under

- uniform temperature effect, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25, 1485-1498, (2006).
7. Sen, F. Elastic-plastic thermal stresses in a composite disc with multiple holes, *Advanced Composite Letters*, 16/3, 95-103 (2007).
 8. Kaynak, I., Sen, F. and Sayman, O. Thermo-elastic stress analysis of injection molding short glass fiber filled polymer composite disc with holes, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 27/11, 1117-1134, (2008).
 9. Sen, F., Pekbey, Y., Sayman, O. Elastic-plastic stress analysis of a thermoplastic composite disc under parabolic temperature distribution. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 14, 282-288, (2007).
 10. Çallıoğlu H. Thermal stress analysis of curvilinearly orthotropic rotating discs, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20, 357-369, (2007).
 11. Çallıoğlu H. Stress Analysis of an Orthotropic Rotating Disc under Thermal Loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23/17, 1859-1867, (2004).
 12. Çallıoğlu, H. Topçu, M. Tarakçılar A.R. Elastic-plastic stress analysis of an orthotropic rotating disc, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48, 9, 985-990, (2006).
 13. Altan, G. Topçu, M. Thermo-elastic stress of a metal-matrix composite disc under linearly-increasing temperature loading by analytical and FEM analysis, *Advances in Engineering Software*, 41, 604-610 (2010).
 14. ANSYS, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.
 15. Üçkardaş, A. Dönen ve Sıcaklık Etkisindeki Termoplastik Matrisli Kompozit Bir Diskteki Isıl Gerilmelerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).
 16. Moaveni, S. *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*, 2nd edition. Pearson Education. Inc. New Jersey. USA, (2003).