

## İÇ BASINÇ ALTINDAKİ BERKİTMELİ SİLİNDİRİK KABUKLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ÜÇ BOYUTLU BENZETİMLERİ

**Ezgi GÜNAY\***, **Abdurrahim NAZLIM** ve **Cengiz Hakan GÜR\*\***

\*Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi,  
Maltepe, 06570 Ankara, [ezgi@mmf.gazi.edu.tr](mailto:ezgi@mmf.gazi.edu.tr)

\*\*Metalurji ve Malzeme Mühensliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara  
[chgur@metu.edu.tr](mailto:chgur@metu.edu.tr)

### ÖZET

Bu çalışmada yanal/halka/ortotropik berkitmeli, katlı kompozit dairesel kesitli silindirlerin üç boyutlu sayısal benzetimleri, iki farklı sonlu elemanlar analiz kodu ile elde edilerek sunulmaktadır. Üç boyutlu olarak oluşturulan modellemeler, **COMPAN** sonlu elemanlar kodu ve ticari yazılım **ANSYS** ile oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yanal/halka/ortogonal berkitmeli dairesel kesitli silindirler, değişik üç boyutlu eleman çeşitleri kullanılarak oluşturulmuşlardır. Katlı kompozit silindirik kabukların davranışları, iç basınç yüklemeleri altında yerdeğışme, gerilme ve genleme dağılımlarından yararlanılarak incelenmiş, modelleme farklılıklarından doğan sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır. Berkitmesiz ana gövde ile değişik berkitmelere sahip kompozit silindirlerde, bu iki farklı bölgenin kesiştiği topuk olarak adlandırılan bölgelerde oluşan gerilme ve genleme yığılmaları ortalama maksimum değerler verilerek tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Katlı kompozit, berkitme, sonlu elemanlar yöntemi, silindir, iç basınç

### THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT SIMULATIONS OF STIFFENED CYLINDRICAL SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE

### ABSTRACT

In this study, comparisons of 3-D numerical simulations of stringer/ring/orthogonally stiffened laminated cylindrical shells are presented using two different finite element codes. The three dimensional simulation models were developed by previously developed finite element code **COMPAN** and commercial **FE** code **ANSYS** in the consideration of the comparison of results. Circular cross sectional stiffener/ring/orthogonally stiffened cylinders were generated by using various three

dimensional element types. The behaviours of laminated cylindrical shells were examined in terms of the displacement, stress and strain distributions for the internally pressurized load cases and doing so, the differences coming from the 3-D simulation models were discussed. Within the unstiffened cylinder and different stiffened cylinders, the developing localized stress and strain concentrations on the toe sections were determined.

**Keywords:** Laminated composite, stiffener, finite element analysis, cylinder, internal pressure

## 1.GİRİŞ

Silindirik berkitmeli kabuk yapılar inşaat ve makina mühendisliği alanlarında sıkça kullanılan yapılardandır. Makina motor parçaları, uçak/denizaltı gövdeleri, yağ tankerlerinin gövde yapıları önemli bazı örnekler arasında sayılabilir. Bunun yanı sıra, günümüzdeki çalışmalara ait kaynak taramaları göstermektedir ki, silindirik kabuk elemanların statik ve dinamik problem çözümlerine geniş olarak yer ayrılmaktadır. Yapılmakta olan bu çalışmalara, tasarım faktörü olarak kompozit malzemelerin yapılara kazandırdığı yüksek mukavemet ve hafif ağırlık özellikleri de eklenerek, tasarımlara ait yeni çözüm teknikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Fakat kaynak taramaları göstermektedirki, günümüzde yapılan çalışmaların içeriklerinin birçoğunu, izotropik malzeme kullanılarak berkitmeler ile güçlendirilmiş kabuk/plak yapı problemlerinin lineer/lineer olmayan çözümlerini oluşturmaktadır. Analizler, genellikle burkulmaya maruz bırakılmış veya dönmekte olan parçaların yanal yönde berkitmelerle güçlendirilmiş silindirik kabuk eleman titreşim problemlerinden oluşmaktadır. Araştırmacıların çoğu yanal-berkitmeli silindirik kabukları “ortotropik” teori [1] ile açıklamaktadırlar. Bu teorideki ana yaklaşım, berkitmelerin ortotropik imgesel ve bir tabakadan oluşturulmasıdır. Bu tabaka, yanal berkitmenin ortalama eğilme ve uzama özelliklerini taşıyan bir parça olarak çalışmaktadır ve berkitmenin genişliği, silindir kalınlığına göre oldukça küçük alınmaktadır. Cowper, Lindberg ve Olson [2], yaptıkları çalışmalarında silindirik yüzeyle statik analiz problemlerini berkitmesiz sığ kabuk elemanlar kullanarak çözmüşlerdir. Mustafa ve Ali [3], yanal berkitmeli silindirik kabuk elemanların doğal frekanslarını hesaplamak için enerji fonksiyonuna bağımlı bir metot önermektedirler. Reddy ve Starnes [1], çalışmalarında yanal berkitmeli silindirlerin burkulma problemlerini her kompozit katman için bularak, berkitmelerin etkisini ortalama bir değer olarak denklemlerine eklemişlerdir. Schokker, Kasagi ve Sridharan [4] çalışmalarında, atmosferik basınç altındaki içten halka şeklinde güçlendirilmiş berkitmeli kompozit kabukların, burkulma ve dinamik stabilite problemlerini çözmüşlerdir. Çalışmalarında, kalın kompozit kabukların üç boyutlu anizotropik elastisite formülasyonunu içeren bir modeli kullanmışlardır. Lee ve Kim [5] ise ortogonal berkitmeli silindirik kabukların titreşim analiz problemini enerji metodu ile çözmüşlerdir. Herakovich ve Mirzadeh [6], ısı ve mekanik yüklemeler altında yanal berkitmelere sahip silindirlerin lineer

statik analizini **ABAQUS** ile iki boyutlu olarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarından elde ettikleri sonuçlar göstermektedir ki, gerilme yığılmaları silindir gövdesi ile berkitmelerin silindirlerle birleştiği kısımlarda oluşmaktadır. Belirtilen çalışma, bu konuda yapılmış şekilsel açıklamalara sahip tek örnektir. Jiang, Bao ve Roberts [7] çalışmalarında, **ABAQUS** kodunu kullanarak ısıtılmış yanal berkitmeli ve berkitmesiz plakların analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizlerinde yalnızca bir yanal yüzeydeki eğilme ve burkulma yükleme durumları için çözümler yapılmıştır. Görülmektedir. Barut, Madenci, Tessler ve Starves [8], yeni geliştirdikleri sığ kabuk elemanlar ile yanal berkitmeli kiriş problemlerini mekanik yüklemeler altında oluşturmuşlardır. Yanal berkitmelerin geometrik merkezinden geçen eksene göre kayma değişimlerini tanımlayan denklemlere, gövde-berkitme etkileşimlerini de katarak dahil etmişlerdir. Günümüzde yapılan kaynak taramaları sonucunda görülen, berkitmeli kiriş/plak/kabuk yapıların SEY çözümlerinde aranan genel çözüm kriterleri aşağıdaki on ana basamakta incelenebilir;

- 1) Kayma kilitlenmesiz plak/kabuk yapılara ait ince/kalın teorileri de aynı anda dikkate alan ve aynı zamanda yanal kesme gerilme dağılım etkilerinin incelenebiliyor olması,
- 2) Eleman modellemelerinde her ağ noktasındaki serbestlik derecesinin problemin analizine en uygun şekilde seçilebiliyor olması,
- 3) Plak/kabuk yapıların çözüm aşamasında ince ve kalınlığa ait geometrik parametrelerinin lineer olmayan davranışları açıklıyan denklemler ile beraber modellenebiliyor olması,
- 4) Problemlerin en kolay şekilde modellenebiliyor olması,
- 5) Tabakalı kompozit plak teorileri ile genel kabuk teorileri arasındaki en uygun geçişin sağlanabiliyor olması,
- 6) Berkitmeleri (halka/yanal/ortogonal) geometrik tanımlamalar kullanarak teorilerin içerisinde kolaylıkla alınabiliyor olması,
- 7) Berkitmelerin ana gövde ile birleştiği topuk bölgelerinde gerilme/genleme/yerdeğiştirme dağılımlarının kolaylıkla açıklanabiliyor olması,
- 8) Berkitmeli kısımlarda kullanılmakta olan geometrik oranların, gövde kalınlığına göre oranlarının sonuçlara etkisinin araştırılabilmesi,
- 9) Katlı kompozit, berkitmeli (halka/yanal/ortogonal) (Şekil 1) eğri yüzeylerin üç boyutta tanımlanarak gösterilebiliyor olması,
- 10) Bölgesel eğrilik yarıçaplarının ve katlar arası gerilme yığılma dağılımlarının hesaplanabiliyorken, seçilen kırılma kriterlerinin de değişik uygulamalar için kullanılabilir olmasıdır.

Bu çalışma, araştırma sonuçları yukarıda özet şeklinde verilmekte olan analiz yöntemlerinin ana basamaklarının büyük bir kısmını kapsıyacak şekilde oluşturulan üç boyutlu çözümlerini kapsamaktadır. Daha önce geliştirilen SEY kodu **COMPAN** [9,11] ile ticari yazılım **ANSYS** [12] kullanılarak, üç boyutlu modellemeler ile berkitmelerin neden olduğu yerdeğiştirme ve ortalama gerilme dağılımları seçilen eleman çeşitleri esas alınarak açıklanmaya çalışılmıştır. Daha

önce yapılan çalışmalarda [9-11] ortogonal ve halka tipli berkitmelerin gerilme/genleme dağılımına etkileri dikkate alınmazken, bu çalışmada, berkitme ve gövdenin birleştiği topuk ara yüzeylerinde oluşan gerilme/genleme dağılımları ANSYS yardımıyla elde edilirken, görsel olarak ifade edilen bu ortalama dağılımlar kritik bölgelerde açıklanmıştır. Bunun yanısıra yine diğer çalışmalardan farklı olarak, kabuk yapıyı oluşturan berkitmeler ve ana gövdenin birleştiği kısımlardaki kritik yerdeğiştirmeler, yanal/halka/ortogonal katlı kompozit kabuklarda, iki farklı kodun sonuçları karşılaştırılarak sunulmaktadır.

## 2. ÜÇ BOYUTLU MODELLEMELER

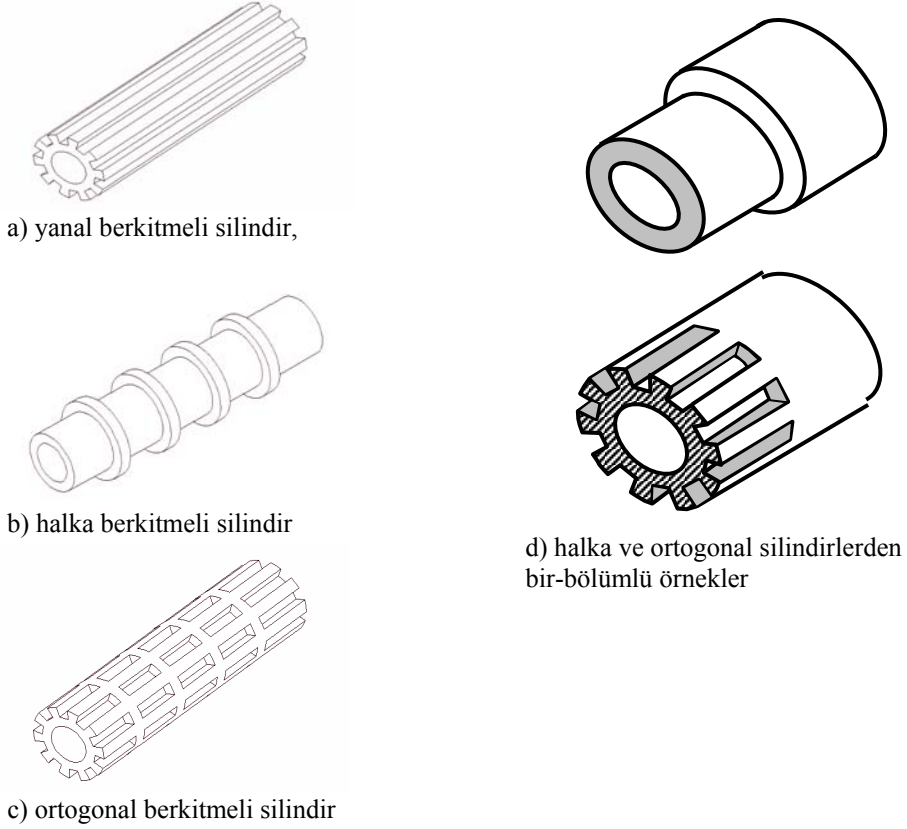
### 2.1 Kompozit Kabuk Elemanlar Kullanılarak Berkitmeli Yapıların SEY ile Analizi

Berkitmeli ve berkitmesiz tabakalı kompozit kabuklar için oluşturulan modeller, genel olarak üç boyutlu kısa silindirlere oluşturulmuş olup, berkitmelerin de eşit aralıklarla dizilmesi ile hazırlanmıştır. Kullanılan modeller dört ana basamak dahilinde Tablo 1’de açıklanmaktadır.

**Tablo 1.** Üç boyutlu modellerde kullanılan SEY eleman çeşitleri

Model No	Eleman Çeşidi	Sebestlik Derecesi	Kodun Adı
I	Plane82/Solid95	$u_x, u_y$	ANSYS
II	Plane42/Solid45	$u_x, u_y / u_x, u_y, \theta_{xy}$	ANSYS
III	Shell 91	$u_x, u_y, \theta_{xy}$	ANSYS
IV	Kayma-kilitlenmesiz eleman	$u_x, u_y, w, \theta_x, \theta_y$	COMPAN

Tablo 1 ile tanımlanmakta olan Model-I için çaprazlama fiber dizilişini oluşturabilecek elemanlar kullanılırken iki ve üç boyutlu yanal berkitmeli kompozit yapılar oluşturulmuştur. Model-II ile ise, yine iki ve üç boyutlu elemanların bir araya getirilmesiyle ortotropik kompozit kabuk yapı yanal berkitmeli olarak oluşturulmuştur. Model-III ile **Shell91** eleman tipi kullanılarak fiber yapı katlı kompozit kabuk yapıyı oluşturabilecek bir modelleme görülmektedir. Bu modelde, halka/yanal/ortogonal berkitmeli ve berkitmesiz kabuklar, katlar halinde fiber dizilişleri tanımlanarak oluşturulmuşlardır. Model-IV, yukarıda açıklanan modellerin **COMPAN** [12] kodu ile hazırlanan sayısal test aşamalarını içermektedir.



**Şekil 1.** Berkitmeli silindirelerin geometrik gösterimleri

Modeller beş ayrı yükleme şekliyle oluşturulmaya çalışılmıştır. İlk grup olarak kullanılan Model-I, yanal berkitmeli ortotropik katı kabuk yapıya ait bir örnektir ve sonuçlar Tablo 2. de açıklanmaktadır. Çaprazlama dizilmiş ve katlı ortotropik yapı gibi eşdeğer elastik sabitlere sahip bir modeldir. Kullanılan elastik sabit değerleri,  $E_{11} = E_{22} = 0.19 \times 10^8 \text{ lb/in}^2$ ,  $G_{12} = 0.82 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$ ,  $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.34$  olup,  $L = 20 \text{ in.}$ ,  $R = 19.5 \text{ in.}$  iken  $(d/b)$  oranı 0.201 olarak seçilmiştir. Problemden geometrik kalınlıklar  $t^{\text{berkitme}} = 1.53 \text{ in}$  iken  $t^{\text{gövde}} = 1.00 \text{ in}$  olarak alınmıştır. Aynı katlı kompozit yapı,  $[0^\circ]_6$  6-katlı olarak tanımlanmıştır. ANSYS-Shell 91 eleman seçimi ile elde edilen sonuçlar, COMPAN kodu sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2). Model-II ile tanımlanan ikinci grup çalışmayı, yanal berkitmeli silindire Solid45 elemanlar kullanılarak ve berkitmelerin 9, ana gövdenin ise 6 katlı kompozit olarak denemesi oluşturmaktadır.

**Tablo 2.** Berkitmeli ve berkitmesiz 3-boyutlu kabuk modellemeleri

YÜK $P$  $(lb/in^2)$	COMPAN Yanal- berkitme 8-eleman / kat Orta-düzlem  $w(in)$	ANSYS Yanal- berkitme Plane42 ve Solid45 800 ağ elemanı Orta-düzlem $w(in)$	ANSYS Yanal- berkitme Plane82 ve Solid95 600 ağ elemanı Orta-düzlem $w(in)$	COMPAN Berkitmesiz 8-eleman / kat Orta-düzlem  $w(in)$	ANSYS Berkitmesiz Shell 91 1100 eleman Orta-düzlem  $w(in)$
0.649	0.45337E-4	0.1629E-4	0.61830E-4	0.51150E-4	0.6089E-4
1.5	0.10479E-3	0.3571E-3	0.14290E-3	0.11822E-3	0.1141E-3
5.0	0.34928E-3	0.1190E-3	0.47640E-3	0.39407E-3	0.4690E-3
10.0	0.69857E-3	0.2381E-3	0.9530E-3	0.78813E-3	0.9384E-3

Bu kısımda kullanılan malzeme ve geometrik özellikler,  $E_{11} = E_{22} = 0.19 \times 10^8 \text{ lb/in}^2$ ,  $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.82 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$ ,  $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.24$ ,  $L = 20 \text{ in}$ .  $R = 19.5 \text{ in}$ .  $(d/b) = 0.13409$  olarak kullanılmıştır. Sonuçlar Tablo 3'te değişik basınç değerleri için verilmiştir. Üçüncü uygulama olarak ortogonal, yanal ve halka şeklindeki berkitmelerle güçlendirilmiş silindirlerin testleri verilmiştir. Katlı kabuk geometrisi  $[0^\circ]_6$  şeklinde dizilmiş olan  $t^{\text{berkitme}} = 0.25 \text{ in}$  ve  $t^{\text{gövde}} = 0.167 \text{ in}$  kalınlıktaki katlardan oluşturulmuştur. Seçilen fiber malzeme özellikleri ise  $E_{11} = 0.19 \times 10^8 \text{ lb/in}^2$ ,  $E_{22} = 0.12 \times 10^8 \text{ lb/in}^2$ ,  $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.32 \times 10^7 \text{ lb/in}^2$ ,  $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.24$  tür. Kabuk yapı orta katmanında elde edilen sehim karşılaştırmaları Tablo 4'te belirtilmektedir. Dördüncü grup olarak,  $[+45^\circ / -45^\circ]_3$  dizilişe sahip orthogonal/yanal/halka şeklindeki berkitmelere sahip fiber kompozit silindir,  $E_{11} = E_{22} = 0.192 \times 10^8 \text{ lb/in}^2$ ,  $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.82 \times 10^7 \text{ lb/in}^2$ ,  $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.25$  malzeme özellikleri ile yapılan test verilmiştir. Berkitmeli bölgeler  $[-45^\circ / +45^\circ]_3$  fiber dizilişli ve  $t^{\text{berkitme}} = 0.422 \text{ in}$  uzunluğundaki eşit kalınlıktaki katlar ile oluşturulurken, ana gövde (berkitmesiz)

**Tablo 3.** Üç boyutlu, yanal berkitmeli katlı kompozit silindir modelleri ve ortalama maksimum sehim değerleri

YÜK $P$ $(lb/in^2)$	COMPAN Orta-düzlem  $w(in)$	ANSYS Plane42 ve Solid45 Orta-düzlem  $w(in)$
2.0	0.14365E-3	0.10513E-3
4.0	0.28730E-3	0.21026E-3
4.5	0.32320E-3	0.23654E-3

bölgeler  $[+45^\circ / +45^\circ]_3$  fiber dizilişinde ve  $t^{gövde} = 0.167 \text{ in}$  eşit uzunluktaki kat kalınlıkları seçilerek oluşturulmuşlardır. Sonuçlar Tablo 5 ile verilmektedir. Beşinci grup çalışmayla, yukarıda belirtilen modellemelerle elde edilen kabuk orta merkezli maksimum sehim değerlerinin, değişik kompozit malzeme sabit değerleri için nasıl değişiklik gösterdiği açıklanmaya çalışılmaktadır. Bu kısım çalışmada, 6 katlı kompozit kullanılırken, kat kalınlıkları  $t^{berkitme} = 0.422 \text{ in}$  ve  $t^{gövde} = 0.167 \text{ in}$  olarak alınarak, sonuçlar Şekil 2'deki grafiklerle gösterilmektedir.

#### Veri grubu 1:

$$E_{11} = 0.192 \times 10^8 \text{ lb/in}^2, E_{22} = 0.124 \times 10^8 \text{ lb/in}^2, G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.32 \times 10^7 \text{ lb/in}^2, \\ \nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.24 .$$

#### Veri grubu 2:

$$E_{11} = 0.75 \times 10^7 \text{ lb/in}^2, E_{22} = 0.20 \times 10^7 \text{ lb/in}^2, G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.125 \times 10^7 \text{ lb/in}^2, \\ \nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.25 .$$

Altıncı grup çalışma,  $[0^\circ / +90^\circ]_3$  fiber açılı dizilişle, yanal ve halka şeklindeki berkitmelere sahip fiber kompozit silindire aittir.  $E_{11} = E_{22} = 0.192 \times 10^7 \text{ lb/in}^2$ ,  $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 0.82 \times 10^7 \text{ lb/in}^2$ ,  $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31} = 0.25$  elastik sabitleri için değişik iç basınç değerleri ile elde edilen çözümler yine Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo ve grafiklerle elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında, orta yüzey maksimum yerdeğiştirme değerlerinin belirli küçük hata yüzdeleri içerisinde aynı

**Tablo 4.** İç basınç altındaki ortogonal berkitmeli silindirlere ortalama maksimum sehim değerleri

YÜK $P$ $(\text{lb/in}^2)$	COMPAN 8-eleman/kat Yanal berkitme: $[0^\circ]_6$ Gövde: $[0^\circ]_6$ Orta-düzlem $w(\text{in})$	ANSYS Shell 91 200 eleman Yanal berkitme: $[0^\circ]_6$ Gövde: $[0^\circ]_6$ Orta-düzlem $w(\text{in})$	ANSYS Shell 91 Gövde: $[0^\circ/90^\circ]_3$ Orta-düzlem $w(\text{in})$
1.5	0.45542E-5	0.10314E-4	0.11127E-4
3.5	0.10626E-4	0.24065E-4	0.25962E-4
5.0	0.15180E-4	0.34379E-4	0.37089E-4
7.0	0.21253E-4	0.48130E-4	0.51924E-4
10.0	0.30361E-4	0.68758E-4	0.74177E-4
12.0	0.36434E-4	0.82510E-4	0.89012E-4
13.0	0.39470E-4	0.89385E-4	0.96430E-4
18.0	0.54651E-4	0.12376E-3	0.13352E-3

**Tablo 5.** Ortogonal/yanal/halka berkitmeli silindirlerde sehim değerleri (COMPAN)

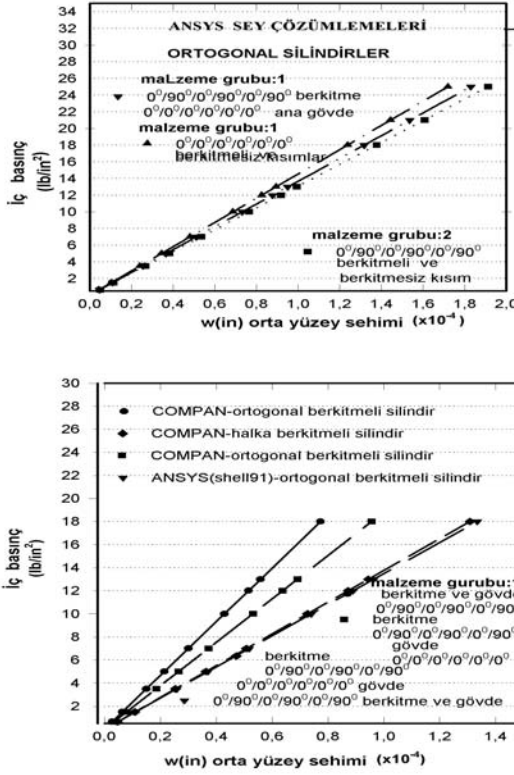
<b>Yanal berkitme : -45/+45/-45/+45/-45/+45</b> <b>Ana gövde : +45/+45/+45/+45/+45/+45</b>			
$P(lb/in^2)$	<b>Ortogonal berkitmeli silindir</b> $w(in)$	<b>Yanal berkitmeli silindir</b> $w(in)$	<b>Halka berkitmeli silindir</b> $w(in)$
0.649	0.59559E-3	0.73177E-3	0.75897E-3
1.5	0.13764E-2	0.16913E-2	0.17541E-2
3.5	0.32117E-2	0.39463E-2	0.40931E-2
5.0	0.45881E-2	0.56377E-2	0.58472E-2
7.0	0.64234E-2	0.78927E-2	0.81861E-2
9.0	0.91763E-2	0.11275E-1	0.11694E-1
12.0	0.11012E-1	0.13530E-1	0.14033E-1
13.0	0.11929E-1	0.14658E-1	0.15202E-1
18.0	0.16517E-1	0.20295E-1	0.21050E-1
21.0	0.19270E-1	0.23678E-1	0.24558E-1
25.0	0.22941E-1	0.28188E-1	0.29236E-1

kaldığını gözlemlemekteyiz. Ortalama maksimum yerdeğiştirme değerleri arasındaki farklılıklar, kullanılan eleman çeşitleri ve kayma gerilmesi kilitlenmesini önleyici metodların farklılığı [9-12] ile açıklanmaktadır. Sonuçlardan anlaşılacağı gibi, berkitme çeşitliliğine göre, kabuk yapılar iç basınç yüklemelerine farklı mukavemet göstermektedirler. Yerdeğişimleri açısından berkitmeli ve berkitmesiz bölgeler arasındaki farklılıklar, eğrilik yarıçaplarının bir bölgeden diğerine göre birden bire değişiyor olması nedeni ile iki boyutlu analizle açıklanması zor görülmektedir. Bu nedenle, aşağıdaki bölümde üç boyutlu ANSYS modellemeleriyle, berkitmeli bölgelerden berkitmesiz bölgelere geçişin sağlandığı dar topuk bölgelerinde oluşmakta olan gerilme/genleme dağılım gösterimleri ve ilgili kritik bölgeler belirlenmeye çalışılmıştır.

### 3. BERKİTMELİ SİLİNDİRİK KABUK YAPILARDA GERİLME VE GENLEME DAĞILIMLARI

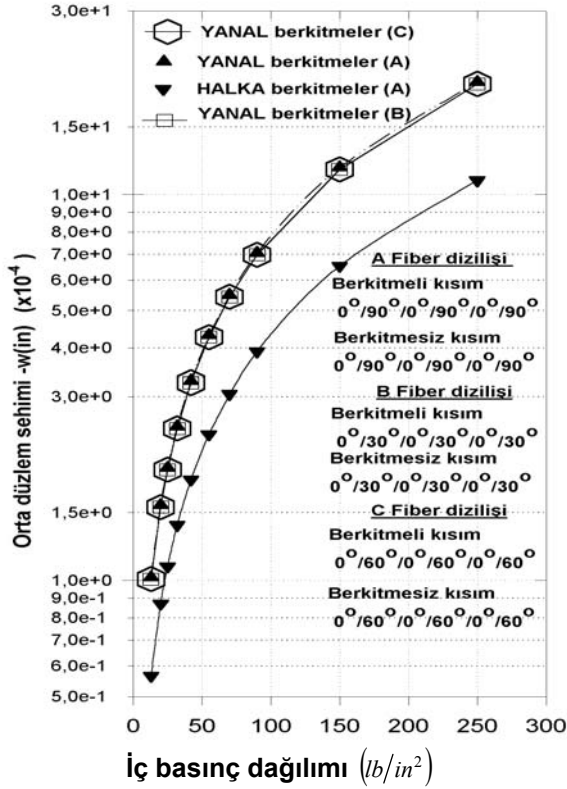
Bu bölümde, ANSYS ile oluşturulan üç boyutlu berkitmelere sahip kabuk silindirlerin, yedi farklı uygulama ile iç basınca karşı davranışları açıklanmaya çalışılmıştır. Kullanılan bütün geometrik ,malzeme ve yükleme değerleri verilerek bu konuda çalışacak olan araştırmacılara yol göstermek amaçlanmıştır.





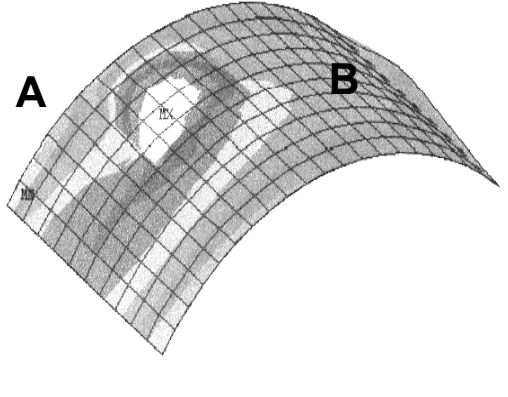
Şekil 2. SEY kodları ile çözümlenmeler

İlk sayısal uygulama, seçilen 6-katlı yanal berkitmelere sahip silindirin  $\left[30^\circ/60^\circ/90^\circ\right]_S$  fiber dizilişleri ile **Shell 91** elemanı ile oluşturularak yapılmıştır. İlgili tabaka kalınlıkları,  $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217 \text{ in}$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 \text{ in}$  değerlerindedir. Her tabakadaki elastik sabit değerleri  $E_y = 20 \times 10^5 \text{ lb/in}^2$ ,  $E_z = 20 \times 10^5 \text{ lb/in}^2$ ,  $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.25$ ,  $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 1.25 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$  olarak tanımlanarak  $25 \text{ lb/in}^2$  değerindeki iç basınç değeri için kabukta oluşan ortalama  $\sigma_x$  gerilme dağılımı Şekil 4 ile x-yönündeki yerdeğiştirme dağılımı  $u_x$  ise Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 4 ve Şekil 6 ANSYS grafiklerinde, "A" ve "B" harfleri ile belirtilen kısımlar, bütün şekillerde hep aynı bölgeleri göstermek kaydıyla kullanılarak ortalama-maksimum ve ortalama-minimum değerleri açıklanmaya çalışılmıştır. A-bölgesi kabuğun üst, B bölgesi ise alt kısımlarını göstermektedir. Şekil 6'dan da görüleceği üzere maksimum yerdeğiştirme B-bölgesinde berkitmelerin olmadığı kısımda oluşmaktadır. Katlı



**Şekil 3.** Yanal ve halka çerişindeki desteklendirilmiş silindir çözümlenmeleri

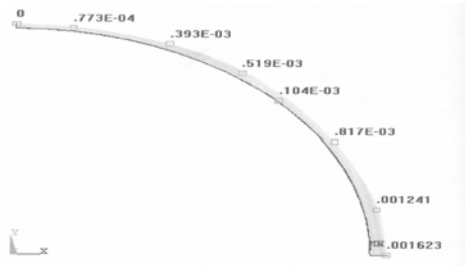
kompozit yapılar da fiber yönleri aynı zamanda asal yönler olarak da kabul edildiği ve her tabaka farklı fiber yönlerinde de oluşturulduğu için,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  ve diğer dağılımlardan, genel fikir verebilecek ortalama değerler olarak bahsedebiliriz. Burada, maksimum ortalama gerilme orta bölgede, berkitmelerle ana gövde arasında  $525.645 \text{ lb/in}^2$  değerini alarak belirlenmektedir. Aynı bölgede, en küçük genleme değerleri  $\varepsilon_y^A = -0.86 \times 10^{-4}$ ,  $\varepsilon_x^A = +0.923 \times 10^{-4}$  olarak belirlenmektedir. B-bölgesinde, maksimum genleme değerleri  $\varepsilon_y^B = +0.106 \times 10^{-3}$ ,  $\varepsilon_x^B = -0.162 \times 10^{-3}$  olarak elde edilmiştir. Bu durumda, berkitmeli kısımlar dış bükey (convex) eserken, ana gövdeye ait daha ince kısımlar iç bükey (convey) bir yüzey oluşturmaktadır. Herakovich ve Mirzadeh [6], çalışmalarında benzer davranışı  $[0^\circ/90^\circ]_s$ ,  $[90^\circ/0^\circ]_s$  ve  $[45^\circ/-45^\circ]_s$  fiber açılı dizilişler için elde ettikleri sonuçları şekillerle vermektedirler.



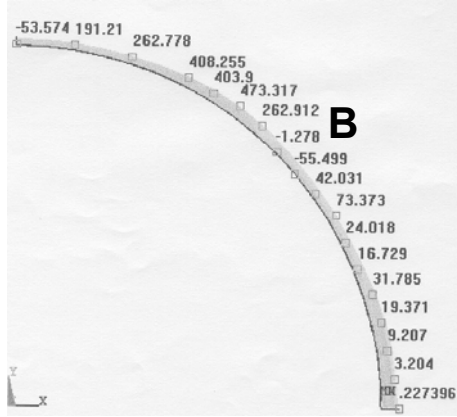
Şekil 4.  $[30^\circ/60^\circ/90^\circ]_S$  ortogonal berkitmeli tabakalı kompozit

ve  $\sigma_x$  gerilme dağılımı  $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$

İkinci sayısal uygulama, **Plane42** ve **Solid45** eleman çeşitleri ile oluşturulan, yanal berkitmelere sahip ortotropik silindirik kabuk içindir (Şekil 7, Şekil 8). Modelde kullanılan elastik sabit değerleri,  $E_x = E_y = E_z = 0.19 \times 10^8 lb/in^2$   $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.34$  ve uygulanan iç basınç değeri,  $p_{int} = 25 lb/in^2$  dir. x-yönünde bulunan kritik ortalama gerilmeler  $\sigma_x^{max} = 427.822 lb/in^2$ ,  $\sigma_x^{min} = -173.035 lb/in^2$  iken y-yönündeki genleme değerleri  $\epsilon_y^{max} = 0.301 \times 10^{-4}$  ve  $\epsilon_y^{min} = -0.993 \times 10^{-5}$  olarak bulunmuştur. Bu değerlerden de görüleceği gibi ortalama  $\epsilon_y^{max}$  genleme değeri dış bükey eğri yüzey üzerinde, ortalama genleme  $\epsilon_y^{min}$  ise iç bükey yüzey üzerinde görülmektedir. Üçüncü sayısal uygulama, **Shell91** ağ elemanları ile ortogonal berkitmelere sahip antisimetrik,  $[0^\circ/90^\circ]_3$  çaprazlama dizilmiş fiber kompozit kabuk üzerinde



Şekil 5.  $[30^\circ/60^\circ/90^\circ]_S$  ortogonal berkitmeli tabakalı kompozit üzerinde  $u_x$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$ )



Şekil 6.  $[30^\circ/60^\circ/90^\circ]_S$  ortogonal berkitmeli tabakalı kompozit ve

$\sigma_x$  gerilme dağılımı  $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217 in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 in.$

gerçekleştirilmiştir.  $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217 in$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 in$ ,  $E_x = 0.19 \times 10^8 lb/in^2$ ,

$E_z = 0.13 \times 10^8 lb/in^2$ ,  $E_z = 0.13 \times 10^8 lb/in^2$ ,  $G_{xy} = G_{xz} = 0.82 \times 10^6 lb/in^2$

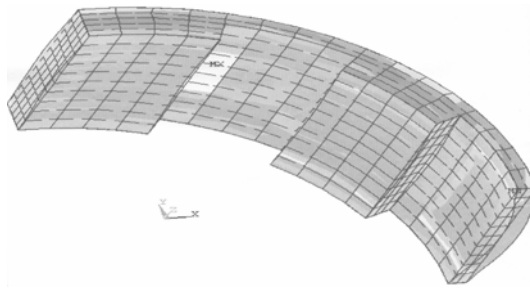
$G_{yz} = 0.52 \times 10^5 lb/in^2$  ve  $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.24$  tanımlamaları ile uygulanan iç basınç

değeri  $p_{int} = 0.649 lb/in^2$  iken, elde edilen  $u_x$ ,  $\sigma_x$ ,  $u_y$  dağılımlarına ait grafikler 9, 10 ve 11 numaralı şekillerde gösterilmektedir. Grafiklerden de görüleceği üzere, berkitmeler silindirin esnemesini büyük ölçüde durdururken aynı anda bu bölgelerde gerilme yoğunlaşmaları yaratmaktadır.

Dördüncü uygulama, yine **Shell 91** eleman tanımlaması ile, 6-katlı ortogonal berkitmeli silindirlere aittir.  $[0^\circ/90^\circ]_3$  fiber dizilişi için  $t_{kat}^{berkitme} = 0.25 in$ ,

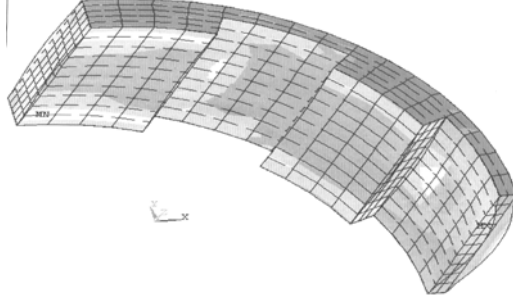
$t_{kat}^{gövde} = 0.167 in$  olarak tanımlanmıştır. Burada,  $E_x = E_y = E_z = 0.24 \times 10^7 lb/in^2$ ,

$\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.25$ ,  $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 0.95 \times 10^6 lb/in^2$  dir. Uygulanan iç basınç dağılımı

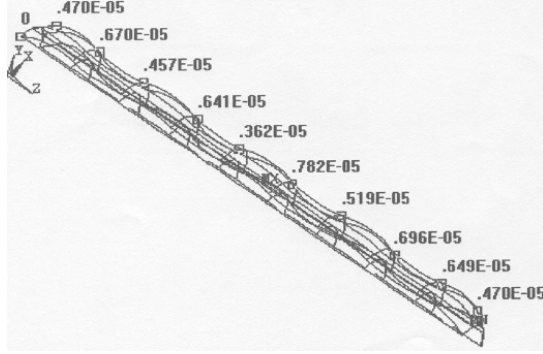


Şekil 7. Yanal berkitmeli silindirde  $\sigma_x$  gerilme dağılımı

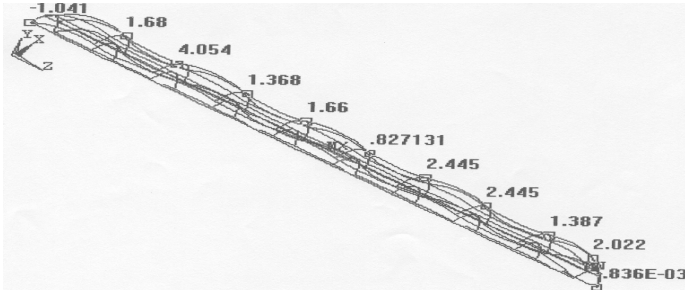
değeri  $p_{int} = 25 \text{ lb/in}^2$  dir.  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  dağılımları Şekil 12, 13, 14, 15 yardımıyla verilmektedir.



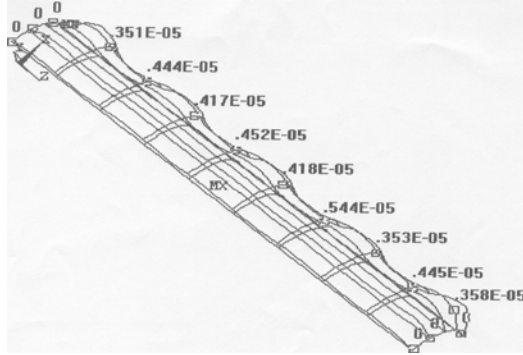
Şekil 8. Yanal berkitmeli silindirde  $\epsilon_x$  genleme dağılımı



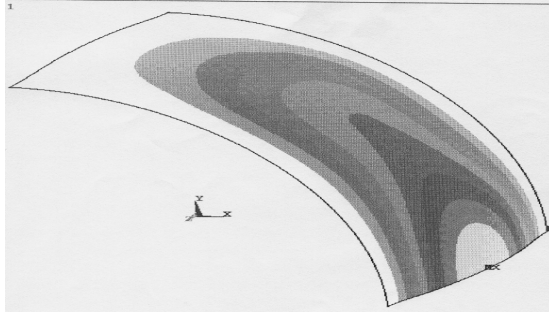
Şekil 9.  $[0^\circ/90^\circ]_3$  4-parçalı ortogonal berkitmelere sahip  $u_x$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217 \text{ in.}$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 \text{ in.}$ )



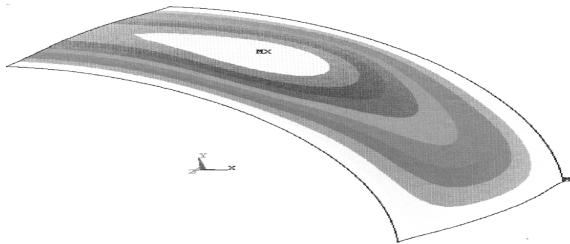
Şekil 10.  $[0^\circ/90^\circ]_3$  ortogonal berkitmeli silindir ve  $\sigma_x$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217 \text{ in.}$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 \text{ in.}$ )



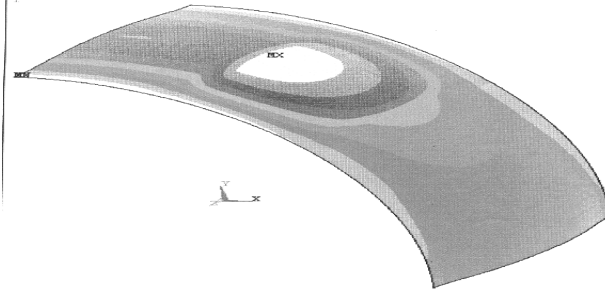
**Şekil 11.**  $\left[0^\circ/90^\circ\right]_3$  4-parçalı ortogonal berkitmelere sahip  $u_y$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$ )



**Şekil 12.**  $\left[0^\circ/90^\circ\right]_3$  1-parçalı ortogonal berkitmeye sahip silindirde  $u_x$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.25in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$ )

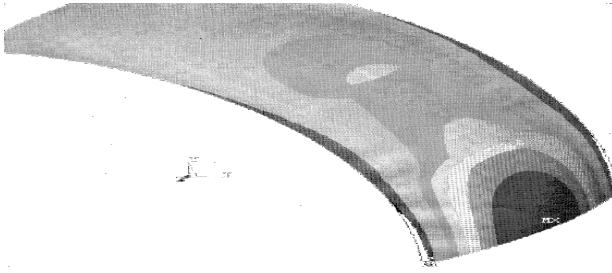


**Şekil 13.**  $\left[0^\circ/90^\circ\right]_3$  1-parçalı ortogonal berkitmeye sahip silindirde  $u_y$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.25in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$ )



Şekil 14.  $[0^\circ/90^\circ]_3$  1-parçalı ortogonal berkitmeli silindirde

$\sigma_x$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.25 in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 in.$ )



Şekil 15.  $[0^\circ/90^\circ]_3$  1-parçalı ortogonal berkitmeli silindirde  $\sigma_y$

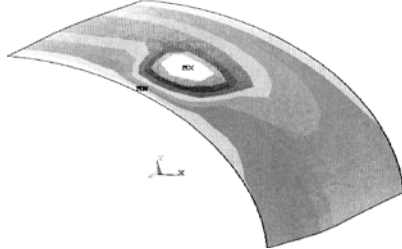
dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.25 in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 in.$ )

Beşinci sayısal uygulama, birinci uygulamada kullanılmış olan elastik sabit değerleri ve  $[0^\circ/90^\circ]_3$  fiber dizilişleri ile oluşturulan silindirik yapıda uygulanmıştır (Şekil 16,17,18). Ortogonal olarak yerleştirilen berkitmeler ile elde edilen sonuçlardan, maximum gerilme  $\sigma_x^A = 336.507 lb/in^2$  olarak görülürken, minimum değer B bölgesinde oluşmuştur. Ortalama maksimum yerdeğiştirme A-bölgesinde  $u_y^A = 0.212 \times 10^{-3} in$  değerini alırken,  $u_x^B = 0.379 \times 10^{-3}$  minimum değerine de B bölgesinde ulaşılmaktadır. Altıncı gruptaki uygulamalar, yine **Shell91** elemanları ile  $[30^\circ/-30^\circ]_3$  dizilişine sahip silindirlerin berkitmesiz ve aynı zamanda yanal/ortogonal berkitmeli silindirlerin  $p_{int} = 0.649, 0.25, 35.0 lb/in^2$  basınç değerleri altındaki tepkilerini vermektedir. Kat kalınlıkları  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 in.$ ,  $t_{kat}^{berkitme} = 0.25 in.$  ve  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 in.$ ,  $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217 in.$  olan iki ayrı grup geometri belirlenmiştir. Burada  $E_x = E_y = E_z = 19.2 \times 10^6 lb/in^2$ ,  $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.25$  ve

$G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 0.82 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$  elastik sabit değerleri kullanılmıştır. Sonuçlar Tablo 6 ve Tablo 7'de özetlenmektedir.

**Tablo 6.** Yanal ve ortogonal berkitmelere sahip iç basınç yükü altındaki kompozit silindirik gövdelerin ortalama maksimum yerdeğiştirme/gerilme dağılımları (ANSYS-  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 \text{ in.}$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.25 \text{ in.}$ )

İç Basınç Yükü	(I) : Maksimum sehim değerleri	(I) : Maksimum gerilme değerleri	(II) : Maksimum yerdeğiştirmeler	(II) : Maksimum gerilme değerleri
$P$	$[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$ Shell91 1100 eleman Yanal berkitmeli	$[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$ Shell91 1100 eleman Yanal berkitmeli	$[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$ Shell91 1100 eleman Ortogonal berkitmeli	$[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$ Shell91 1100 eleman Ortogonal berkitmeli
$(\text{lb/in}^2)$	$(\text{in})$	$(\text{lb/in}^2)$	$(\text{in})$	$(\text{lb/in}^2)$
0.25	$u_{x\max}^B = 0.738E-5$ $u_{y\max}^A = 0.537E-5$ $u_{z\max}^{A-B} = 0.3105E-7$	$\sigma_{x\max}^A = 0.406E+1$ $\sigma_{y\max}^B = 0.504E+1$ $\sigma_{z\max}^{A-B} = 0.399E+1$	$u_{x\max}^B = 0.734E-5$ $u_{y\max}^A = 0.547E-5$ $u_{z\max}^{A-B} = 0.322E-6$	$\sigma_{x\max}^A = 0.438E+1$ $\sigma_{y\max}^B = 0.580E+1$ $\sigma_{z\max}^{A-B} = 0.517E+1$
35.0	$u_{x\max}^B = 0.1035E-3$ $u_{y\max}^A = 0.7510E-3$ $u_{z\max}^A = 0.4347E-5$	$\sigma_{x\max}^A = 568.033$ $\sigma_{y\max}^B = 706.111$ $\sigma_{z\max}^{A-B} = 559.849$	$u_{x\max}^B = 0.103E-2$ $u_{y\max}^A = 0.765E-3$ $u_{z\max}^A = 0.452E-4$	$\sigma_{x\max}^A = 612.969$ $\sigma_{y\max}^B = 811.392$ $\sigma_{z\max}^{A-B} = 723.236$
150.0	$u_{x\max}^B = 0.737E-2$ $u_{y\max}^A = 0.5367E-2$ $u_{z\max}^A = 0.3105E-3$	$\sigma_{x\max}^A = 4057$ $\sigma_{y\max}^B = 5044$ $\sigma_{z\max}^{A-B} = 3999$	$u_{x\max}^B = 0.441E-2$ $u_{y\max}^A = 0.328E-2$ $u_{z\max}^A = 0.194E-3$	$\sigma_{x\max}^A = 2627$ $\sigma_{y\max}^B = 3477$ $\sigma_{z\max}^{A-B} = 3100$



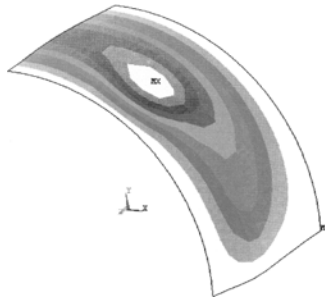
**Şekil 16.**  $[0^\circ / 90^\circ]_3$  1-parçalı ortogonal berkitmeli silindirde  $\sigma_x$

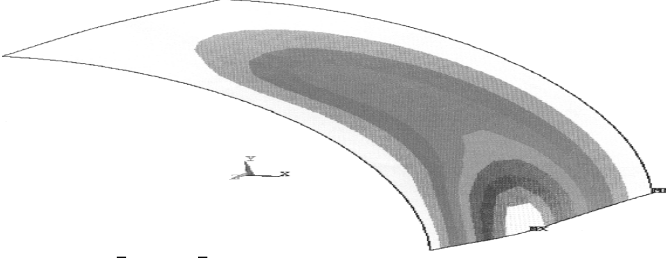
dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217 \text{ in.}$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167 \text{ in.}$ )



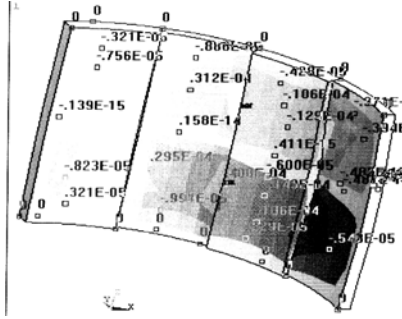
**Tablo 7.** Ortogonal berkitmelere ve berkitmesiz gövdeye sahip silindirlerin iç basınç altındaki ortalama maksimum yerdeğiştirme/gerilme dağılımları(ANSYS-  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.4217in.$ )

İç Basınç Yüğü $P$  ( $lb/in^2$ )	(III) : Maksimum yerdeğiştirmeler  $[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$  Shell 91 1100 eleman Ortogonal berkitmeli gövde (in)	(III) : Maksimum gerilmeler  $[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$  Shell 91 1100 eleman Ortogonal berkitmeli gövde ( $lb/in^2$ )	(IV) : Maksimum yerdeğiştirmeler  $[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$  Shell 91 1100 eleman Berkitmesiz-ana gövde (in)	(IV) : Maksimum gerilmeler  $[30^\circ / -30^\circ / 30^\circ]_s$  Shell 91 1100 eleman Berkitmesiz-ana gövde ( $lb/in^2$ )
0.25	$u_{xmax}^B = 0.721E-5$ $u_{ymax}^A = 0.467E-5$ $u_{zmax}^{A-B} = 0.137E-6$	$\sigma_{xmax}^A = 0.366E+1$ $\sigma_{ymax}^B = 0.499E+1$ $\sigma_{zmax}^{A-B} = 0.503E+1$	$u_{xmax}^B = 0.805E-5$ $u_{ymax}^A = 0.761E-5$ $u_{zmax}^{A-b} = 0.446E-6$	$\sigma_{xmax}^A = 0.523E+1$ $\sigma_{ymax}^B = 0.560E+1$ $\sigma_{zmax}^{A-B} = 0.495E+1$
35.0	$u_{xmax}^B = 0.895E-3$ $u_{ymax}^A = 0.579E-3$ $u_{zmax}^A = 0.253E-4$	$\sigma_{xmax}^A = 519.427$ $\sigma_{ymax}^B = 753.611$ $\sigma_{zmax}^{A-B} = 704.776$	$u_{xmax}^B = 0.113E-2$ $u_{ymax}^A = 0.107E-2$ $u_{zmax}^{A-b} = 0.625E-4$	$\sigma_{xmax}^A = 732.609$ $\sigma_{ymax}^B = 784.405$ $\sigma_{zmax}^{A-B} = 693.112$
150.0	$u_{xmax}^B = 0.383E-2$ $u_{ymax}^A = 0.248E-2$ $u_{zmax}^A = 0.108E-3$	$\sigma_{xmax}^A = 2226$ $\sigma_{ymax}^B = 3230$ $\sigma_{zmax}^{A-B} = 3020$	$u_{xmax}^B = 0.483E-2$ $u_{ymax}^A = 0.457E-2$ $u_{zmax}^{A-b} = 0.268E-3$	$\sigma_{xmax}^A = 3140$ $\sigma_{ymax}^B = 3362$ $\sigma_{zmax}^{A-B} = 2970$

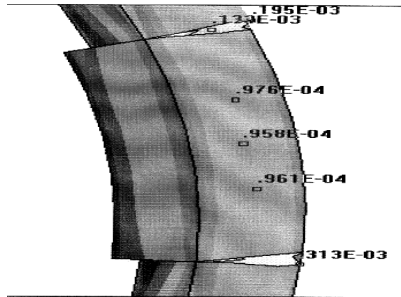
**Şekil 17.**  $[0^\circ / 90^\circ]_3$  1-parçalı ortogonal berkitmelere sahip silindirde $u_y$  dağılımı ( $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$ )



Şekil 18.  $[0^\circ/90^\circ]_3$  1-parçalı ortogonal berkitmeli silindirde  $u_x$  dağılımı  
( $t_{kat}^{berkitme} = 0.4217in.$ ,  $t_{kat}^{gövde} = 0.167in.$ )



Şekil 19. Solid 45 eleman kullanılarak oluşturulan yanal berkitmeli silindirde  $\sigma_z$  dağılımı



Şekil 20. Solid 45 eleman kullanılarak oluşturulan yanal berkitmeli silindirde  $u_x$  dağılımı

#### 4. SONUÇLAR

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sayısal çalışmaların sonuçları, genellikle çözülmekte olan problemde kullanılmakta olan ağ sistemine, eleman çeşitlerine ve içerisinde kullanılmakta olan diğer sayısal çözüm metodlarına bağlıdır. Burada anlatılan fiber kompozit malzeme kapsamlı çalışmada, sonuçları etkileyen faktörlere ek olarak, katlardaki fiber açılarına, her katta kullanılan fiber elastik malzeme sabitlerine, katman sayısına, geometrik faktörlere, yükleme çeşitlerine ve büyüklüklerine bağlı olarak değişmektedir. Yapılan bu çalışma ile halka/yanal/ortogonal geometrilerdeki destekleyici yapılar olarak tanımlanan berkitmelerin, kabuk yapılar üzerinde yarattığı tepkimeleri iç basınç, fiber malzeme özellikleri, fiber açıları ve seçilen modelleme parametrelerine bağlılığı gösterilmeye çalışılmıştır. Üç boyutlu ANSYS çözümlenmeleri ile COMPAN (COMPOSITE ANALYSIS) kodunun ortogonal ve halka şeklindeki berkitmeler için bu çalışma için yeniden düzenlenmiş geometrik tanımlamaları kullanarak, elde edilen sayısal test sonuçları karşılaştırılmaktadır. Belirlenen başlıca sonuçlar aşağıdaki dokuz ana basamakta özetlenmektedir;

- Berkitmeler silindirik kabuklarda oluşan yerdeğiştirmelerini istenilen yönlerde sınırlayabilmektedirler.
- Berkitmeli yapılar arasında, yanal ve halka tiptekilerde oluşan yerdeğiştirme değerleri ortogonal olanlara göre 1-10% oranında daha büyük değerdendirler. Bu büyüklükler aynı zamanda katların kalınlıklarına, fiber yönlerine, katlarda kullanılan elastik sabit değerlerine de bağlı olarak değişmektedir.
- $d/b$  oranı genel olarak silindirik berkitmeli yapıların genel deformasyonlarını iç basınç değerinin büyüklüğüne bağlı olarak değiştirmektedir.
- Her üç farklı berkitme uygulamasında da, güçlendirilmiş bu kısımlarla ana gövde arasında kalan birleşme topuk bölgelerinde gerilme yığılmalarının oluşurken aynı bölgelerde minimum yerdeğiştirme değerlerine erişilmesine de neden olmaktadır.
- Yanal ve halka şeklindeki berkitmelere sahip silindirik yüzeyler, iç basınç altında büyük iç ve dış bükey eğriler göstermektedir. Bu nedenle  $d/b$  oranı kullanılarak, silindirik yapı üzerindeki gerilme yığılmalarının homojen ve minimum düzeyde dağıtılmasının sağlanabilirliği gerekmektedir.
- Bu çalışmada kullanılan  $d/b$  oranlarına göre (0.2, 0.13), gerilme dağılımlarının yapı üzerinde berkitmeler üzerinden aktarımı beklenirken, yığılmalar genel olarak ana gövde üzerinde yoğunlaşmaktadır.
- ANSYS kodu ile yapılan çalışmalarda elde edilen en iyi benzetim, katlı kompozit modellemesinde kullanılan Shell91 [11,13] eleman seçimi ile elde edilmiştir. Tablo 2 ve bu değerlere ait şekiller (Şekil 19, 20) ile Shell91 elemanlı çözümlenmeler karşılaştırıldığında, Solid45, Solid95 tipli elemanların, gerilme ve yerdeğiştirme sonuçlarını verirken, topuk bölgelerinde basamak fonksiyornu şeklinde değerlendirme yaptığı görülmektedir. Shell91 tipli elemanlar gerilme ve

yerdeğiştirme dağılımlarını homojen bir yayılım içerisinde verebilmektedir (Şekil 18,18).

## SEMBOLLER

$E_{11}$	Fibere paralel, 1-yönündeki Young Modülü ( $lb/in^2$ )
$E_{22}$	Fibere dik, 2-yönündeki Young Modülü ( $lb/in^2$ )
$G_{12}, G_{13}, G_{23}$	1-2, 1-3 ve 2-3 düzlemlerindeki kayma modülleri ( $lb/in^2$ )
$d$	berkitmenin kalınlığı (in)
$b$	berkitmenin genişliği (in)
$L$	silindir uzunluğu (in)
$p$	iç basınç ( $lb/in^2$ )
$R$	silindir yarıçap uzunluğu (in)
$t^{berkitme}$	berkitmelerin kat kalınlığı (in)
$t^{gövde}$	ana gövde kat kalınlığı (in)
$u_x, u_y, w$	x, y ve z eksenleri boyunca sehim (in)
$\theta_x, \theta_y$	x ve y eksenleri etrafında dönme (rad)
$\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}$	1-2, 2-3, 3-1 düzlemlerindeki Poisson oranı
$\sigma_x, \sigma_y$	x ve y yönlerindeki gerilme dağılımları ( $lb/in^2$ )

## KAYNAKLAR

1. Reddy J.N, Starnes J.R. "General Buckling of Stiffened Circular Cylindrical Shells According to a Layer-wise Theory", **Computers&Structures**, 1993; 49 (4): 605-616.
2. Cowper G.R., Lindberg G.M., Olson M.D. "A Shallow Shell Finite Element of Triangular Shape", **Int.J.Solids Structures**, 1970; 6: 133-1156.
3. Mustafa, B.A.J., Ali R. "An Energy Method for Free Vibration Analysis of Stiffened Circular Cylindrical Shells", **Computers&Structures**, 1989; 32 (2): 355-363.
4. Schokker, A., Kasagi, A., Sridharan, S., "Dynamic Interactive Buckling of Ring Stiffened Composite Shells", **AIAA Journal**, 1995; 33 (10): 1954-1962.
5. Lee, Y.S., Kim, Y.W., "Vibration Analysis of Rotating Composite Cylindrical Shells with Orthogonal Stiffeners", **Computers&Structures**, 1998; 69: 271-281.
6. Herakovich, C.T., Mirzadeh, F., "Thermal-Mechanical Response of Stiffened Composite Cylinders", **ASME Mechanics Pan-America Appl Mech Rev**, 1997; 50 (11): 87-92.

7. Jiang, W., Bao, G., Roberts, J.,” Finite Element Modelling of Stiffened and Unstiffened Orthotropic Plates”, **Computers&Structures**, 1997; 63 (1): 105-117.
8. Barut, A., Madenci, E., Tessler, A., Starves, J. H. “A New Stiffened Shell Element for Geometrically Nonlinear Analysis of Composite Laminates”, **Computers&Structures**, 2000; 77: 11-40.
9. Günay, E., Erdem, A.Ü., “A New Heterosis Plate Element for a Geometrically Nonlinear Finite Element Analysis of Laminated Plates”, **Computers&Structures**, 1997; 65 (6): 819-828.
10. Günay, E., “Finite Element Analysis of Laminated Stiffened Cylindrical Shallow Shell”, **Applied Composite Materials**, 1999; 6: 381-395.
11. **ANSYS** User’s manual for revision 5.0, Vol.III, Elements, December 23, 1992.
12. Günay. E., Nazlım., A., Gür, C.H., “A Finite Element Model for Deformation of Laminated Cylinders with Orthogonal Stiffeners Under Internal Pressure”, **Proc. of 10<sup>th</sup> International Metallurgy and Materials Congress**, pp.1299-1310, May, İstanbul, 2000.
13. **ANSYS** Theory reference manual for revision, 5.0, Vol.IV, December 23, 1992.