

KOMPOZİT YAPILARIN SONLU ELEMANLARDA ALT MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harun DEMİR

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ömer SOYKASAP

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2013

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KOMPOZİT YAPILARIN SONLU ELEMANLARDA ALT
MODELLENMESİ**

Harun DEMİR

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ömer SOYKASAP

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2013

TEZ ONAY SAYFASI

Harun DEMİR tarafından hazırlanan “Kompozit Yapıların Sonlu Elemanlarda Alt Modellenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

İMZA

- Danışman** : Prof. Dr. Ömer SOYKASAP
AKÜ, Mühendislik Fakültesi
- Başkan** : Prof. Dr. Ömer SOYKASAP
AKÜ, Mühendislik Fakültesi
- Üye** : Doç. Dr. Abdurrahman KARABULUT
AKÜ, Teknoloji Fakültesi
- Üye** : Yrd. Doç. Dr. Şükrü ÜLKER
AKÜ, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

KOMPOZİT YAPILARIN SONLU ELEMANLARDA ALT MODELLENMESİ

Harun DEMİR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer SOYKASAP

Büyük boyutlu ve karmaşık yapıdaki tasarımların Abaqus ve diğer sonlu elemanlar programları ile analiz yapılması oldukça problem oluşturmaktadır. Zamanla farklı malzeme türlerinin de geliştirilmesiyle birlikte simülasyon sorunları giderek daha da artış göstermiş, yeni teknikler geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Bu çalışmada Abaqus programından faydalanılarak, son yıllarda geliştirilen sonlu elemanlarda alt modelleme tekniğinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. İlk olarak üç boyutlu kiriş modelinde üç farklı delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılarak ve bu teknik kullanılmadan modelleme yapılmıştır. Yapılan statik analizler karşılaştırıldığında; Von-Mises gerilmeleri ve reaksiyon kuvvetleri her iki modelleme içinde yaklaşık aynı değerlerde gerçekleşmiş, çözüm zamanlarına bakıldığında ise alt modelleme tekniği daha avantajlı olarak kısa sürede çözüme ulaşılmasına olanak vermiştir. Daha sonra, kompleks yapıya sahip kabuk olarak modellenen kompozit reflektör anten beş farklı etek kalınlığında alt modelleme tekniği yardımıyla daha kısa sürede ve daha kolay olarak modellenmiştir. Kompozit reflektör antenin analizleri sonucunda ise Von-Mises gerilmeleri, reaksiyon kuvvetleri ve Tsai-Wu hasar kriteri açısından incelenmiştir. Sonuç olarak üç boyutlu kiriş ve kabuk yapılı kompozit reflektör için alt modelleme tekniğinin uygulanabilir olduğu gözlemlenmiştir.

2013, xiii + 81 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar, alt modelleme, kompozit malzemeler, reflektör anten

ABSTRACT
M.Sc Thesis

SUBMODELING OF COMPOSITE STRUCTURES USING FINITE ELEMENTS

Harun DEMİR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer SOYKASAP

It is hard to analyze large and complex structures with Abaqus and other finite element programs. The simulation problems have increased with the new material types in time and the development of new techniques have become an obligation for this purpose.

In this study, by utilizing Abaqus program, the applicability of finite element sub-modeling technique that was developed in recent years, is investigated. In the first step, modelling was achieved by using sub-modeling technique and without sub-modeling technique in three-dimensional beam model with a hole. When the static analyses were compared, Von-mises stresses, and reaction forces were obtained approximately at the same values in both modeling. When the solution times are considered, sub-modeling technique has achieved to the solution in less time than the other technique. In the second step, a composite reflector antenna that was modeled as complex structure, was modelled in less time and more easily. The analysis results of the composite reflector antenna was examined in terms of Von-Mises stress, reaction forces, and Tsai-Wu damage criterion. In conclusion, it is decided that sub-modeling technique can be applied to three-dimensional beam and the shell structured composite reflector, as well as other complex structures.

2013, xiii + 81 Pages

Key Words: Finite elements, submodeling, composite materials, reflector antenna

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ömer SOYKASAP, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Grv. Dr. şükrü KARAKAYA'ya, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca manevi desteğinden dolayı eşime teşekkür ederim.

Harun DEMİR
AFYONKARAHİSAR, 2013

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	3
2.1 Kompozit Malzemeler.....	10
2.1.1 Kompozit Teknolojisinin Gelişimi	11
2.1.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	11
2.1.3 Kompozit Türleri ve Sınıflandırılması.....	12
2.1.3.1 Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler.....	13
2.1.3.2 Yapım Şekillerine Göre Kompozitler	15
2.1.4 Karbon Fiber Üretimi	16
2.2 Sonlu Elemanlar Metodu.....	17
2.2.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Kısa Tarihi	17
2.2.2 Uygulama Alanları	18
2.2.3 Problemlerde Uygulanması.....	19
2.2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri	19
2.2.5 Abaqus/CAE Sonlu Elemanlar Paket Programı.....	20
2.2.5.1 Programın bölümleri.....	21
2.2.5.2 Ön işlem süreci (Preprocessor).....	23
2.2.5.3 Programın çalıştırılması.....	24
2.2.5.4 Katı modelin oluşturulması	25
2.2.5.5 Malzeme girişi.....	26
2.2.5.6 Adım (Step) menüsü	27
2.2.5.7 Etkileşim (Interaction) tanımlanması	28
2.2.5.8 Sınır şartların ve yüklerin tanımlanması ve parçaya uygulanması	29
2.2.5.9 Parçanın küçük parçalara (ağ) bölünmesi	30
2.2.5.10 İş (Job) menüsü.....	31

2.2.5.11 Analiz sonrası işlemler (Postprocessor) menüsü	32
2.3 Sonlu Elemanlarda Alt Modelleme.....	34
2.3.1 Genel Olarak Alt Modelleme.....	34
2.3.2 Alt Modelleme Teknikleri.....	34
2.3.2.1 Düğüm Tabanlı Alt Modelleme	34
2.3.2.2 Yüzey Tabanlı Alt Modelleme	35
2.3.3 Alt Modelleme Tekniğinin Uygulanışı.....	36
2.3.3.1 Genel Model Analiz.....	36
2.3.3.2 Alt Modelin Oluşturulması.....	37
2.3.3.3 İstenmeyen Bölgelerin Çıkartılması	38
2.3.3.4 Alt Model Sınır Koşullarının Oluşturulması	39
2.3.3.5 Alt Model İçin Yük Oluşturulması	42
2.3.3.6 Alt Model Üzerinde Değişiklik Yapılması.....	43
2.3.3.7 Alt Model Analizi	44
2.3.3.8 Alt Modelde Elde Edilen Sonuçların Kontrolü	44
3. ANALİZ VE HESAPLAMALAR.....	46
3.1 Üç Boyutlu Kiriş Analizi.....	46
3.1.1 Problemin Geometrik Modeli ve Sınır Koşulları	46
3.1.2 Kirişin Malzeme Özellikleri	49
3.1.3 Sonlu Elemanlar Modeli.....	49
3.1.4 Bulgular.....	50
3.1.4.1 Gerilme Analizi.....	50
3.1.4.2 Reaksiyon Kuvvetleri.....	58
3.1.4.3 Analiz Sonuçlarına Göre Çözüm Zamanlarının Karşılaştırılması	59
3.2 Kabuk Yapılı Kompozit Reflektör Anten	61
3.2.1 Problemin Geometrik Modeli ve Sınır Koşulları	61
3.2.2 Kompozit Reflektörün Malzeme Özellikleri	63
3.2.3 Sonlu Elemanlar Modeli.....	64
3.2.4 Bulgular	64
3.2.4.1 Gerilme Analizi	65
3.2.4.2 Reaksiyon Kuvvetleri	69
3.2.4.3 Hasar Analizi.....	71
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	76
4.1 Sonuçlar	76
4.2 Öneriler	78

5. KAYNAKLAR.....	79
5.1 İnternet Kaynakları	80
ÖZGEÇMİŞ.....	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

E	Elastik modül
G	Kayma Modülü
F	Kuvvet
ν	Possion Oranı
X	Reflektör anten çapı
t	Reflektör anten etek kalınlığı
X_A	Reflektör anten ofset miktarı
t_{ref}	Reflektör anten tabaka kalınlığı
D	Üç boyutlu kiriş delik çapı
UR1	X yönündeki dönme serbestliği
U_x	X yönündeki serbestlik
ρ	Yoğunluk
UR2	Y yönündeki dönme serbestliği
U_y	Y yönündeki serbestlik
UR3	Z yönündeki dönme serbestliği
U_z	Z yönündeki serbestlik

Kısaltmalar

CPU	Central Processing Unit (Merkezi İşlem Birimi)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
m	Metre
mm	Minimetre
N	Newton
PAN	Polyacrylonitrile
s	Saniye
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
ULSI	Ultra Large Scale Integration (Ultra Büyük Ölçekli Entegre)
VMS	Von Mises

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. ULSI (ultra büyük ölçekli entegre)	4
Şekil 2.2. Alt model ve kaba modelin alt modelleme tekniği kullanılarak karşılaştırılması	4
Şekil 2.3. VMS (MPa) gerilmeleri (a. Kaba model, b. Alt model)	5
Şekil 2.4. Tek eksenli uzamaya maruz kalan kompozit-kompozit yapılı model (a. Tam görünüş, b. Kesit görünüş).....	6
Şekil 2.5. Küresel ve yerel geometrilerin görünümü (a. Üst, b. Yan).	7
Şekil 2.6 Global model ve global model üzerinde oluşturulan alt model.....	7
Şekil 2.7 Farklı modeller için CPU zamanlarının karşılaştırılması.....	8
Şekil 2.8 ABAQUS programı ile alt modelleme tekniği (a. Genel model, b. Alt model).....	9
Şekil 2.9 Bir boyutlu bir sonlu eleman	19
Şekil 2.10 Üçgen tipi sonlu eleman örneği	20
Şekil 2.11 İki boyutlu değişik dörtgen geometri biçimli sonlu elemanlar	20
Şekil 2.12 Abaqus/CAE ana penceresi	22
Şekil 2.13 Abaqus/CAE açılış penceresi	24
Şekil 2.14 Abaqus/CAE katı model oluşturma.	25
Şekil 2.15. Abaqus/CAE çizim alanı	26
Şekil 2.16 Malzeme girişi	27
Şekil 2.17 Adım (Step) menüsü	28
Şekil 2.18 Etkileşim menüsü	29

Şekil 2.19	Yükleme ve sınır şartlar menüleri	29
Şekil 2.20	Parçanın dilimlenmesi	30
Şekil 2.21	Eleman tipi seçme menüsü	31
Şekil 2.22	İş menüsü	32
Şekil 2.23	Sonuçların görüntülenmesi menüsü	33
Şekil 2.24	İş dosyası oluşturma	36
Şekil 2.25	Genel modelin kopyalanması.....	37
Şekil 2.26	Alt model oluşturma.....	38
Şekil 2.27	Alt model için sınır koşulu oluşturma	40
Şekil 2.28	Sınır koşullarını düzenleme iletişim kutusu	41
Şekil 2.29	Alt model için yük oluşturmak	42
Şekil 2.30	Yük düzenleme iletişim kutusu.....	43
Şekil 3.1	Genel model.....	46
Şekil 3.2	Alt modeller (a. 0,04 m delik çaplı alt model, b. 0,04 m delik çaplı alt model, c. 0,04 m delik çaplı alt model)	47
Şekil 3.3	Alt modelleme tekniği uygulanacak üç boyutlu kiriş	48
Şekil 3.4	Üç boyutlu kiriş için sınır koşulları.....	48
Şekil 3.5	Üç boyutlu kirişin ağ yapısı.....	49
Şekil 3.6	0,04 delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm.....	51
Şekil 3.7	0,04 delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılarak yapılan çözüm.....	51
Şekil 3.8.	0,04 m delik çapı için kesit halinde gerilmeler (a. alt modelli çözüm, b. alt modelsiz çözüm)	52
Şekil 3.9	0,05 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm .	53

Şekil 3.10 0,05 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılarak yapılan çözüm...54	
Şekil 3.11 0,05 m delik çapı için kesit halinde gerilmeler (a. alt modelli çözüm, b. alt modelsiz çözüm)..... 55	55
Şekil 3.12 0,06 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm.56	
Şekil 3.13 0,06 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılarak yapılan çözüm.... 56	
Şekil 3.14 0,06 m delik çapı için kesit halinde gerilmeler (a. alt modelli çözüm, b. alt modelsiz çözüm) 57	57
Şekil 3.15 Üç boyutlu kiriş için maksimum reaksiyon kuvvetleri 58	58
Şekil 3.16 Üç boyutlu kiriş üzerinde meydana gelen maksimum reaksiyon kuvvetleri. 59	
Şekil 3.17 Ofset reflektör tasarım parametreleri.....62	62
Şekil 3.18 Reflektör anten modeli (a. Genel model, b. Alt model, c.Çözümlenen model).....62	62
Şekil 3.19 Reflektör antenin sınır koşulları..... 63	63
Şekil 3.20 0,11 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri..... 66	66
Şekil 3.21 0,22 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri..... 66	66
Şekil 3.22 0,33 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri..... 67	67
Şekil 3.23 0,44 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri..... 67	67
Şekil 3.24 0,55 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri..... 68	68
Şekil 3.25 Eteksiz olarak modellenen kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri.....69	69

Şekil 3.26 Maksimum reaksiyon kuvvetlerinin oluştuğu A ve B düğümleri.....	70
Şekil 3.27 Reflektör anten üzerinde meydana gelen maksimum reaksiyon kuvvetleri..	71
Şekil 3.28 0,11 etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu.....	72
Şekil 3.29 0,22 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu.....	73
Şekil 3.30 0,33 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu.....	73
Şekil 3.31 0,44 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu.....	74
Şekil 3.32 0,55 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu.....	74
Şekil 3.33 Eteksiz olarak modellenen kompozit reflektör anten için Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kaba ve alt modelleme karşılaştırılması.....	5
Çizelge 3.1 Üç boyutlu kiriş için malzeme özellikleri.....	49
Çizelge 3.2 Üç boyutlu kiriş için sonlu elemanlar modeli.....	50
Çizelge 3.3 Üç boyutlu kiriş modeli için analiz sonuçları ve çözüm zamanları.....	61
Çizelge 3.4 T300B/1160 tek tabakalı dokumalı kompozitin malzeme özellikleri.....	64
Çizelge 3.5 Reflektör anten için sonlu elemanlar modeli.....	64

1.GİRİŞ

Günümüzde büyük boyutlu ve karmaşık tasarımların abaqus ve diğer sonlu elemanlar programları ile analiz yapılması oldukça problem oluşturmaktadır. Zamanla farklı kompozit malzeme türlerinin de geliştirilmesiyle beraber çeşitli sorunlar oluşmaya başlamıştır. Bu sorunları ortadan kaldırmak için çeşitli tekniklere başvurulmuştur. Alt modelleme yöntemi de büyük boyutlu ve kompleks yapıdaki farklı malzemelerden oluşan tasarımların simüle sorunlarını ortadan kaldırmak ve daha az zamanda doğru sonuçlar elde etmek için etkili bir metottur.

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Bugün taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme evlerimizi oluşturmaktadır. Kompozit malzemeye en güncel örneklerden biri de kağıttır. Selüloz ve reçineden oluşan kâğıt, günümüzde yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak insanlığın hizmetine sunulmuştur. Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara ulaşmıştır (İnt. Kyn.1). Kompozit malzemelerin kullanım alanlarının artmasıyla birlikte çeşitli analiz ve simüle sorunları ortaya çıkmıştır. Bu çıkan simüle sorunlarını gidermek için çeşitli sonlu elemanlar yöntemleri ve teknikler geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan sayısal bir metottur. Günümüzde bilinen sonlu elemanlar metodu ise, 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Top tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada, perçin bağlantılı profil ve üçgen iç gerilmeli tabaka şeklindeki sonlu elemanların bir uçağın gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarı ile kullanılabileceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi olmuştur (Bedir 2007).

Sonlu elemanlarda geliştirilen yöntemlerden alt modelleme tekniği de önceden yapılmış genel çözümlere dayalı yerel bölgelerde detaylı çözümler sağlar. Sadece bu yerel bölgede hesaplama yapılarak aşırı bilgisayar zamanı almadan doğruluk derecesi iyi sonuçlara ulaşmamıza imkân verir.

Bu çalışmada Abaqus programından faydalanılarak, belirleyeceğimiz üç boyutlu alüminyum kiriş ve kompozit reflektör anten modeli üzerinde alt modelleme tekniğinin avantajları araştırılacaktır. Yapılan statik gerilme analizleri sonucunda alt modelleme tekniğinin; Von-Mises gerilmeleri, simülasyon zamanına etkisi, yerel bölgelerde verdiği ayrıntılı sonuçlar, reaksiyon kuvvetleri ve elde edilen Tsai-Wu hasar durumu sonuçlarının doğruluğu değerlendirilecektir.

2.LİTERATÜR BİLGİSİ

Hızla gelişen günümüz teknolojisinde çeşitli simüle sorunları ile karşılaşılmaktadır. Son yıllarda özellikle kompleks ve büyük boyutlu modellerin az zamanda ve doğru sonuçlar elde ederek analiz edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bundan dolayı farklı yeni teknikler geliştirilerek çözümlenmesi daha zor olan modeller çeşitli yöntemlerle basite indirgenerek, simüle sorunları ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Geliştirilen bu tekniklerden alt modelleme tekniği hakkında da akademik alanda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar da, genel olarak büyük boyutlu ve kompleks yapıdaki modellerin analizinde daha az zamanda yerel bölgelerde doğru sonuçlar elde etmeye yönelik gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan bazı çalışmalara aşağıda elde edilen sonuçlarıyla birlikte yer verilmiştir.

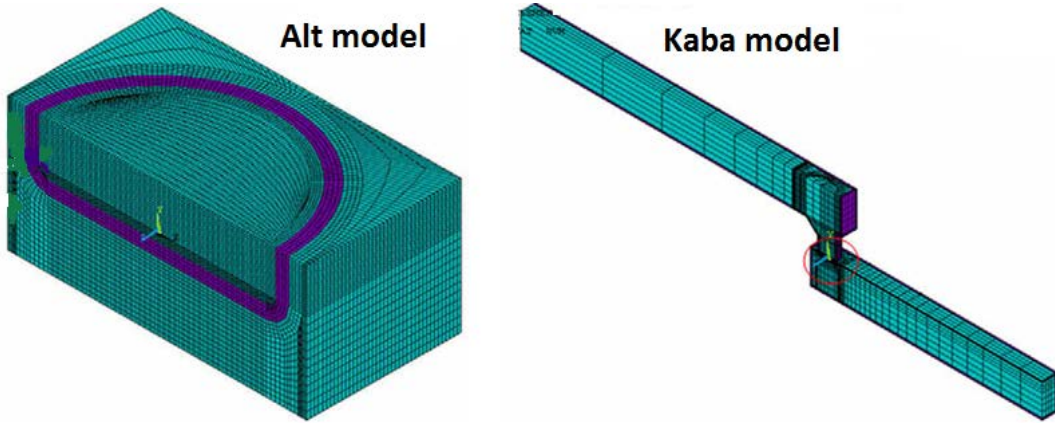
Giglio çalışmasında, bir deniz helikopterin arka gövdesi üzerindeki kirişlerin yorulma analizini gerçekleştirmiştir. Deneysel testlere bir alternatif olarak sonlu elemanlar metodu kullanarak, uçak gövdesinde oluşan yükleri belirlemiştir. Helikopter parçasının modellenmesinde Abaqus standart sonlu elemanlar programı yardımıyla gelişmiş alt modelleme tekniği kullanılmış yerel gerilmelerin değerlendirilmesi sağlanmıştır. Deneysel test sonuçları sonlu elemanlar hesaplamaları karşılaştırılarak teyit edilmiştir. Bu nedenle alt modelleme yöntemi mühendislikte yorulma analizi için güvenilir olduğu bulunmuştur. Alt modelleme sayesinde, hesaplamalar için gereken zaman miktarında sadece sınırlı bir artış olmuş ve daha kesin sonuçlar elde edilmiştir (Giglio 1999).

Ciptokusumo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, elektronik alanında kullanılan bir çip üzerinde yaklaşık bir milyon devre elemanı yerleştirilebilen ULSI (Ultra Large Scale Integration) teknolojisinin analizi esnasında sonlu elemanlar yöntemi kullanmıştır. Şekil 2.1' de gösterilen çok katlı ULSI adı verilen parçanın üzerinde oluşan gerilmelerden dolayı gözenekli noktalar oluşmuştur. Bu yerel gerilme dağılımı ile ilgili alt bölge araştırılması gerekmektedir. Çeşitli teknolojik işlemler nedeniyle alt geometrileri farklılık gösterebilir (Ciptokusumo *et al.* 2009).



Şekil 2.1. ULSI (ultra büyük ölçekli entegre)

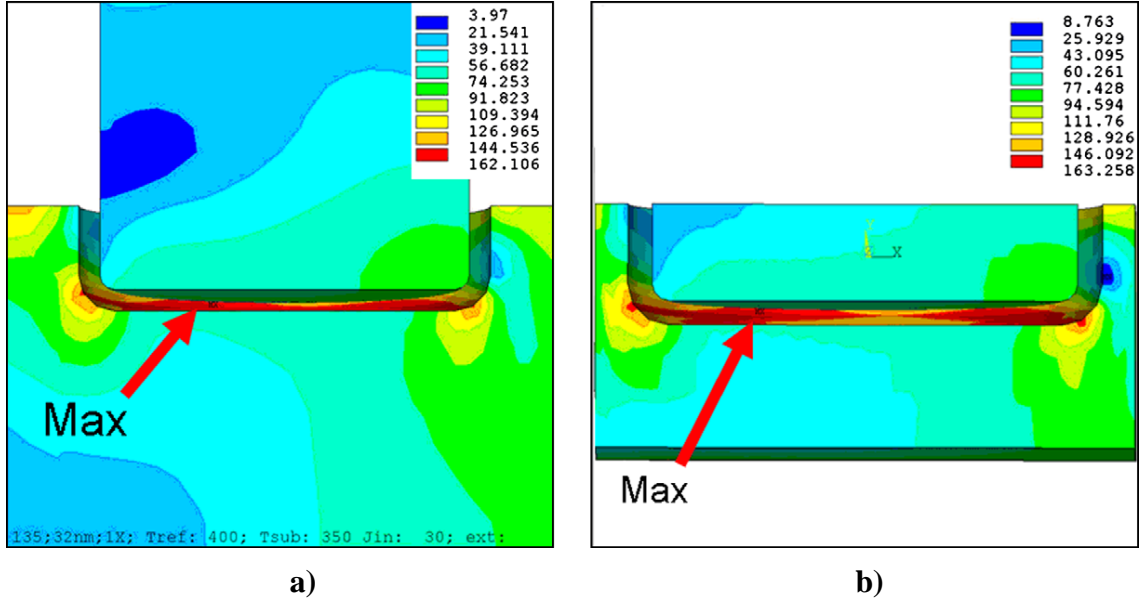
Şekil 2.2’ de kaba model ve alt model geometrileri oluşturularak ANSYS paket programı yardımıyla alt bölgelerde farklı sıcaklıkların etkisi araştırılmıştır. Ayrıca simülasyon zamanının azaltılması ve daha hassas sonuçlar elde etmek için alt modelleme tekniği kullanılmıştır (Ciptokusumo *et al.* 2009).



Şekil 2.2 Alt model ve kaba modelin alt modelleme tekniği kullanılarak karşılaştırılması (Ciptokusumo *et al.* 2009)

Yapılan analizler sonucunda oluşan Von-Mises gerilme değerleri Şekil 2.3’te görülmektedir. Genel olarak gerilme dağılımları aynı bölgelerde benzer şekilde

meydana gelmiş, maksimum gerilmeler ise kaba model için 162,106 MPa alt model için 163,258 MPa değerlerinde olarak yaklaşık yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır.



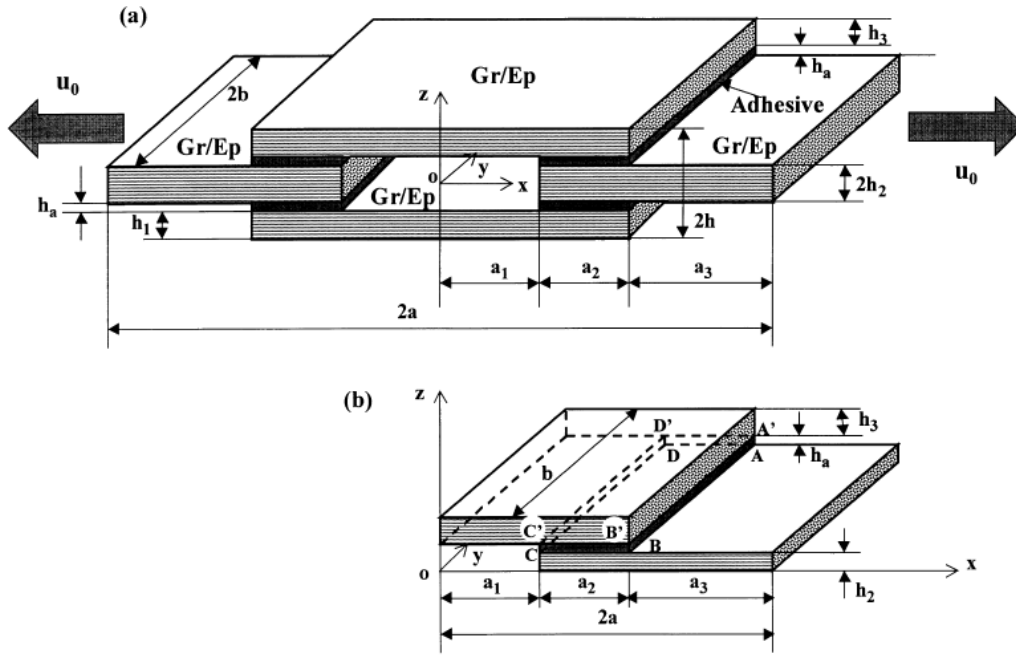
Şekil 2.3 VMS (MPa) gerilmeleri (a. Kaba model, b. Alt model) (Ciptokusumo *et al.* 2009)

Ayrıca meydana gelen Von-Mises ve Hidrostatik Gerilmeler Çizelge 2.1’ de verilmiştir. Gerilme değerleri alt modelde kaba modele göre bir miktar fazla değerlerde oluşmuştur. Alt modelin daha yoğun mesh yapısına sahip olduğundan ayrıntılı sonuçlar vermesi oluşan gerilmelerin daha fazla çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir (Ciptokusumo *et al.* 2009).

Çizelge 2.1 Kaba model ve alt model karşılaştırılması (Ciptokusumo *et al.* 2009)

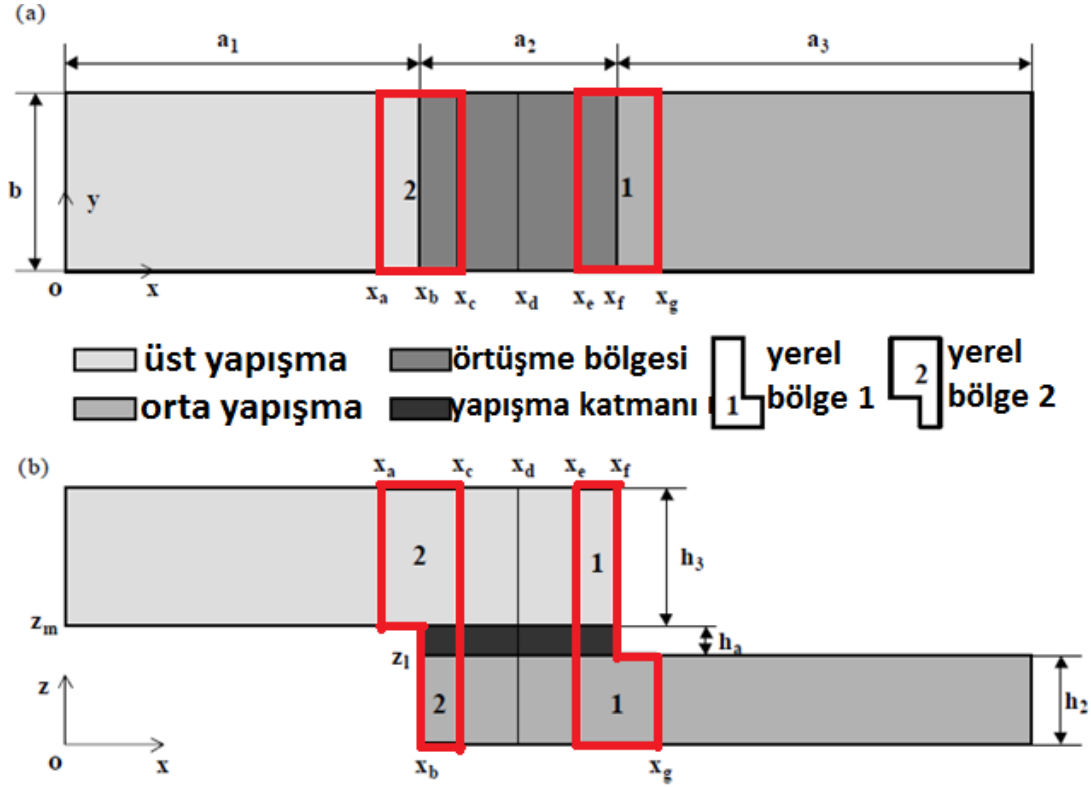
Model	Kaba Model	Alt Model
T (°C)	350	350
Max. VMS (MPa)	162	163
Hidrostatik Gerilme (MPa)	95	119

Bogdanovich ve Kizhakkethara çalışmasında Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’te görülen tek eksenli uzamaya maruz kalmış çift kat olarak birleştirilen kompozit-kompozit şeklindeki yapıştırma işleminin üç boyutlu stres analizini yapmışlardır. Abaqus’un son versiyonlarında mevcut olan alt modelleme yaklaşımı kullanılarak çözümlenmiştir (Bogdanovich ve Kizhakkethara 1999)



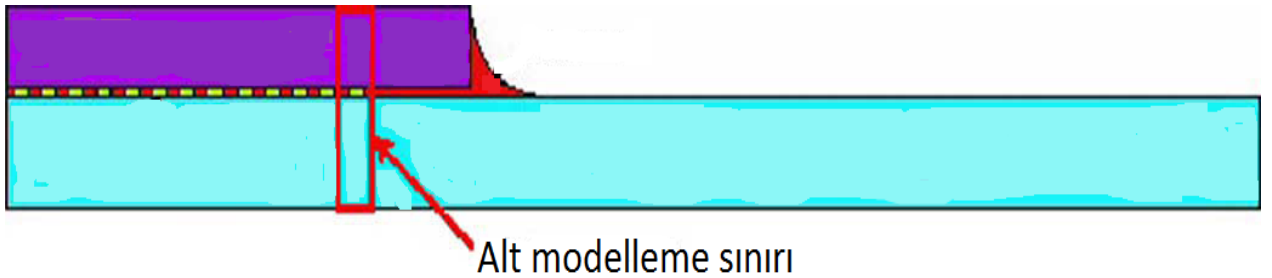
Şekil 2.4. Tek eksenli uzamaya maruz kalan kompozit-kompozit yapıli model (a. Tam görünüş, b. Kesit görünüş) (Bogdanovich and Kizhakkethara 1999)

Şekil 2.5' de görülen yerel bölge 1 ve yerel bölge 2 alt model olarak tasarlanmış alt modelleme tekniği yardımıyla çözümlene yapılmıştır. Bu tekniğin kullanılmasında başlıca amaçlar şunlardır; çok basamaklı alt modelleme yaklaşımının sağladığı hesaplanabilir avantajları araştırmak ve yapıştırıcı katmanlarını 3 boyutlu elastik varlıklar olarak düşünerek eklem yapılarındaki üç boyutlu stres değişiklikleri konusunda kapsamlı bir sayısal çalışma gerçekleştirmek. Global analizden elde edilen sayısal sonuçlar eklem her yerinde yer değiştirmede hızlı yaklaşma olduğunu gösterir, fakat örtüşmenin uçlarına yakın bölgelerde gerilmenin yaklaşıp yaklaşmadığını açıkça göstermez. Bu bölgelerde çok sayıda eleman gerekmesinden başka aynı zamanda ciddi bir hesaplama sorunu yaşanmaktadır; eleman sayısı o kadar yükselir ki sonuçlar güvenilir hale gelir. Bu sorunların üstesinden gelmek için alt modelleme yaklaşımı kullanılır. Alt modelleme yaklaşımı kullanılarak, farklı yerel bölgelerde gerilme dağılımının yüksek olduğu kısımların analizi yapmada yeterli bir hesaplama aracı sağladığı sonucuna varılmıştır (Bogdanovich and Kizhakkethara 1999).



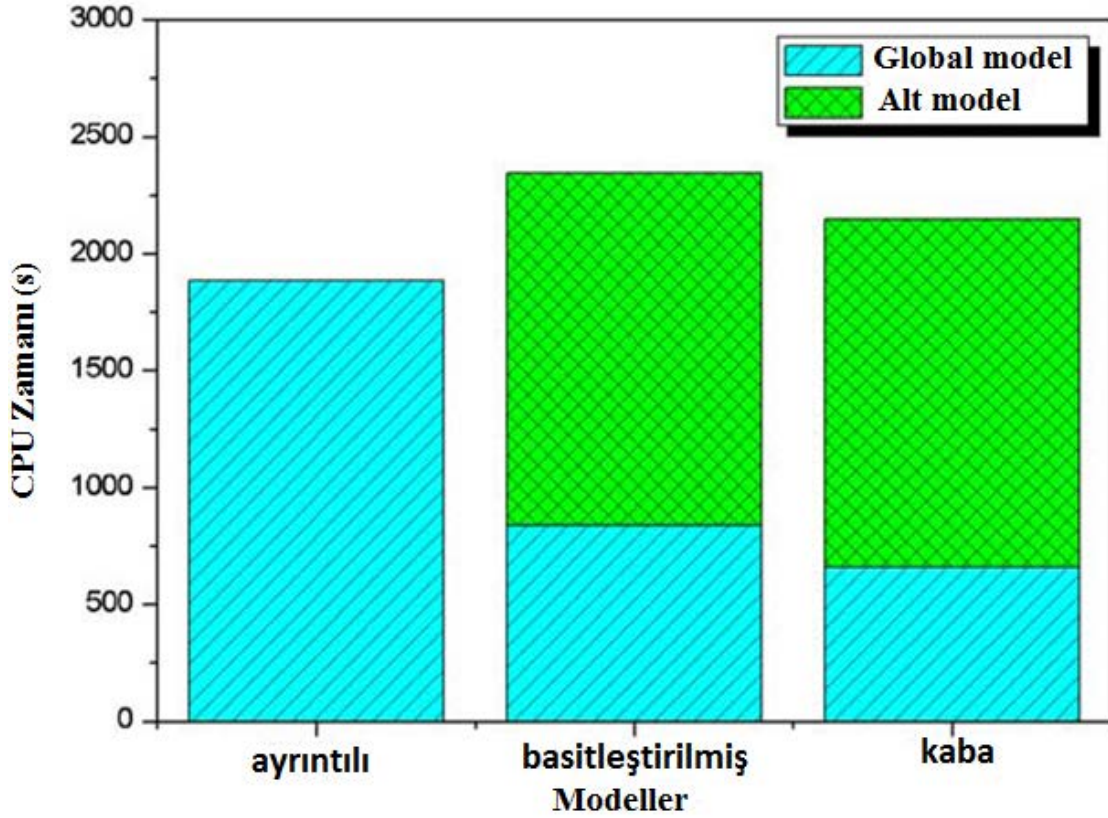
Şekil 2.5 Küresel ve yerel geometrilerin görünümü (a. Üst, b. Yan) (Bogdanovich and Kizhakkethara 1999)

Lai ve Wang alt modelleme tekniğini kullanarak hızlandırılmış termal döngüde bir kapak yonganın termomekanik güvenilirliğini test etmiştir. İlk olarak alt modelleme çözümleri teyit etmek için detaylı bir genel model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu genel model üzerinde Şekil 2.6'daki alt model elde edilir. Aynı zamanda global model ile yerel bölgelerdeki çözümler karşılaştırılarak incelenmiştir.



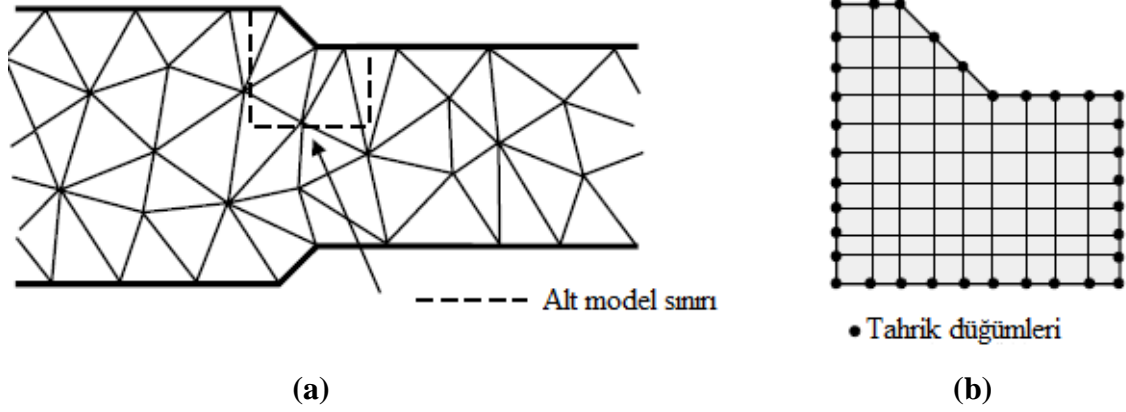
Şekil 2.6 Global model ve global model üzerinde oluşturulan alt model (Lai and Wang 2005)

Şekil 2.7’ de farklı modeller incelenerek, çözümlenmeleri tamamlamak için gereken CPU zamanları karşılaştırılmıştır. Global modellemelerde karmaşıklık arttığı için işlemci süresi artmaktadır. Ayrıca bu çalışmada belirlenen sonlu eleman modelleri için, alt modelleme analizi hesaplama verimliliği açısından da faydalı olmuştur (Lai and Wang 2005).



Şekil 2.7 Farklı modeller için CPU zamanlarının karşılaştırılması (Lai and Wang 2005)

Schöllmann ve arkadaşları çatlak büyümesi esnasında mesh yapısında değişimlerin meydana gelmesinden dolayı doğru sonuçlar elde etmek için alt modelleme tekniğini kullanmışlardır. İlk olarak genel model oluşturulmuş, daha sonra özel bir kısımdan alt model oluşturularak bu bölüm tamamen yeniden mesh edilmiştir.



Şekil 2.8 ABAQUS programı ile alt modelleme tekniği (a. Genel model, b. Alt model)

Bunu yaparken kullanılan elemanların tipleri, kısmen sınırlar ve düğümler farklı olarak oluşturulabilir. Alt modelleme, özellikle büyük nesnelere için, standart tekniğe göre çok daha hızlı çözüm sağlayarak kolaylıkla bir kaç saniye içinde sonuca ulaşmamızı sağlar. Yapılan çözümler sonucunda daha hassas hesaplamalar gerektiren çatlak bölgesi analiz edilmiş ve detaylı çözümler elde edilmiştir (Schöllmann *et al.* 2003).

Yapılan çalışmada Kitamura ve arkadaşları geminin yapısı içinde bulunan döküm taşıyıcı kısmını alt modelleme tekniği yardımıyla analiz etmiştir. Çalışmalarında yer değiştirme ve gerilme analizi sonuçlarını incelemişlerdir. Genellikle literatürde alt model çözüm için kullanılan deplasman sınır koşulu uygulanmıştır. İlk olarak genel model çözümlenmiş gerilmeler elde edilmiş, daha sonra alt model çözümlenerek doğru sonuçlar elde edilmiştir (Kitamura *et al.* 2003).

Gerstle ve arkadaşları alt modelleme tekniği kullanarak kırılma analizleri yapmışlardır. Normal şartlarda sürekli değişen kırılma parametrelerinden dolayı çok fazla zaman kaybı oluşmaktadır. Alt modelleme sayesinde zaman kaybı büyük ölçüde önlenmiştir. Yapılan kırılma analizlerinde kendi yöntemleriyle doğru çözümler elde etmişlerdir. Alt modelleme tekniği büyük boyutlu modeller için yerel bölgelerde ayrıntılı ve doğru sonuç elde etmek için etkili bir yöntem olmuştur (Gerstle 1989, Gerstle *et al.* 1987).

Ranestad ve arkadaşları üç boyutlu kaynak plakaları üzerindeki çatlak ucunda oluşan gerilme alanlarında doğru sonuçlar elde etmek için alt modelleme yöntemine ihtiyaç

duymuşlardır. Bu yöntem kabuk model üzerinde oluşturulmuştur. Alt modelin sınır koşulları global model üzerinde elde edilmiştir. Kabuk model ve üç boyutlu katı model sonuçları karşılaştırıldığında homojen malzemeler için çatlak bölgelerinde iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır. Alt modelleme tekniği kullanılarak hem modelleme zamanı hem de hesaplama süresi açısından avantajlı sonuçlar elde edilmiştir (Ranestad *et al.* 1999).

Larson, yaptığı çalışmada alt modelleme tekniğini endüstriyel uygulamada kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bir muhafaza içinde kontrol edilen şanzımanı incelemiştir. Hazırlanan modelin ve alt modelin çözüm zamanları karşılaştırılmıştır. Çalışmasında ayrıca yerel bölgelerin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir (Larson 2004).

2.1 Kompozit Malzemeler

İstenilen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye kompozit malzeme denir. İyapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik muayene) yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde (mikroskobik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilir. Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, fiber malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir (İnt. Kyn.1).

2.1.1 Kompozit Teknolojisinin Gelişimi

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Bugün taş, kum, kireç, demir, ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme evlerimizi oluşturmaktadır. Kompozit malzemeye en güncel örneklerden biri de kağıttır. Selüloz ve reçineden oluşan kağıt, günümüzde yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak insanlığın hizmetine sunulmuştur. Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara ulaşmıştır (İnt. Kyn.1).

2.1.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Aşağıda bu malzemelerin avantajlı olan ve olmayan yanları kısaca ele alınmıştır. Kompozit malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler metalik malzemelerin yerini alabilecektir.

Yüksek Mukavemet: Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir.

Kolay Şekillendirebilme: Büyük ve kompleks parçalar tek işleme bir parça halinde kaplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

Elektriksel Özellikler: Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet: Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır.

Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı: Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Titreşim Sönümlendirme: Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Bütün bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir:

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez. Görüldüğü gibi kompozit malzemeler, bazı dezavantajlarına rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikleri ile kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev elyaflarından tarım araçlarına kadar bir çok sanayi kolunda problemleri çözümlenecek bir malzemedir (İnt. Kyn.1).

2.1.3 Kompozit Türleri ve Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler yapılarını oluşturan malzemeler ve yapım metotlarına göre iki ayrı şekilde sınıflandırılmıştır. Bunları sıralayacak olursak;

2.2.3.1 Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler

Fiber ve matris olarak kullanılabilen malzemeler amaca uygun olarak çok çeşitli olabilmektedirler. Fakat genellikle cam, seramik, plastik ve metaller kullanılmaktadır.

Plastik - Plastik Kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matris olarak kullanılan plastik esneklik verici, darbe emici ya da istenen amaca göre kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır.

Plastik - Cam Elyaf Kompozitler

İsteğe göre termoplastikler veya termoset plastikten oluşan matris ve cam liflerin uygun kompozisyonundan üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam lifler birçok durumda metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliği gibi liflere tercih edilebilirler. Ancak cam elyafı kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılğan olmasından dolayı çok düşük dirençlidirler. Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek arzu edilen şekle sokulabilir.

Plastik – Metal Fiber Kompozitler

Endüstride çok kullanılan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça hafif ve mukavim bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberlerin (Bakır, Bronz, Alüminyum, Çelik v.s.) poli – etilen ve poli – propilen plastiklerini takviyelendirmesi amacı ile elde edilmekte ve kullanılmaktadır.

Plastik – Köpük Kompozitler

Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta; Köpük ise matris, reçine konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve

doğal halde bulunduğu gibi, büyük kısmı sentetik olarak elde edilmiş hafif maddelerdir. Köpük, hücre yapısına göre sert, kırılğan, yumuşak ya da elastik olabilmektedir.

Metal Matrisli Kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılğan olmaktadır. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedir. Bakır ve alüminyum matrisli, Wolfram ve Molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti bize bu kompozisyonu en iyi veren örneklerdir. Fiberlerin malzemeyi kuvvetlendirme derecesi, yüzeysel boşlukların olmayışına bağlıdır. Böylece teorik duruma yaklaşılabılır. Fiberlerin çaplarına ve matrisle olan adezyon kuvvetinin niteliğine bağlı olarak belli bir kritik uzunluktan daha kısa olmalıdır.

Seramik Kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin bileşiminden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği gösterirler. Üç ayrı grupta toplanan seramik kompozitler şu şekilde sıralanabilir:

a) Seramik - Seramik Sistemi: İki seramik fazın karışmasından oluşmaktadır. Örnek olarak saf çini verilebilir.

b) Seramik - Cam Sistemi: Yaşamımızın her alanında kullanılan porselen, bir seramik cam kompozitidir. Kuartz fiberlerin bir cam matris içerisine çini ile birlikte hamurlanıp yerleştirilmesiyle oluşmuştur.

c) Seramik - Metal Sistemi: Bu tür kompozitler, çok fazlı bir yapıya sahiptirler. Bir metal faz, bir seramik faz, bir gözenek fazı ve daha çok karmaşık formlarda seramik ve metalin ilave fazlarından meydana gelmiştir. Endüstride kullanılan ve elmas olarak

adlandırılan kesme aletleri en iyi örneklerdir. Bir kobalt matris içine dağılmış tungsten karpit parçalarından oluşan bu kompozit malzeme büyük bir dayanım sağlamaktadır.

2.1.3.2 Yapım Şekillerine Göre Kompozitler

Karışık Malzeme ve Sinterleme

Endüstride kullanılan çok çeşitli karışık kompozit malzeme vardır. İnce bir kalıp kumun bir plastik malzeme ile bağlanması ve plastiğin yüksek sıcaklıkta polimerize olmasından yararlanılarak dökümcülükte kullanılan kalıp malzemeleri ortaya çıkmıştır. Karışık malzemelerin birleştirilmesinde bir başka yöntem de sinterlemedir. Sinterleme, küçük parçaları (çoğu kez metalleri) yüksek sıcaklıkta, basınç altında birbirine bağlama ile gerçekleşir. Sinterleme olması için ya bir sıvı faz meydana gelmeli ya da katı halde yayınma ile parçaların arasında bir bağ oluşmalıdır. Sıvı fazlı sinterlemede başlıyıcı metal erir ve karbür taneleri arasında sürekli bir faz oluşur. Fakat sinterlemeden sonra kristalleşir, kuvvetli ve rijit bir yapı meydana getirir. Küçük parçaları birbirine başlamada reçine kullanıldığı zaman aynı şekilde tanelerin yüzeyini kaplaması gerekir. Kristalleşme yerine, reçine polimerize olur ve akışkanlığını kaybederek kuvvetli bir bağ yapar. Birçok toz metal parça ve dielektrik seramik malzeme katı sinterleme ile yapılır. Ayrıca volfram ve kolumbiyum gibi refrakter metaller bu malzemeleri içinde ergitecek potaların ve kalıpların pratik olarak mümkün olmamasından dolayı katı sinterleme ile şekillendirilir. Sinterlemeden önce parçacıklar arasında iki yüzey vardır. Yüzeydeki atomların yalnız bir taraflarında atom olduğu için yüzeyler yüksek enerji yerleridir. Çünkü iki parça birbirine çok yakın görünse bile aralarındaki açıklık birçok atom alacak kadar geniştir ve atomlar arası çekim kuvveti buralarda çok zayıftır. Ancak sinterleme işleminde, yüksek sıcaklıkta yeterli zaman verilirse atomlar yayınma ile hareket eder ve parçalar arasındaki noktalara genişlerler. Bu şekilde iki ayrı yüzey yerine iki parça arasında ortak bir yüzey meydana getirirler. Oluşan ortak yüzeyde atomların yakın komşuları olduğundan, önceki yüzeylerin her ikisinden de alçak enerjide olurlar (İnt. Kyn.1).

Lif Takviyesi

Malzeme mekanik özelliklerini yükseltmek için malzeme yapısı içine çok sert ve ince fazların serpilmesi yöntemidir. Bu tür kompozitler ana fazdan beklenen bazı özelliklerin elde edilmesi ya da geliştirilmesi amacıyla üretilirler. Ana faz (matris), ikincil fazlarla (fiber) belirli doğrultularda takviyelendirilir. Böylece mukavemet, korozyon ve aşınma direnci, ısı izolasyonu, rijitlik ve ağırlık gibi özelliklerde daha verimli hale getirilir. Bu arada cam takviyeli plastik, kord beziyle takviyeli otomobil lastiği ve demir ile takviyeli betondan söz edilebilir. Bu tür kompozitler de hem fiber hem de matris malzeme yeterince büyük olduklarından, her birinin etkisini ayrı ayrı hesaplayıp, bu hesapları kompozit malzeme üzerinde birleştirmek gerekmektedir (İnt. Kyn.1).

2.1.4 Karbon Fiber Üretimi

Karbon fiberler, germe ve termoset işlemleriyle sentetik fiberlerden üretilmektedir. Polyacrylonitrile (PAN) ve zift karbon fiber üretimi için kullanılan en genel ham maddelerdir. PAN önceden üretilmiş ve makaralara sarılmış durumdadır. Zift ise bir petrol türevi olup eritilip bir dizi işlemde geçirilerek fiber haline getirilir.

1.aşama

Isıl işlem aşamasında fiberlere gerilme uygulanıp 400 °C'yi aşmayacak şekilde ısıtılır. Bu işlem karbon zincirlerinin birbirleriyle kesişmesini sağlayarak daha sonraki ısıl işlemlerde erimesini önler.

2.aşama

Karbonizasyon aşamasında fiberler oksijensiz ortamda 800 °C'ye kadar ısıtılır. Bu işlem karbon olmayan empüriteleri ortadan kaldırır.

3.aşama

Grafitizasyon aşamasında fiberler %50 ile %100 uzayacak şekilde gerilmeye maruz bırakılır ve 1100 °C ile 3000 °C arasında ısıtılır. Gerilme, istenilen kristal oryantasyonu sağlayarak istenilen young modülü değerinin (300-600 GPa) elde edilmesini sağlar. Son olarak, epoxy boyutlandırması ve yüzey işleme aşamaları, karbon fiber / epoxy arası bağı kuvvetlerini güçlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Bu son iki aşama yerine daha değişik yöntemlerde kullanılabilir (İnt. Kyn.1).

2.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin, daha basit ve kısa zamanda çözmek için bu problemlere eşdeğer ancak daha basit hale getirilmiş problemlerin çözüme gidilmesi sonlu elemanlar metodunun temelindeki fikirdir. Genellikle, basitleştirmeye gidilmesi sonucunda doğru sonuç yerine, yaklaşık bir sonuç bulunmaktadır. Günümüzde, sonlu elemanlar metodlarının bilgisayarlarda uygulanması sonucunda hemen her problem istenilen ölçüler arasında yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir.

Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesinin çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsi çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır (Demirsöz 2005).

2.2.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Kısa Tarihi

Günümüzde sonlu elemanlar metodu olarak bilinen çözüm metodlarının arkasında bulunan temel fikirler yüzyıllar öncesine dayanmaktadır. Örneğin, yüzyıllar öncesinde bilim adamları çemberin çevre uzunluğunu bulmak için çemberin etrafından poligonlar çizerek bulmaktaydılar. Köşe sayısı arttırılan poligon, sonuca daha fazla yaklaştırmaktaydı.

Yakın tarihimizde, sonlu elemanlar metoduna benzer bir yöntem Courant tarafından 1943' te ilk kez ortaya atılmıştır. Bu yöntemde, üçgensel bölgeler üzerinde parçasal

sürekli fonksiyonlar tanımlanmaktadır.

Günümüzde bilinen sonlu elemanlar metodu ise, 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Top tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada, perçin bağlantılı profil ve üçgenel iç gerilmeli tabaka şeklindeki sonlu elemanların bir uçağın analizinde kullanımı ele alınmıştır.

Çağımızın en büyük teknolojik gelişme olarak bilinen bilgisayar teknolojisinin gelişmesi, bu yönetime çok büyük katkı sağlamıştır. Günümüzün bilgisayarları, çözülmesi aylar bulan problemleri, en kısa zamanda çözmekte ve gerçek sonuçlara çok yakın yaklaşık sonuçlar verebilmektedirler (Bedir 2007).

2.2.2 Uygulama Alanları

Sonlu elemanlar metodunun uygulama alanları özdeğer (eigenvalue), denge ve yayılma problemleridir. Kısaca yukarıda bahsi geçen alanların kısaca tarifleri aşağıda açıklanmıştır

Denge problemlerinin bir uzantısı olan özdeğer (eigenvalue) grubuna giren problemler arasında yapıların stabilitesi ve titreşimleri, lineer viskoelastik sönümleme, burkulma, katı ve esnek kaplarda akışkanların çalkalanması gibi problemler en çok bilinenleridir. Kararlı hal problemleri olarak bilinen denge problemlere makine ve inşaat yapılarının gerilme analizleri, katılarda ve sıvılarda kararlı sıcaklık dağılımları, sürekli akış problemleri gibi problemler örnek verilebilir.

Yayılma problemleri ise zamana bağlı olan problem grubuna giren problemler arasında yapılarda gerilme dalgaları, yapıların darbelere karşı davranışı, viskoelastik problemler, zeminlerden suyun geçişi, katılarda ve sıvılarda ısı geçişi, kararlı olmayan akış problemleri örnek verilebilir.

Mühendislik açısından sonlu elemanlar metodunun en geniş uygulama alanı gerilme analizi problemleridir. Gerilme analizi problemlerinde yer değişim, kuvvet ve karma yöntem gibi üç yaklaşım dikkate alınmaktadır.

Yer değişim yönteminde yer değişimler, dönmeler ve deformasyonlar; kuvvet yöntemi yaklaşımında kuvvetler ve gerilmeler; karma yönteminde ise bilinmeyen veya serbest değişkenler işlenmektedir (Kurtay 1980).

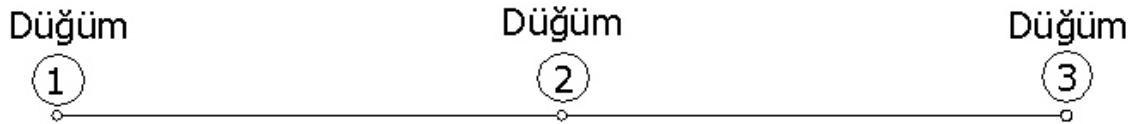
2.2.3 Problemlerde Uygulanması

Elastik ve sürekli ortamlara SEM' in uygulanmasında yapının parçalara ayrılması, uygun bir interpolasyon seçimi, rijitlik matrislerinin ve yük vektörlerin, eleman denklemlerinin birleştirilmesiyle toplam denge denklemlerin elde edilmesi, bilinmeyen düğümsel (nodal) yer değişimleri için çözüm yöntemlerinin kullanılması ve sonuçların bulunması adımları uygulanır.

2.2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri

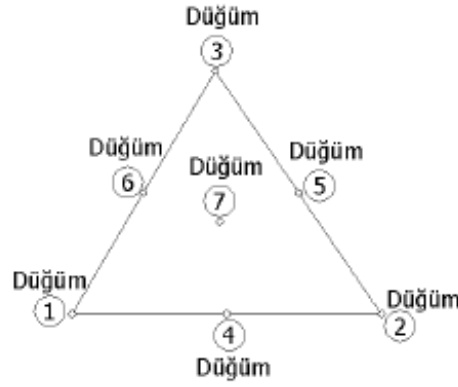
Analizi yapılacak bir parçada doğru sonuçlar alınabilmesi için en uygun bir şekilde sonlu elemanlara bölünmelidir. Sonlu elemanlara bölme işleminde sürekli ortamın boyutuna ve parçanın geometrisine en uygun elemanın şekli seçilmelidir. Seçilen sonlu elemanlar bir, iki veya üç boyutlu olabilirler. Genelde, sonlu elemanın sınırları düzgün olarak seçilebilir ya da, bazı durumlarda eğri sınırlı elemanlar da kullanılması gerekebilir (Bedir 2007).

Ortam geometrisi, malzeme özellikleri, yükleri ve yer değişimleri bir bağımsız uzay koordinatı cinsinden ifade edilebiliyorsa, Şekil 2.9' da örneği verilen bir boyutlu sonlu elemanlar tercih edilir (Bedir 2007).



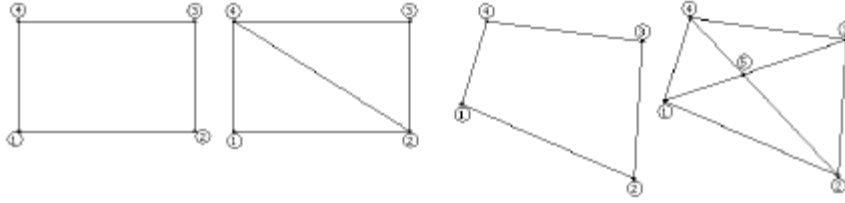
Şekil 2.9 Bir boyutlu bir sonlu eleman

Birçok problem, yaklaşık olarak, iki boyutlu sonlu elemanlarla çözülebilir. İki boyutlu tipleri arasında en basiti Şekil 2.10' da görülen üçgen tipi sonlu elemandır.



Şekil 2.10 Üçgen tipi sonlu eleman örneği

Birçok problemlerde iki boyutlu dikdörtgen, iki üçgenli dikdörtgen, dörtgen elemanı ve dört üçgenli dörtgen elemanı tipi sonlu elemanlar da kullanılmaktadır. Şekil 2.11’de yukarıda bahsi geçen değişik iki boyutlu dörtgen sonlu eleman tiplerine örnekler soldan sağa doğru verilmiştir.



Şekil 2.11 İki boyutlu değişik dörtgen geometri biçimli sonlu elemanlar

2.2.5 Abaqus/CAE Sonlu Elemanlar Paket Programı

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi karmaşık ve çözülmesi uzun zaman alan problemlerin bilgisayarlarda çözülmesi hem zaman tasarrufundan hem de işlemin daha doğru sonuçlar vermesi bakımından çok önemlidir. Bilgisayarlarda, sonlu eleman metodu çeşitli paket programlar vasıtasıyla basit bir şekilde modellenmektedir, daha sonra bu modeller küçük sonlu elemanlara bölünerek analizler yapılmaktadır.

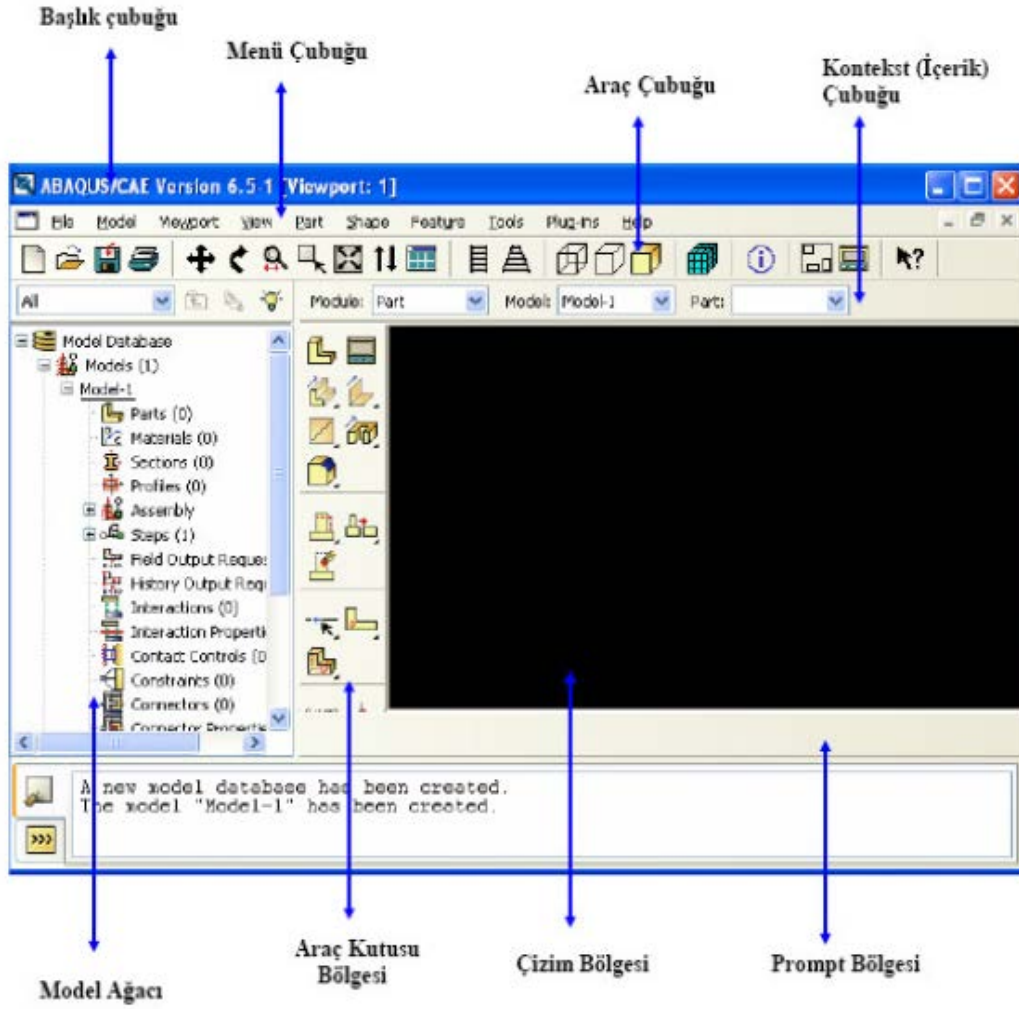
Günümüzde, SEM uygulamaları için birçok yazılım geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları, Abaqus, Nastran&Patran, Ansys’dir. Bazı SEM yazılımları kendi bünyesinde

modelleme paketleri bulundurmasına karşı çoğunlukla karmaşık geometrilerin modellenmesi uzun zaman almakta, bazen ise hiç yapılamamaktadır. Bundan dolayı, iki ve üç boyutlu problemlerin modellenmesi amacıyla çeşitli paket programlar hazırlanmıştır. Bunlar arasında Catia, Pro/Engineer, Solidworks, Autocad programları en çok bilinenleridir (Demirsöz 2005, Bedir 2007).

Bu tez için en uygun program olarak Abaqus programı seçilmiştir. Bunun sebebi Abaqus'ün tasarım kısmının alt modelleme tekniğinin uygulanması esnasında çözülecek problemler için yeterli olması ve bunun yanı sıra SEM analizi prosesinde kullanıcı dostu olmasıdır. Ayrıca, analiz sonuçlarında hata payının tatmin edici değerler arasında olması da bu programın bu çalışmada kullanılması tercihinde payı olmuştur.

2.2.5.1 Programın bölümleri

Abaqus/CAE başlatıldığında Şekil 2.12'de görülen ana pencere ekrana gelir (Can and Kaya 2007). Detaylara girmeden önce Abaqus/CAE programının birkaç özelliği bilinmelidir. Öncelikle, Abaqus/CAE görsel bir şekilde bir problemin modellenerek analiz edebilmeyi sağlaması yanında birde komut yazılarak çözüme verilmesi olanağını sunmaktadır. Örneğin, eğer problemin geometrisinin koordinatları, sınır şartları biliniyorsa, o halde bu problem kolaylıkla herhangi bir yazı editöründe programın kendine has komutlarıyla yazılarak analize verilebilir. Aksi halde, eğer problemin geometrisi karmaşık, sınır değerlerinin yerleri ancak modelin oluşturulmasıyla tespit edilebiliyorsa o halde program ara yüzünü çalıştırılarak sıfırdan problem modellenmeli ve analiz edilmelidir.



Şekil 2.12 Abaqus/CAE ana penceresi

Yukarıdaki pencere, kendi altında üç ana pencereden oluşmaktadır. Solda “Model Ağacı” ismi verilen bir pencerede kullanıcı parçanın modellenmesinden analiz sonuçlarının görüntülenmesine kadar olan tüm işlemler tanımlayabilmektedir. “Çizim Bölgesi” penceresi bulunmaktadır. Bu pencerede kullanıcı yaptığı tüm işlemleri görsel olarak görebilmektedir. En altta ise “Prompt Bölgesi” penceresi bulunmaktadır. Bu kısımda, kullanıcı yaptığı işlemlerin sonucunda program tarafında enteraktif diyalogları görebilir ayrıca “Python Script” içinde hazırlanmış hesap makinesini kullanabilir. Diğer kısımlar kısaca aşağıda izah edilmiştir (Can ve Kaya 2007).

Başlık çubuğu: Çalışmakta olan Abaqus/CAE’nin versiyonunu ve model veri tabanının ismini belirtir.

Menü çubuğu: Mevcut bütün menüleri içerir. Kontekst çubuğunda modül değiştirilirse menü çubuğunun da içeriği değişir, hangi modül seçildiyse o modül ile ilgili menüler gelir.

Araç çubuğu: Çok kullanılan bazı menülere hızlı erişim sağlar.

Kontekst (içerik) çubuğu: Yapılacak çalışmayı belirli bir düzende yapılabilmesi için kullanıcıya modüller sunar.

Örneğin, ilk olarak parça (part) modülünde parçalar modellenirse sonra özellik (property) modülüne geçerek parçaların malzeme özellikleri belirlenir. Daha sonra ise montaj (assembly) modülüne geçilerek modellenen parçaların montajı yapılır.

Model ağacı: Yapılan çalışmanın adımlarını model ağacında görülür. Model ağacı, yapılan çalışma üzerinde değişiklik yapabilme ve modüller arasında geçişi olanaklı kılar.

Araç kutusu bölgesi: Bir modele girildiği zaman o modülle ilgili komutlar araç kutusu bölgesinde bulunur. Aynı komutlar, menü çubuğunda da yer alır. Fakat araç kutusu sayesinde bu komutlara çok hızlı bir şekilde ulaşılabilir.

Çizim bölgesi: Çizimin görüldüğü ekrandır.

Prompt bölgesi: Bir komut seçildiği zaman o komutun kullanımı ile ilgili bilgi sahibi değilse kullanıcı, mesaj bölgesinde uyarıları takip ederek hangi adımları yapması gerektiğini görebilir.

2.2.5.2 Ön işlem süreci (Preprocessor)

Ön işlem sırasında analiz süreci için hazırlanması önemli olan adımlar ihtiva eder.

Bunlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. Modelin oluşturulması,
2. Modele malzeme tanımı yapılması,
3. Modelde işlemine göre parçaların kesitlendirilmesi,

4. Her kesite daha önceden tanımlanan uygun malzemenin atanması,
5. Montajın oluşturulması,
6. Analiz adımlarının tanımlanması,
7. Modeldeki parçalar arasındaki mekanik temasın tanımlanması,
8. Sınır şartların ve yüklerin tanımlanması ve parçaya uygulanması,
9. Model içerisindeki her bir parçanın küçük hücresel elemanlara bölünmesi (Bu adım, diğer bölümlerde “mesh atma”, ya da diğer bir ifadeyle “meshleme” olarak anılacaktır),
10. İş'in oluşturulması.

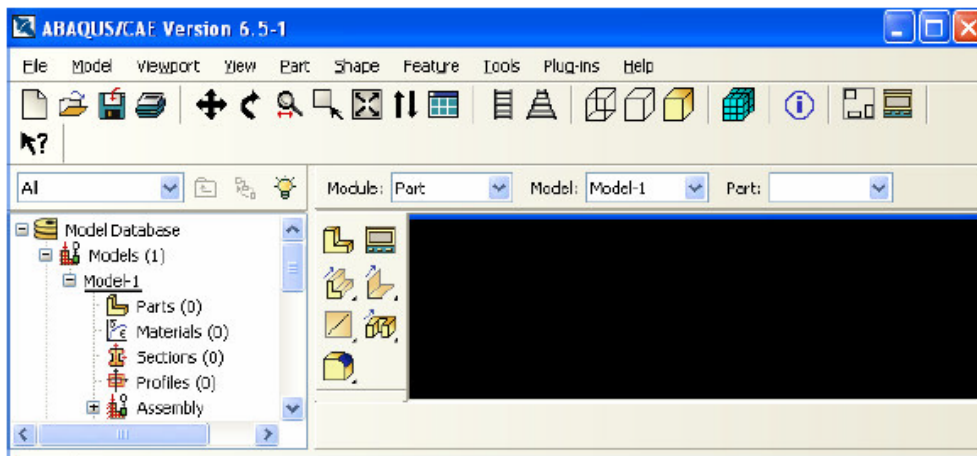
Yukarıda sıralanan adımları gerçekleştirilirken en ince ayrıntılar dahi gözden geçirilmelidir. Örneğin, mesh atma adımında eleman tipi seçimi sırasında seçilecek eleman tipi sonucun tamamen doğru ya da tamamen yanlış sonuçlar doğmasına neden olacaktır.

2.2.5.3 Programın çalıştırılması

Abaqus/CAE programı hem komut isteminde hem de programın kısa yoluna tıklanarak çalıştırılabilir. Burada en basit bir şekilde nasıl çalıştırılıp probleme uyarlanması anlatılacaktır. Öncelikle, program aşağıdaki yol sırasıyla izlenerek çalıştırılacaktır.

Başlat(Start) > Programlar > Abaqus 6.5-1 > Abaqus/CAE.

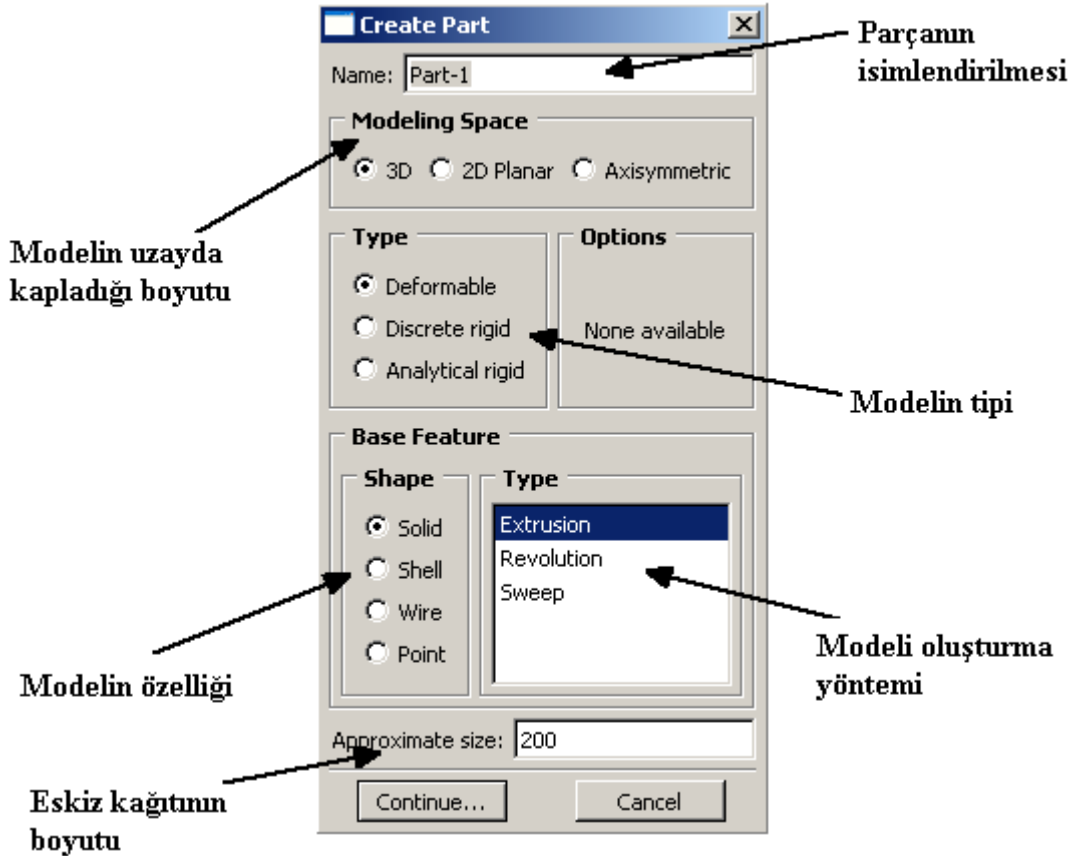
Programı çalıştırdıktan sonra Şekil 2.13' te görülen ekran görüntülenir (Can ve Kaya 2007).



Şekil 2.13 Abaqus/CAE açılış penceresi

2.2.5.4 Katı modelin oluşturulması

Yeni bir veri tabanı oluşturabilmek için “New Model Database” butonuna tıklanmalıdır. Bu butona “File > New” yolu izlenerek de ulaşılabilir. Bu buton basıldıktan sonra Şekil 2.14’te görülen “Create Part” diyalog kutusu görüntülenir. Diyalog kutusu problemin modellenebilmesi için araçlar sunmaktadır.



Şekil 2.14 Abaqus/CAE katı model oluşturma

Parçanın isimlendirilmesi: Eğer model birden fazla parçadan oluşmaktaysa parçalar mantıklı bir şekilde adlandırılmasına olanak tanınmaktadır.

Modelin uzayda kapladığı boyut: Çalışılacak model uzayda kapladığı boyutu üç ise 3D, eğer model iki boyutluysa 2D, eğer model bir eksen etrafında simetrik ise “Axisymmetric” seçeneği seçilmelidir.

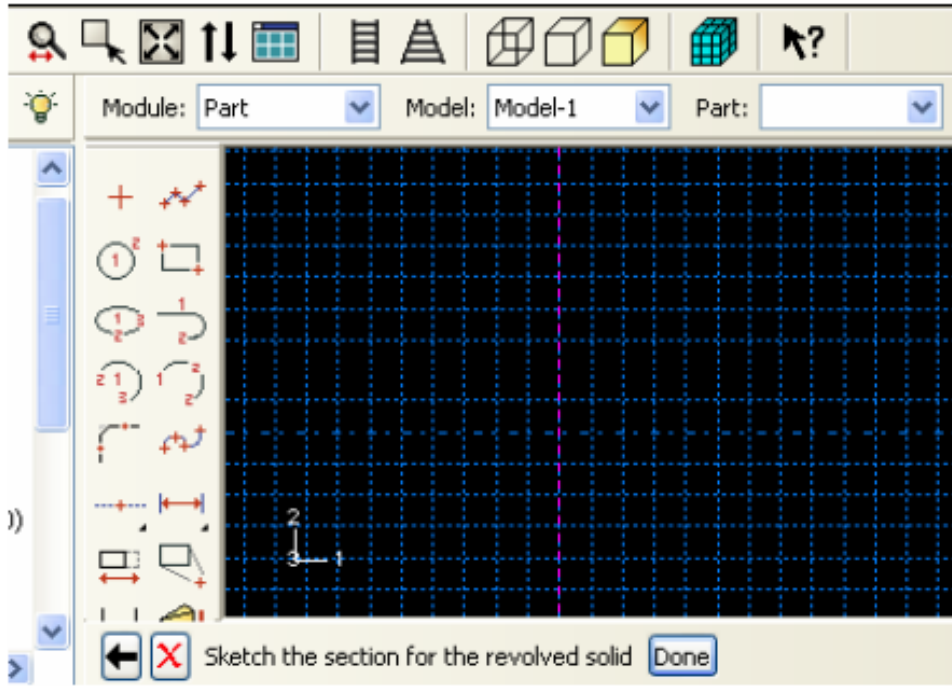
Modelin özelliği: Oluşturulacak modelin tipi katı ise “Solid”, kabuk ise “Shell”, çubuk

veya ince kiriş ise “Wire”, eğer noktalardan oluşuyorsa “Point” seçeneği seçilmelidir.

Modeli oluşturma yöntemi: Bu kısımda program kullanıcıdan en kolay hangi şekilde modellemenin oluşturulması olanağı sağlamaktadır.

Modelin tipi: Malzeme yapısına göre, rijit veya deforme olabilir olarak seçilebilir.

Eskiz kağıdının boyutu: Çizimin kolay bir şekilde yapılabilmesi için program otomatik olarak çizim alanını dilimler. Her dilim arası mesafenin ne kadar olduğunu bu kutuda girilmelidir. Şekil 2.15’ te çizim alanı görülmektedir(Can ve Kaya 2007).

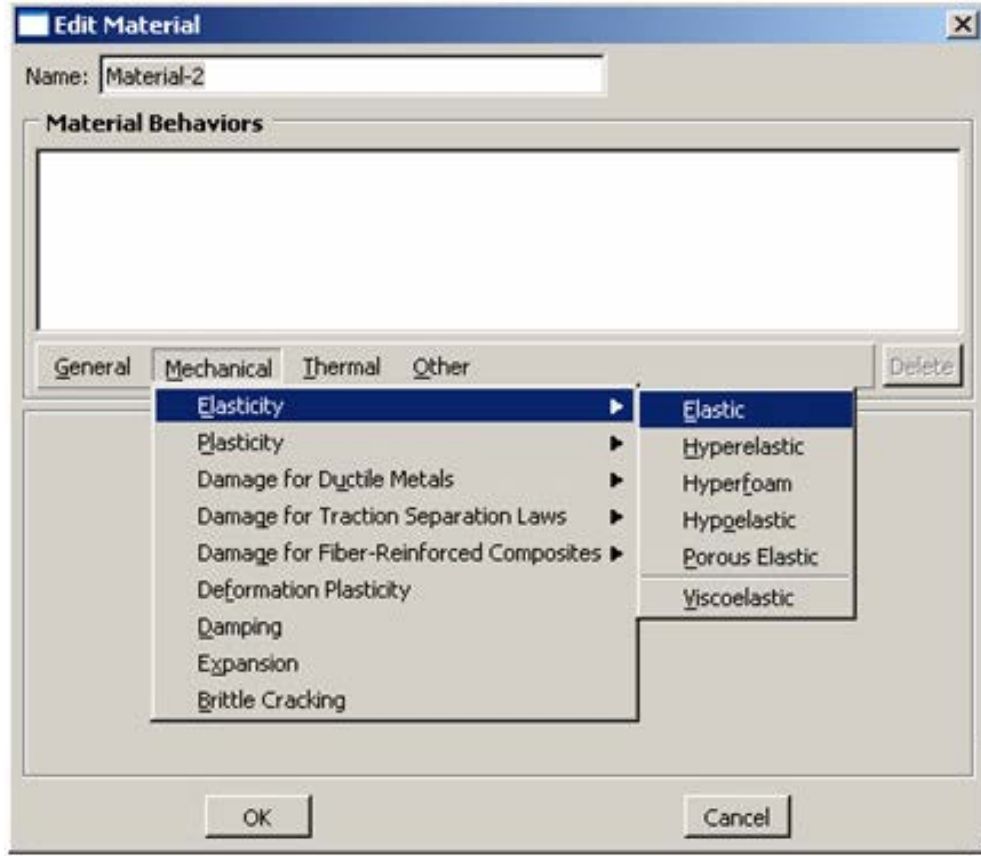


Şekil 2.15 Abaqus/CAE çizim alanı

2.2.5.5 Malzeme girişi

Modelleme yapıldıktan sonra modelin malzemesi tanımlanmalıdır. Tanımlama işlemi aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

“Create Material” butonunu seçtikten sonra Şekil 2.16’da görülen pencere görüntülenir.

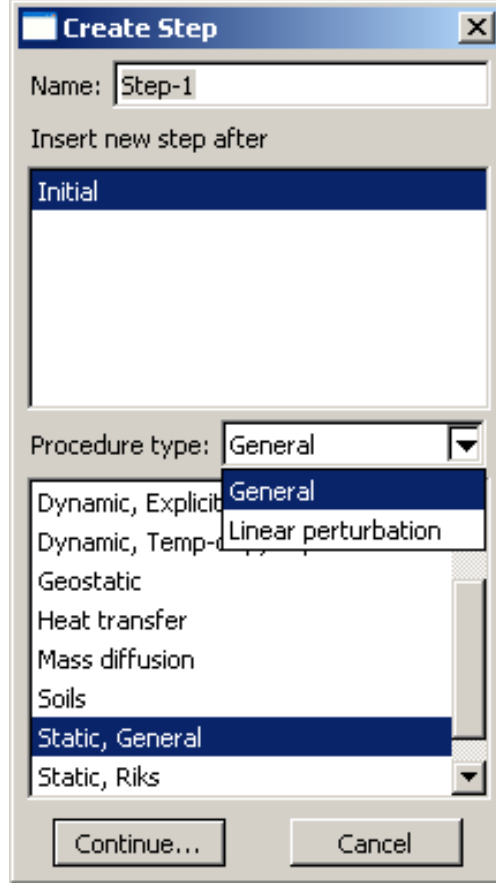


Şekil 2.16 Malzeme girişi

Malzeme isimlendirildikten sonra malzemenin cinsi ve davranışı seçeneklerden seçilmelidir. Aynı anda malzemeye birçok özellik tanımlana bilmekte ve en ince ayrıntısına kadar malzemenin davranışı programa tanıtılabilmektedir.

2.2.5.6 Adım (Step) menüsü

Analiz sırasında modelin hangi analiz adımlarından geçeceği bu aşamada tanımlanmaktadır. Bu menüde Şekil 2.17' de görüldüğü gibi birçok analiz amacı için seçenekler sunulmuştur.

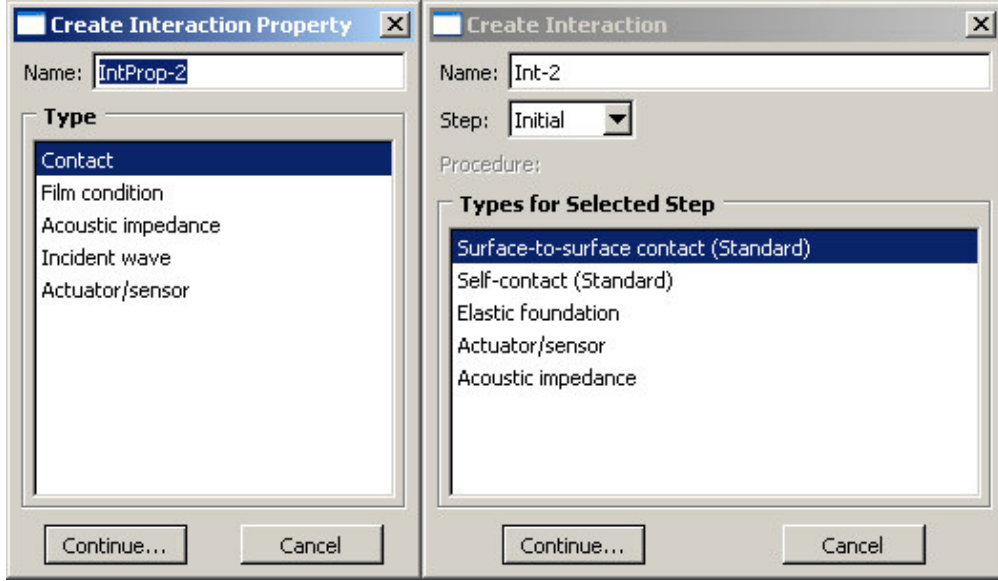


Şekil 2.17 Adım (Step) menüsü

“Step” menüsü daha sonra sınır koşulları ve yüklemeler tanımlanma sırasında kullanılacaktır.

2.2.5.7 Etkileşim (Interaction) tanımlanması

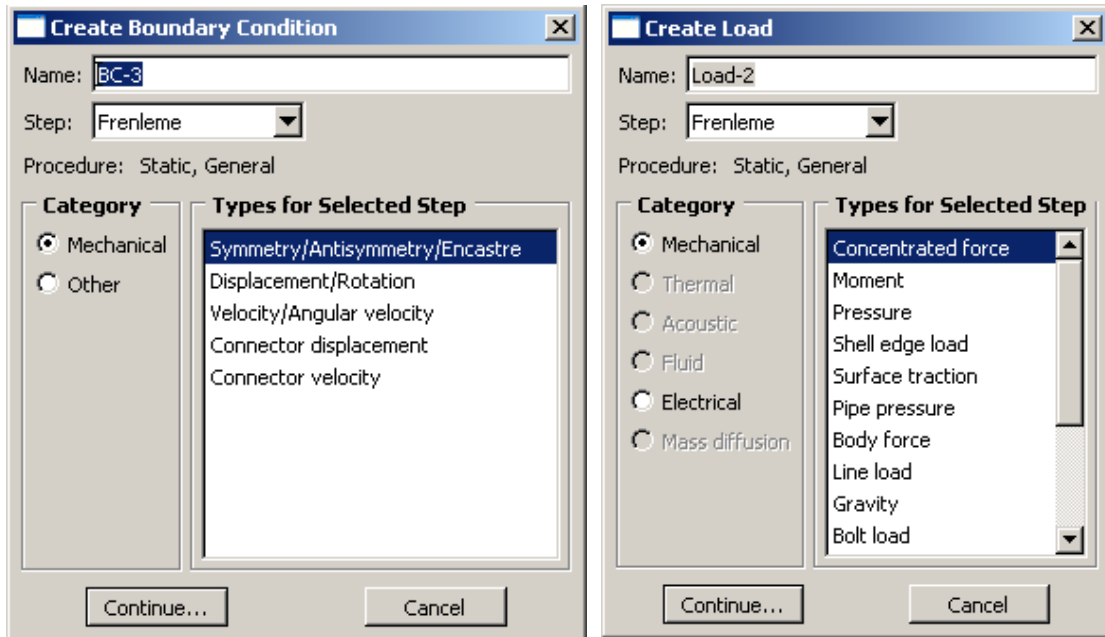
Model içerisinde birden fazla parça ihtiva edebilir. Bu parçalar analiz sırasında hareket ediyorsa veya her bir parça analiz sırasında farklı bir davranış gösteriyorsa o halde her parçanın birbiri arasındaki etkileşimleri tanımlanmalıdır. Örnek olarak; pim, cıvata, perno bağlantıları, herhangi iki parçanın birbiri üzerinde kayması veya birbirini itmesi (Can ve Kaya 2007). Şekil 2.18’ de etkileşim menüsü görülmektedir.



Şekil 2.18 Etkileşim menüsü

2.2.5.8 Sınır şartların ve yüklerin tanımlanması ve parçaya uygulanması

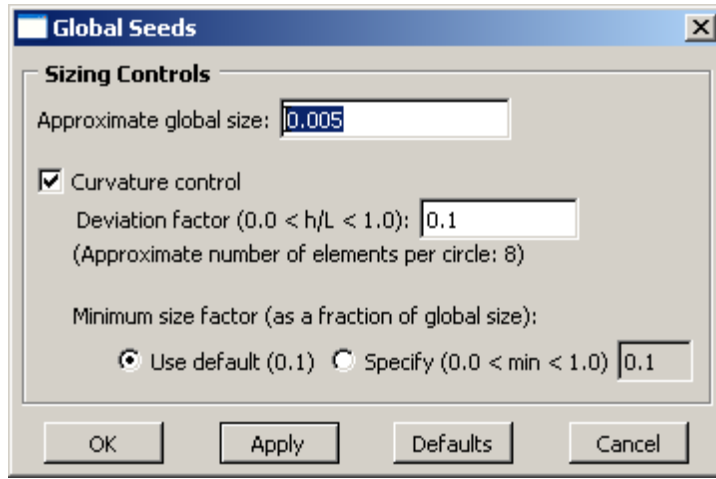
Şekil 2.19'da görülen menülerden sağdakinde yüklemelerin cinsi ve değerleri, soldakinde ise sınır şartları verilebilmektedir.



Şekil 2.19 Yükleme ve sınır şartlar menüleri

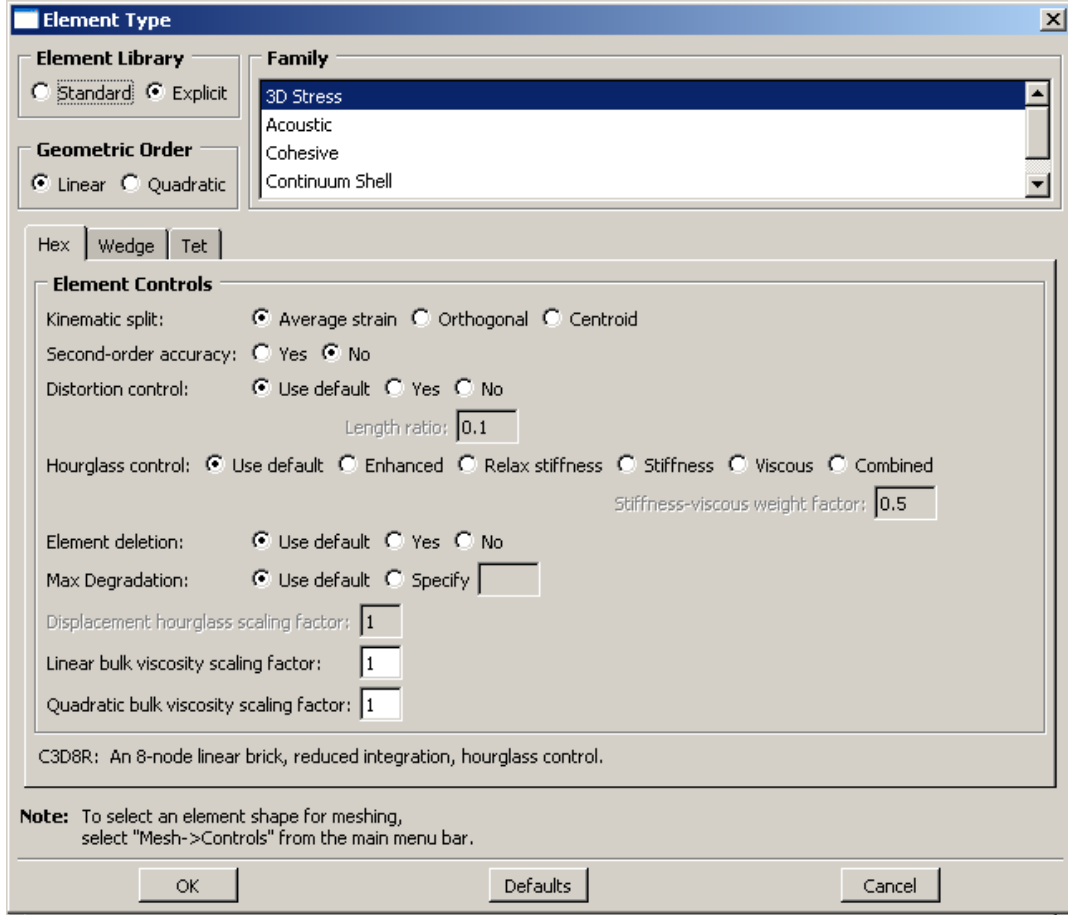
2.2.5.9 Parçanın küçük parçalara (mesh) bölünmesi

Daha önceki bölümlerde bahsettiğimiz üzere Abaqus/CAE kullanıcıya otomatik olarak kendi seçtiği en küçük parçanın (mesh) boyutlarını sunmaktadır. Eğer analizin daha doğru ve kesin sonuçları vermesi istendiği takdirde, Şekil 2.20’ de görüldüğü üzere en küçük yaklaşık dilimleme seçeneğindeki “approximate global size” değeri daha da düşürürüz. Eğer değer çok küçük olursa, bu parçadaki eleman sayısını artıracacağı için analizin çözülmesi uzun zaman alacağı anlamına gelir. Analiz hızı bilgisayar performansı ile doğru orantılıdır (Can ve Kaya 2007).



Şekil 2.20 Parçanın dilimlenmesi

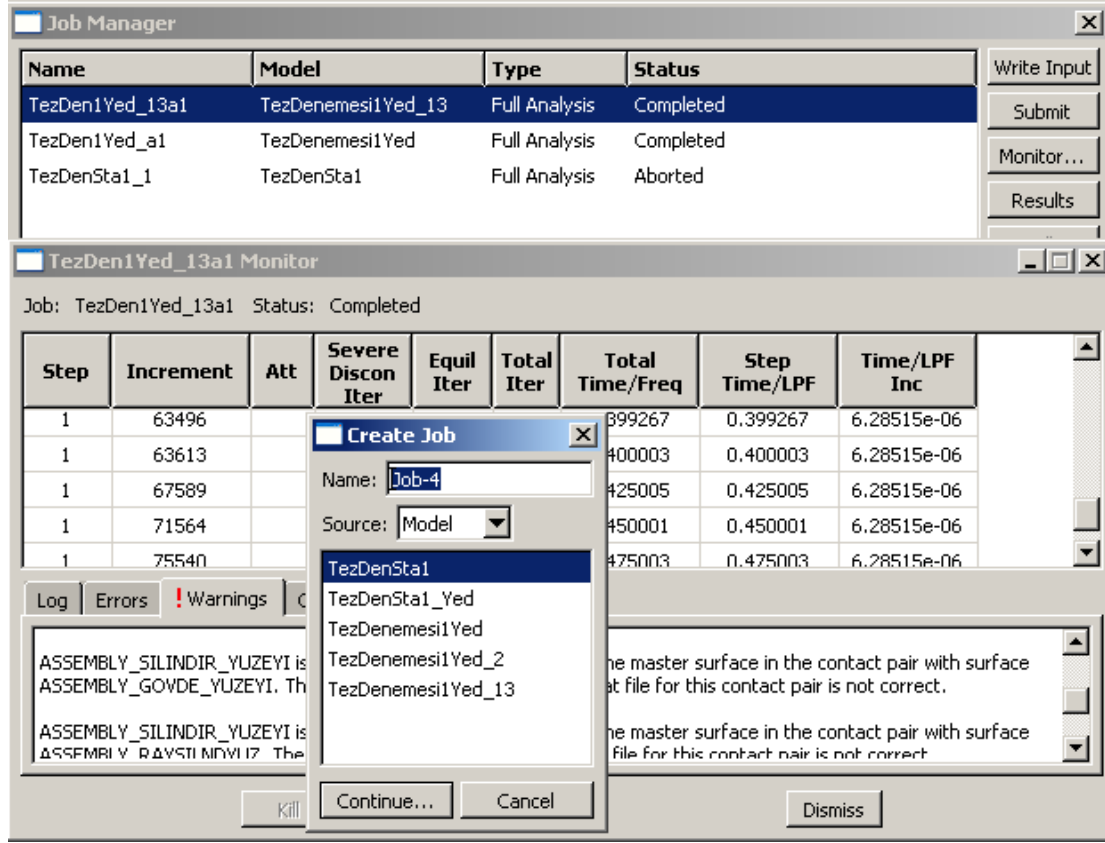
Parça dilimlendikten sonra eleman tipi kısmına geçilmelidir. Bu durumda da Abaqus/CAE programının en önemli özelliklerinden biri de akıllıca bizim seçtiğimiz model tipine uygun olan eleman tipi seçenekleri sıralamasıdır. Örneğin, yine mesh atma sırasında en uygun boyutlarda parçayı bölümleyebilmekte ve parça için seçilebilecek uygun eleman tiplerini otomatik olarak sıralamaktadır. Burada bilinmesi gerek husus, yapılacak yüklemeler sırasında parçanın maruz kalacağı deformasyonlara uygun tepki verecek eleman tiplerin seçimidir. Şekil 2.21’ de görülen menüden eleman tipi seçilir.



Şekil 2.21 Eleman tipi seçme menüsü

2.2.5.10 İş (Job) menüsü

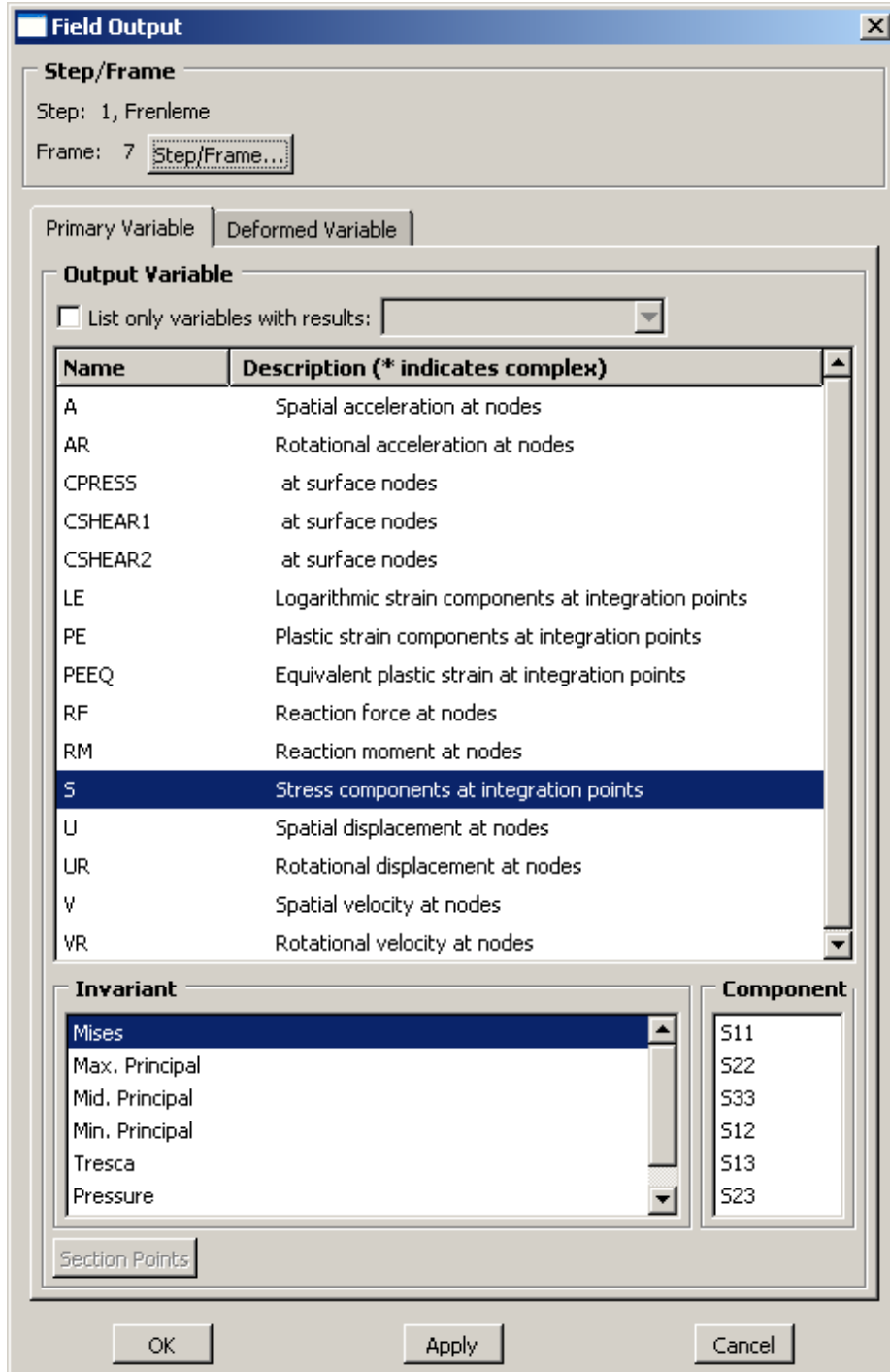
İş menüsünde analize hazır duruma getirdiğimiz modelin analize verilmesini sağlamaktayız. Bu menüde, analizin hangi durumda olduğu, analiz sırasında hataların veya uyarıların neler olduğu gözlemlenebilmektedir. Ayrıca, analizin bitmesinden sonra sonucun yazı editörüne kaydedilmesi veya görüntülenmesi sağlanır. Şekil 2.22’ de görülen menüden daha önce analizi yapılan bir çalışma görünmektedir.



Şekil 2.22 İş menüsü

2.2.5.11 Analiz sonrası işlemler (Postprocessor) menüsü

Abaqus/CAE programının bir diğer güçlü özelliği analiz sonucunda sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması için yeterli bir görsel araçları sağlamasıdır. “Postprocessing” aşamasında çözümde elde edilen değerler ekrana grafik olarak yansıtılmakta, karşılaştırmalar yapılmakta ve çıktı alınmaktadır. Örneğin, çözümü yapılmış bir parçanın gerilme, ivme, sıcaklık, yer değiştirme gibi önemi yüksek sonuçlar görsel olarak gözlemlenebilmektedir. Ayrıca, yukarıda bahsettiğimiz sonuçların gözlenmesi sırasında parça analiz adımları süresince nasıl hareket ettiğini hareketli bir görüntü şeklinde birebir taklidi yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Bu aşamada ayrıca çeşitli enerjilerin zamana göre dağılımları izlenebilmektedir. Şekil 2.23’te görülen menüden analiz sonrasında birçok sonucun görüntülenmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.23 Sonuçların görüntülenmesi menüsü

2.3 Sonlu Elemanlarda Alt Modelleme

2.3.1 Genel Olarak Alt Modelleme

Alt modelleme tekniği;

- Nispeten daha büyük yapılı, karmaşık problemlerin dataları kullanılarak yerel bölgelerin incelemesine olanak sağlar.
- Genel modelin tamamının modellenmesine gerek kalmadan yerel bölgede doğru ve detaylı çözüm elde etmememize olanak verir.
- Yüzey tabanlı ve düğüm tabanlı alt modelleme olarak iki farklı seçim sunar.
- Küresel model üzerinde sürekli değişim gösteren akustik sıvı örneklerin çözümünde de kullanılabilir.
- Abaqus' ün standart özellikleriyle kullanılabilir.
- Lineer ve lineer olmayan işlemlerde bir arada kullanılabilir.
- Dışardan alınan analizlerde kullanılamaz

2.3.2 Alt Modelleme Teknikleri

Alt modelleme tekniği Abaqus programında oldukça genel olarak kullanılabilir. Hem genel model hem de alt model için aynı malzeme kullanılabileceği gibi, farklı malzemede tanımlanabilir. Alt modelleme tekniği ilk olarak iki genel yönteme göre sınıflandırılır. En yaygın ve daha fazla kullanılan düğüm tabanlı alt modelleme yönteminde, genel model düğümleri üzerinde bulunan sonuçlar (sıcaklık, yer değiştirme gibi) alt model düğümlerine aktarılabilir. Bu yönteme alternatif olarak kullanılan yüzey tabanlı alt modelleme tekniğinde ise, genel model gerilme alanındaki sonuçlar alt model yüzeyine aktarılabilir (İnt. Kyn.2).

2.3.2.1 Düğüm Tabanlı Alt Modelleme

Düğüm tabanlı alt modelleme yöntemi abaqus programının çeşitli prosedürlerini ve eleman tipi kombinasyonlarını destekleyen genel bir tekniktir. Genel modelden daha

farklı bir eleman türü ile alt model için kullanılabilir. Bu yöntemin genel ve alt model için desteklediği eleman türleri aşağıda belirtilmiştir;

- İki boyutlu modeller:
 - Katı-katı
 - Akustik-yapı
- Üç boyutlu modeller:
 - katı-katı
 - kabuk-kabuk
 - membran-membran
 - kabuk-katı
 - akustik-yapı

Tamamı kabuk elemanlardan oluşturulmuş bir genel model, alt modelleme tekniği kullanılarak üç boyutlu katı bir modele dönüştürülebilir (İnt. Kyn.2).

2.3.2.2 Yüzey Tabanlı Alt Modelleme

Düğüm tabanlı alt modellemenin tamamlayıcısı olarak genel model üzerinde oluşan gerilmelerin alt model yüzeyi üzerine aktarılabilmesini sağlar. Bu yöntemin genel ve alt model için desteklediği eleman türleri aşağıda belirtilmiştir;

- İki boyutlu modeller:
 - Katı-katı
- Üç boyutlu modeller:
 - Katı-katı

Yüzey tabanlı alt modelleme aşağıdaki istisna eleman tipleri dışındaki elemanların statik analizini destekler;

- Silindirik elemanlar desteklenmez
- Sürekli kabuk elemanları desteklemez (İnt. Kyn.2).

2.3.3 Alt Modelleme Tekniğinin Uygulanışı

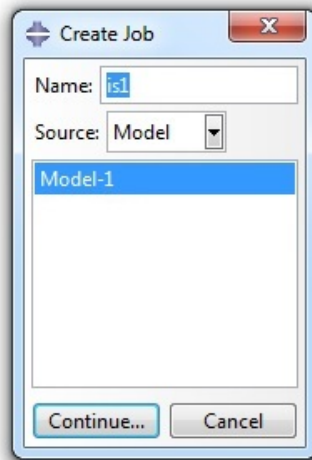
Alt modelleme tekniği, yüksek gerilmelere maruz kalmış bir bölgenin detaylı bir şekilde çözümünün yapılabilmesi için kullanılır. Aynı zamanda bu teknik kullanılarak kabuk yapıdaki genel modelden kabuktan katıya alt modelleme yöntemi kullanılarak katı model çözümlenebilir.

Bir alt model oluşturma, iki adımdan oluşur. İlk olarak genel bir model analiz edilir. Daha sonra genel model analizi sırasında kaydedilmiş olan sınır koşulları ve değişkenler aktararak alt model oluşturulur. Bu şekilde genel modeldeki veriler kullanılarak alt model analizi sağlanmış olur (İnt. Kyn.2).

Alt modelleme tekniğinin uygulanması için aşağıdaki aşamalar kullanılır;

2.3.3.1 Genel Model Analizi

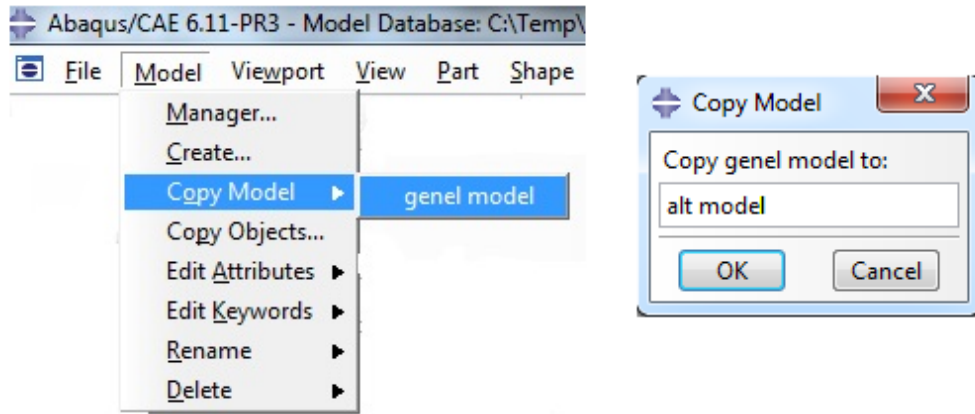
İlk olarak basit bir geometri kaba mesh yapılı bir şekilde analiz edilerek sonuçlar elde edilir. Bu model genel model olarak adlandırılır. Genel model analizi sonucunda oluşturulan veri çıktıları alt modeli çalıştırmak için kullanılır. Aşağıda Şekil 2.24' te gösterilen menüde genel model için iş dosyası oluşturulur. Ayrıca bu oluşturulan sonuç verileri abaqus programında saklanabilir ve farklı alt modellemeler için kullanılabilir (İnt. Kyn.2).



Şekil 2.24 İş dosyası oluşturma

2.3.3.2 Alt Modelin Oluşturulması

Genel modelin tamamı başarıyla analiz edilip sonuç verileri elde edildikten sonra alt model oluşturulur. Alt modelin kullanacağı yeni modeli oluşturmak için ilk olarak genel model kopyalanır. Şekil 2.25' te görüldüğü gibi genel modeli kopyalamak için ana menü çubuğundan **Model**→**Copy**→**genel model adı** seçilir. Karşımıza çıkan **copy model** iletişim kutusunda alt model adı girilerek OK seçeneği tıklanır (İnt. Kyn.2).

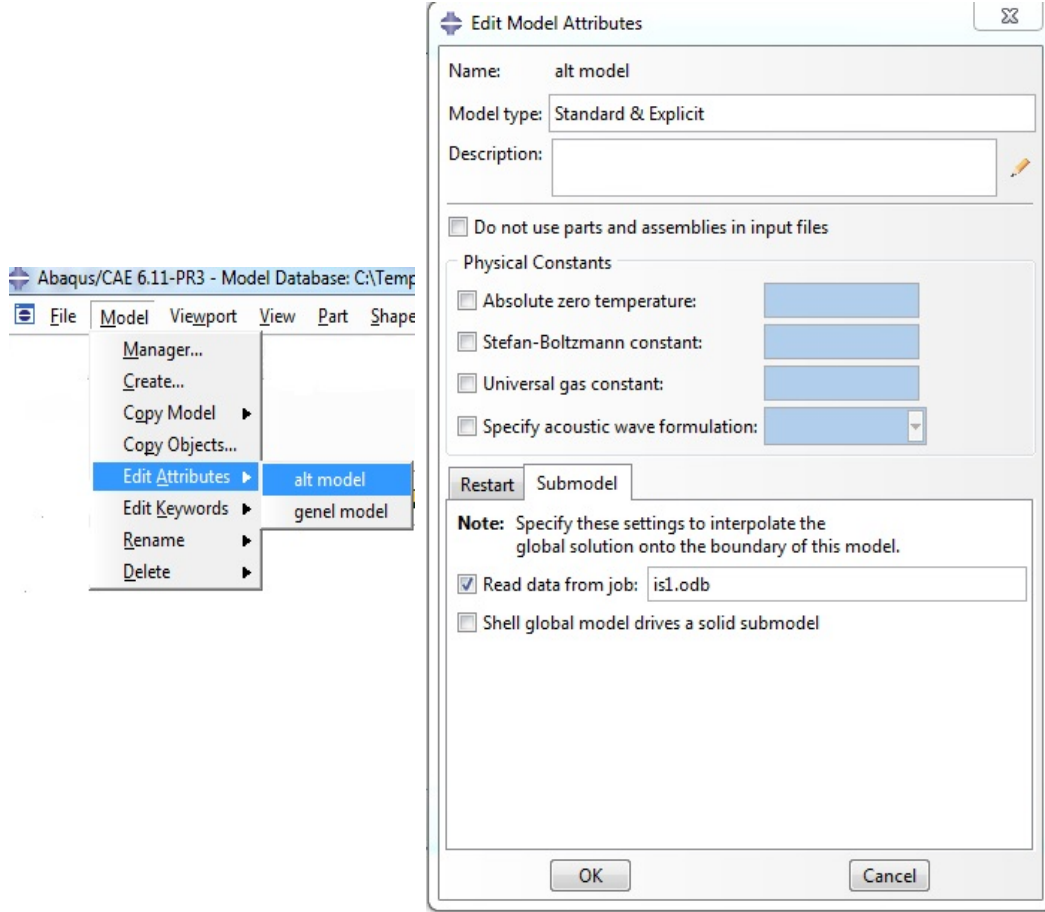


Şekil 2.25 Genel modelin kopyalanması

Kopyaladığımız güncel alt modelimizi analiz yapabilmek için genel modeldeki data sonuç dosyalarını alt modele aktarmamız gerekir. Bu dosyaları aktarmak için Şekil 2.26' da görüldüğü gibi ana menü çubuğundan **Model**→**Edit Attributes**→**alt model adı** seçilir. Burada model düzenleme iletişim kutusundan **submodel** sekmesi tıklanarak aşağıdakiler yapılır:

- **Read data from job** imleci tıklanarak alt modeli sürmek için kullanacağımız genel modelin sonuç verilerini içeren dosya ismi yazılır. Doğru veri ismi yazıldıktan sonra sonuna dosya uzantısı olarak (.odb veya .fil) eklenir.
- Buna ek olarak, eğer kabuk genel model üzerinden katı alt model yönlendirilecekse **Shell global model drives a solid submodel** sekmesi tıklanır.

- **Edit Model Attributes** İletişim kutusunu kapatmak için OK seçeneği tıklanır (İnt. Kyn.2).



Şekil 2.26 Alt model oluşturma

2.3.3.3 İstenmeyen Bölgelerin Çıkartılması

Analiz ile ilgisi olmayan alt model bölgeleri çıkartılabilir. Sadece alt modelle alakalı bölgeler kalmalıdır. Alt modelin bir kısmını çıkartmak için çeşitli teknikler vardır.

- **Part modül** kısmındaki kesim araçları kullanılır.
- Yüzey bölgelerini düzenlemek için **tools** sekmesi içerisinde **Geometry Edit** seçeneği kullanılır.
- Part modülünde silinme işlemi yapıldıktan sonra yeni bir isimle parça oluşturulabilir. Daha sonra alt model için parçanın özgün hali kalmak koşuluyla, farklı geometrik özellikler eklenebilir.

Yeni bir alt model oluşturma kabuk yapıdaki bir modeli katı yapıdaki alt modele dönüştürmek için çok kullanışlı bir tekniktir. Kopyalanan bu kabuk modelin parçası silinerek aynı konumda yeni katı model oluşturulabilir (İnt. Kyn.2).

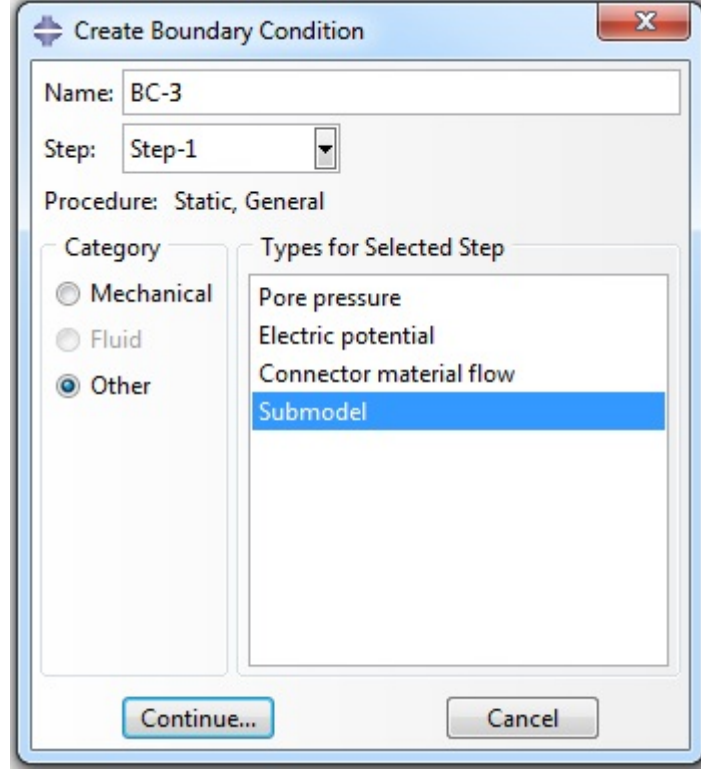
2.3.3.4 Alt Model Sınır Koşullarının Oluşturulması

En yaygın kullanılan alt modelleme tekniği genel model üzerindeki nodal sonuçların (yer değiştirme, sıcaklık) alt modele aktarılmasıyla oluşturulan düğüm tabanlı alt modelleme tekniğidir. Daha genel olan düğüm tabanlı alt modelleme tekniğini kullanmak için sınır koşulları oluşturmak gerekir.

Eğer bir önceki adımda genel model deplasman/ dönme sınır koşulu gibi kısıtlamalara maruz kalmış ise düğümlere alt model sınır koşulu uygulanır. Abaqus programında Alt model sınır koşulları uygulanmadığı takdirde genel modelin sınır koşulları geçerli sayılır.

Bir alt model sınır koşulu oluşturmak için aşağıdaki adımlar Şekil 2.27’de üzerinde uygulanır:

1. Ana menü çubuğundan **load** modülüne girilerek **BC** → **create** seçilir.
2. Step sekmesinden alt modelin uygulanacağı step ismi seçilir.
3. Burada **Category** alanından **other** seçeneği seçilir.
4. **Types for Selected Step** alanından **submodel** seçilerek devam edilir.



Şekil 2.27 Alt model için sınır koşulu oluşturma

5. Model üzerinden, sınır koşulunun uygulanacağı bölgeleri seçilir. Aynı bölgelerden sınır koşulları belirlenemez. Sınır koşullarında alt model sınır koşulu her zaman önceliklidir.
6. Aşağıda Şekil 2.28’de karşımıza çıkan **Edit Boundary Condition** iletişim kutusundan aşağıdakiler yapılır:
 - a. **Driving region** alanından aşağıdakiler yapılır:
 - **Automatic** sekmesi seçildiğinde, Abaqus programı alt model çevresinde arama yaparak genel model üzerinden aldığı tahrik düğümleri sayesinde sürülmesini sağlar.
 - **Specify** sekmesi seçildiğinde, sürdürülmek istenen set ismi belirlenebilir. Set ismi, assembly_name.part_name-1.set_name şeklindeki tam olarak yazılması gerekir.
 - b. Kabuk yapıdaki bir genel model üzerinden katı alt model sürdürülecekse, genel model **Shell thickness** alanında gövde kalınlığı maksimum seçilmelidir.

- c. **Exterior tolerance** alanında aşağıdakiler yapılır:
- **Absolute** kısmına mutlak tolerans değeri girilir.
 - **Relative** kısmına ise göreceli bir tolerans değeri girilir.
- d. Eğer katıdan katıya alt modelleme veya kabuktan kabuğa alt modelleme teknikleri kullanılacak ise **degrees of freedom** kısmına örneğin; 1,2,3 şeklinde serbestlik derecesi değerleri girilmesi gerekir.
- e. Bir kabuk genel model ile katı alt model sürdürülmesi yapılırsa, kabuk orta yüzeyi etrafında merkez bölge kalınlığı alınır.
- f. **Global step number** alanına, sürülen değişken değerlerinin okunacağı genel model adım sayısını temsil eden tamsayı değeri girilir.
- g. Eğer lineer durum adımında statik sınır koşulu oluşturulursa sürülen değişken değerlerini hesaplamak için esas olacak genel analiz de artış belirtilebilir.
- h. Alt model analiz ve genel analiz süreleri farklı olabilir, alt model analiz genellikle daha az sürede çözüm sağlar (İnt. Kyn.2).

The image shows a dialog box titled "Edit Boundary Condition". The fields are as follows:

- Name: BC-3
- Type: Submodel
- Step: Step-1 (Static, General)
- Region: (Picked)
- Driving region: Automatic, Specify: []
- Exterior tolerance: absolute [0], relative [0.05]
- Magnitudes: [Use results from global model]
- Degrees of freedom: [3]
- Global step number: [1]
- Scale: [1]
- Scale time period of global step to time period of submodel step.

Buttons: OK, Cancel

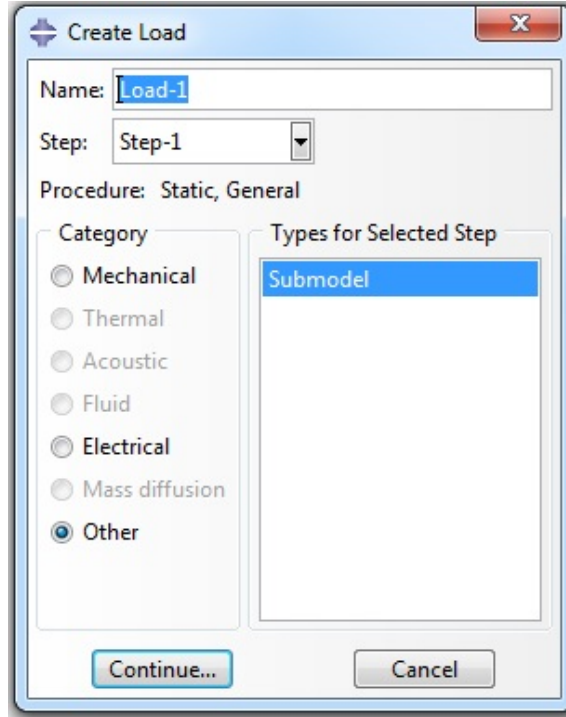
Şekil 2.28 Sınır koşullarını düzenleme iletişim kutusu

2.3.3.5 Alt Model İçin Yük Oluşturulması

Yüzey tabanlı alt modelleme tekniği, tahrik unsurlarının alt modelin yüzeyine uygulanarak genel model sonuçlarını gerilme alanında kullanan alternatif bir tekniktir. Yüzey tabanlı alt modellemeyi kullanmak için, bir alt model yük oluşturulmalıdır.

Bir alt model yük oluşturmak için Şekil 2.29'da üzerinde aşağıdaki adımlar izlenir:

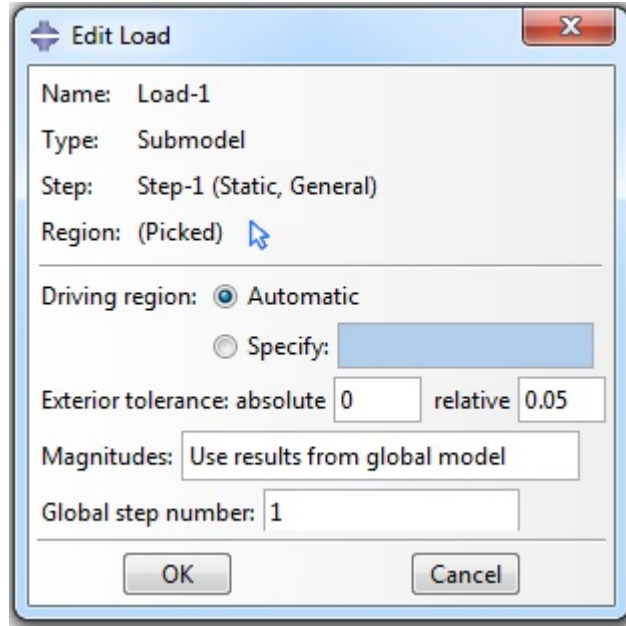
1. Ana menü çubuğundan **load** modülüne girilerek **load** → **create** seçilir.
2. Step sekmesinden alt modelde yükün uygulanacağı step ismi seçilir.
3. Burada **Category** alanından **other** seçeneği seçilir.
4. **Types for Selected Step** alanından **submodel** seçilerek devam edilir.



Şekil 2.29 Alt model için yük oluşturmak

5. Model üzerinden yük uygulanacak bölgeler seçilir. Kabuk bir yüze yük uygulanıyorsa, Abaqus / CAE yükün uygulanacağı yüzün kenarını belirtmemizi ister.
6. Aşağıda Şekil 2.30'da karşımıza çıkan **Edit Load** iletişim kutusundan aşağıdakiler yapılır:

- a. Driving region alanından aşağıdakiler yapılır:
- **Automatic** sekmesi seçildiğinde, Abaqus programı alt model çevresinde arama yaparak genel model üzerinden aldığı tahrik düğümleri sayesinde sürülmesini sağlar.
 - **Specify** sekmesi seçildiğinde, sürdürülmek istenen set ismi belirlenebilir. Set ismi, assembly_name.part_name-1.set_name şeklindeki tam olarak yazılması gerekir.
- b. Exterior tolerance alanında aşağıdakiler yapılır:
- **Absolute** kısmına mutlak tolerans değeri girilir.
 - **Relative** kısmına ise göreceli bir tolerans değeri girilir.
- c. **Global step number** alanına, sürülen değişken değerlerinin okunacağı genel model adım sayısını temsil eden tamsayı değeri girilir (İnt. Kyn.2).



Şekil 2.30 Yük düzenleme iletişim kutusu

2.3.3.6 Alt Model Üzerinde Değişiklik Yapılması

Alt model üzerinde aşağıdaki değişiklikler yapılabilir:

- Analiz yöntemini değiştirmek için **step** adımı kullanılır. Alt model için genel bir yöntem ya da lineer bir yöntem kullanılabilir.

- **Load** modülünde herhangi bir yük, sınır koşulu değiştirilecek ise genel model üzerindeki bölgelere uygulanan başlangıç koşullarını kaldırmak gerekir.
- Bir sınır koşulu eğer alt model sınır koşulunu uyguladığımız bölgenin dışında uygulanacak olursa, bunun genel modelin yükleme durumuna uygun olmasına dikkat edilmelidir.
- Benzer şekilde alt modele uygulanan yük, genel modelin yükleme durumuna karşılık gelmesinden emin olunmalıdır.
- Çoğu durumda **Mesh** modülünde alt modele daha hassas bir mesh uygulanır. Alt modele atanan eleman türü değiştirilebilir ancak, boyutluluk değiştirilemez. Genel model ve alt model, iki boyutlu veya üç boyutlu olması gerekir (İnt. Kyn.2).

2.3.3.7 Alt Model Analizi

Alt model analizi için **job** modülünden aşağıdakiler yapılır:

- Alt modeli içeren yeni bir **job** oluşturulur.
- Oluşturulan bu yeni iş **submit** tıklanarak çalıştırılır (İnt. Kyn.2).

2.3.3.8 Alt Modelde Elde Edilen Sonuçların Kontrolü

Analiz tamamlandıktan sonra, genel model ve alt model için sonuçları görmek için **Visualization** modülü kullanılır. Doğru bir karşılaştırma için, aynı ölçekli grafikler kullanılmalıdır. Ayrıca aşağıdakilere dikkat edilmelidir:

Alt modelin konumu sonuçların değerlendirilmesi için önemli bir etkidir. Genel modele göre alt modelin konumunun doğru olup olmadığı kontrol edilmelidir. Genel model ve alt model çıkış veri tabanından orantılı grafikler kullanılarak kontrol edilebilir. Alternatif olarak, genel modeldeki parçaların geçici örnekleri alt model analizi yapılmadan montaj modülünde göreceli olarak kontrol edilebilir. Burada alt modelin montaj konumuna göre genel modelin montaj konumu görülebilir.

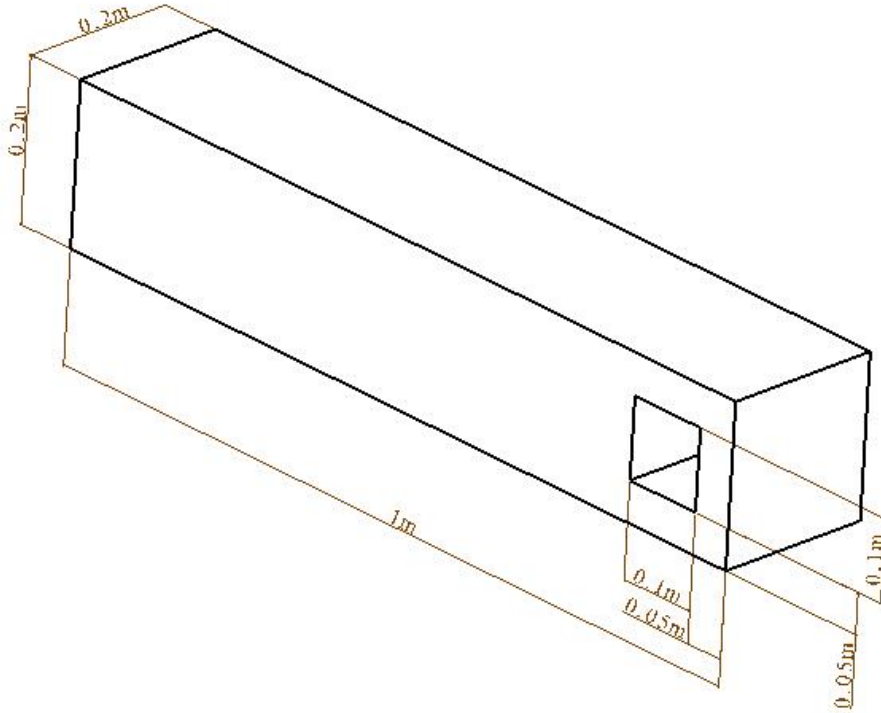
Hiçbir zaman alt modeldeki sonuç genel modeli etkilemez. Alt model sonuçlarının genel model sonuçlarını etkilememesi alt modelleme tekniğinin temel varsayımıdır. Gerilme ve yer değiştirme değişkenlerinin grafikleri oluşturularak bu durum kontrol edilebilir (İnt. Kyn.2).

3. ANALİZ VE HESAPLAMALAR

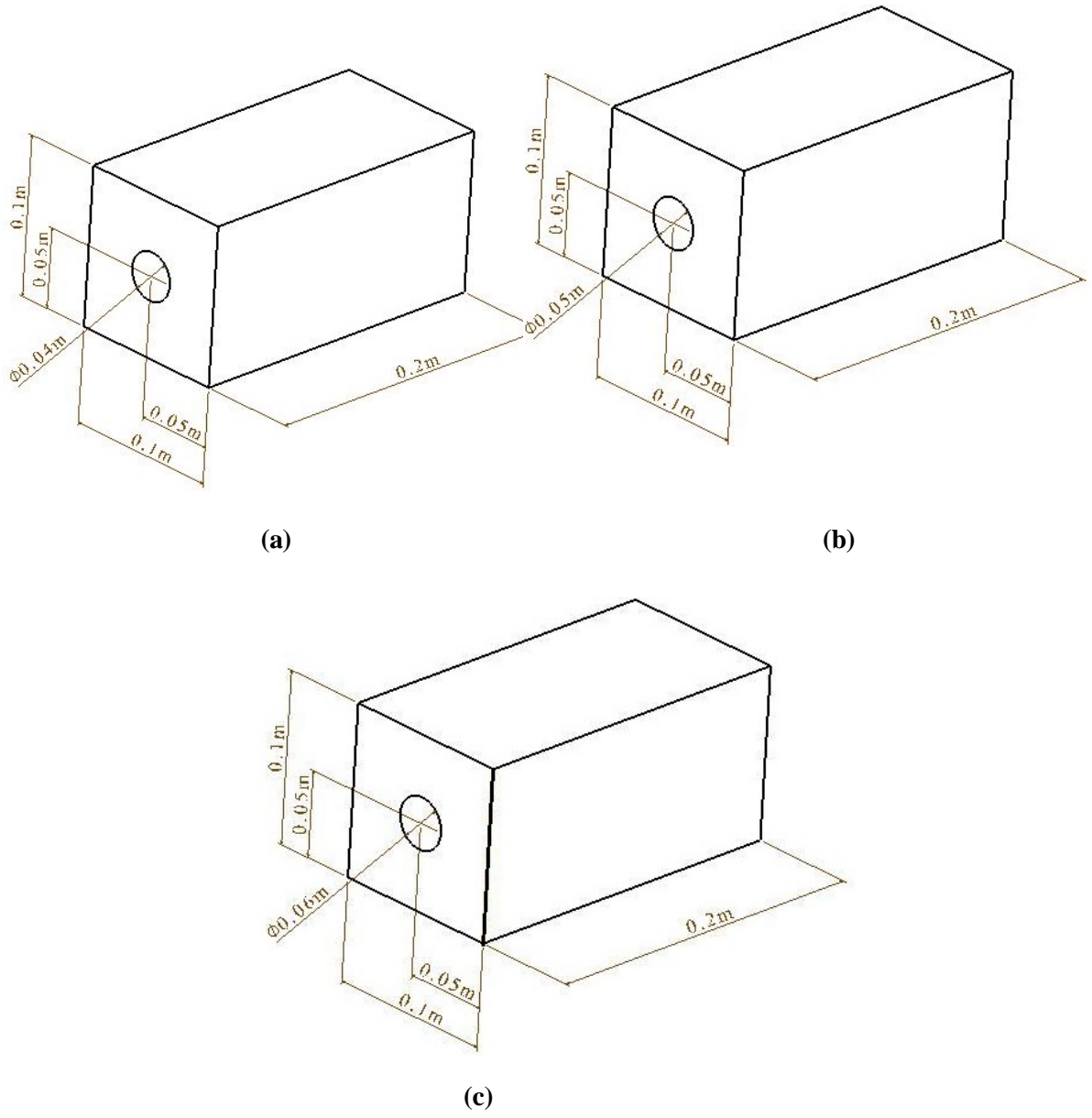
3.1 Üç Boyutlu Kiriş Analizi

3.1.1 Problemin Geometrik Modeli ve Sınır Koşulları

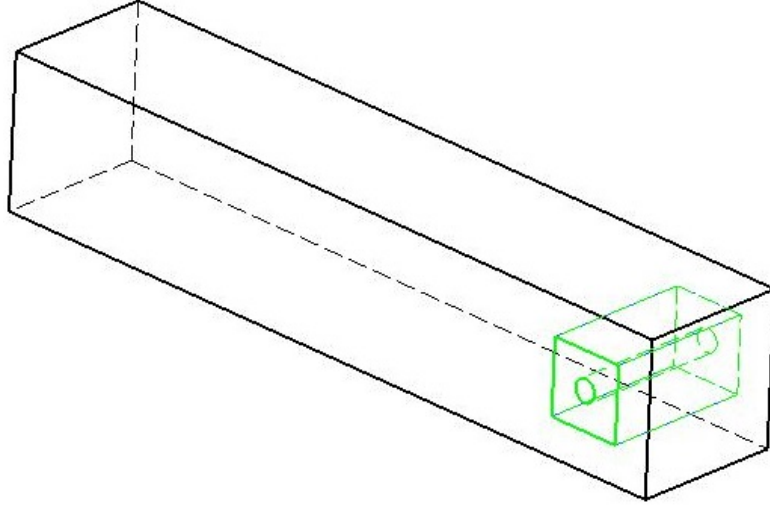
Üç boyutlu kiriş, sonlu elemanlarda alt modelleme tekniği kullanılarak modellenmiştir. Bir genel model (Şekil 3.1) ve bu genel model üzerinde bulunan $D_1=0,04$ m, $D_2=0,05$ m, $D_3=0,06$ m boyutlarında 3 farklı delik çapında alt model oluşturulmuştur (Şekil 3.2). Ayrıca aynı kiriş, alt modelleme tekniği kullanılmadan modellenerek alt modelleme tekniğinin etkisi araştırılmıştır. Analizi yapılması için son halini alan alt model ve genel modelin birlikte verildiği problem aşağıdaki Şekil 3.3' de verilmiştir.



Şekil 3.1 Genel model

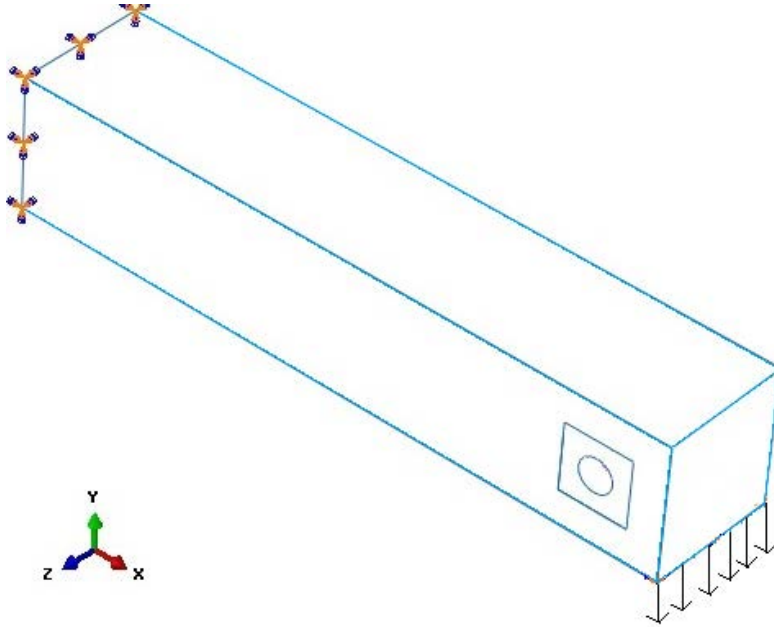


Şekil 3.2 Alt modeller (a. 0,04 m delik çaplı alt model, b. 0,04 m delik çaplı alt model, c. 0,04 m delik çaplı alt model)



Şekil 3.3 Alt modelleme tekniği uygulanacak üç boyutlu kiriş

İncelenen kirişin, alt modeli ve alt model kullanılmadan yapılan analizler için aynı sınır koşulları kullanılmıştır. Şekil 3.4’ te görüldüğü gibi delikli kısma uzak olan yüzeyden ankastre olarak sabitlenmiş ve uç kısmından Y yönünde yayılı olarak -0,001 m uzamaya maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.4 Üç boyutlu kiriş için sınır koşulları

3.1.2 Kirişin Malzeme Özellikleri

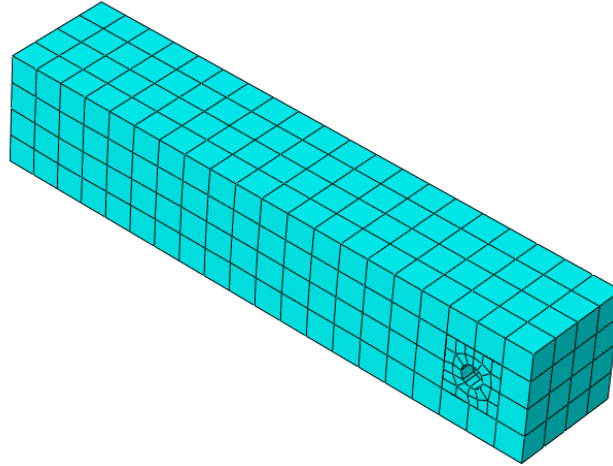
Farklı modellemeler için tek tip malzeme olarak alüminyum düşünülmüştür. Problemlerde kullanılan malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Üç boyutlu kiriş için malzeme özellikleri

Elastik Modülü (E) (GPa)	69
Poisson Oranı (ν)	0,3
Yoğunluk (ρ) (kg/ m ³)	2740

3.1.3 Sonlu Elemanlar Modeli

Üç boyutlu kiriş için, lineer statik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Problemin sonlu elemanlar modelleri Şekil 3.5’te verilmiştir. Deliklerin bulunduğu kritik bölgeler daha yoğun ağ yapısına ayrılmıştır. Ayrıca problemin analizi için düğüm tabanlı alt modelleme tekniğindeki katıdan katıya dönüşüm kullanılmıştır. Modelin ağ yapısı için 8 düğümlü *C3D8R* eleman kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Üç boyutlu kirişin ağ yapısı

Yapılan modellemelerin toplam değişken sayısı, eleman sayısı ve düğüm sayılarını gösteren sonlu elemanlar modeli Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Üç boyutlu kiriş için sonlu elemanlar modeli

Çap (m)	Model	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Toplam Serbestlik Derecesi
0,04	Alt modellenli çözüm	528	916	2748
	Alt modellenli çözüm	592	905	2715
0,05	Alt modellenli çözüm	528	916	2748
	Alt modellenli çözüm	580	895	2685
0,06	Alt modellenli çözüm	528	916	2748
	Alt modellenli çözüm	624	960	2880

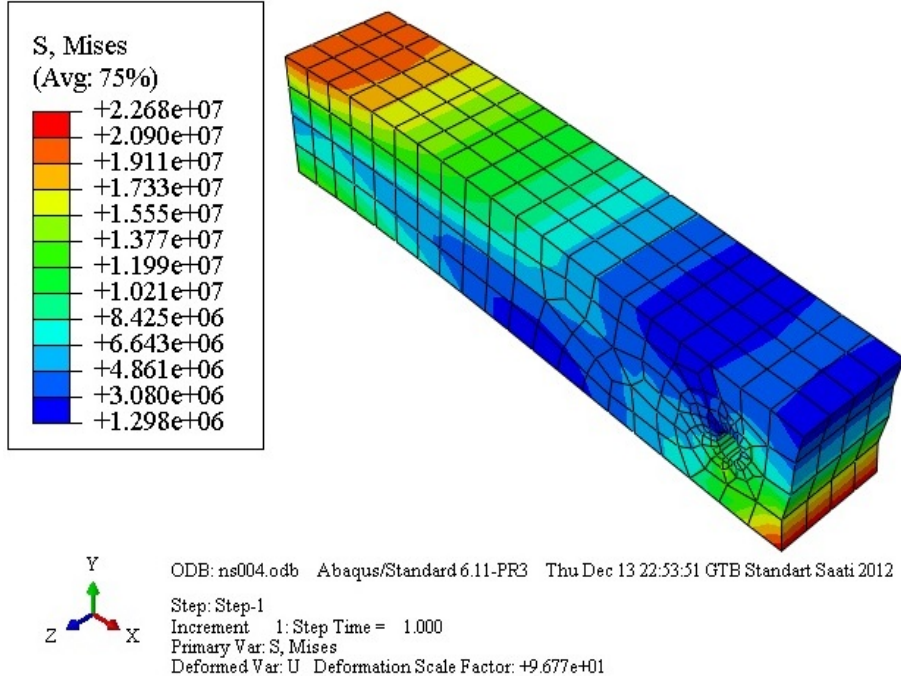
3.1.4 Bulgular

Üç boyutlu kiriş modeli için, $D_1=0,04$ m, $D_2=0,05$ m, $D_3=0,06$ m boyutlarındaki farklı delik çaplarında alt modelleme tekniği kullanılarak ve bu teknik kullanılmadan modellemeler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen verilere göre sistemde meydana gelen gerilmeler bütün ve kesit halde Von-Mises cinsinden incelenmiştir. Ayrıca reaksiyon kuvvetleri ve çözüm zamanları karşılaştırılmıştır.

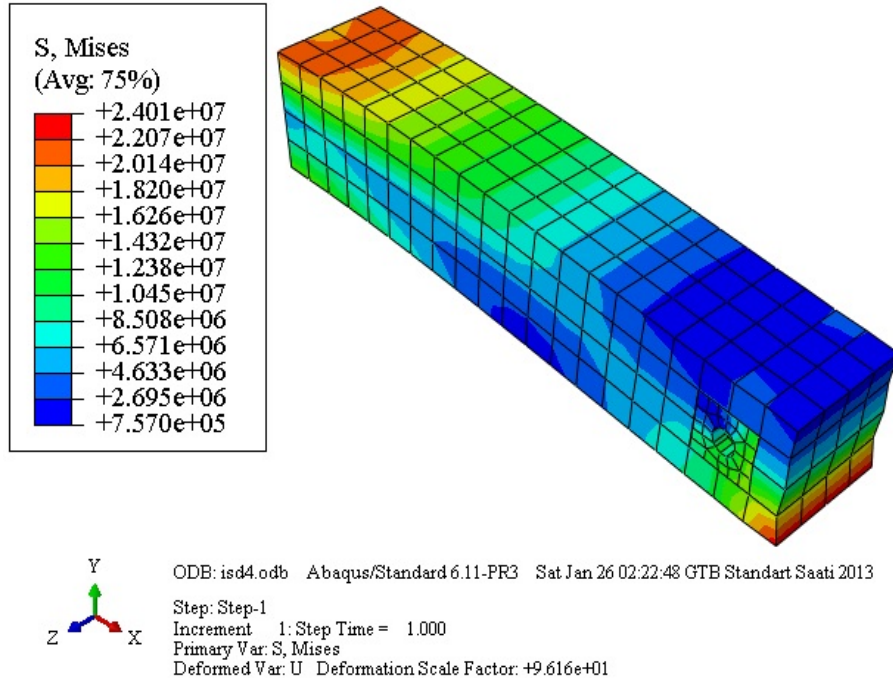
3.1.4.1 Gerilme Analizi

Delik Çapı 0,04 m Olan Kiriş

0,04 m delik çapındaki kirişler için alt modelleme tekniği uygulanarak ve bu teknik uygulanmadan analizler yapılmış sonucunda oluşan gerilmeler Şekil 3.6 ve Şekil 3.7' de gösterilmiştir.



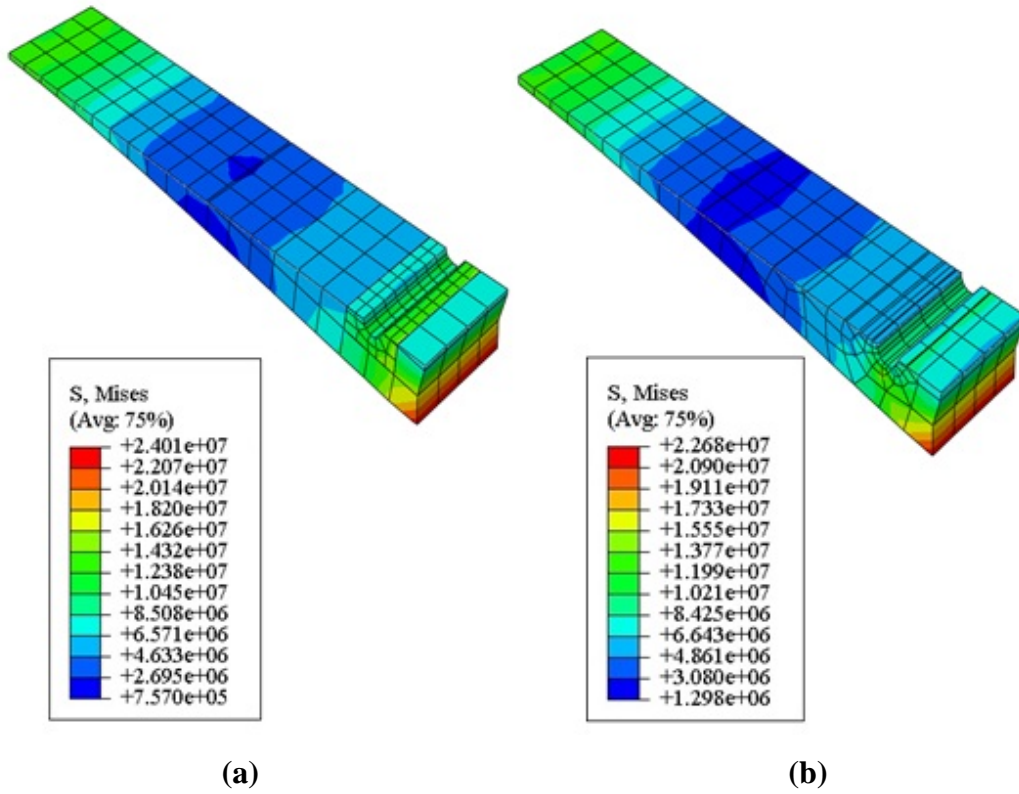
Şekil 3.6 0,04 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm



Şekil 3.7 0,04 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılarak yapılan çözüm

Alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm için maksimum gerilme 22,68 MPa olarak oluşmuş, aynı şartlar altında bu teknik kullanılarak çözüm yapıldığında maksimum gerilme 24,01 MPa gerilme meydana gelmiştir. Her iki şekildeki analizler için de gerilme dağılımları yaklaşık olarak aynı bölgelerde oluşmuştur. En yüksek gerilme değerleri deplasmanın uygulandığı bölgede ve bu bölgeye en uzak olan ankastre bağlantı noktasında oluşmuştur. Alt modelleme ile yapılan çözüm ile bu teknik uygulanmadan yapılan çözüm sonuçları yaklaşık aynı değerlerde gerçekleşmiştir. Arada oluşan küçük farkın ise ağ yapılarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

0,04 m delik çapındaki üç boyutlu kiriş modeli için alt modelleme tekniği uygulanarak ve bu teknik uygulanmadan yapılan analizlerin y yönündeki kesit görüntüleri Şekil 3.8' de gösterilmiştir.



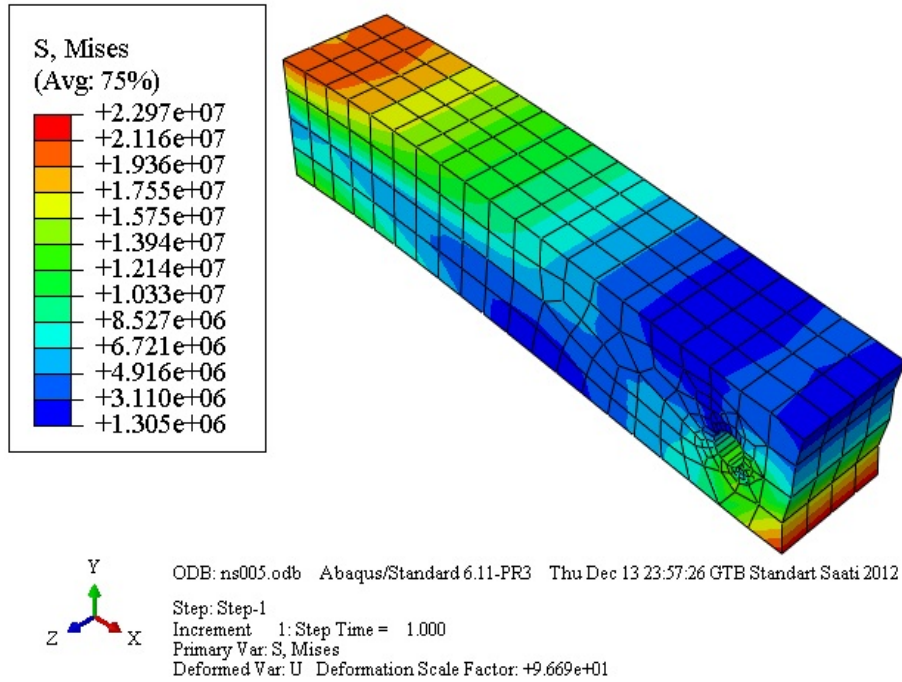
Şekil 3.8 0,04 m delik çapı için kesit halinde gerilmeler (a. alt modelli çözüm, b. alt modelsiz çözüm)

İç kısımdaki oluşan gerilme dağılımlarına kesit halinde bakıldığında genel olarak alt modelli tasarımda daha yoğun şekilde gerilmeler görülmektedir. Aynı şekilde delik

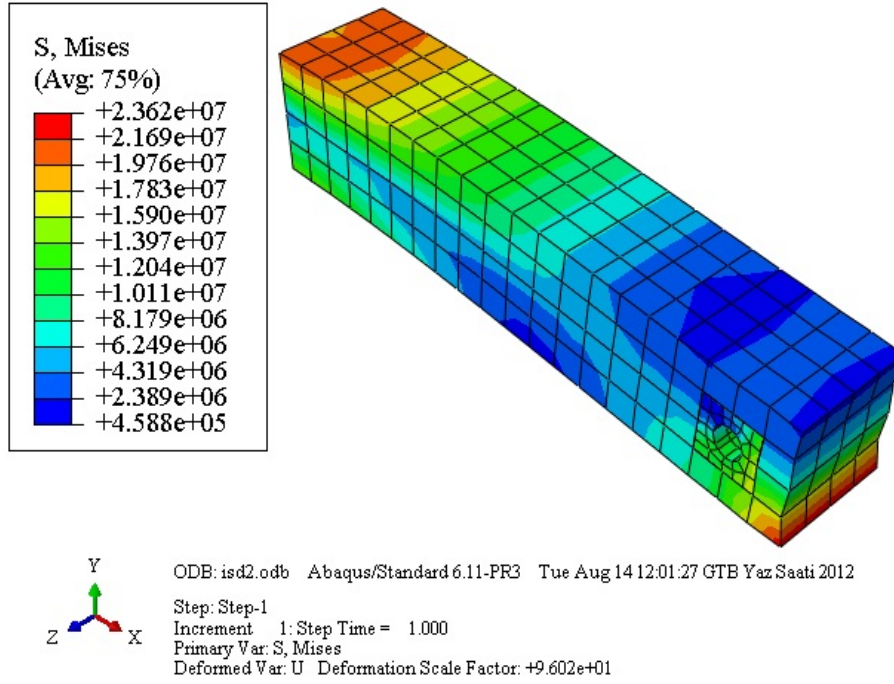
bölgesinde meydana gelen gerilmelere bakıldığında ise alt modellenli çözümde daha yüksek gerilme değerleri oluşmuştur. Genel olarak her iki modele de bakıldığında, delik çevresi iç bölgelerde çok büyük gerilmeler oluşmamıştır. Gerilmeler genellikle, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’ de görüldüğü gibi deplasman uygulanan noktada ve bu noktaya en uzak ankastre bağlantısının olduğu bölgede yoğunlaşmıştır.

Delik Çapı 0,05 m Olan Kiriş

Üç boyutlu kiriş modeli için 0,05 m delik çapında alt modelleme tekniği uygulanarak ve bu teknik uygulanmadan analizler yapılmış sonucunda oluşan gerilmeler Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’ da gösterilmiştir.



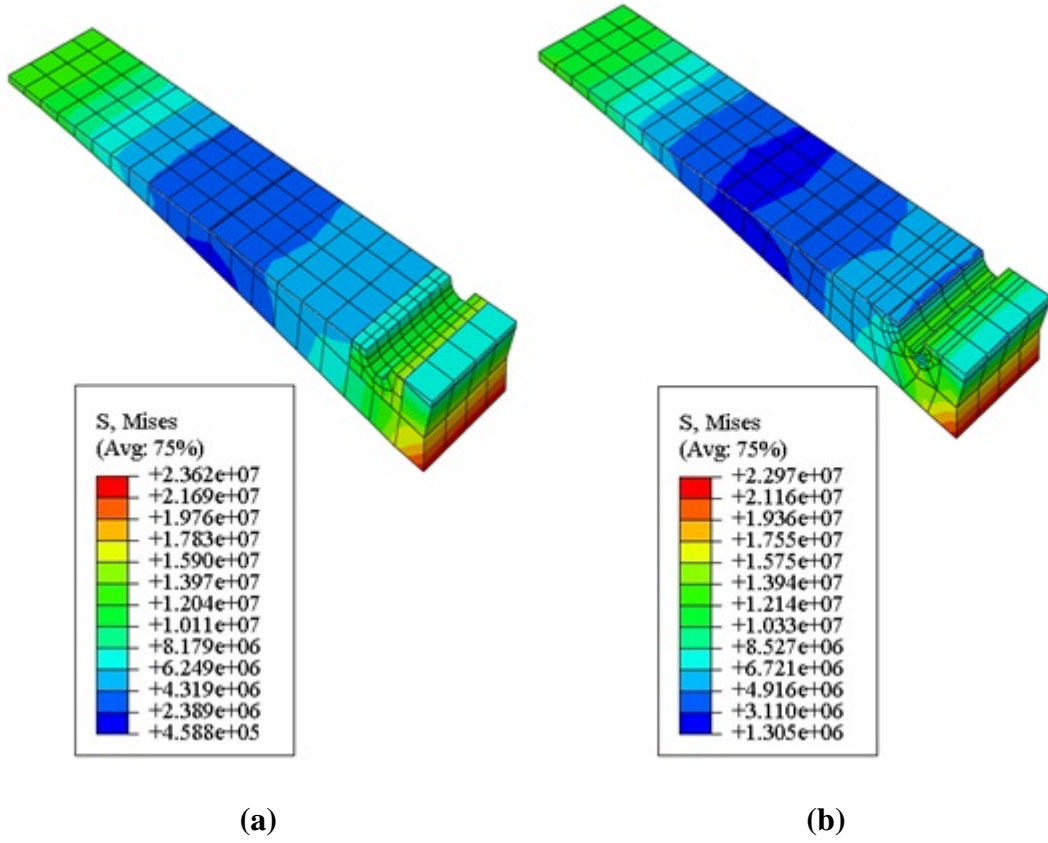
Şekil 3.9 0,05 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm



Şekil 3.10 0,05 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılarak yapılan çözüm

Oluşan maksimum gerilmeler alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm için 22,97 MPa, aynı şartlar altında bu teknik kullanılarak çözüm yapıldığında 23,62 MPa gerilme meydana gelmiştir. Genellikle gerilme dağılımları benzer bölgelerde gerçekleşmiştir. En yüksek gerilme değerleri deplasmanın uygulandığı bölgede ve bu bölgeye en uzak olan ankastre bağlantı noktasında oluşmuştur. Alt modelleme ile yapılan çözüm ile bu teknik uygulanmadan yapılan çözüm sonuçları yaklaşık aynı değerlerde gerçekleşmiştir. Arada oluşan küçük farkın ise ağ yapılarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Üç boyutlu kiriş modelinde, 0,05 m delik çapı için alt modelleme tekniği uygulanarak ve bu teknik uygulanmadan yapılan analizlerin y yönündeki kesit görüntüleri Şekil 3.11' de gösterilmiştir.

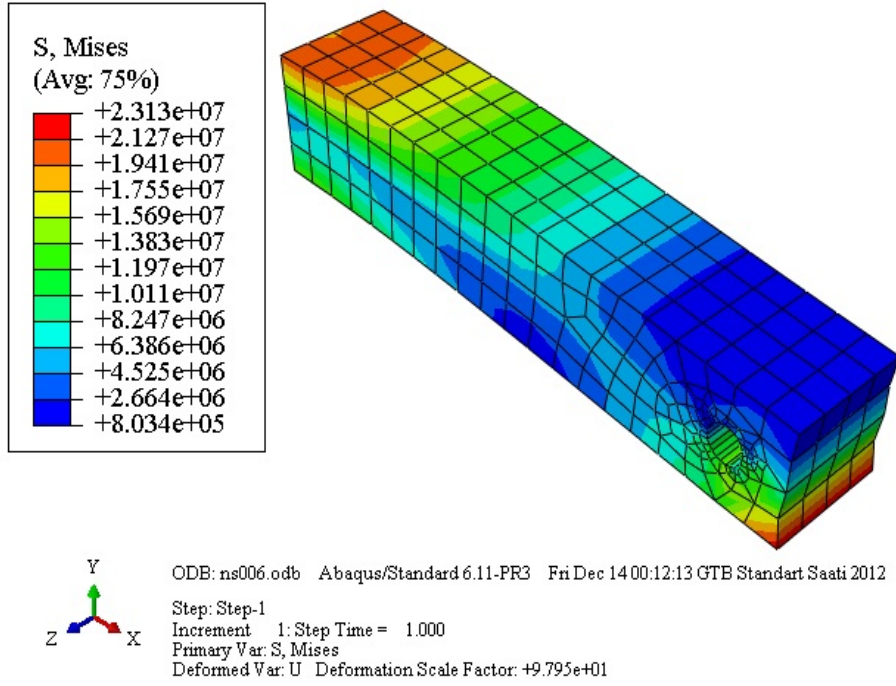


Şekil 3.11 0,05 m delik çapı için kesit halinde gerilmeler (a. alt modelli çözüm, b. alt modelsiz çözüm)

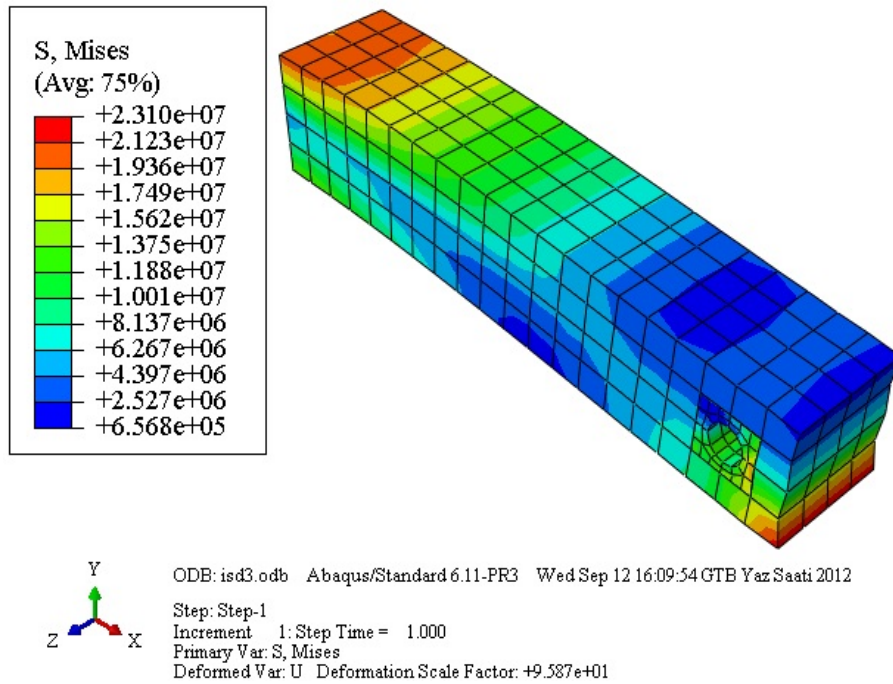
İç kısımdaki oluşan gerilme dağılımlarına kesit halinde bakıldığında, 0,04 m delik çapındaki model ile benzerlik göstererek genel olarak alt modelli tasarımda daha yoğun şekilde gerilmeler görülmektedir. Aynı şekilde delik bölgesinde meydana gelen gerilmelere bakıldığında ise alt modelli çözümde daha yüksek gerilme değerleri oluşmuştur. Genel olarak her iki modele de bakıldığında, delik çevresi iç bölgelerde çok büyük gerilmeler oluşmamıştır. Gerilmeler genellikle, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’ da görüldüğü gibi deplasman uygulanan noktada ve bu noktaya en uzak ankastre bağlantısının olduğu bölgede yoğunlaşmıştır.

Delik Çapı 0,06 m Olan Kiriş

Gerilme analizleri 0,06 delik çapı için yapıldığında oluşan analiz sonuçları Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’ de gösterilmiştir.



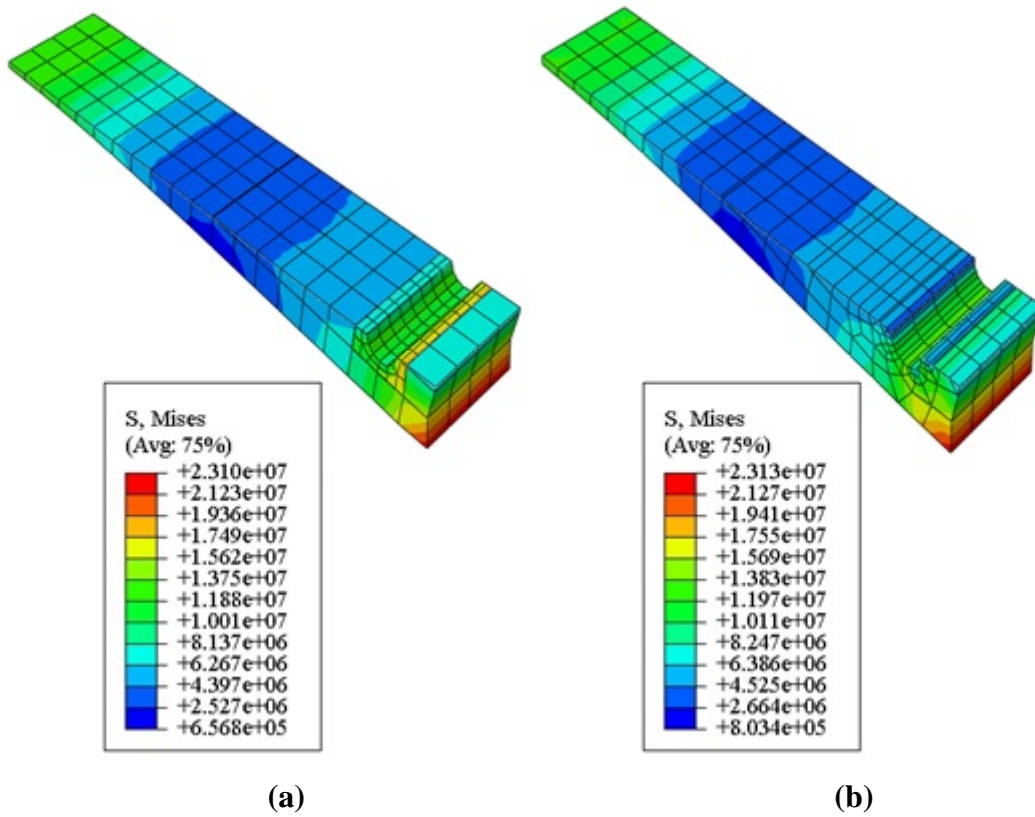
Şekil 3.12 0,06 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözüm



Şekil 3.13 0,06 m delik çapı için alt modelleme tekniği kullanılarak yapılan çözüm

0,06 m delik çapı için alt modelleme kullanılmadan yapılan çözüm ve bu teknik kullanılarak yapılan çözümlerde oluşan maksimum gerilmeler neredeyse aynı miktarda oluşarak 23,1 MPa civarında gerçekleşmiştir. Gerilme dağılımları açısından bakıldığında da her iki çözüm için gerilmeler yaklaşık aynı bölgelerde oluşmuştur.

Üç boyutlu kiriş modelinde, 0,06 m delik çapı için alt modelleme tekniği uygulanarak ve bu teknik uygulanmadan yapılan analizlerin y yönündeki kesit görüntüleri Şekil 3.14’ de gösterilmiştir.



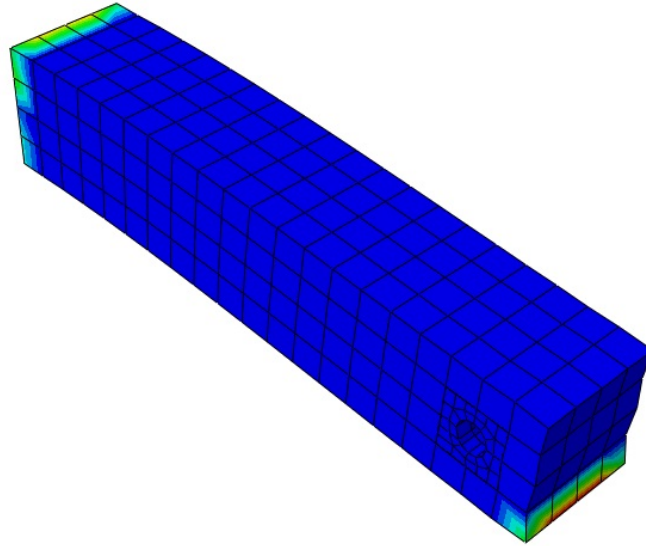
Şekil 3.14 0,06 m delik çapı için kesit halinde gerilmeler (a. alt modelli çözüm, b. alt modelsiz çözüm)

İç kısımdaki oluşan gerilme dağılımlarına bakıldığında, diğer delik çapındaki modellerde farklılıklar oluşmasına rağmen, 0,06 m delik çapındaki modelde nerdeyse hiç fark oluşmayarak benzer dağılımlar meydana gelmiştir. Ancak delik bölgesinde alt modelleme tekniğiyle tasarlanan kirişte bir miktar fazla gerilme gerçekleşmiştir. Bunun

sebebi olarak, daha küçük ağ yapısından dolayı alt modellenli tasarımıñ ayrıntılı sonuçlar vermesi olarak düşünölmektedir. Genel olarak her iki modele de bakıldığında, delik çevresi iç bölgelerde çok büyük gerilmeler oluşmamıştır.

3.1.4.2 Reaksiyon Kuvvetleri

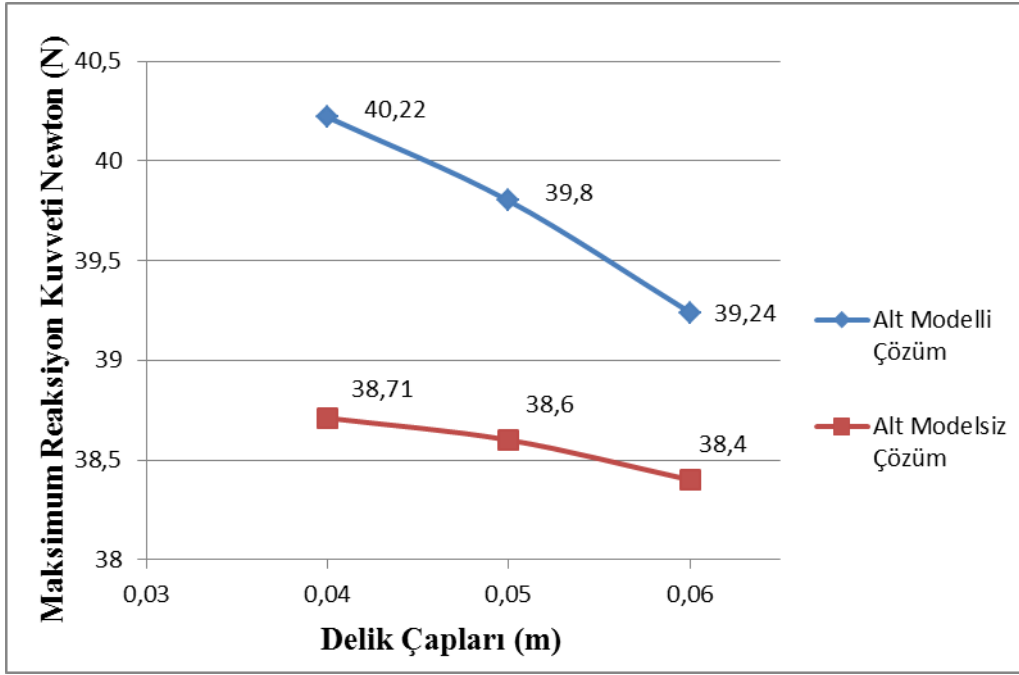
Üç boyutlu kiriş modelinde alt modellenli ve alt modelsiz tasarımlar için farklı delik çaplarında maksimum reaksiyon kuvvetleri incelenmiştir. Genel olarak bütün modeller için, x,y ve z yönünde gerçekleşen toplam maksimum reaksiyon kuvvetlerinin meydana geldiği kısımlar aşağıda Şekil 3.15' de gösterilmiştir. Maksimum reaksiyon kuvvetleri Şekil 3.15' de göröldüğü üzere deplasmanın uygulandığı bölgede ve bu bölgeye en uzak olan ankastre bağlantısının olduğu kısımda meydana gelmiştir.



Şekil 3.15 Üç boyutlu kiriş için maksimum reaksiyon kuvvetleri

Reaksiyon kuvveti dağılımları Şekil 3.15' de gösterilen, alt modellenli ve alt modelsiz çözümler için farklı delik çaplarına meydana gelen maksimum reaksiyon kuvvetleri Şekil 3.16' da verilmiştir. Şekil 3.16' ya bakıldığında her iki çözüm için de benzer eğriler oluşarak delik çapının artmasıyla birlikte reaksiyon kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir. Genel olarak alt modellenli çözümlerde reaksiyon kuvvetleri daha fazla oluşmuştur. Bunun sebebi olarak da alt modellenli analizin daha ayrıntılı çözüm

vermesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Alt modellenli çözümde en yüksek reaksiyon kuvveti 40,22 N ile 0,04 m delik çapına sahip olan modelde, en düşük reaksiyon kuvveti ise 0,06 m delik çapına sahip olan modelde 39,24 N olarak görülmüştür. Alt modelsiz çözümde reaksiyon kuvvetleri biraz daha küçük değerlerde oluşmuş, en yüksek olarak 0,04 m delik çapında 38,71 N gerçekleşmiş, en düşük olarak da 0,06 m delik çapında 38,4 N değerinde alt modellenli çözümle benzer bir durum meydana gelmiştir.



Şekil 3.16 Üç boyutlu kiriş üzerinde meydana gelen maksimum reaksiyon kuvvetleri

3.1.4.3 Analiz Sonuçlarına Göre Çözüm Zamanlarının Karşılaştırılması

Farklı delik çapları için üç boyutlu kiriş modelinde alt modelleme tekniği kullanılarak ve bu teknik kullanılmadan çözümler yapılmış, bu analizler ve oluşan çözüm zamanları Çizelge 3.3' te saniye cinsinden gösterilmiştir.

Genel olarak çözüm zamanlarına göre gerilme dağılımlarını değerlendirdiğimizde, farklı delik çapları için daha az zamanda modellediğimiz alt modelleme tekniği ile oluşan çözümlerin yaklaşık olarak bu yöntem kullanılmadan yapılan çözümlerle aynı sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. 0,04 m ve 0,05 m çaplarındaki delikli kirişlerde alt model ve

normal çözümlerde oluşan maksimum gerilmeler arasında biraz daha fazla fark oluşmuştur. Genel olarak bakıldığında delik çapının artmasıyla birlikte maksimum gerilmeler arasındaki fark azalmıştır. Diğerlerine göre alt modelsiz çözümün daha fazla sürdüğü 0,06 m delik çapı olan kirişe bakıldığında ise, maksimum gerilme değerleri arasında nerdeyse fark oluşmamış eşit miktarda gerçekleşmiştir. Değişik delik çapları için maksimum gerilmeler arasında oluşan farkın sebebi, delik etrafında oluşturulan ağ yapılarındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülebilir.

Maksimum reaksiyon kuvvetlerine baktığımızda genel olarak alt modelli çözümler de daha fazla meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak da alt modelli analizin daha ayrıntılı çözüm vermesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca delik çapının artmasıyla birlikte reaksiyon kuvvetlerinde azalma gerçekleşmiştir. Delik çapının artmasıyla birlikte reaksiyon kuvvetlerinde azalma gerçekleşmesinin sebebi, artan delik çapı model üzerindeki malzeme miktarını azaltmış bununla birlikte deplasmana maruz kalan yüzey miktarı da azalarak reaksiyon kuvvetlerini de azalttığı düşünülmüştür.

Çizelge 3.3 incelendiğinde 0,04 m ve 0,05 m delik çapındaki kiriş modelleri için alt modelleme tekniği kullanıldığında daha az çözüm zamanı harcanarak analizler yapılmıştır. Fakat 0,06 m delik çapındaki kiriş modeli analizlerinde alt modelleme tekniği kullanılmadan yapılan çözümlerde daha az zamanda sonuca ulaşılmıştır. Genel olarak bakıldığında alt modelli çözümlerinde daha az zaman harcanmıştır. Bunun sebebi olarak, alt modelleme tekniğinin bütün modeli analiz etmeden sadece alt modeller üzerinde çözüm oluşturarak bilgisayarın sadece lokal bir kısımda hesaplama yapmasına olanak sunmasıdır. Bu şekilde bilgisayar işlemcisi daha küçük alanda çalışma yaparak daha az zamanda sonuca ulaşılır. 0,06 delik çapında, alt modelleme kullanılarak yapılan çözümlerde istisnai olarak daha fazla zaman harcanmasının nedeni olarak bilgisayar performansının analiz yapıldığı sürede düşük olmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Çizelge 3.3 Üç boyutlu kiriş modeli için analiz sonuçları ve çözüm zamanları

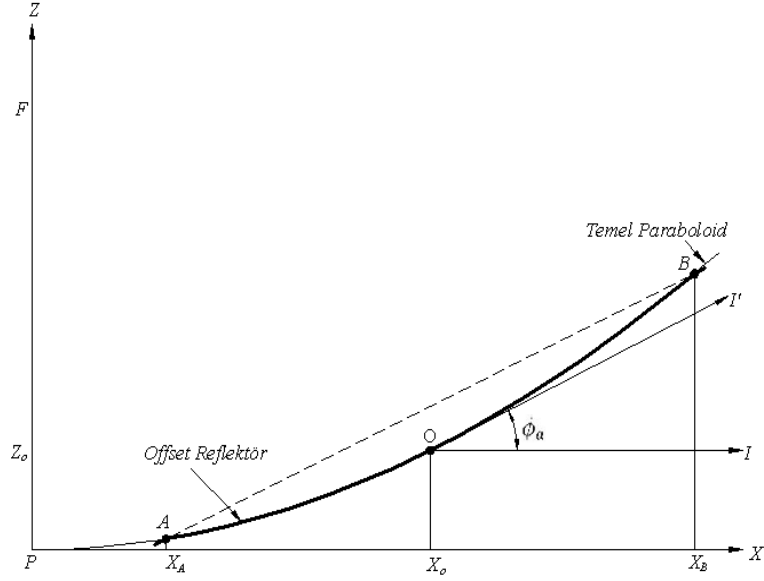
Çap (m)	Model	Çözüm Zamanı (s)	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Maksimum Reaksiyon Kuvvetleri (N)
0,04	Alt modellenli çözüm	0,4	24,01	40,22
	Alt modelsiz çözüm	0,5	22,68	38,71
0,05	Alt modellenli çözüm	0,4	23,62	39,8
	Alt modelsiz çözüm	0,6	22,97	38,6
0,06	Alt modellenli çözüm	0,8	23,10	38,24
	Alt modelsiz çözüm	0,6	23,13	38,4

3.2 Kabuk Yapılı Kompozit Reflektör Anten

Üç boyutlu kiriş analizinde basit bir model üzerinde alt modelleme tekniğinin etkisi incelenmiş, sonra kabuk yapılı kompozit reflektör için çözüm yapılarak daha kompleks yapıdaki reflektör anten üzerinde bu tekniğin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bir genel model (Şekil 3.18 a) ve bu genel model üzerinde bulunan alt model olarak belirlenen etek (Şekil 3.18 b), $t_1=0,11$ mm, $t_2=0,22$ mm, $t_3=0,33$ mm, $t_4=0,44$ mm, $t_5=0,55$ mm kalınlıklarında modellenerek analizleri yapılmıştır.

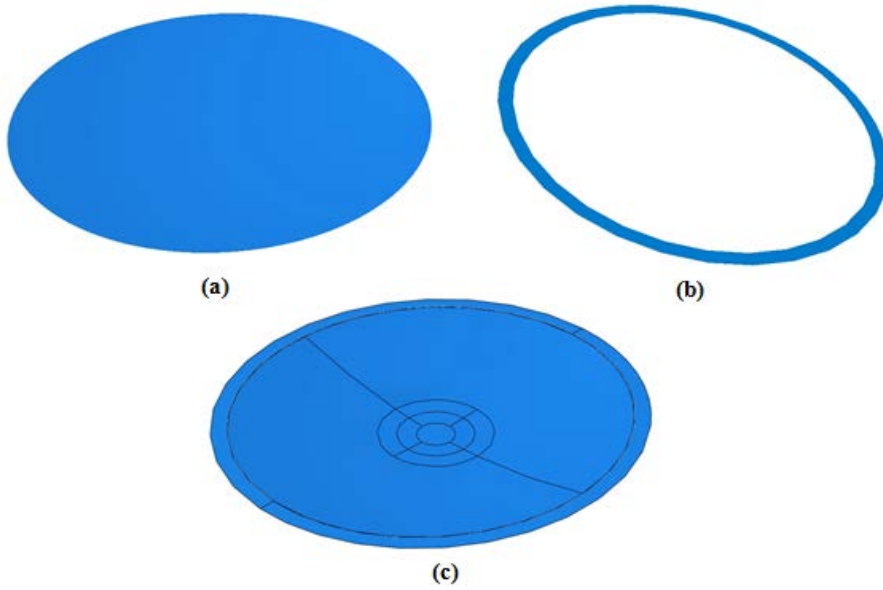
3.2.1 Problemin Geometrik Modeli ve Sınır Koşulları

İnce kabuk yapıya sahip kompozit reflektörün çapı 1,5 m'dir. Kompozit reflektör modeli ofset bir reflektördür. Ofset reflektör modeli için ana parabolidin merkezinden belli bir ofset yapılarak ana parabolidi belirli çaptaki bir silindirin kesmesi ile oluşturulur (Şekil 3.17). Ofset miktarı ise $X_A=0,075$ m'dir. X_B-X_A ise 1,5 m'dir (Karakaya 2012).



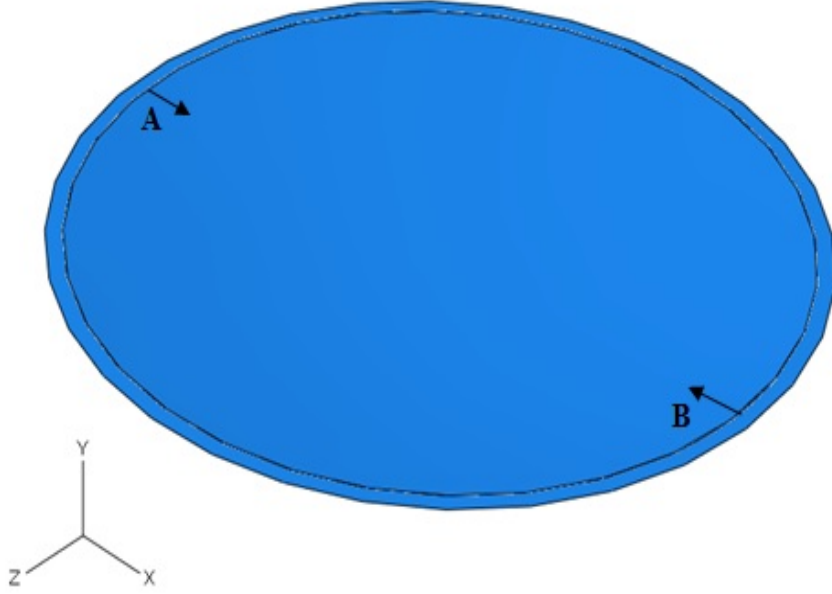
Şekil 3.17 Ofset reflektör tasarım parametreleri (Karakaya 2012)

Reflektörün şematik çiziminden de görüleceği gibi reflektörün dış çapını çevreleyen etek bağlantısı vardır. Etek uzunluğu ise 0,0625 m'dir. Belirtilen çalışma üzerinde reflektör anten genel model, anteni sarmalayan etek ise alt model olarak tasarlanmıştır Şekil (3.18). Genel model kalınlığı 0,33 mm olarak alınmıştır. Alt model olarak belirlenen etek, $t_1=0,11$ mm, $t_2=0,22$ mm, $t_3=0,33$ mm, $t_4=0,44$ mm, $t_5=0,55$ mm kalınlıklarında modellenmiştir. Genel model ve farklı alt model kalınlıklarındaki reflektör anten için ayrı ayrı çözüm yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 3.18 Reflektör anten modeli (a. Genel model, b. Alt model, c. Çözümlenen model)

Karşılıklı iki taraftan çekme şeklinde yapılacak analizler için tek noktadan katlama düşünülmüştür. Analizler için reflektörün üzerinden 180° aralıkla iki nokta belirlenmiştir. Bu noktalar Şekil 3.19’da görüldüğü gibi A ve B noktalarıdır. Belirtilen noktalar için sırasıyla $-U_x$ ve $+U_x$ 0,01 m’lik deplasman değeri ve UR3 dönme serbestliği verilmiştir. Diğer serbestlikler ise U_y , U_z , UR1, UR2 kilitlenmiştir.



Şekil 3.19 Kompozit reflektör antenin sınır koşulları

3.2.2 Kompozit Reflektörün Malzeme Özellikleri

Reflektör model için üç tabakalı (0/45/0) basit dokumalı Karbon fiber malzeme kullanılmıştır. T300B basit dokumalı kumaş malzemesi ve L160 epoksi reçine kullanılmıştır. Bir tabaka kalınlığı 0,11 mm olan tabakalı kompozit reflektörün toplam üç tabaka kalınlığı $t_{ref}=0,33$ mm olarak alınmıştır (Karakaya 2012).

Farklı tasarımlar için tek tip malzeme düşünülmüştür. Problemlerde kullanılan malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 3.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 T300B/L160 tek tabakalı dokümalı kompozitin malzeme özellikleri (Karakaya 2012).

Elastik modül ($E_1=E_2$) (GPa)	53,7
Kayma modülü ($G_{12}=G_{13}=G_{23}$) (GPa)	2,84
Poisson oranı ($\nu_{12}=\nu_{13}$)	0,033
Yoğunluk (ρ) (kg/ m ³)	1418

3.2.3 Sonlu Elemanlar Modeli

Problemin analizi için düğüm tabanlı alt modelleme tekniğindeki kabuktan kabuğa dönüşüm kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çekme analizleri lineer statik analizdir. Malzeme lamina olarak tanımlanmış kesit durumu 0/45/0 tabakalı kompozit olarak tanımlanmıştır. Modelin ağ yapısı için *S4R* quadratik eleman kullanılmıştır. Yapılan modellemelerin toplam değişken sayısı, eleman ve düğüm sayılarını gösteren sonlu elemanlar modeli Çizelge 3.5’ de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Reflektör anten için sonlu elemanlar modeli

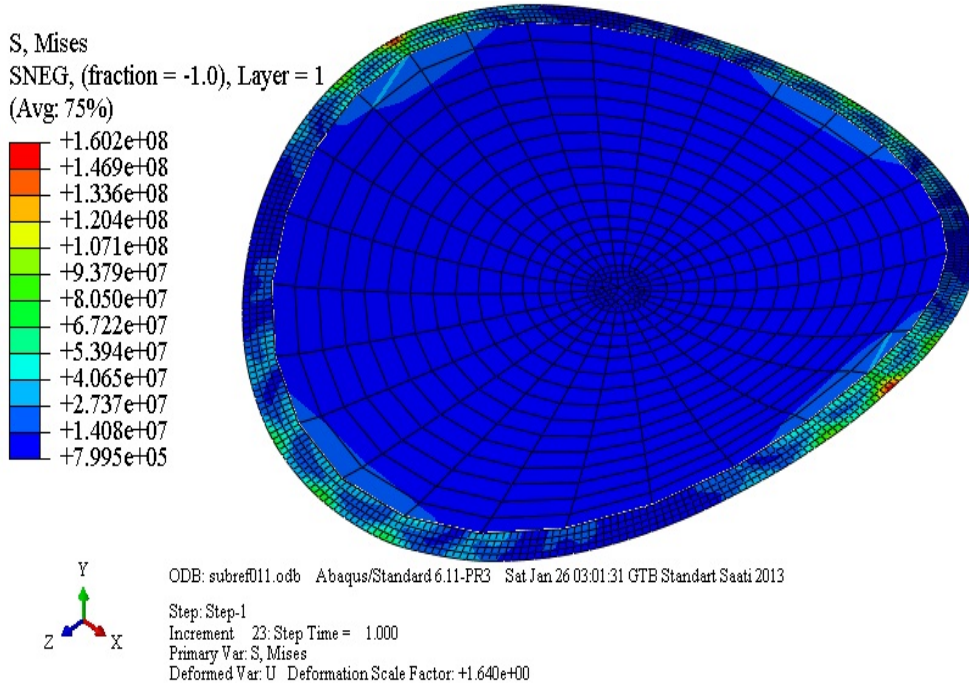
Model	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Toplam Serbestlik Derecesi
Etekli Reflektör Anten	1839	2190	13140
Eteksiz Reflektör Anten	495	510	3060

3.2.4 Bulgular

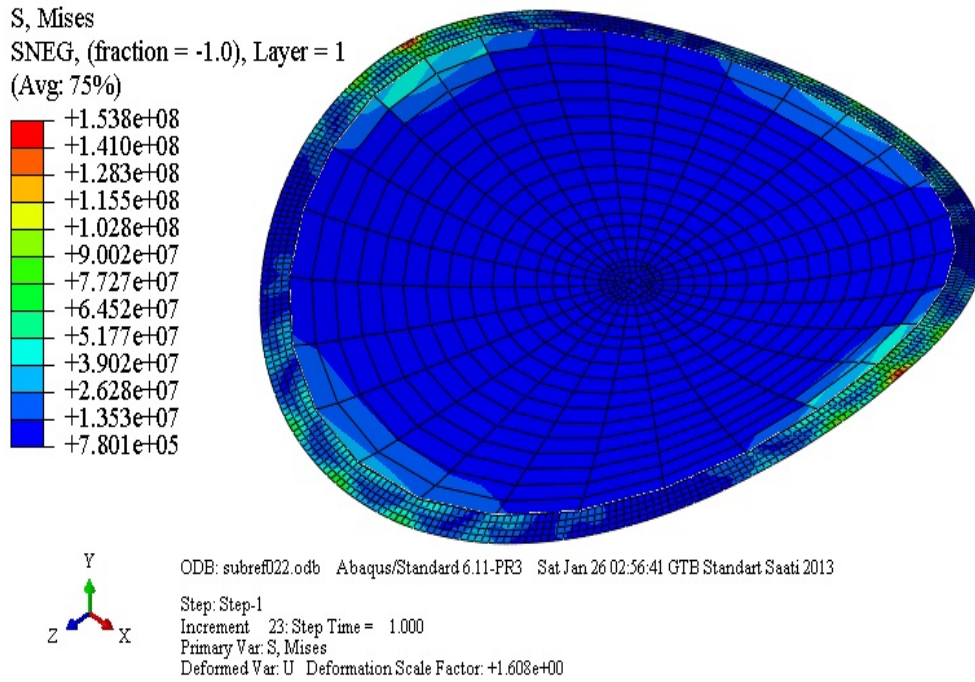
Kabuk yapıda olan daha kompleks kompozit reflektör anten için, alt modelleme tekniği yardımıyla 0,11 mm, 0,22 mm, 0,33 mm, 0,44 mm, 0,55 mm etek kalınlıklarında beş farklı alt model oluşturularak çözümler yapılmıştır. Bu teknik sayesinde daha kısa sürede ve kolay olarak modellenen kompozit reflektör anten için gerilme analizi, reaksiyon kuvvetleri ve Tsai-Wu hasar analizi çözümleri oluşturularak sonuçlar değerlendirilmiş, tekniğin daha karmaşık modellemelerde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Gerilmeler Von-Mises, reaksiyon kuvvetleri Newton cinsinden elde edilmiştir.

3.2.4.1 Gerilme Analizi

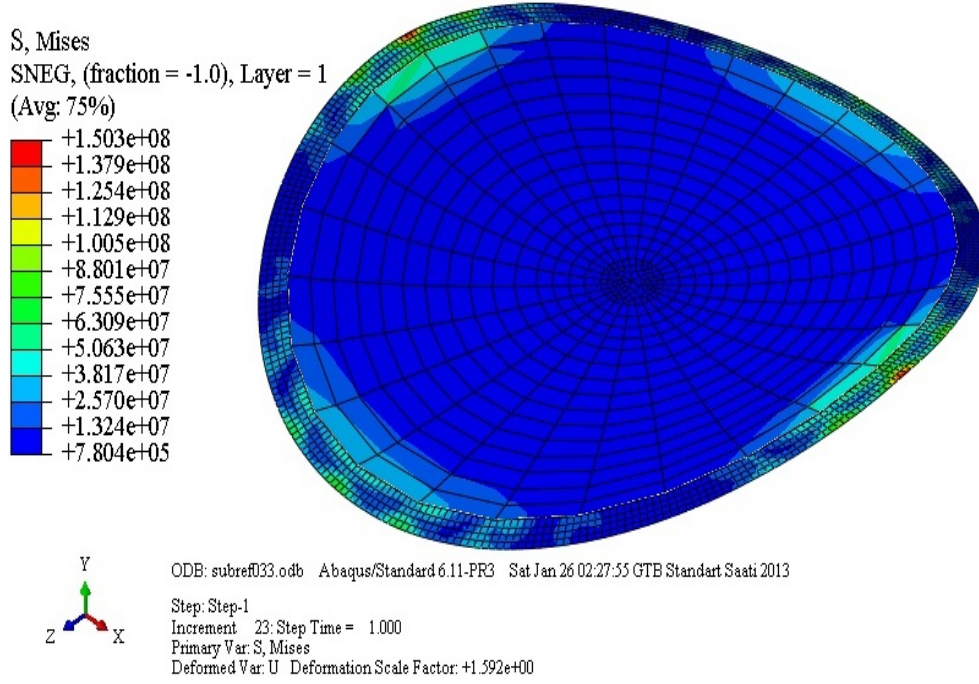
Şekil 3.20-3.24 arasında Abaqus programında farklı etek kalınlıklarının alt modelleme tekniği kullanılarak modellenmesi sonucu oluşan Von-Mises gerilme dağılımı görüntüleri verilmektedir. Her beş farklı etek alt modelleri için de oluşan gerilmeler benzer şekilde dağılım göstermişlerdir. Maksimum gerilmeler genel olarak deplasmanın uygulandığı noktalara yakın olan eteğin dış çapı civarında meydana gelmiştir. Farklı etek kalınlıkları beraber ele alındığında en yüksek maksimum gerilme değeri 160,2 MPa olarak 0,11 mm etek kalınlığına sahip olan modelde oluşmuş, en düşük maksimum gerilme değeri ise 0,55 mm etek kalınlığındaki modelde 147,4 MPa olarak gözlemlenmiştir. Etek kalınlığının artmasıyla beraber oluşan maksimum gerilme değerleri ters orantılı olarak azalma göstermiştir. Bunun en büyük sebebi olarak, artan etek kalınlığıyla birlikte malzeme miktarının fazlalaşmasından dolayı büyük etek kalınlıklarında dayanım artmasıyla, gerilmelerin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca reflektör anten modeli için etek kalınlığının artmasıyla birlikte gerilmeler deplasman değerinin uygulandığı bölgede toplanmayarak bütün model üzerine dağılma göstermiş bunun da bir miktar maksimum gerilmeleri azalttığı görülmüştür. Kalınlığın artmasıyla birlikte deplasmanın uygulandığı bölgelerde oluşan gerilmelerin büyük bir kısmı konum değiştirerek katlanma başlangıcının olduğu bölgelerde oluşmaya başlamıştır. Aynı zamanda meydana gelen minimum gerilmelerde, etek kalınlığının artmasıyla birlikte genel olarak düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Bu düzenli artıştan farklı olarak sadece 0,11 mm etek kalınlığındaki modelde yüksek değerde gerçekleşerek minimum gerilme değeri 0,799 MPa olmuştur. Bunun dışında düzgün bir şekilde artarak minimum gerilme değerleri en düşük 0,780 MPa ile 0,22 mm etek kalınlığına sahip modelde oluşmuş, en yüksek minimum gerilme değeri ise 0,791 MPa olarak 0,55 mm etek kalınlığındaki modelde meydana gelmiştir. Alt modelleme tekniği yardımıyla daha kolay şekilde modellenen çalışmamızda etek kalınlıklarının artmasıyla, reflektör anten üzerinde oluşan maksimum gerilmelerde azalma meydana gelmiş ve model üzerinde hasar açısından olumlu bir durum ortaya çıkmıştır.



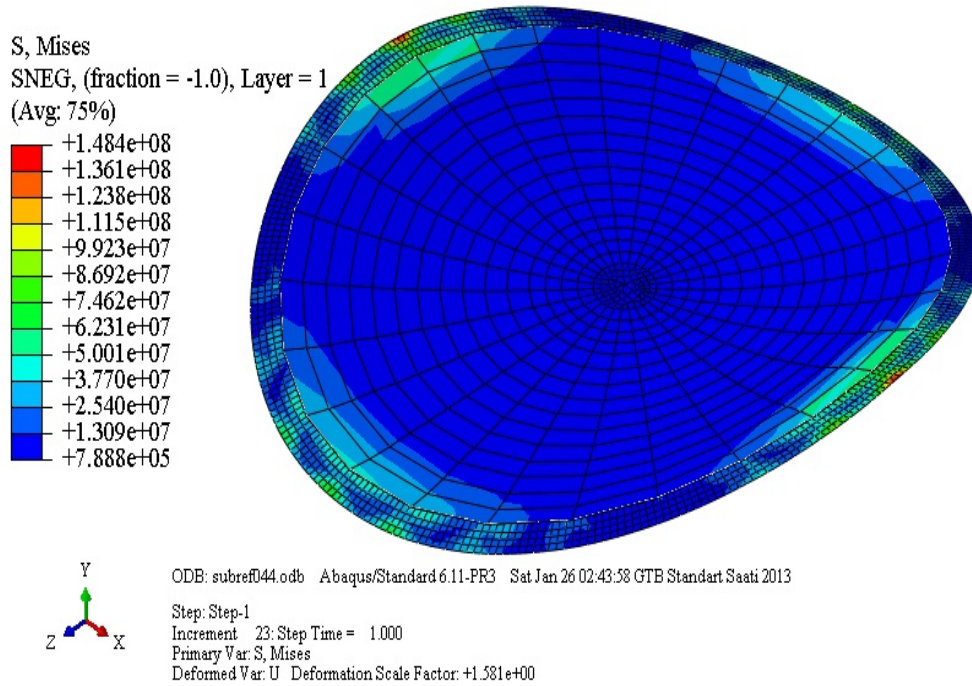
Şekil 3.20 0,11 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri



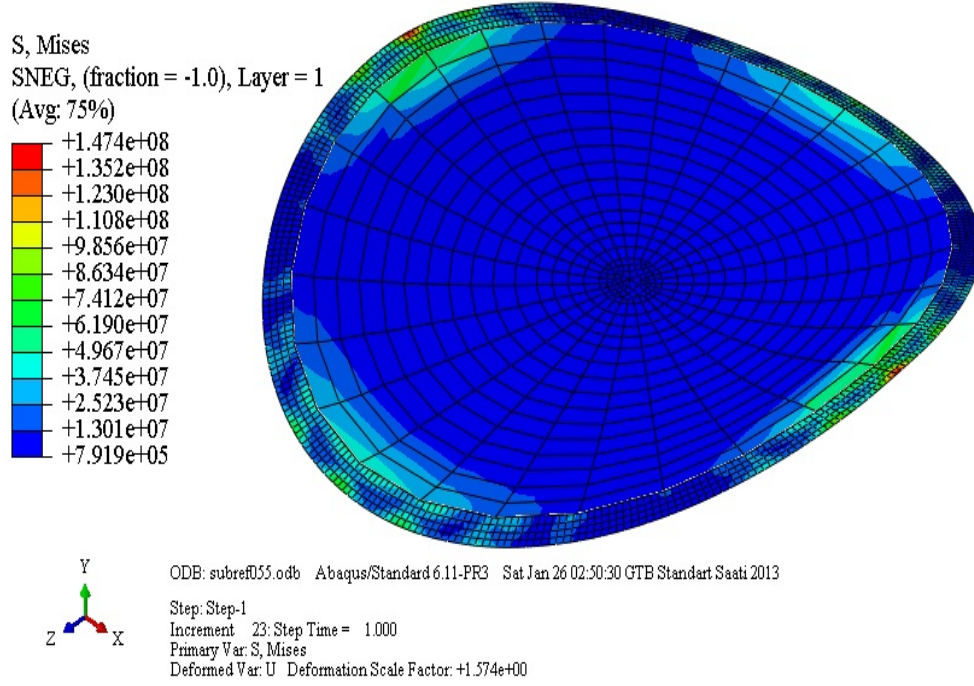
Şekil 3.21 0,22 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri



Şekil 3.22 0,33 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri

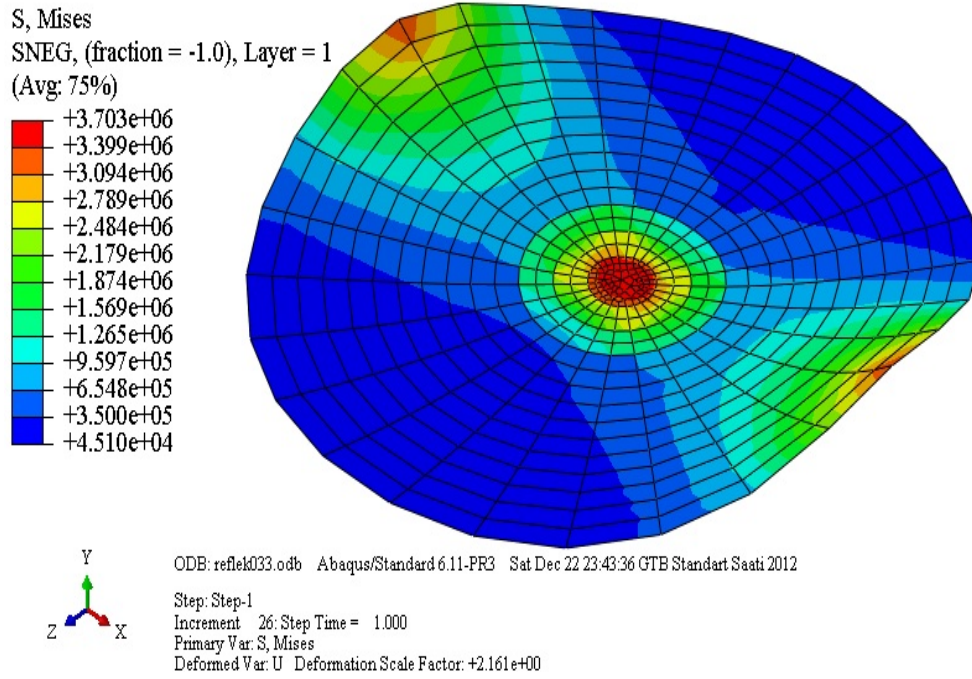


Şekil 3.23 0,44 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri



Şekil 3.24 0,55 mm etek kalınlığına sahip kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri

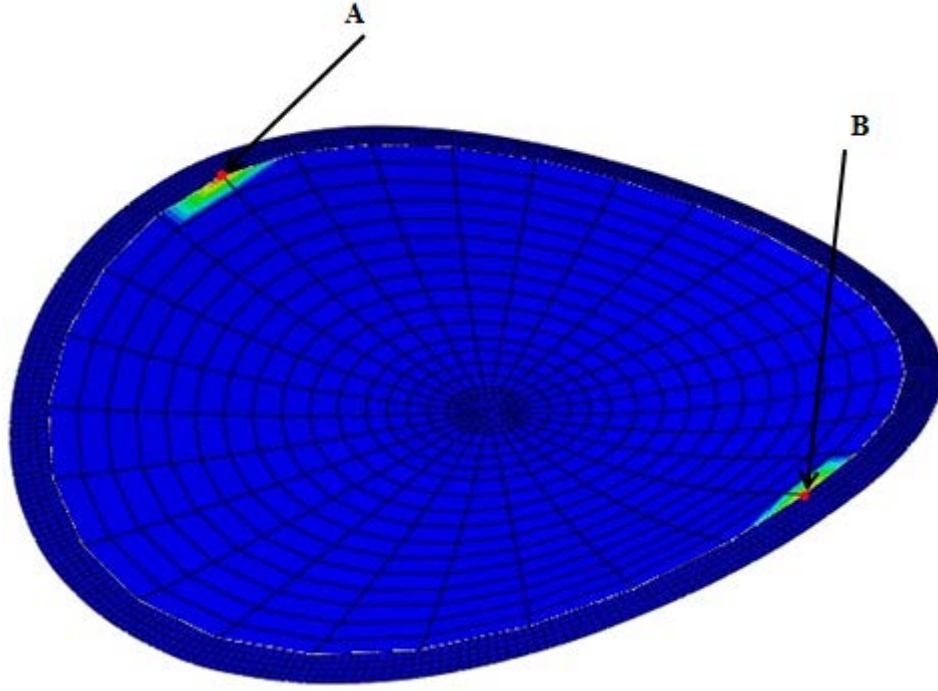
Ayrıca reflektör anten alt model olarak kullanılan etek olmadan analiz yapılmış, meydana gelen gerilmeler Şekil 3.25’de gösterilmiştir. Von-Mises gerilmelerine bakıldığında maksimum gerilmeler, etekli modellere kıyasla oldukça düşük değerlerde 3,703 MPa olarak gerçekleşmiştir. Ancak maksimum gerilme dağılımları etekli modellemeler gibi reflektör dış çapı civarında oluşmayarak, daha çok reflektör merkezinde toplanmıştır. Etekli modellere genel olarak bakıldığında, reflektör yüzeyinde oluşan gerilmeler etek üzerine dağılarak, maksimum gerilmelerin reflektörün dış çapında ve etek üzerinde oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 3.25 Eteksiz olarak modellenen kompozit reflektör anten için Von-Mises gerilmeleri

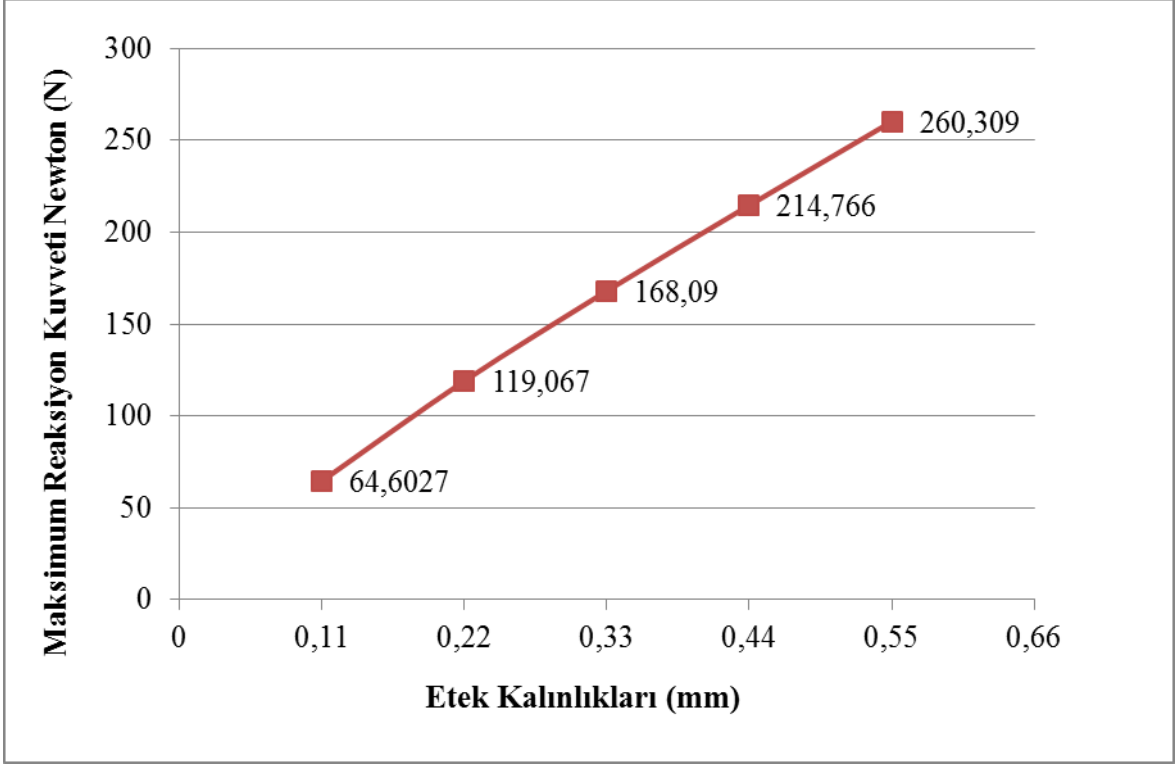
3.2.4.2 Reaksiyon Kuvvetleri

Yapılan reflektör anten analizleri sonucunda oluşan maksimum reaksiyon kuvvetleri farklı etek kalınlıkları için incelenmiştir. Aşağıda Şekil 3.26' da deplasman değerlerinin uygulanması sonucu en yüksek reaksiyon kuvvetinin olduğu A ve B düğümleri gösterilmiştir.



Şekil 3.26 Maksimum reaksiyon kuvvetlerinin oluştuğu A ve B düğümleri

Şekil 3.26’da gösterilen A ve B düğümleri için farklı etek kalınlıklarında maksimum reaksiyon kuvvetleri meydana gelmiş bu değerler aşağıda Şekil 3.27’de gösterilmiştir. Oluşan kuvvetler Şekil 3.27’ de görüldüğü gibi etek kalınlığının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. En küçük etek kalınlığı olan 0,11 mm değerinde 64,602 N olarak en az reaksiyon kuvveti oluşmuş, en büyük etek kalınlığı olan 0,55 mm de ise 260,309 N ile en yüksek miktarda reaksiyon kuvveti meydana gelmiştir. Genel olarak kalınlığın artmasıyla düzenli bir kuvvet artışı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak aynı deplasman değerleri için büyük etek kalınlıklarında daha fazla yüzeyin deplasmana maruz kalmasından dolayı reaksiyon kuvvetlerinin artış gösterdiği düşünülmüştür.



Şekil 3.27 Reflektör anten üzerinde meydana gelen maksimum reaksiyon kuvvetleri

Ayrıca etek olmayan reflektör anten için aynı şekilde A ve B düğümlerinde reaksiyon kuvvetlerine bakıldığında oldukça küçük miktarda gerçekleşerek 0,1773 N değerinde oluşmuştur. Eteğin olmayışı daha az yüzeye deplasman uygulanmasına bunun da reaksiyon kuvvetlerinin azalmasına neden olduğu düşünülmüştür.

3.2.4.3 Hasar Analizi

Offset reflektörün tek nokta katlama sonrası hasar oluşup oluşmayacağını belirlemek için Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Tsai-Wu hasar kriterine göre laminada hasar oluşma durumu aşağıdaki denkleme bağlıdır.

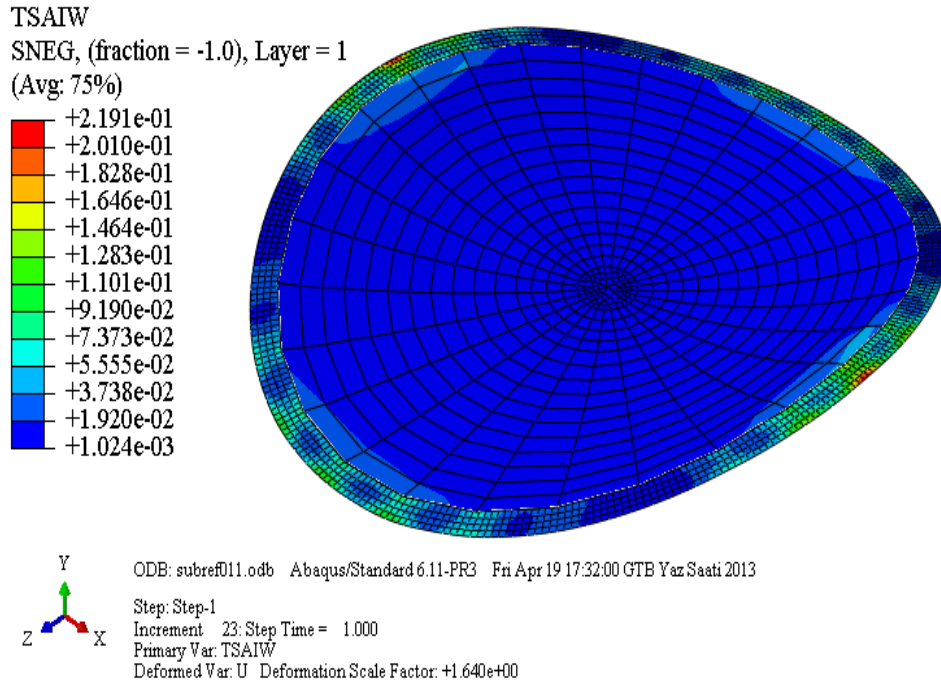
$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (3.1)$$

Bu denklemde $F_{11} = 1/(S_L^+ S_L^-)$, $F_{22} = 1/(S_T^+ S_T^-)$, $F_1 = 1/S_L^+ - 1/S_L^-$, $F_2 = 1/S_T^+ - 1/S_T^-$,

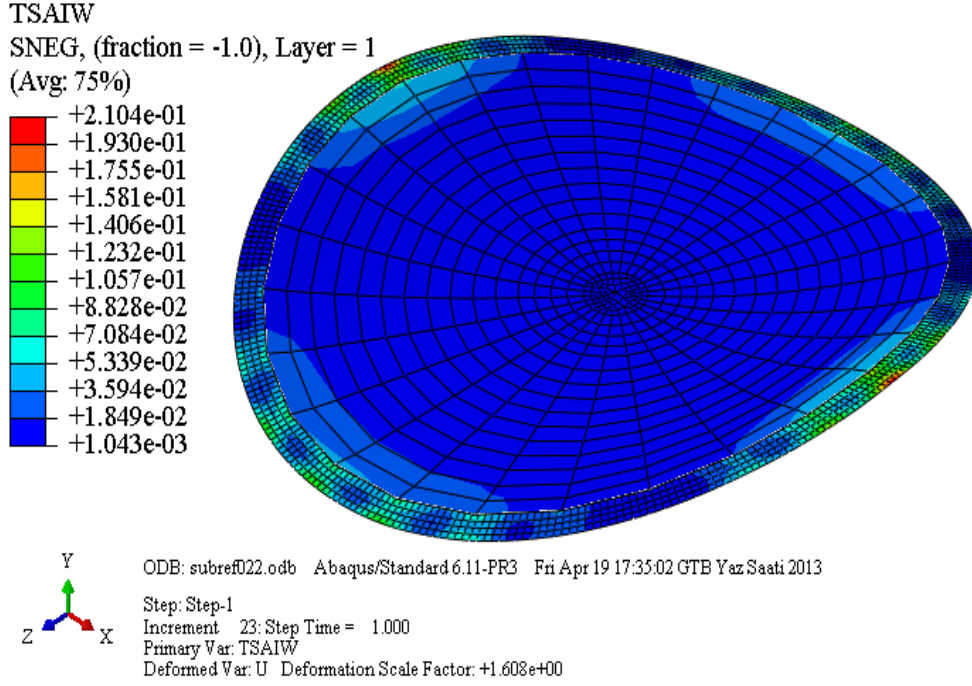
$F_{66} = 1/S_{LT}^2$ ve $F_{12} = -(F_{11}F_{22})^{0.5}/2$, $\sigma_6 = \tau_{12}$ burada S_L^+ ve S_L^- laminanın boyuna çekme ve basma dayanımları, S_T^+ ve S_T^- ise enine çekme ve basma dayanımlarıdır (Karakaya et al 2012).

T300/LTM45 94 g/m² kompozit malzemenin dayanım değerleri $S_L^+ = 650$ MPa, $S_L^- = 670$ MPa ve $S_{LT} = 111$ MPa olarak belirtilmiştir (Soykasap 2007). LTM45 ile L160 epoksi reçinenin dayanım değerleri yaklaşık olarak aynı olduğu için Tsai-Wu hasar kriterini hesaplamak için LTM45 reçinenin dayanım değerleri kullanılmıştır.

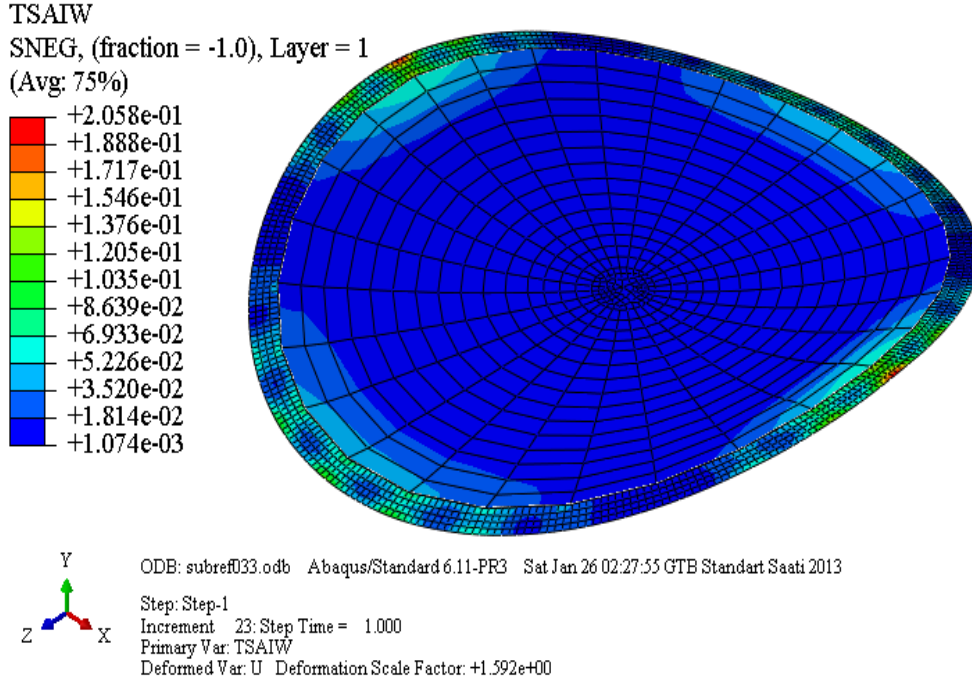
Şekil 3.28-3.32 arasında reflektör modelinin hasar durumları görülmektedir. Maksimum gerilmeden dolayı en fazla hasar durumu reflektör anten için 0,11 mm etek kalınlığına sahip olan model üzerinde gerçekleşmiştir. 0,11 mm etek kalınlığı için en fazla miktarda 0,2191 değerinde hasar durumu oluşmuş, kalınlık değeri arttıkça hasar oluşma ihtimali düzenli bir şekilde azalarak 0,55 mm etek kalınlığında en az miktarda 0,2021 değerinde meydana gelmiştir. 0,55 mm etek kalınlığında, 0,11 mm etek kalınlığına göre göre % 7,75 daha az gerilme durumu vardır. Genel olarak bütün modeller için deplasmanın uygulandığı düğüm ve etek bölgesinde maksimum gerilmenin oluştuğu görülmektedir.



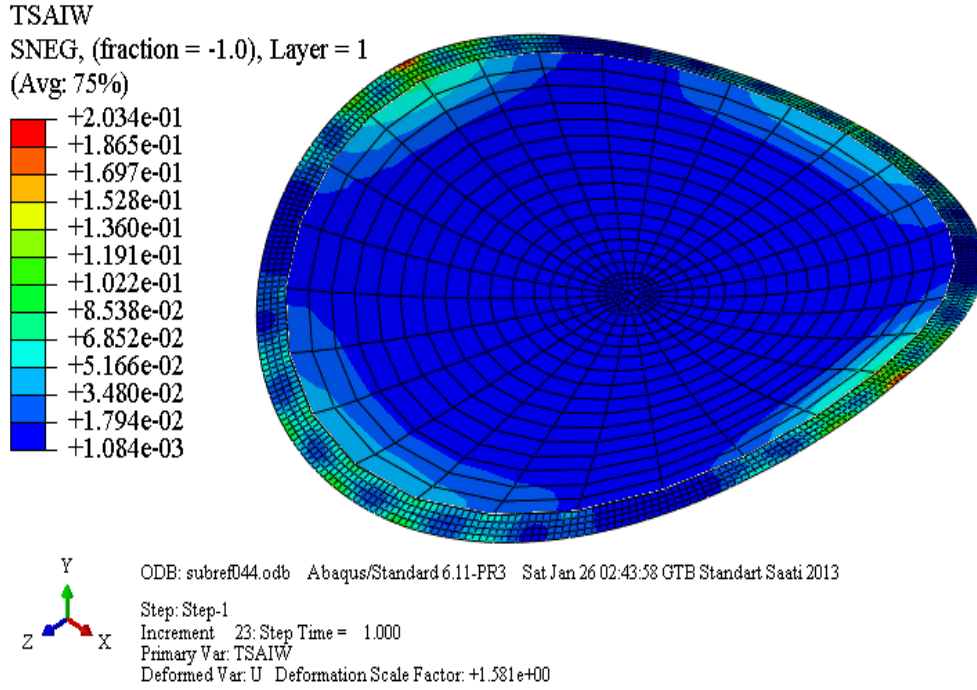
Şekil 3.28 0,11 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu



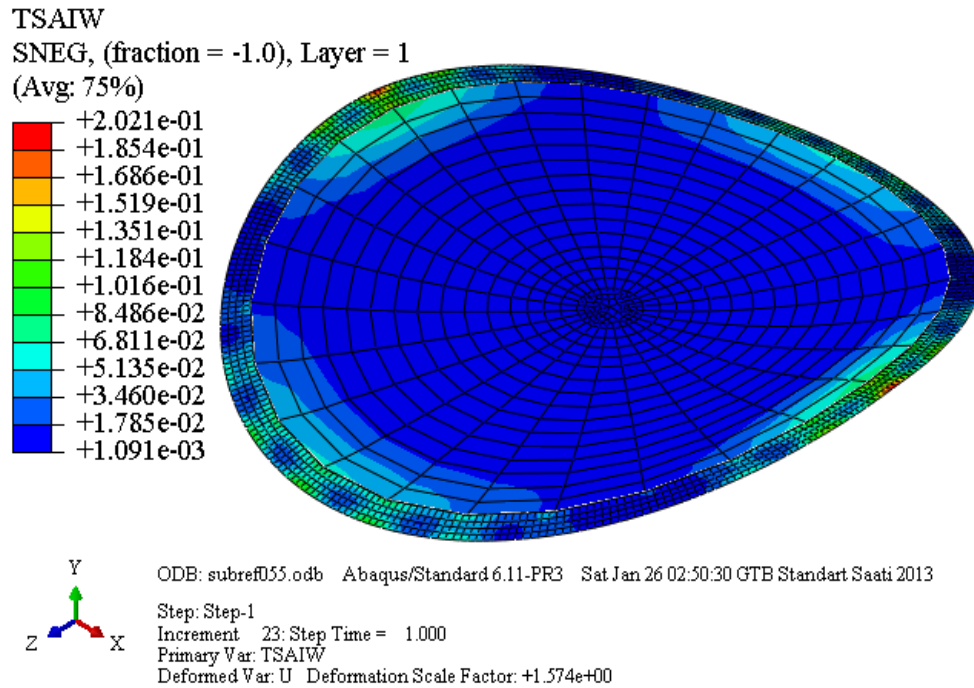
Şekil 3.29 0,22 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu



Şekil 3.30 0,33 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu

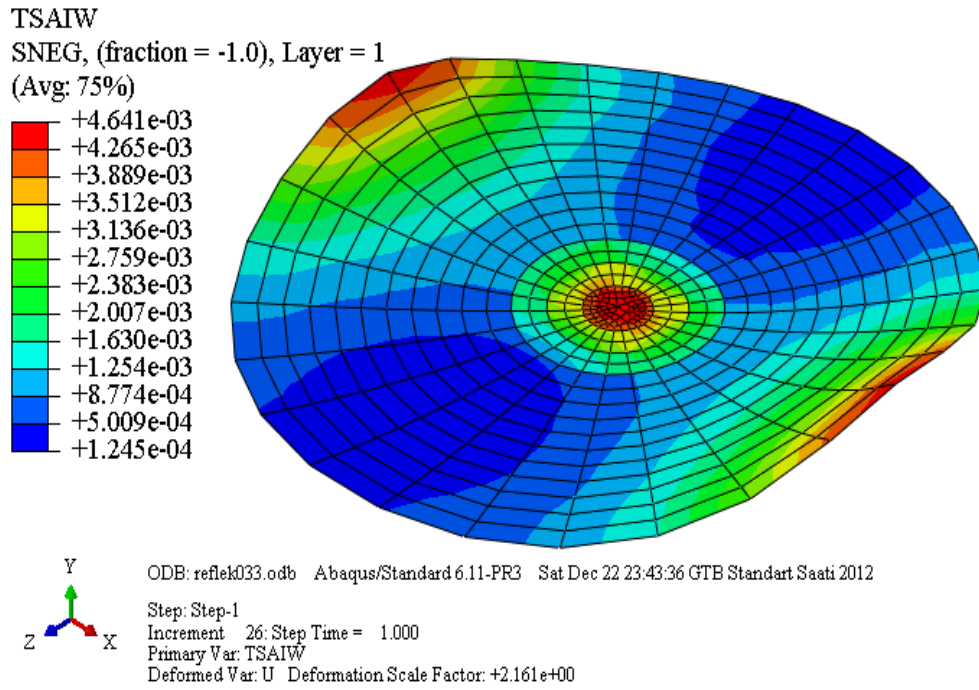


Şekil 3.31 0,44 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu



Şekil 3.32 0,55 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu

Ayrıca Şekil 3.33’ de reflektör anten modelinin etkisiz olarak Tsai-Wu hasar analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda etekli modellemelere kıyasla ciddi oranda hasar oluşma ihtimalinde azalma gözlemlenmiştir. En az hasar oluşma ihtimali olan 0,55 mm etek kalınlığına sahip modelde 0,2021 değerinde gerçekleşen Tsai-Wu değeri etkisiz model için 0,004641 değerinde meydana gelmiştir. Burada reflektör anten için eteğin gerilme değerlerini arttırarak hasar olasılığını yükselttiği gözlemlenmiştir. Eteğin hasar oluşma olasılığını artırmasının sebebi olarak, reflektör gövdesindeki gerilmeleri dış çapa ve etek civarına taşımamasından olduğu düşünülebilir.



Şekil 3.33 0,11 mm etek kalınlığına sahip modelin Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar durumu

Genel olarak bütün modellemeler için Tsai-Wu hasar değerleri oldukça küçük gerçekleşmiştir. Denklem 3.1’e bakıldığında ise modellerin tamamında Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar gerçekleşmemektedir.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, sonlu elemanlarda alt modelleme tekniğinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu teknik kullanılarak üç boyutlu alüminyum kiriş ve kabuk yapılı kompozit reflektör anten için statik analizler yapılarak meydana gelen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Üç boyutlu kiriş modeli için farklı delik çaplarında alt modelleme tekniği kullanılarak ve bu teknik kullanılmadan modelleme yapılmış oluşan Von-Mises gerilmeleri, reaksiyon kuvvetleri ve çözüm zamanları karşılaştırılmıştır.

Üç boyutlu kiriş modeli için, yapılan Von-Mises gerilme analizleri sonucunda genel olarak gerilme dağılımları, farklı delik çaplarında alt modelli çözüm ve alt modelsiz çözüm için benzer bir görünüm sergilemiştir. Aynı şekilde delik çapının artmasıyla birlikte her iki çözüm için de maksimum gerilmeler arasındaki fark azalmıştır. Diğerlerine göre daha büyük olan 0,06 m delik çapındaki kirişe bakıldığında ise maksimum gerilme değerleri arasında neredeyse fark oluşmamış ve 23,1 MPa değerlerinde eşit miktarda gerçekleşmiştir.

Üç boyutlu kiriş modeli için, reaksiyon kuvvetlerine baktığımızda genel olarak alt modelli çözümler de daha fazla meydana gelmiştir. Ayrıca delik çapının artmasıyla birlikte reaksiyon kuvvetlerinde azalma gerçekleşmiştir. Delik çapının artmasıyla birlikte reaksiyon kuvvetlerinde azalma gerçekleşmesinin sebebi, artan delik çapı model üzerindeki malzeme miktarını azaltmış bununla birlikte deplasmana maruz kalan yüzey miktarı da azalarak reaksiyon kuvvetlerini de azalttığı düşünülmüştür.

Üç boyutlu kirişte oluşan çözüm zamanı sonuçları değerlendirildiğinde genel olarak alt modelleme tekniği aynı modeller için çözüm zamanlarını azaltmıştır. Ancak 0,06 m delik çapına sahip olan kiriş için alt modelli çözümde 0,2 s fazla sürede çözüm

sağlanmıştır. Genel olarak bakıldığında ise alt modelleme tekniğinin, çözüm zamanı açısından olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Daha kompleks yapıya sahip kabuk yapıları kompozit reflektör anten beş farklı etek kalınlığında alt modelleme tekniği yardımıyla daha kısa sürede ve daha kolay olarak modellenmiştir. Yapılan analizler sonucunda Von-Mises gerilmeleri, reaksiyon kuvvetleri ve Tsai-Wu hasar durumu incelenmiştir.

Kabuk yapıları kompozit reflektör için Von-Mises gerilmelerine bakıldığında, literatüre uygun tutarlı sonuçlar meydana gelmiştir. Çalışmamızda etek kalınlıklarının artmasıyla birlikte reflektör anten üzerinde oluşan maksimum gerilmelerde azalma meydana gelmiş ve model üzerinde hasar açısından olumlu bir durum ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi olarak etek kalınlığının artması ile birlikte daha fazla malzeme kullanılarak dayanımın artmasını sağlanmış ve maksimum gerilmelerde azalma gerçekleşmiştir. Eteksiz modellenen reflektör için Von-Mises gerilmelerine bakıldığında maksimum gerilmeler, etekli modellere kıyasla oldukça düşük değerlerde meydana gelmiştir.

Reflektör antenin deplasman uygulanan noktalarında oluşan reaksiyon kuvvetlerine bakıldığında etek kalınlığının artmasıyla deplasman noktalarında oluşan kuvvetlerde düzenli bir artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak aynı deplasman değerleri için büyük etek kalınlıklarında daha fazla yüzeyin deplasmana maruz kalmasından dolayı reaksiyon kuvvetlerinin artış gösterdiği düşünülebilir.

Tsai-Wu hasar kriterine göre reflektör antende, maksimum gerilmeden dolayı en fazla hasar durumu 0,11 mm etek kalınlığına sahip olan model üzerinde gerçekleşmiştir. Etek kalınlık değeri büyüdükçe hasar oluşma ihtimali düzenli bir şekilde azalarak 0,55 mm etek kalınlığında en küçük değerde meydana gelmiştir. Deplasmanın uygulandığı düğüme en yakın etek bölgesinde maksimum gerilmenin oluştuğu görülmüştür. Genel olarak bütün modellemeler için Tsai-Wu hasar değerleri oldukça küçük gerçekleşmiştir. Denklem 1'e bakıldığında ise modellerin tamamında Tsai-Wu hasar kriterine göre hasar gerçekleşmemektedir.

4.2 Öneriler

Bu çalışmada alt modelleme tekniğinin kompleks yapıdaki modellemeler için uygulanabilir olduğu görülmüştür. Günümüzde modellenmesinde oldukça sorun yaşanan, otomotiv ve uçak sanayisinde çok fazla parça bulunduran araçların modellenmesinde alt modelleme tekniği kullanılabilir. Ayrıca bu alanlarda üzerinde sürekli değişiklik yapılan modeller için bütün modeli çözmek yerine sadece alt modeller oluşturularak kısa sürede analizler yapılabilir.

Çalışmamızda statik analiz yapılarak modeller üzerine deplasman uygulanmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, daha farklı alanlarda bu teknikten faydalanabilmek için dinamik analizler yapılabilir, ayrıca basınç yükü ve termal etkiler altında alt modelleme tekniğinin uygulanabilirliği araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Bedir S. (2007). Çift Yönlü Asansör Fren Bloklarının Modellenmesi ve Sonlu Elemanların Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bogdanovich, A.E. and Kizhakkethara, I. (1999). Three-dimensional finite element analysis of double-lap composite adhesive bonded joint using submodeling approach. *Composites: Part B*, **30**: 537–551.
- Can, Ö. ve Kaya, A.İ. (2007). Örneklerle Abaqus'a Giriş. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Ciptokusumo, J., Weide-Zaage, K. and Aubel, O. (2009). Investigation of stress distribution in via bottom of Cu-via structures with different via form by means of submodeling. *Microelectronics Reliability*, **49**: 1090–1095.
- Demirsöz R. (2005). Asansör Kılavuz Rayların Gerilme Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Giglio, M. (1999). FEM submodelling fatigue analysis of a complex helicopter component. *International Journal of Fatigue*, **21**: 445–455.
- Gerstle, W. (1989). Structural Zooming Research and Development of an Interactive Computer Graphical Interface for Stress Analysis of Cracks. NASA/American Society for Engineering Education (ASEE) Summer Faculty Fellowship Program, Tiwari, S. N. (Compiler), NASA Contractor Report, **181894**: 67-68.
- Gerstle, W., Martha, L. and Ingraffea, A. (1987). Finite and Boundary Element Modeling of Crack Propagation in Two and Three Dimensions. *Engineering with Computers*, **2**: 167-183.

Karakaya Ş. (2012). Kompakt Olarak Katlanan Ve Kendi Kendine Açılabilen Yeni Bir Reflektör Antenin Tasarım Ve Analizi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Kitamura, M., Ohtsubo, H., Akiyama, A., Bandoh, H. (2003). Submodeling Analysis of Ship Structure with Superconvergent Patch Recovery Method. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, **13**: 216-223.

Kurtay, T. (1980). Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş Ders Notu, İTÜ., Makina Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.

Lai, Y.S. and Wang, T.H. (2005). Verification of submodeling technique in thermomechanical reliability assessment of flip-chip package assembly. *Microelectronics Reliability*, **45**: 575-582.

Larson, M. G. (2004). Adaptive Submodeling. *Computational Mathematics*, Chalmers.

Ranestad, Q., Zhang, Z. L. and Thaulow, C. (1999). An Engineering Method for Constraint Based Fracture Assessment of Welded Structural Components with Surface Cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, **63**: 653-674.

Schöllmann, M., Fulland, M., Richard, H.A. (2003). Development of a new software for adaptive crack growth simulations in 3D structures. *Engineering Fracture Mechanics*, **70**: 249–268.

Soykasap, Ö. (2007). Folding Design of Composite Structures. *Composite Structures*, **79**: 280-287.

5.1 İnternet Kaynakları

1-http://data.obitet.net/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf,08.05.2013

2-<https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus/6.11.2/books/usi/default.htm>,08.05.2013

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Harun DEMİR
Doğum Yeri ve Tarihi : SELENDİ 01.02.1988
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 05055549436/harundemir_88@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : SELENDİ Ç.P.L. (2001-2004)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi (2006-2010)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi (2010-2013)