

**MODÜLER KOMPOZİT ENERJİ DİREKLERİNİN  
TASARIM, ANALİZ VE ÜRETİMİ**

**Mustafa AKOĞLU**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MODÜLER KOMPOZİT ENERJİ DİREKLERİNİN TASARIM, ANALİZ VE  
ÜRETİMİ**

Mustafa AKOĞLU  
0000-0002-9606-2294

Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023

## TEZ ONAYI

Mustafa AKOĞLU tarafından hazırlanan “MODÜLER KOMPOZİT ENERJİ DİREKLERİNİN TASARIM, ANALİZ VE ÜRETİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

**Başkan** : Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ İmza

0000-0002-4035-4642  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Prof. Dr. Mustafa Özgür YAYLI İmza

0000-0003-2333-3062  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Prof. Dr. Şeref Doğuşcan AKBAŞ İmza

0000-0001-5327-3406  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali KARA**  
**Enstitü Müdürü**

.././.....

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**19/06/2023**

**Mustafa AKOĞLU**

**TEZ YAYINLANMA  
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI**

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı  
Tarih

Öğrenci Adı-Soyadı  
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım  
yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MODÜLER KOMPOZİT ENERJİ DİREKLERİNİN TASARIM, ANALİZ VE ÜRETİMİ

**Mustafa AKOĞLU**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

Bu tez kapsamında, modüler kompozit enerji direklerinin tasarımı, malzeme seçimi, üretimi ve performans analizi üzerinde yoğunlaşmıştır. Sonuçlar, enerji iletim endüstrisindeki uzmanlara, araştırmacılara ve karar vericilere, modüler kompozit enerji direklerinin potansiyelini değerlendirmeleri ve enerji altyapısının sürdürülebilirliğini artırmak için stratejik adımlar atmaları konusunda yol gösterecektir.

Bu çalışma, daha önceden geleneksel olarak yekpare olarak kullanılan modellere alternatif olunması için çalışılmıştır. Bu şekilde direklerin naklinde ve bakımında çalışmalar yapılabilecektir.

Modüler kompozit enerji direklerinin öncelikle betonarme direk için referans model oluşturularak geliştirilmek için modeller oluşturulmuş ve sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Bu çalışma sonucunda modüler kompozit direk için sonlu elemanlar modeli ile hafiflik ve dayanım konusunda en uygun model seçilmiştir ve bu model elyaf sarma yöntemi ile üretilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu elemanlar analizi, kompozit, kompozit üretimi, Abaqus 2023, viii + 76 sayfa.

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

**DESIGN, ANALYSIS AND PRODUCTION OF MODULAR COMPOSITE ENERGY  
POLES**

**Mustafa AKOĞLU**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

In this thesis, the design, material selection, production and performance analysis of modular composite energy poles are focused on. The results will guide experts, researchers and decision makers in the power transmission industry to assess the potential of modular composite energy pylons and take strategic steps to improve the sustainability of energy infrastructure.

In this study, it was tried to be an alternative to the models that were traditionally used as a monolith. In this way, it will be possible to work on the transportation and maintenance of the poles.

Models were created and finite element analyzes were made in order to develop modular composite energy poles by first creating a reference model for the reinforced concrete pole.

As a result of this study, the finite element model and the most suitable model in terms of lightness and strength were selected for the modular composite pole and this model was produced by the fiber winding method.

**Keywords:** Finite elements, analysis, composite, composite fabrication, Abaqus  
**2023, viii + 76 pages.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın başından bu yana her zaman yanımda olan, beni yönlendiren ve destekleyen, bu süre boyunca kendisinden çok şey öğrendiğim danışmanım Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusun belirlenmesi ve sonrasında olan süreçte yardımlarından dolayı Vimansys Digital AR-GE Teknolojileri şirketine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın şekillendirilmesinde, yol haritalarının oluşturulması ve kapsamlı organizasyon şemasında bana yardım eden ve bana yol gösteren Okan OTUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım sürecinde bana olan manevi desteklerinden ötürü Ayőe POLAT'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tüm eğitim sürecimde olduğu gibi bu çalışmanın başından sonuna kadar her zaman yanımda olan ve beni her zaman destekleyen ve motive eden annem Fatma AKOĞLU ve babam Hasan AKOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte manevi destekleriyle bana güç veren kıymetli arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa AKOĞLU  
.././2023



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	6
3.1.Mevcut Durum.....	6
3.2.Kullanılış çeşitlerine göre direk çeşitleri.....	6
3.2.1.Gerilim tipine göre direkler.....	7
3.2.2.Yapıldıkları malzemeye göre direk çeşitleri.....	8
3.3.Materyal.....	10
3.3.1.Kompozit.....	11
3.3.2.Kompozit üretim yöntemleri.....	13
3.3.3.Plastikler.....	21
3.4.Yöntem.....	28
3.4.1.Sonlu elemanlar yöntemi.....	28
4.BULGULAR.....	45
4.1.Sonlu Elemanlar Analizleri.....	45
4.1.1.Betonarme durdurucu direkler.....	45
4.1.2.Yekpare polimer kompozit model çalışması.....	47
4.1.3.Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit model çalışması.....	50
4.1.4.Fens teli kullanarak oluşturulan model.....	52
4.1.5.Modüler kompozit direk manşon kullanımı.....	59
4.1.6.Nihai modüler kompozit sıkı geçme ile tasarımı.....	65
5.TARTIŞMA VE SONUÇ.....	70
5.1.Kompozit Direk Üretimi.....	70
5.2.Sonuç.....	72
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	76

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\rho$	Yoğunluk
$\sigma$	Gerilme
$G_{ij}$	Kayma modülü
$E_{ij}$	Elastisite modülü
$\nu_{ij}$	Poisson oranı
$\phi$	Çelik donatı çapı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
Al	Alüminyum
cm	Santimetre
g	gram
GF	Glass fiber(Cam elyaf) katkı
GPa	Gigapascal
h	Ankraj boyu
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
PA	Poliamid
PP	Polipropilen
1D	Bir boyutlu
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1.	Kompozit Türleri..... 12
Şekil 3.2.	Elle yatırma yöntemi ..... 14
Şekil 3.3.	Püskürtme yöntemi ..... 15
Şekil 3.4.	Elyaf yatırma yöntemi ..... 16
Şekil 3.5.	Reçine transfer yöntemi..... 17
Şekil 3.6.	Hazır kalıplama yöntemi..... 18
Şekil 3.7.	Pultrüzyon yöntemi ..... 19
Şekil 3.8.	Vakum yöntemi ..... 20
Şekil 3.9.	Otoklav yöntemi ..... 21
Şekil 3.10.	DC04 fens teli ..... 27
Şekil 3.11.	Alüminyum manşon ..... 28
Şekil 3.12.	Abaqus'de part oluşturma..... 30
Şekil 3.13.	Abaqus'te dıştan aktarılan part..... 31
Şekil 3.14.	Abaqus'de montajlama..... 33
Şekil 3.15.	Analiz adımı oluşturulması..... 34
Şekil 3.16.	Abaqus'de 'Surface to surface contact'..... 35
Şekil 3.17.	Abaqus'de kontak özellikleri..... 36
Şekil 3.18.	Abaqus'de 'tie' bağlantısı..... 37
Şekil 3.19.	Abaqus'de yükleme durumu..... 38
Şekil 3.20.	Durdurucu direk yükleri..... 40
Şekil 3.21.	Sabitlenme durumu..... 41
Şekil 3.22.	Durdurucu direk sabitleme durumu..... 42
Şekil 3.23.	İntegrasyon noktaları ..... 43
Şekil 3.24.	Durdurucu direk meshlenmesi..... 44
Şekil 4.1.	Betonarme direk modeli..... 45
Şekil 4.2.	Betonarme model analiz sonuçları..... 47
Şekil 4.3.	Yekpare kompozit direk modeli..... 48
Şekil 4.4.	Yekpare kompozitin tanımlanması..... 49
Şekil 4.5.	Yekpare kompozit model sonuçları..... 50
Şekil 4.6.	Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit direk modeli..... 51
Şekil 4.7.	Geliştirilmiş Yekpare kompozit model analiz sonuçları..... 52
Şekil 4.8.	Fens teli modeli..... 53
Şekil 4.9.	Fens teli kompozitin tanımlanması..... 54
Şekil 4.10.	Fens teli kompozit ve termoplastik arasındaki bağlantı..... 55
Şekil 4.11.	Fens teli kontakt özellikleri..... 56
Şekil 4.12.	Termoplastik ve kompozit arasındaki bağlantı..... 56
Şekil 4.13.	Kompozit katman gerilme değeri..... 57
Şekil 4.14.	Termoplastik katman gerilme değeri..... 57
Şekil 4.15.	Telfens gerilme değeri..... 58
Şekil 4.16.	Fens teli kompozit model deplasman değeri..... 58
Şekil 4.17.	Manşonlu model..... 59
Şekil 4.18.	İlk iki katman kompozitin tanımlanması..... 61
Şekil 4.19.	Son iki katman kompozitin tanımlanması..... 61
Şekil 4.20.	Manşon bağlantısı..... 62
Şekil 4.21.	Manşon kontak özellikleri..... 63
Şekil 4.22.	Termoplastik ve kompozit arasındaki bağlantı..... 64

Şekil 4.23.	Manşonlu kompozit direk analiz sonuçları.....	64
Şekil 4.24.	Nihai model.....	65
Şekil 4.25.	İlk dört modül kompozit tanımlanması.....	67
Şekil 4.26.	İlk dört modül kompozit tanımlanması.....	67
Şekil 4.27.	Modüller arasında bağlantı.....	68
Şekil 4.28.	Nihai model kompozit gerilmesi.....	68
Şekil 4.29.	Nihai model deplasman sonuçları.....	69
Şekil 5.1.	Elyaf sarımı.....	71
Şekil 5.2.	Üretilmiş kompozit direk.....	72

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1.	Durdurucu direk yükleri.....	39
Çizelge 4.1.	Betonarme model özellikleri.....	46
Çizelge 4.2.	Beton malzeme özellikleri.....	46
Çizelge 4.3.	Çelik malzeme özellikleri.....	46
Çizelge 4.4.	Yekpare kompozit direk modeli özellikleri.....	48
Çizelge 4.5.	PA-GF30 malzeme özellikleri.....	49
Çizelge 4.6.	Kompozit malzeme özellikleri.....	49
Çizelge 4.7.	Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit model özellikleri.....	51
Çizelge 4.8.	Fens teli modeli özellikleri.....	53
Çizelge 4.9.	HDPE malzeme özellikleri.....	54
Çizelge 4.10.	Katmanlı kompozit malzeme özellikleri.....	54
Çizelge 4.11.	DC04 çeliği malzeme özellikleri.....	55
Çizelge 4.12.	Manşonlu model kesit özellikleri.....	59
Çizelge 4.13.	Manşonlu model özellikleri.....	60
Çizelge 4.14.	Alüminyum malzeme özellikleri.....	60
Çizelge 4.15.	Manşonlu model kompozit özellikleri.....	61
Çizelge 4.16.	Nihai model özellikleri.....	65
Çizelge 4.17.	Nihai kompozit özelliklerin kesit özellikleri.....	66
Çizelge 4.18.	Nihai model kompozit özellikleri.....	66
Çizelge 5.1.	Sonlu elemanlar analiz sonuçları.....	70

## 1. GİRİŞ

Günümüz toplumlarının temel ihtiyaçlarından biri de enerjidir. Endüstriyel operasyonlar, ev aydınlatması, iletişim sistemleri ve daha pek çok farklı alanın işlevselliği elektrik enerjisine bağlıdır. Bu nedenle, çağdaş toplumların sorunsuz çalışması için güvenli, güvenilir ve etkili bir enerji iletim altyapısı şarttır. Enerji iletimi için altyapının temel parçalarından biri olan enerji direkleri, elektrik enerjisinin iletimini sağlayarak bu sistemin güvenilirliğini ve etkinliğini sağlar.

Geleneksel elektrik direkleri hala çelik veya betondan yapılmış yekpare yapılar olarak bilinmesine rağmen, elektrik direği yapılarında kompozit malzemelerin kullanımı son zamanlarda popüleritesini artırmıştır. Hafiflik, sağlamlık ve dayanıklılık gibi özellikleriyle öne çıkan ve kompozit olarak bilinen malzemeler, çeşitli malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde ediliyor. Modüler kompozit enerji direkleri, bu özelliklerinden dolayı geleneksel malzemelerin dezavantajlarının üstesinden gelebilmektedir.

Modüler kompozit enerji direkleri çelik veya beton direklere göre daha güçlü ve hafif olmakla birlikte yüksek mukavemete sahiptir. Bu, taşınabilirliği, montajı ve demontajı kolaylaştırır. Ayrıca bu direkler, kompozit malzemelerin korozyon direnci ve dayanıklılığı sayesinde uzun ömürlüdür ve az bakım gerektirir. Direklerin modüler yapısı, çeşitli boyut ve özelliklerde yapılandırılmasını kolaylaştırarak, çeşitli enerji iletim projelerine uyarlanabilir hale getirir. Kompozit malzemeler aynı zamanda geri dönüştürülebilir niteliklere sahiptir ve bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir avantajdır.

Modüler kompozit enerji direklerinin tasarımı, üretimi ve performansının incelenmesi bu tezin amacıdır. Bu çalışmanın bulguları, enerji iletim endüstrisindeki uzmanlara, araştırmacılara ve diğer kilit oyunculara, modüler kompozit enerji direklerinin potansiyelini anlamalarına ve sürdürülebilirliği ve verimliliği iyileştirmenin daha iyi yollarını bulmalarına yardımcı olmak için bir rehber niteliğindedir. enerji sektörü. Modüler kompozit enerji direkleri, geleneksel malzemelerin dezavantajlarının üstesinden gelme potansiyeline sahiptir ve enerji iletiminin daha verimli ve sürdürülebilir bir yolunu

sunar. Tez ayrıca bu alanda ek çalışma ve geliştirmeyi teşvik etmekte ve enerji sektöründe kompozit malzemelerin genel kabulünü genişletmektedir.

Bu tez, enerji endüstrisi için modüler kompozit enerji direklerinin inovasyonunun önemini gösterecek ve gelecek enerji iletim projeleri için bir yol haritası sunacaktır. Modüler kompozit enerji direklerinin kullanımının artması ile daha sürdürülebilir ve etkin enerji çözümleri elde etmek mümkün olacaktır. Çeşitli modüler kompozit enerji direği tasarımı, üretimi ve performans özelliklerinin araştırılması da alanı önemli ölçüde ilerletecektir.

Bu çalışmanın amacı, kullanılan kompozit direkleri modüler olarak tasarlamaktır. Yekpare yapılar, bu yapıları bir sonlu elemanlar programı kullanarak analiz edilerek ve ardından en iyi tasarım seçilerek üretim yapılacaktır. Enerji direklerinin modüler tasarımı ortaya konulduktan sonra, enerji direkleri gibi ulaşımın zor olduğu veya hiç olmadığı yerlerde direğin zarar görmemesi için tüm direğin yerine problemin olduğu bölge değiştirilerek sorunun lokal olarak çözümlenmesi çalışmanın öncelikli hedefidir. Ayrıca, modüler kompozit enerji direklerinin taşıma amaçlı ağırlıklarının azaltılması, çalışmanın faydasını en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir.

Çalışmada öncelikle yapılacak olan modüler direk tasarımları ele alınmış ve bu tasarımlarda hangi malzemelerin kullanılacağına karar verilmiştir. Enerji direklerine gelen düşey ve yatay yükler belirlendikten sonra yekpare betonarme direk için Abaqus programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Daha sonra çeşitli tasarımlar karşılaştırılarak sağlıklı, fiyat ve ağırlık açısından en iyi tasarım belirlendi ve üretildi.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde enerji direklerinde geleneksel malzemeler yerine kompozit malzemenin kullanılması üzerine yapılan çalışmalar incelendi.

Polyzois ve arkadaşları (1998) yaptıkları çalışmada kullanılan geleneksel direklerin yerine kompozit direk kullanmayı amaçlamışlardır. Bu direği yaparken de kompozitin üretim yöntemi olarak elyaf sarma yöntemini tercih etmişlerdir. Kompozit malzeme kullanma sebeplerinden bir tanesi, kompozitle üretilen direğin ince et kalınlığına sahip olmasıdır, ince et kalınlığından dolayı daha hafif bir ürün ortaya çıkacaktır. Kompozit malzemenin bir diğer avantajı ise kompozit malzemeler sertlik ve mukavemet açısından da geleneksel malzemelerden istenilen değerleri sağlamaktadır. Ancak dinamik davranışları açısından geleneksel malzemelerden daha farklı davranışlar sergilemektedirler. Bu makalede kompozit olarak E tipi cam ile vinil ester kullanılan malzemenin elastisite modülü geleneksel malzemelere göre nispeten daha düşük olduğundan dolayı daha düşük frekansa sahiptir. Enerji direkleri, yatay olarak gelen yüklere maruz kaldıkları için daha çok eğilmeye maruz kalmaktadırlar. Bu çalışmada da kompozit direklerin dinamik özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda ise yüksek derecede doğruluk elde edilmiştir.

Polyzois ve arkadaşları (1999) çalışma kapsamında kompozit direklerin nihai gücünü ve performansını belirlemeyi, tasarım yönergesini geliştirmeyi ve geliştirilen modelleri test yoluyla değerlendirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmanın sonucunda kompozit direklerin ahşap direklerle eşdeğer yükü taşıyabildiği kanıtlanmıştır. Kompozit direklerin yük kapasitesi-ağırlık oranı, eşdeğer ahşap direklerden neredeyse üç kat daha yüksek olduğu farkedilmiştir. Dolayısıyla da ağırlık bakımından kompozit direklerin ahşap direklere göre önemli bir tasarruf sağladığı görülmüştür. Çalışma kapsamında yapılan testlerde yüksek yarıçap-kalınlık oranı nedeniyle, numelerin çoğunda yerel burkulma en baskın kırılma modu olmuştur. Test sonucu ile sonlu elemanlar sonuçları kıyaslandığında ise birbirine yakın sonuçlar verildiği görülmüştür ve sonlu elemanlar analizi” kompozit direkler için kırılma modlarını doğru bir şekilde tahmin etmiştir.



Mohamed ve Masmoud (2009) fiberin boyuna, aç ı yönelimine ve direğin yüksekliğine bakılarak direk üzerindeki etkilerini incelemek üzerine yaptıkları çalışmayı sonlu elemanlar analizi ile çalıştırmışlardır. Çalışmada direk üzerinden üç farklı bölge incelenmiş ve bu bölgeler 20 ve 33 ft uzunluklarında olan iki farklı direk üzerindedir. Çalışmanın sonucunda ABAQUS ile yapılan sonlu elemanlar analizleri eğilme davranışlarını ve kırılma yüklerini iyi tahmin etmiştir. Kalınlık, elyaf yönelimleri ve katmanların istiflenme sırasını optimize eden önerilen modeller iyi sonuç vermiştir. Sonuçlara göre standartlar içinde kalacak şekilde direk tasarımı yapmışlardır.

Urgessa ve Mohammadi (2016) yaptıkları çalışmada FRP direklerinin özelliklerini incelemek için kompozit üzerinde çeşitli parameterler ile çalışmalar ve ABAQUS' te sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Bu parametreler arasında geometrik özellikler, fiber oryantasyonu, koniklik oranı, katman sayısı, lamina kalınlığı ve enine yükün konumu yer alır. Çalışmaları sonucunda ABAQUS üzerinden yapılan analizlerde kabuk eleman ile yapılan analizlerde nispeten daha iyi sonuçlar elde edildiği, maksimum gerilmenin 0 dereceden 45 dereceye kadar arttığı ve daha sonrasında 60 dereceye doğru maksimum gerilmenin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kompozit direklerde katman sayısını arttırdıkça deplasman ve gerilme değerlerinde azalmalar gözlenmiştir.

Saboori ve Khalili (2011) yaptıkları çalışmada kompozit enerji direklerinin lineer statik analizini ve ikinci dereceden bir kabuk kullanarak sonlu elemanlar modeli kullanarak davranışı üzerindeki çeşitli parametreleri değerlendirmişlerdir. Bu parametreler konik kompozit direğin geometrik özellikleri, fiberin tipi ve oryantasyonu ve fiber oranıdır. Yapılan sonlu eleman analizleri ANSYS ile yapılmış olup, küçük yer değiştirmeler için formülasyona dayalı MATHEMATİCA yazılımı kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda mevcut sonlu elemanlar analizi ve ANSYS ile yapılan analizin sonuçları arasında uyum sağlanmıştır. Fiber oryantasyon açısında da 45 dereceye kadar maksimum gerilme değeri yükselirken, 45 dereceden sonra maksimum gerilmenin değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Koniklik oranı azaldıkça maksimum sehim ve deplasman değeri düşmüştür. Kompozitteki lif oranı incelendiğinde ise, lif oranı arttıkça kompozit direğin daha küçük sapma ve daha küçük gerilmeye maruz kaldığı görülmüştür. Lif tipi

değiştirildiğinde ise, daha sert lifler kullanıldığında kompozit direğin performansında önemli ölçüde bir iyileşme gözlemlenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kompozit direklerin üretiminde hangi malzemelerin kullanılacağı ve kullanılan malzemelerin üretim yöntemleri seçildi. Malzemelerin tipi ve üretim yöntemi belirlendikten sonra ABAQUS üzerinden sonlu elemanlar analizi ile direğin deplasman ve gerilme değerleri belirlendi.

#### 3.1. Mevcut Durum

Elektrik enerjisinin üretim yerinden tüketim yerlerine transferi için hava yolu hatları kullanılır. Hava yolu hatlarını sabit bir şekilde tutmaya yarayan sistem direklerden oluşur. Direkler kullanım çeşitlerine göre isim alırlar.

#### 3.2. Kullanılış çeşitlerine göre direk çeşitleri

- Durdurucu direkler
- Köşede durdurucu direkler
- Taşıyıcı direkler
- Köşede taşıyıcı direkler
- Nihayet direkleri
- Branşman direkleri
- Tevzi direkleri (URL-7)

- **Durdurucu direkler**

Enerji nakil hatlarının lineer olduğu yerlerde iletkenlere gelen çekme kuvvetleri direkler tarafından karşılanır. Yedi taşıyıcı direk ve bir durdurma direği, enerji nakil hatlarının tipik olarak nasıl ilerlediğini gösterir. İki durdurucu direk ise yol ve nehir gibi engellerde sıralı olarak kullanılabilir. Bir kutupdaki problemin diğer iki direk arasında kalmasını ve o direk ile ilgili bir problem olması durumunda diğer direklere yayılmamasını sağlar.

- **Köşe durdurucu direkler**

Enerji nakil hatlarında köşelerde kullanılan direklere denir. Bu direğin amacı hem durdurucu olması hem de düz doğrultuda giden hatların köşesinde kullanılarak rotayı değiştirmektir.

- **Taşıyıcı direkler**

Durdurucu direkler arasında kullanılarak iletkeni taşımak için kullanılan direk çeşitidir.

- **Köşede taşıyıcı direkler**

Enerji nakil hatlarında doğrusal giden yönünün değiştiği noktalarda iletkeni taşımak için kullanılan direklere denir.

- **Nihayet direkleri**

Enerji nakil hattının başlangıç ve sonunda kullanılan direklere denir. Hattın tek taraflı toplam gerilme kuvvetlerini karşılayabilmektedirler.

- **Branşman direkleri**

Taşıyıcı ve köşe taşıyıcı direklerin bir veya iki yönde kollara ayrıldığı durumda kullanılan direklerdir.

- **Tevzii direkleri**

Enerji nakil hatlarında ikiden fazla nihayet bağı ile hatların dağıtımının yapıldığı direklerdir.

### **3.2.1. Gerilim tipine göre direkler**

Ana hat, direğe bağlı hatların en büyük kesitine sahip olanıdır. Ana hattın diğer hatlara uzanan dalları vardır. Ana hatlardan enerji aldıkları için dallara güç sağlamak için daha küçük enerjiler kullanılır. Kullanılan direkler çekme, ağırlık, rüzgar ve buz yüklerine dayanabilmelidir. Taşıyıcı direkler sadece taşıma ve tutma amaçlı kullanıldığından, durdurucu, köşe ve dağıtım direkleri direkleri çeşitli açılardan etkilerken çekme kuvveti yerine dikey yöndeki rüzgar kuvveti dikkate alınır. Ayrıca kullanılan hattın gerilimi enerji direklerinin sınıflandırılmasında kullanılabilir. Alçak gerilim direkleri:

- Orta gerilim direkleri
- Yüksek gerilim direkleri
- Çok yüksek gerilim direkleri

- **Alçak gerilim direkler**

1 kV'a kadar alçak gerilim sistemlerinde kullanılan bir direk çeşididir. Alçak gerilim direkleri yapmak için ahşap, çelik ve betonarme kullanılabilir.

- **Orta gerilim direkler**

1 kV ile 34,05 kV arası orta gerilimde kullanılan direk türüdür. Çelik, betonarme ve ahşap, orta gerilim direk yapımı için kabul edilebilir malzemelerdir. Acil durumlarda betonarme ve diğer ahşap malzemeler yerine ahşap direkler tercih edilebilir.

- **Yüksek gerilim direkler**

Bu tip direk ile 35.05 kV ile 154 kV arası yüksek gerilim kullanılmaktadır. Yüksek gerilim direklerinin yapımında galvaniz sac kullanılmaktadır. Çevrenin etkilerinden korumak için koruyucu bir tabaka uygulanır ve periyodik olarak yenilenir. 8 ile 18 m arası yüksek gerilim direkleri için yükseklik aralıklarıdır.

- **Çok yüksek gerilim direkleri**

154 kV ve 380 kV arasında yüksek gerilimde kullanılan direk çeşididir. Çok yüksek gerilim direkleri galvaniz sac malzemeden üretilir. Direkler kafes bir yapı oluşturacak şekilde üretilmektedir. Direğin en üstünde hattı korumak üzere koruma iletkeni kullanılmakta olup, bu iletken toprakla irtibatı sağlanır.

### **3.2.2. Yapıldıkları malzemeye göre direk çeşitleri**

İmal edildiği malzemeye göre enerji direği üç tanedir ve bunlar aşağıdaki gibidir.

- Ahşap direkler
- Betonarme direkler
- Çelik direkler

- **Ahşap direkler**

Alçak ve orta gerilim havai hatlarında direk yapımında köknar, ardıç ve karaçam gibi ağaçlar kullanılır. Bazı savunmalar, dış etkilere karşı hassas oldukları için devreye sokulur. Bu koruyucular katranlanır veya bakır sülfat emdirilir ve direğe uygulanır. Ahşap direkler kullanım şekillerine göre şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Tek ahşap direkler
- Çift ahşap direkler (ikiz veya H)
- A direkler
- Payandalı direkler
- Kirişli direkler
- Lenteli direkler (gergi telli)

- **Betonarme direkler**

Çimento, su ve katkı maddelerinden yapılan beton ve çelik takviyeler, betonarme direkler oluşturmak için birleştirilir. Pürüzsüz, gözeneksiz bir direk oluşturmak için santrifüj veya vibrasyon kullanılır. Endüstriyel alanlarda sert havalarda betonarme direklerin zararlı gazlara karşı daha az duyarlı olması çelik direklere göre en önemli avantajıdır.

- **Çelik direkler**

Ahşap direkler ve betonarme direklere göre çelik direkler hem daha dayanıklı hem de daha hafiftir. Ahşap ve betonarme direklere göre daha kolay, her alanda hasar onarılabilir. Fakat diğer direk tiplerine göre çelik direklerin bakımı daha pahalıdır. Kullanılan farklı çelik direk türleri arasında:

- Boru direkler
- A ve kafes direkler
- Putrel direkler (pilon veya çatal)

Geleneksel olarak kullanılan malzemelerin birbirine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Ahşap direklerin kullanım ömrü çelik direklere göre daha kısadır ama betonarme direklerin ömrü de çelik direklere göre daha uzundur. Çelik direkler ahşap ve betonarme

direklere göre daha pahalıdır. Kaçak akım konusunda da betonarme ve ahşap direkler oldukça güvenilirken çelik direkler üretim malzemesinden dolayı kaçak akımlara karşı güvenilir değildir. Çelik ve ahşap direklerin taşınması ve kurulumu kolaydır fakat betonarme direkler kırılğan ve tek parça oldukları için taşınması ve kurulması zordur.

Geleneksel malzemelerin avantajları ve dezavantajları göz önüne alındığında yeni bir malzeme ihtiyacı ortaya çıkmıştır ve kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. İlk fiber takviyeli polimer iletim yapısı ABD’de, 1960’lı yıllarda Hawaii’deki Maui adasında kullanılmıştır. Ancak kompozit malzemelerin elektrik direklerde kullanılması için olan ilgi son zamanlarda artmıştır. Aralık 2009’da yaklaşık 1.000 ahşap elektrik direği kaybeden Batı Virginia’dan Appalachian Power Co. (APCO) gibi bazı şirketler direklerin engeli arazilerde bulunduğunu ve bundan dolayı ekipmanların ulaşmasının zor olduğunu ifade etmişlerdir. Helikopterlerin ağırlık kapasitesi sınırlı olduğu için engebeli arazilere ahşap direklerin iletilememiştir. 2011 ‘de Güney Kaliforniya da olan fırtınada elektrik direkleri devrilmiş ve bazı yerlerde yangın, bazı yerlerde ise büyük elektrik kesintileri yaşanmıştır. Yaşanan bu kötü tecrübeler sonucunda insanlar çözüm arayışına girmişlerdir. Araştırmalar doğrultusunda hem taşınması kolay hem bakımı hem de kurulumunun kolay olmasından dolayı kompozit malzemeler ön plana çıkmıştır. Ayrıca kompozit ve plastik malzemelerin geri dönüştürülme imkanı betonarme malzemeye göre daha yüksek olduğu için kompozit malzemeler daha da fazla önem kazanmıştır.

Bu çalışmada geri dönüştürülebilir kompozit direklerin tasarımı hakkında çalışmalar yapıldı ve kompozit direklerin uygunluğu hakkında ABAQUS ile sonlu elemanlar analizi yapıldı.

### **3.3. Materyal**

Bu bölümde kompozit direğin seçilmesi ve üretilmesinde kullanılacak kompozit ve termoplastik hakkında bilgiler verildi ve hangi üretim yöntemi ve hangi malzemenin seçileceğine karar verildi.

### 3.3.1. Kompozit

Kompozit malzemeler, farklı biçimlere ve kimyasal bileşimlere sahip olan iki veya daha fazla mikro ve makro bileşenin karışımı veya birleşimiyle oluşan malzemelerdir. Bu malzemelerde bileşenler genellikle makro düzeyde bir araya gelir. Kompozitler tarih boyunca kullanılmaya başlanmıştır; örneğin kerpicing dayanıklılığını artırmak için kil, saman ve bitkisel liflerle karıştırılmıştır. Günümüzde en yaygın kullanılan kompozitlerden biri betondur, çünkü çimento ve kumdan oluşan matris çelik çubuklarla takviye edilir (Kaw,1997).

Plastik malzemeler, kolay şekillendirilebilme, düşük yoğunluk, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı dayanıklılık gibi özellikleri nedeniyle diğer malzeme çeşitleriyle rekabet edebilecek düzeye gelişmiştir. Ancak, plastik malzemelerin sertlik ve dayanıklılık gibi bazı özellikleri düşük olabilir. Bu nedenle, bu eksiklikleri gidermek amacıyla 1950'lerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir.

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin bir araya gelerek istenen özellikleri sağlamalarını mümkün kılar. Metaller, seramikler veya polimerler tek başlarına istenen tüm özellikleri sağlayamayabilir. Ancak, kompozit malzemelerde her bir bileşen, iyi olduğu özelliklerle bir fazı oluşturacak şekilde bir araya getirilir. Fazlar birbiri içinde çözünmeden bir araya gelir ve aralarındaki ara yüzeyler fiziksel olarak belirlenir. Her bir fazın kompozit içindeki görevi farklıdır ve her fazın özellikleri kompozit malzemede görünür.

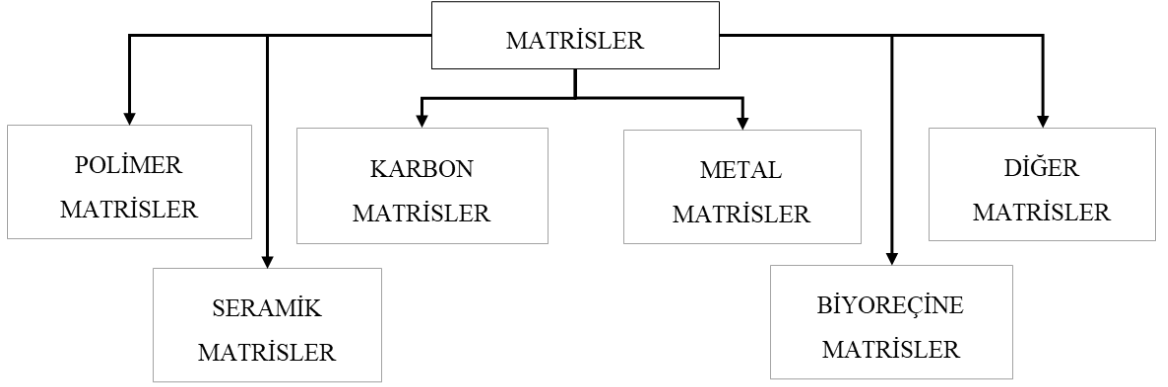
Özellikle polimer kompozitler, yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi avantajlar sunar. Ayrıca, kompozit malzemeler hafif olmalarının yanı sıra metaller kadar dayanıklı ve sert olabilirler (Mazumdar, 2002).

Kompozit malzemelerde temel olarak iki faz bulunur: matris ve takviye fazı. Bu iki unsurun özellikleri, ihtiyaç duyulan nitelikleri karşılayacak şekilde kontrol edilebilir.

Kompozitleri matrislerine göre 3 sınıfa ayırabiliriz:

- Metal matrisli kompozitler,
- Seramik matrisli kompozitler
- Polimer matrisli kompozitler.





**Şekil 3.1.** Kompozit Türleri

### 3.3.1.1. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitlerde, matris metaldir. Metal matris, genellikle alüminyum, titanyum veya magnezyum gibi yüksek mukavemetli metallerden oluşur. Bu tür kompozitlerde, metal matris takviye elemanlarını, genellikle seramik elyaflar, karbon elyaflar veya metal elyaflar gibi lifler veya partiküller şeklinde içerir. Metal matrisli kompozitler, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık dayanımı ve mükemmel termal iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılır.

### 3.3.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitlerde, matris seramiktir. Seramik matris, cam, oksitler veya karbürler gibi seramik malzemelerden oluşur. Bu tür kompozitlerde, seramik matris takviye elemanlarını genellikle seramik elyaflar veya seramik partiküller oluşturur. Seramik matrisli kompozitler, yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve kimyasal dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle, genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında, motor parçalarında ve seramik kaplamalarda kullanılırlar.

### 3.3.1.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitlerde ise matris polimerdir. Polimer matris, plastik gibi organik polimer malzemelerden oluşur. Bu tür kompozitlerde, polimer matris takviye elemanlarını genellikle cam elyaflar, karbon elyaflar veya doğal elyaflar gibi elyaflar oluşturur. Polimer matrisli kompozitler, hafiflik, darbe dayanımı, esneklik ve kolay

işlenebilirlik gibi özellikleri nedeniyle birçok endüstride yaygın olarak kullanılır. Otomotiv sektörü, spor malzemeleri, inşaat malzemeleri ve elektronik bileşenler gibi birçok alanda polimer matrisli kompozitler tercih edilir.

Her bir matris türü, farklı özelliklere ve uygulamalara sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesini sağlar. Bu sınıflandırma, kompozit malzemelerin özelliklerini ve kullanım alanlarını anlamamıza yardımcı olur.

Kompozit malzemenin üretim yöntemine göre kullanılan kompozitin dayanımı ve malzeme özellikleri değişir.

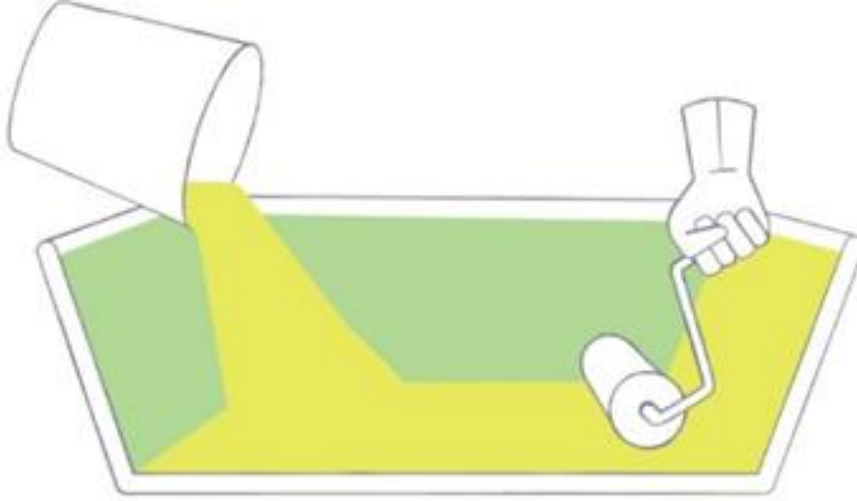
### **3.3.2. Kompozit üretim yöntemleri**

#### **3.3.2.1. Elle yatırma yöntemi**

Elle yatırma yöntemi, takviye kumaşının kalıp üzerine elle yerleştirilerek kompozit malzemeye reçinenin emdirilmesi işlemidir. Bu yöntemde, önceden dokunmuş veya kırılmış elyaflardan oluşan takviye kumaşları hazırlanır. Kalıp temizlendikten sonra üzerine jelkot sürülür ve jelkot sertleşir. Ardından, elyaf katmanları yatırılır ve son olarak reçine uygulanarak kompozit malzeme oluşturulur.

Bu işlemde, reçinenin elyaf kumaşına iyi nüfuz etmesi önemlidir, çünkü bu, malzemenin homojen ve sağlam bir yapıya sahip olmasını sağlar. El yatırma tekniğinde, polyester ve epoksi reçinelerin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de sıklıkla tercih edilen seçeneklerdir. Elle yatırma yöntemi, yoğun işçilik gerektirebilmesine rağmen düşük üretim miktarları için uygundur.

Bu yöntem, özellikle karmaşık veya özel şekillendirme gerektiren parçaların üretiminde kullanılır. Elle yatırma, birçok endüstride çeşitli uygulamalara sahip olan kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir proses yöntemidir.



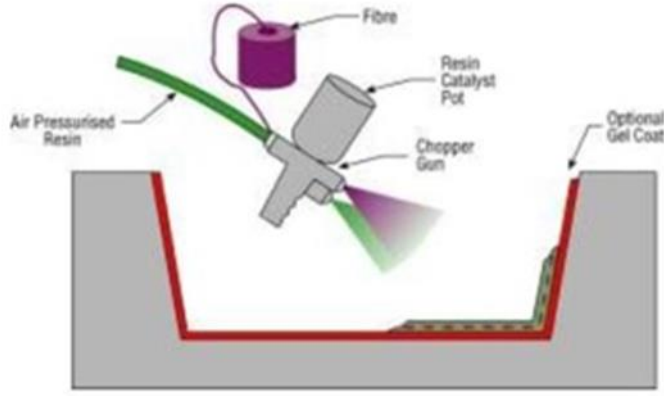
**Şekil 3.2.** Elle yatırma yöntemi (URL-1)

### **3.3.2.2. Püskürtme yöntemi**

Püskürtme yöntemi, elle yatırmanın aletli bir versiyonudur. Bu yöntemde, özel bir tabanca yardımıyla kırılmış elyaflar ve içine sertleştirici katılmış reçine kalıp yüzeyine püskürtülür. Elyaf, tabanca üzerinde bulunan ve kendi başına çalışan bir kırıcı kullanılarak kırılır. Püskürtme işleminin ardından yüzey düzgün bir şekilde düzeltilir ve ürün hazır hale gelir.

Püskürtme yöntemi, daha hızlı ve daha verimli bir üretim sağlamak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Elyaf ve reçine, tabancanın nozulu aracılığıyla birleştirilerek kalıp yüzeyine püskürtülür. Bu yöntem, kompleks şekillendirme gerektiren parçaların üretiminde ve büyük yüzey alanlarına sahip parçaların kaplanmasında tercih edilir.

Püskürtme yöntemi, endüstride çeşitli uygulamalara sahip olan kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan etkili bir proses yöntemidir. Hızlı uygulama, düşük maliyet ve homojen bir kaplama sağlama gibi avantajları vardır. Bu yöntem, özellikle seri üretim ve büyük parça üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Şekil 3.3'te püskürtme yöntemi görülebilir.



**Şekil 3.3.** Püskürtme Yöntemi (Korkmaz, 2014)

### 3.3.2.3. Elyaf sarma yöntemi

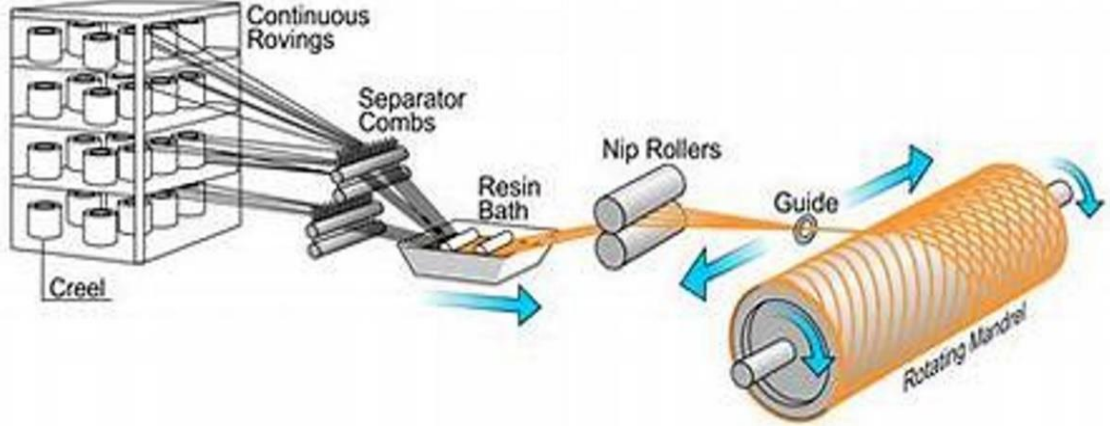
Bu yöntem, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, özel tasarıma sahip ürünlerin seri üretiminde kullanılabilir. Sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılması, elyaf sarma olarak bilinir. Bu teknik, sürekli liflerin kalıba farklı açılarda sarılmasıyla çeşitli mekanik özelliklere sahip ürünler üretmek için kullanılabilir.

Elyaf sarma yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir proses yöntemidir. Sürekli elyaf lifleri, bir reçine ile ıslatıldıktan sonra makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılır. Bu sarılma işlemi, liflerin farklı açılarda kalıba yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, çeşitli açılarda sarılan liflerin kompozit malzemenin mukavemet, rijitlik ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerini etkileyerek istenen özelliklere sahip ürünlerin elde edilmesini sağlar.

Elyaf sarma yöntemi, özellikle silindirik veya tüp şeklindeki parçaların üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Sürekli liflerin dönen bir kalıp üzerine sarılması, parçanın dış yüzeyine homojen bir şekilde dağılımını sağlar. Bu yöntem, yüksek mukavemet, rijitlik ve yorulma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılan kompozit malzemelerin üretiminde etkili bir şekilde kullanılır.

Elyaf sarma yöntemi, esneklik sağlayan bir üretim süreci sunar ve çeşitli lif malzemeleri ve reçinelerle uyumlu olarak kullanılabilir. Bu yöntem, karmaşık şekillere sahip

parçaların üretiminde ve uzunlamasına mukavemet sağlayan ürünlerin elde edilmesinde etkili bir yöntemdir.



Şekil 3.4. Elyaf Yatırma Yöntemi (Bayraktar,2016)

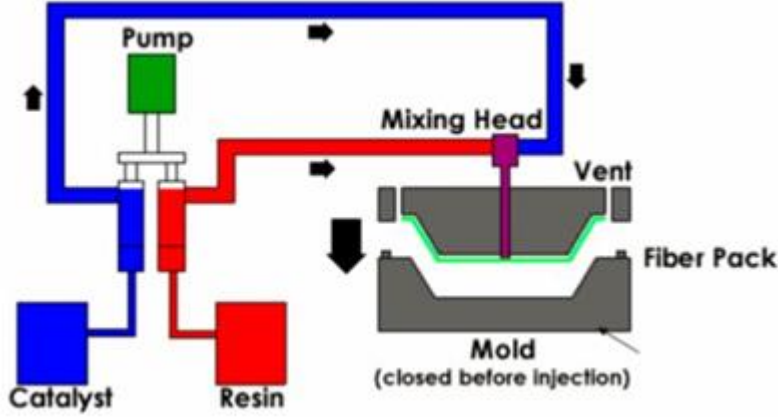
#### 3.3.2.4. Reçine transfer yöntemi

RTM (Reçine Transfer Kalıplama) yöntemi, pürüzsüz yüzeylere sahip parçaların üretiminde kullanılan bir kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntemde, takviye malzemesi olarak kuru keçe, kumaş veya bunların bir kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi, önceden kalıp boşluğuna yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Ardından, elyafın matris içinde çözünen reçinelerle kaplanması sağlanır ve bu sayede elyafın kalıp içinde hareket etmesi önlenir. Reçine, basınç altında kalıba pompalanarak dağılımı sağlanır.

RTM yöntemi, hızlı ve dayanıklı ürünler elde etmek için tercih edilirken aynı zamanda düzgün yüzeyli parçaların üretimi için de uygundur. Kalıp genellikle iki parçadan oluşur ve kompozit malzemeyle yapılan kalıplar, çelik kalıplara kıyasla daha düşük maliyetlidir. Matris enjeksiyonu, RTM yönteminde reçinenin basınç altında kalıba pompalanmasıyla gerçekleştirilir. Bu süreçte vakum kullanılarak içerideki hava dışarı çıkarılır ve reçine, elyaflar arasında homojen bir şekilde dağılır. Ayrıca, matris enjeksiyonu için kalıp ısıtılabilir ve belirli sıcaklıklara kadar (genellikle 80°C'ye kadar) ısıtma işlemi uygulanabilir.

RTM yöntemi, elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirdiği için işçilik gerektiren bir yöntemdir. Ancak kapalı kalıp kullanımı, zararlı gazların azalmasını sağlar ve gözeneksiz

bir ürün elde edilmesine yardımcı olur. Bu yöntem ayrıca karmaşık parçaların üretimine de olanak tanır. Örneğin, Concorde uçakları ve F1 arabalarının bazı parçaları, RTM yöntemi kullanılarak üretilmektedir.



Şekil 3.5. Reçine transfer yöntemi (URL-2)

### 3.3.2.5. Hazır kalıplama yöntemi

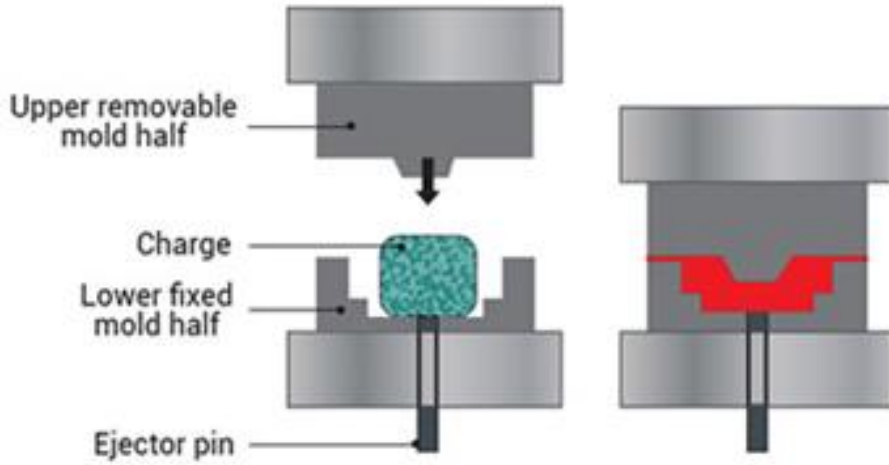
Hazır kalıplama yöntemi, SMC (Sheet Molding Compound) ve BMC (Bulk Molding Compound) adı verilen kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemeler kullanılır. Bu bileşimler cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemelerini içerir.

Hazır kalıplama yöntemi, çeşitli avantajlara sahiptir. Öncelikle, karmaşık şekillerin üretilmesine olanak tanır ve metal parçaların bileşenin içine gömülmesine imkan verir. Ayrıca, ürünün her iki yüzü de kalıp ile şekillendirildiği için simetrik ürünler elde edilebilir. Bu yöntem ayrıca diğer kompozit üretim tekniklerinde zorlu olan delik gibi komplike şekillerin elde edilmesine olanak sağlar. Iskarta oranı düşüktür, yani üretimden kaynaklanan hatalı ürün sayısı azdır.

Ancak, hazır kalıplama yönteminin bazı dezavantajları vardır. Öncelikle, hazır kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanması gereklidir, çünkü bileşimlerin bekletildiği süre boyunca reaksiyon başlamamalıdır. Ayrıca, kalıpların metal olmasından dolayı diğer

kalıplara göre daha maliyetlidir. Büyük parçaların üretimi için ise büyük ve pahalı preslere ihtiyaç duyulabilir.

Hazır kalıplama yönteminde kullanılan bileşimler çeşitlilik gösterebilir, ancak genellikle SMC ve BMC gibi iki tür hazır kalıplama bileşimi tercih edilir. Bu bileşimlerin içeriği, istenen özelliklere ve uygulamaya bağlı olarak farklılık gösterebilir.



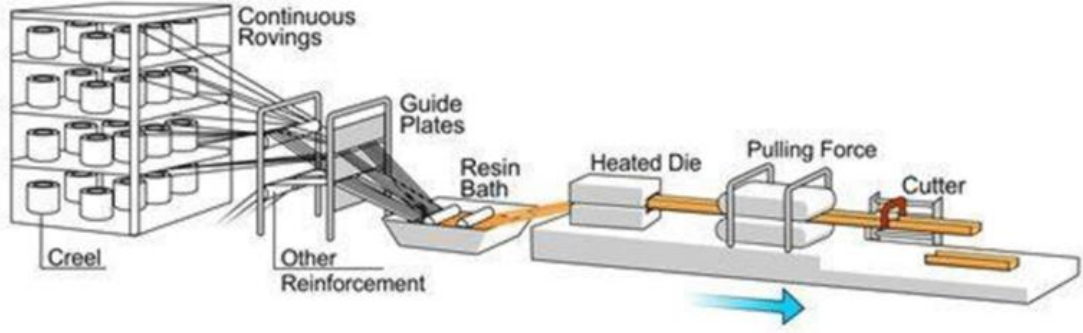
Şekil 3.6. Hazır kalıplama yöntemi (Han, 2012)

### 3.3.2.6. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon işlemi, düşük maliyetli seri üretim için kullanılan bir yöntemdir ve sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretimini sağlar. "Pull" ve "Extrusion" kelimelerinin birleşiminden oluşan bu terim, işlem adını tanımlar. Bu yöntemde, sürekli bir takviye malzemesi (genellikle elyaf) bir reçine banyosundan geçirilerek beslenir. Daha sonra bu malzeme ısıtılmış bir şekillendirme kalıbından geçirilir ve sertleşmesi sağlanır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmıştır.

Pultrüzyon işlemi, sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde yüksek mekanik mukavemet sağlar. Ancak, enine yükleri karşılamak için özel dokumalar kullanılması gerekebilir. Şekil 3.7'da bu işlemin adımları görsel olarak görülebilir.

Bu yöntem, seri üretim gerektiren durumlarda tercih edilen bir yöntemdir. Profil şeklindeki ürünlerin üretimi için idealdir ve maliyet açısından avantajlıdır. Pultrüzyon işlemi, çeşitli endüstrilerde, örneğin yapı malzemeleri, otomotiv parçaları, elektrik ve elektronik ekipmanlar gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.



**Şekil 3.7.** Pultrüzyon Yöntemi (URL-3)

### 3.3.2.7. Vakum yöntemi

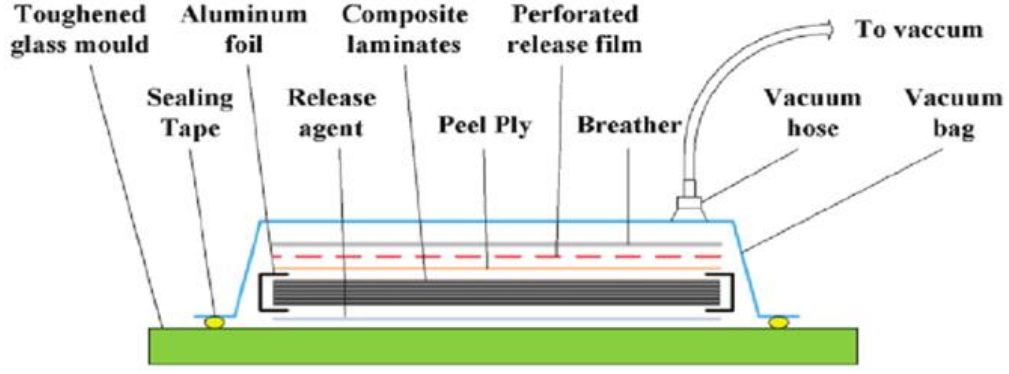
Vakum yöntemi, genellikle geniş sandviç yapılar gibi kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir. İlk adımda, kompozit malzeme bir kalıba yerleştirilir ve üzerine bir vakum torbası konulur. Vakum torbası, içerideki havanın emilmesiyle birlikte 1 atmosferlik bir basınç uygulayarak malzemenin üzerine bastırılır.

Sonraki aşamada, malzeme ve vakum torbası birlikte bir fırına yerleştirilir ve reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu ısıtma işlemi, malzemenin sertleşmesini ve istenen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar.

Vakum yöntemi, genellikle elyaf sarma veya yatırma teknikleriyle ilişkilendirilerek kullanılır. Bu yöntem, kompozit malzemelerin tamir işlemlerinde de sıkça kullanılır.

Şekil 3.8'de görseli bulunan vakum yöntemi, kompozit malzemelerin üretimi ve tamiri için etkili bir yöntem olarak kabul edilir. Vakum uygulaması, malzemenin homojen bir şekilde sıkışmasını ve reçinenin malzeme içine iyi bir şekilde nüfuz etmesini sağlar. Bu sayede daha güçlü ve dayanıklı kompozit yapılar elde edilebilir.





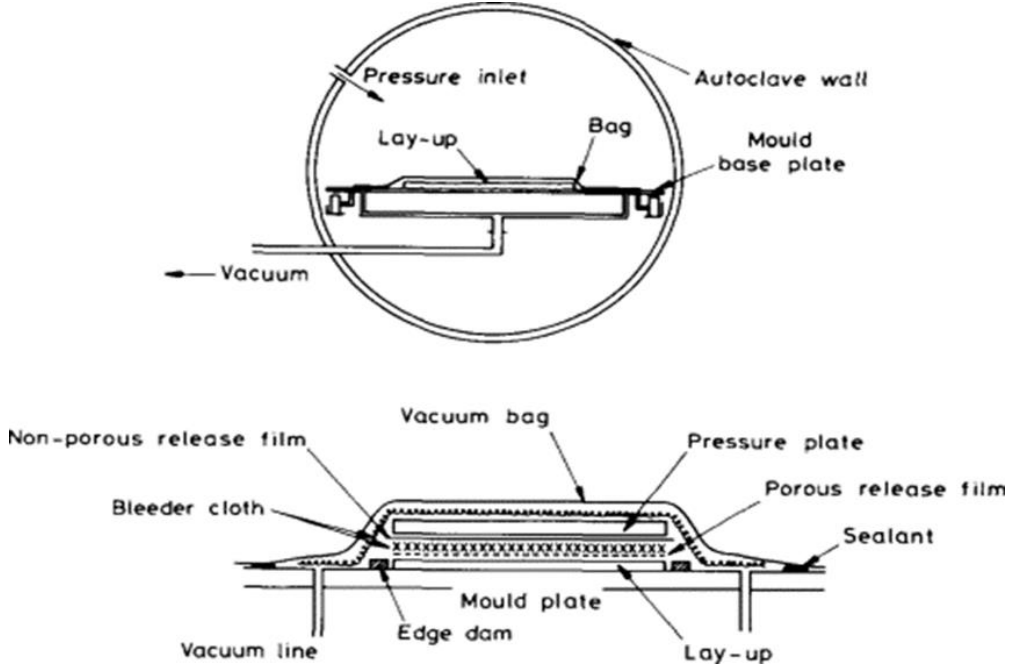
Şekil 3.8. Vakum Yöntemi (Hang, 2017)

### 3.3.2.8. Otoklav yöntemi

Termoset kompozit malzemelerin performansını artırmak için hava boşluklarını tamamen ortadan kaldırmak ve elyaf ve reçine oranını artırmak çok önemlidir. Bu amaçla malzemeye yüksek basınç ve ısı uygulanmalıdır. Vakum bagging yönteminde olduğu gibi, elyaf ve reçine karışımına sızdırmaz bir torba kullanılarak basınç uygulanabilir. Bununla birlikte, düzenli ve kontrol edilebilir bir basınç sağlamak için bir atmosferden daha yüksek bir basınç gereklidir. Bu durumda otoklav uygulanır.

Otoklav, kesin olarak basınç, sıcaklık ve vakumun kontrol edilebildiği bir basınçlı kap olarak kullanılır. Vacuum bagging yöntemiyle benzerdir, ancak fırın yerine otoklav kullanılır. Bu sayede özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit malzemeler üretebilme imkanı sağlanır ve kürlenme şartları tam olarak kontrol edilebilir.

Otoklav yöntemi diğer yöntemlere kıyasla daha uzun sürede uygulanır ve daha maliyetlidir. Ancak, kompleks şekillerde daha iyi kontrol edilebilirlik sağlar ve yüksek kalitede kompozit üretimi için tercih edilir. Şekil 3.9'da otoklav ve vakum yöntemlerinin karşılaştırmalı görseli bulunmaktadır, bu da yöntemler arasındaki farkları görsel olarak göstermektedir.



Şekil 3.9. Otoklav yöntemi (URL-4)

### 3.3.3. Plastikler

Plastikler, 19. yüzyılda endüstri alanında gelişmeye başlayan bir malzeme olup, ilk olarak selüloz-nitrat bazlı malzemelerin keşfiyle ortaya çıkmıştır. H.Bracconat, C.F. Schonbein ve A.Parker gibi araştırmacıların bağımsız çalışmaları sonucunda selüloz-nitrat plastik elde edilmiştir. Ayrıca, 1869 yılında J.W.Hyatt tarafından selüloz-nitrat kullanılarak üretilen selüloit bilardo topu, endüstriyel olarak üretilen ilk plastik ürün olmuştur.

Plastik kelimesi, Yunanca kökenli "plastikos" kelimesinden türetilmiştir ve "biçimlendirme, kalıp yapma" anlamına gelir. Plastik reçine ise, karbonun organik bileşiklerinden mineral, petrol, ahşap gibi doğal maddelerin ısı, basınç ve kimyasal etkilerle polimerizasyon ve kondenzasyon süreçleriyle oluşan makromoleküler organik maddelerdir.

Plastik yapı malzemeleri ise, istenilen şekli elde etmek için ısı altında yumuşak haldeyken basınç veya farklı bileşiklerin polimerizasyonu ile üretilen ve farklı özelliklere sahip olan çeşitli plastik reçinelerin kullanıldığı yapı malzemeleridir. Bu malzemeler, yapıların gereksinimlerine uygun olarak şekillendirilip üretilebilirler.

- **Plastik çeşitleri**

Plastiklerin iki grubu vardır: termoset veya ısıtıldığında erimeyen plastikler(termoplastik).

### **3.3.3.1. Termoset plastikler**

Termoset plastikler, bir kez şekillendirildikten ve kimyasal bir reaksiyonla sertleştikten sonra, yeniden ısıtılarak şekil değiştiremez veya yumuşatılamazlar. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda bozunma eğilimi gösterirler. Bu nedenle, kısmen polimerleşmiş bir durumda ısıtılarak kalıplanırlar.

Kalıplama süreci sırasında, polimerizasyon ilerleyerek termoset plastiklerin çapraz bağlanmasını sağlar ve akıcılık özelliklerini kaybettirir. Bu nedenle, termoset plastikler geri dönüşüm sürecine giremezler ve bir kez sertleştikten sonra tekrar şekillendirilemezler. Bu özellikleri nedeniyle termoset malzemeler "ısıl sert" plastikler olarak da adlandırılır.

Termoset plastikler, moleküler yapılarında çapraz bağlar oluşturarak şekillendirilirler. Bazı termosetler, ısı veya ısı ile basınç kombinasyonunun etkisiyle çapraz bağlanırken, diğerleri oda sıcaklığında kimyasal tepkimelerle çapraz bağlanabilir. Sertleştikten sonra termoset parçaları ısıtıldığında yumuşarlar, ancak çapraz bağlar nedeniyle sertleşme öncesindeki akıcılıklarına geri dönemezler. Bu nedenle, termosetler termoplastikler gibi tekrar ısıtılarak eritilemezler. Ayrıca, termoset plastikler çözücülerde çözünmezler.

Mühendislik tasarım uygulamalarında termoset plastiklerin tercih edilme nedenleri arasında yüksek ısıl kararlılık, sertlik, boyutsal kararlılık, yük altında deformasyona direnç, hafiflik ve yüksek elektriksel ve ısıl yalıtım özellikleri yer almaktadır.

Genellikle termoset plastikler basınçlı kalıplama veya transfer kalıplama kullanılarak yapılır. Bununla birlikte, bazı durumlarda termosetler için enjeksiyon kalıplama yöntemi de kullanılabilir. Örnek olarak fenolikler, epoksi reçineleri, doymamış polyesterler ve amino reçineleri termoset plastiklere örnek olarak verebiliriz.

### 3.3.3.2. Termoplastik plastikler

Bir plastik alt grubu olan termoplastikler olarak bilinen düz veya dallı polimerler yüksek sıcaklıklarda erir. Polimer zincirleri çapraz bağ içermediğinden ısıtıldıklarında aralarındaki zayıf kuvvetler ortadan kalkar ve zincirlerin birbiri üzerinde kolayca yüzerek maddeyi sıvıya dönüştürmesini sağlar. Isı ve basınç, kullanılmış termoplastikleri geri dönüştürmek ve yeniden kullanmak için de kullanılabilir.

Her tür, kendine özgü cam geçiş sıcaklığı ile erime sıcaklığı arasında termoplastiklere ihtiyaç duyar. Kırılgan değildir ve bu sıcaklık aralığında tam sıvı özelliklerini göstermezler.

Plastik malzemelerin görece düşük yoğunluğu, mühendislik uygulamaları için temel özelliklerinden biridir. Örneğin, demirin yoğunluğu 7,8 gr/cm<sup>3</sup> iken, genel amaçlı plastiklerin yoğunluğu yaklaşık 1 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Birçok mühendislik uygulamasında, termoplastik malzemelerin düşük yoğunlukları çok önemli bir bileşendir. Tipik gerilme mukavemeti aralığı 55 ila 83 MPa'dır. Mühendislik açısından bakıldığında, bu düşük çekme mukavemeti genellikle kötü bir kalitedir. Polikarbonatların darbe dayanımı yüksek olduğundan, mühendislik termoplastiklerinin darbe dayanımı genellikle 640 ile 854 J/m arasında değişir. Mühendislik termoplastikleri, diğer plastiklere kıyasla üstün elektrik yalıtım özelliklerine sahiptir. Mühendislik termoplastikleri, düzgün çalışmaya devam ederken 260°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Kullanım sıcaklığı en yüksek olan termoplastik malzeme 260°C ile polifenilen sülfittir. Mühendislik termoplastikleri yapmak, polimerizasyon reaksiyonu tamamlandığında veya bittiğinde oldukça kolaydır. Mühendislik termoplastikleri, çeşitli ortamlarda aşınmaya karşı güçlü bir direnç sergiler. Mühendislik termoplastikleri, diğer polimerlere göre kimyasal etkilere karşı daha dayanıklıdır. Mühendislikte, naylon veya poliamidler (PPA), polikarbonat, fenilen oksit esaslı reçineler, asetaller, termoplastik poliesterler, polisülfonlar, polifenilen sülfür, polieterimid ve polimer alaşımları en yaygın termoplastik malzemeleridir. Bu malzemeler genel olarak tok, iyi elektriksel ve kimyasal özelliklere sahip, düşük sürtünme katsayılı, çok düşük su emme özelliğine sahip ve kolay işlenebilen malzemelerdir.

### 3.3.3.3. Malzeme seçimi

#### 3.3.3.3.1. Termoplastik kısım için malzeme seçimi

Kompozit direk çalışmasında modüler direk iç astar kısımda çalışmalar esnasında kullanılan malzemeler aşağıda sıralanmıştır, bunlar;

- HDPE
- PA
- PP
- PA GF30
- **HDPE (Yüksek yoğunluklu polietilen)**

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), petrolden elde edilen bir malzemedir. Diğer türlerin aksine, bu termoplastik darbelere dayanıklı ve kimyasal maddelere karşı daha dayanıklıdır. HDPE üretimi kolaydır.

HDPE'nin yoğunluğu 0,9040–0.970 g/cm<sup>3</sup>'tür. Düşük yoğunluklu polietilenin molekül yapısı benzer değildir. Suya ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır, ancak açık havada ve ışıktta LDPE'den daha az dayanıklıdır. HDPE, sudan daha ağırdır. 100 dereceye kadar sıcaklığa dayanabilir ve yüksek çekme ve darbeye dayanabilir.

HDPE korozyona ve yaşlanmaya karşı dayanıklıdır. Darbeli kazalarda minimum zarara neden olur çünkü yüksek gerilim çatlağı ve çatlak ilerleme dayanımı vardır. Malzemenin esnekliği nedeniyle zorlu çalışma koşullarında bile kolaylıkla kullanılabilir. HDPE ayrıca kendini yağlama özelliğine sahiptir.

HDPE, ekstrüzyon, enjeksiyon, toz kaplama, film çekme ve döner kalıplama dahil olmak üzere çok sayıda biçimlendirme yönteminde kullanılabilir. Ayrıca elektriksel uygulamalar için uygun bir yapıya sahiptir.

- **PA (Poliamid)**

Polyamid, yarı kristal bir polimer çeşididir ve İngilizce adıyla "polyamide" olarak bilinir. Halk arasında ise genellikle "naylon" olarak adlandırılır. Bu mühendislik plastikleri

arasında yer alan sert bir plastik türüdür ve aşınmaya ve bükülmeye karşı dirençlidir. Yük altında dayanıklılığı yüksektir.

Polyamid, su emme özelliğine sahiptir. Bu sebeple, suyla temas gerektiren uygulamalarda tercih edilmeyen bir mühendislik plastik çeşididir. Karbon lifi gibi eklemeler, poliamidin dayanımını artırırken aynı zamanda işlenmesini de kolaylaştırır.

- **PP (Polipropilen)**

Polipropilen (PP), opak, sert ve dayanıklıdır. Su üzerinde yüzebilir çünkü ağırlığı düşüktür. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), ticari olarak yaygın olarak kullanılan polipropilenin kristal yapısı açısından karşılaştırılabilir. Diğer plastiklerden daha az serttir ve kırılabilir. Elektriksel olarak yalıtkandır. Pürüzsüz yüzeyi nedeniyle düşük sürtünme direnci gösterir. Bu özellik sayesinde polipropilen gıda saklama kaplarında kullanılabilir. Polipropilen, sürekli dinamik yüklere dayanıklı hale geldi. Malzemenin yüzeyi çatlaklara maruz kalmaz. Ancak UV ışınlarına dayanmıyor. Isına maruz kaldığında polipropilenin genleşme katsayısı polietilen kadar yüksek değildir.

- **PA GF30 (%30 Fiber katkılı poliamid)**

PA6-GF30, %30 cam elyafı içeren bir kompozit malzemedir. Cam elyafı, PA6'nın performansını iyileştirmek için eklenmiştir ve malzemeye bir dizi avantaj sağlar. PA6-GF30, PA6'ya göre daha yüksek sertlik, ısı direnci, yorulma direnci ve mekanik dayanım gibi özelliklere sahiptir. Cam elyafının eklenmesiyle malzeme, daha yüksek sıcaklık dayanımı, alev geciktirici özelliği, korozyon direnci, ısı yalıtımı, yüksek çekme dayanımı ve iyi elektrik yalıtımı gibi özelliklere sahip olur. Bu nedenle, PA6-GF30, endüstriyel ve günlük kullanım gereksinimlerini karşılayan dayanıklı ve güçlü bir malzemedir. Ayrıca, mükemmel darbe dayanımı ve iyi boyutsal stabilite özelliklerine sahiptir, bu da çeşitli uygulamalarda kullanımını destekler.

### 3.3.3.3.2. Kompozit kısım malzeme seçimi

Kompozit kısımda yapılan literatür çalışması sonucunda analizlerde Epoxy GF50 ve PP-UD kullanılmıştır. Burada GF cam fiber katkısını ifade etmektedir, UD ise sürekli elyafın kullanıldığını açıklamaktadır. Dış kompozit kısımda kullanılan bu iki malzemeye göre değerlendirme yapılmıştır. Sehim ve gerilme değerleri karşılaştırılarak hem mekanik yönden kuvvetli alanda kalınmaya çalışılmıştır hem de malzemelerin kolay temin edilebilirliği ve bunun uzun vadede sorun olmaması yani sürekliliği göz önünde bulundurulmuştur.

### 3.3.3.3.3. Birleşim bölgesi malzeme seçimi

- **Fens teli kullanımı**

Çalışmada modüler kompozit direğin iç termoplastik kısım ve dış kompozit kısmında belirtilen malzemelerle birçok analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışması sonuçları karşılaştırıldığında sehim ve gerilme değerlerinin limit değerlerinin üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Dayanımı artırmak ve deplasmanı azaltmak amacıyla fens teli yerleştirilmesi düşünülmüştür ve analizler bu şekilde yenilenmiştir. Sehim ve gerilme değerlerinde azalma görülmüştür. Kullanılması planlanan fens telinin malzemesi DC04 çeliği olarak belirlenmiş ve DC04 çeliğine göre tasarım yapılmıştır.

- **DC04 çeliği**

7114 (DC04) çeliği, soğuk çekme işlemiyle hazırlanan bir yassı çelik malzemesidir ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Darbelere karşı yüksek dayanıklılık ve mukavemet gücüne sahip olmasıyla bilinir. Bu çelik türü, şekillendirme işlemlerinde avantaj sağlayarak iyi şekillendirme özelliklerine sahiptir. DC01'den daha sonraki çelik türleri, preste şekillendirme gibi soğuk şekillendirme işlemlerine uygunluk kabiliyeti artmaktadır. Ayrıca, kaynaklanabilirlikleri, boyama ve kaplama gibi işlemlere uygun olmaları gibi avantajları vardır. Bu özellikler, 7114 (DC04) çeliğini çok yönlü bir malzeme haline getirir ve birçok farklı endüstriyel alanda kullanım için tercih edilen bir seçenek haline getirir.



**Şekil 3.10.** DC04 fens teli (URL-5)

- **Manşon kullanımı**

Fens teli kullanılarak yapılan analizlerde dayanım ve deplasman değerlerinde iyileştirilmeye ulaşılmıştır ancak telfens kullanımı direk mevcut ağırlığını büyük oranda arttırmıştır. Ağırlık artışının modüler kompozit direk tasarımının amaçlarından biri ve en önemli maddesi olan ağırlık azaltılması hususunda proje gerekliliklerinin yerine getirilememesi durumuna sebep olacaktır. Bu sebeple iyileştirme ve aslında birleşim bölgelerinin güçlendirilmesi amacıyla farklı bir çözüm yoluna gidilmiştir. Bağlantı bölgelerinde alüminyum manşon kullanılmasına karar verilmiştir. Manşonda kullanılacak malzeme olarak alüminyum belirlenmiş ve 6061 alüminyuma göre analizler gerçekleştirilmiştir.

- **Alüminyum 6061 T6**

6061 serisi alaşımlı alüminyum, düzgün bir şekilde ısı ile şekillendirilebilen ve aradığımız birçok özelliği kaybetmeden şekil değiştirebilen bir alaşım türüdür. Türkiye'de yaygın olarak kullanılan bir alüminyum çeşididir. Bu alaşım, korozyon dayanıklılığına sahip olması ve geniş bir mekanik özellik aralığı sunmasıyla dikkat çeker. Ayrıca, 6061 alaşımlı alüminyum, her türlü kaynak metoduyla birleştirilebilir ve sert lehimlemeye sahip ocaklarda ve fırınlarda kullanılabilir. Sonuç olarak, 6061 serisi alaşımlı alüminyum, geniş bir ürün ve uygulama yelpazesinde kullanılan bir malzemedir. Özellikle iyi korozyon dayanımı ve yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda tercih edilir.





**Şekil 3.11.** Alüminyum manşon (URL-6)

### **3.4. Yöntem**

#### **3.4.1. Sonlu elemanlar yöntemi**

Karmaşık yapıların analizinde ve tasarımında kullanılan bir mühendislik tekniğine Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) denir. Yapıların davranışını matematiksel olarak modellemek ve analiz etmek, özellikle mühendislik, fizik ve bilgisayar bilimlerinde popüler olan bu teknik kullanılarak yapılır.

Bir yapı, FEM kullanılarak daha küçük, daha kolay parçalara bölünür. Bu bileşenleri element adı verilen ayrık birimlere ayırır ve bu elementlerin her birinin nasıl davrandığını matematiksel olarak ifade eder. Bu bileşenlerin davranışına dayanarak, tüm yapının davranışını tahmin etmek mümkündür.

Öğeleri tanımlamak için basit geometriler ve davranışlar kullanılır. Bu elemanlar, yapının malzeme özellikleri, yükler, sınırlayıcı koşullar ve diğerleri gibi etkileşimlerden etkilenir. Denklemler daha sonra bu bileşenler arasındaki bağlantıları ve etkileşimleri ifade etmek için kullanılır. Tipik olarak, bu denklemler diferansiyel denklemlerdir.

Bu denklemler, Sonlu Elemanlar Yöntemi sayesinde sayısal analiz teknikleri kullanılarak çözülebilir. Yapıyı oluşturan her bileşenin davranışı tahmin edilir ve sonuçlar bir araya

getirilerek yapının bir bütün olarak davranışı belirlenir. Bu teknik, sıvı akışı, ısı transferi, stres ve gerinme gibi çeşitli fiziksel etkileri analiz etmek için kullanılabilir.

Karmaşık yapılara analitik çözüm bulmanın zor olduğu durumlarda, sonlu elemanlar yöntemi önemli bir avantaj sunar. Özellikle mühendislik tasarım süreçlerinde, yapıların dayanıklılık, rijitlik ve titreşim özellikleri gibi unsurların analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım aynı zamanda çeşitli yapısal tasarım seçeneklerinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesini ve optimizasyonunu sağlar. Bu çalışmada Abaqus 6.17 kullanılmıştır.

Abaqus yazılımında analiz adımları:

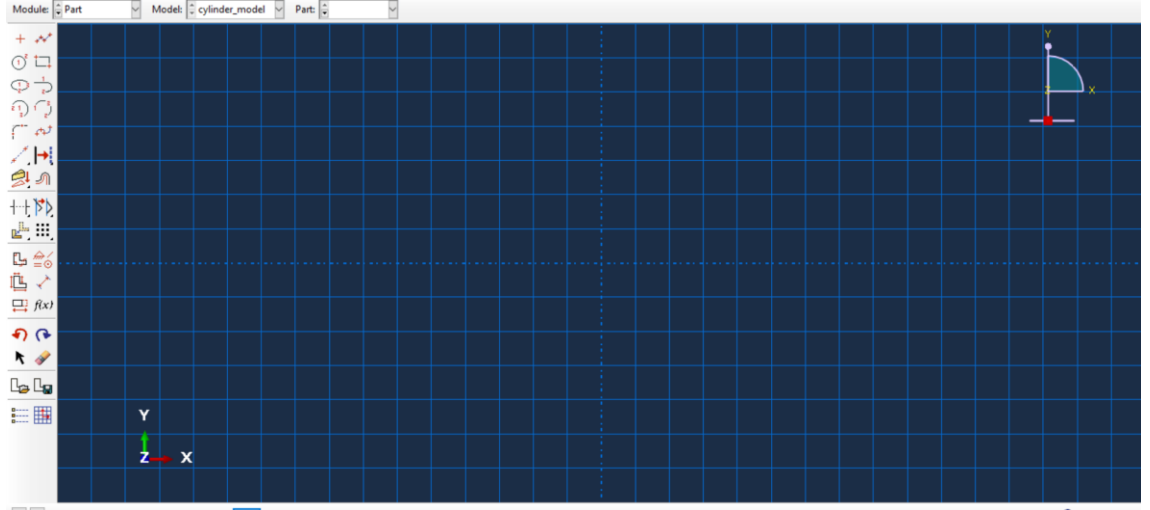
1. Modelin oluşturulması
2. Malzeme tanımlama
3. Montaj yapılması
4. Analiz adımlarının oluşturulması
5. Bağlantıların tanımlanması
6. Yüklerin ve sınır koşullarının tanımlanması
7. Mesh oluşturma

#### **3.4.1.1. Modelin oluşturulması**

Abaqus de geometri oluşturulması iki yöntemle yapılır. Birinci yöntem Abaqus üzerinde geometri oluşturulması, diğer yöntem ise içeri aktarma yöntemi ile yapılmasıdır.

Geometri oluşturma:

Yeni bir "Part" belgesi oluşturulur. Oluşturulan "Part" belgesinde geometri tanımlamak için çeşitli araçlar kullanılır, çizgi araçları çeşitli çizgi şekillerini oluşturmak için kullanılırken, yüzey araçları çizgileri birleştirerek yüzeyler oluşturmak veya kapalı yüzeyler tanımlamak için tercih edilir. Hacim araçları ise yüzeyleri birleştirerek hacimler oluşturmak için kullanılır. Editör araçları ise düğümleri yerleştirmek veya düzenlemek amacıyla kullanıcıya yardımcı olur. Geometriyi düzenlemek ve ayarlamak için ise ölçekleme, döndürme, taşıma gibi transformasyon araçları kullanılabilir.



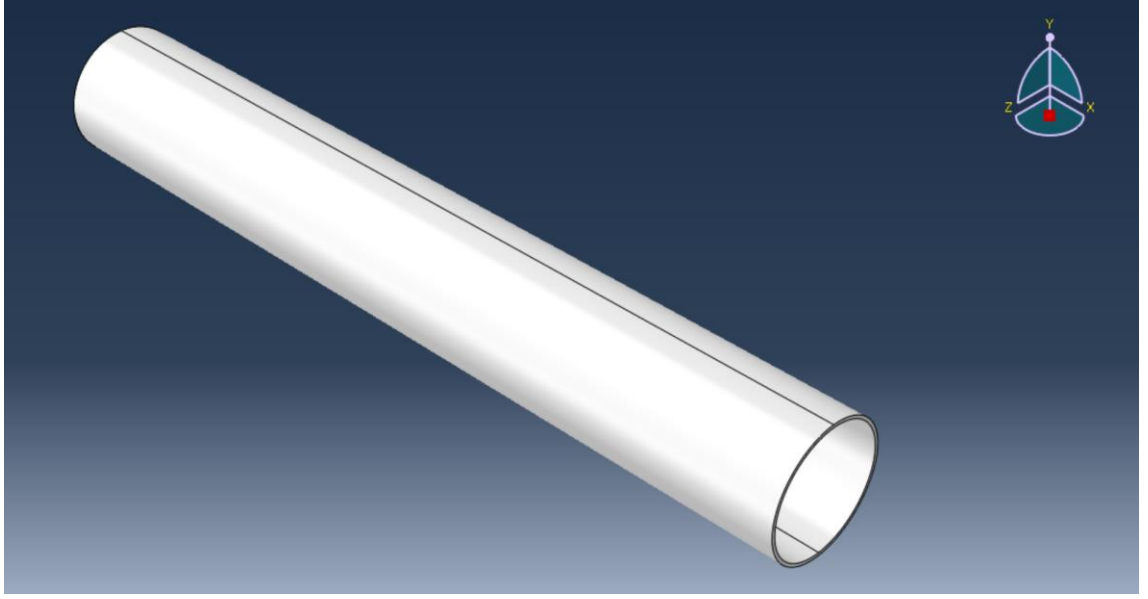
**Şekil 3.12.** Abaqus'de part oluşturma

Geometri içe aktarma:

Dışarıdan bir CAD programında oluşturulan geometri dosyası uygun bir dosya formatıyla (STEP, IGES, SAT, vb.) kaydedilir. Bu formatlar, geometri verilerinin farklı CAD programları arasında aktarımını sağlayan yaygın kullanılan standart formatlardır.

Abaqus'deki "Part" belgesinde, "File" menüsünden "Import" seçeneği seçilir ve açılan iletişim kutusunda geometri dosyasının konumu belirtilir ve dosya seçilir. İçe aktarma işlemi sırasında, dosyanın doğru bir şekilde aktarıldığından emin olmak için gerekli ayarlamalar yapılır, örneğin ölçek, birimler, koordinat sistemleri ve diğer geometri özellikleri kontrol edilebilir.

Bu çalışmada tasarımlar CAD programında yapılmıştır ve sonrasında geometri .step formatıyla Abaqus'e eklenmiştir.



**Şekil 3.13.** Abaqus'te dıştan aktarılan part

#### **3.4.1.2. Malzeme tanımlama**

Abaqus yazılımı, mühendislik analizlerinde kullanılan bir simülasyon aracı olarak bilinir ve farklı malzeme türlerinin davranışını modellemek için geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu çalışmada farklı malzeme türleri kullanılmıştır ve bu malzeme türleri elastik olarak tanımlanmıştır.

Elastik malzeme özelliklerinin tanımlanması, Abaqus yazılımında yapısal analizlerde kullanılan malzemenin mekanik davranışını belirlemek için yapılan bir adımdır. Bu tanımlama, analiz sürecinde doğru sonuçlar elde etmek için önemlidir.

Elastik malzeme özellikleri tanımlanırken, malzemenin elastik modülü (Young Modülü veya elastisite modülü olarak da bilinir), Poisson oranı ve yoğunluk parametreleri belirlenir. Bu parametreler, malzemenin elastik davranışını tanımlamak için kullanılır. Elastik modül, malzemenin sertliğini ve şekil değiştirme kapasitesini belirler. Poisson oranı ise, malzemenin yanal genişleme davranışını tanımlar. Poisson oranı 0 ile 0.5 arasında bir değer alır.

Elastik malzeme özellikleri tanımlanırken, malzeme için uygun bir malzeme modeli seçilir. Abaqus, farklı elastik malzeme modellerini destekler, örneğin Lineer Elastik,

İzotropik Elastik, Anizotropik Elastik gibi. Seçilen malzeme modeli, malzemenin davranışını daha gerçekçi bir şekilde temsil etmek için önemlidir.

Kompozit malzemelerin tanımlanması için ortotropik malzeme modeli kullanılmıştır. Ortotropik malzeme modeli, kompozit malzemelerin farklı yönlere göre farklı elastik özelliklere sahip olduğunu temsil eder. Bu modeller, takviye malzemesi ve matris malzemesi arasındaki etkileşimleri ve bileşenlerin davranışını doğru bir şekilde modellemek için kullanılır.

### **3.4.1.3. Montaj yapılması**

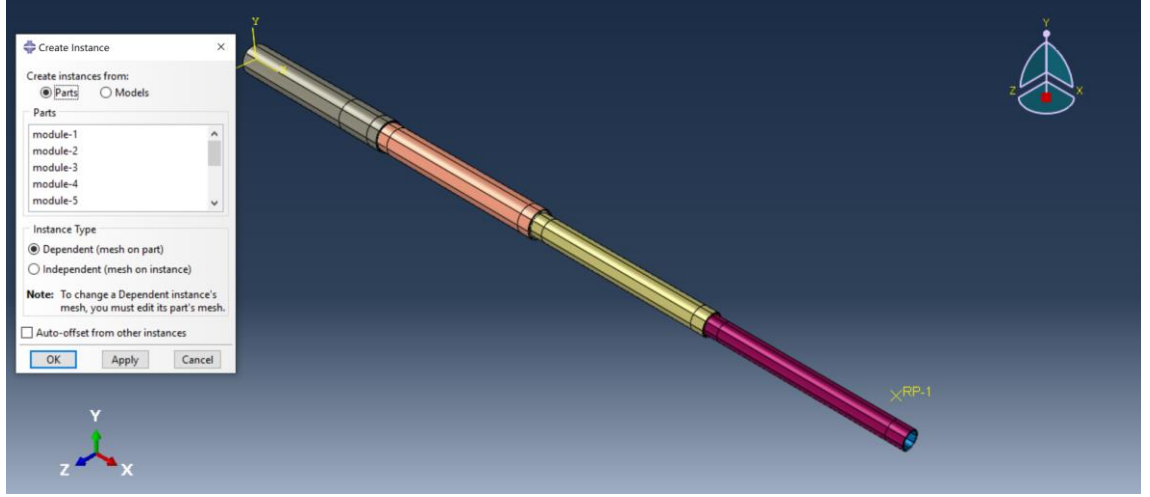
Abaqus'ta montaj yapmak için, öncelikle analiz edilecek bileşenlerin geometrik ve malzeme özelliklerini tanımlamak gerekir. Her bir bileşenin boyutları, şekli ve malzeme özellikleri, analizin doğruluğunu etkileyen önemli faktörlerdir.

Montaj işlemi sırasında, bileşenlerin birbirlerine nasıl bağlanacağı ve sınırlama koşullarının nasıl ayarlanacağı belirlenmelidir. Bu, bileşenler arasında bağlantılar, sürtünme, kısıtlamalar gibi etkileşimlerin doğru bir şekilde tanımlanmasını gerektirir. Bu adım, bileşenlerin gerçek dünyadaki davranışını daha iyi modellemek için önemlidir.

Abaqus'ta montaj işlemi genellikle Assembly Modülü kullanılarak gerçekleştirilir. Bu modül, farklı bileşenlerin bir araya getirilmesini ve bağlantılarının tanımlanmasını kolaylaştırır. Her bir bileşenin yerleştirilmesi, uygun bağlantıları sağlamak ve sınırlamaları uygulamak için dikkatlice yapılmalıdır.

Sonuç olarak, Abaqus'ta montaj süreci, farklı bileşenlerin bir araya getirilmesi ve uygun bağlantıların tanımlanmasıyla gerçekleştirilir. Bu süreç, analiz edilecek sistemlerin doğru ve gerçekçi bir şekilde modellenmesi için kritik öneme sahiptir.

CAD datasında modeller üst üste gelecek şekilde tasarlandığı için bu adımda montaj için parçaları döndürülmesine veya taşınmasına gerek kalmamıştır.



**Şekil 3.14.** Abaqus'de montajlama

#### **3.4.1.4. Analiz adımlarının oluşturulması**

Abaqus, çeşitli analiz tiplerini destekler, bunlar arasında statik analiz, dinamik analiz, ısı analiz, parametrik analiz vb. yer alır. Bu çalışmada direğe gelen yükleri uyguladığımız için statik analiz yapılmıştır.

Statik analiz için, analiz adımı "Static" olarak belirlenir. Bu, sistemin dengede duran durumunu modellemek için kullanılır. Statik analizde, sistemdeki denge durumunda kuvvetler, deformasyonlar ve gerilimler hesaplanır.

"Step" adımı, analiz parametreleri de belirlenir. Bunlar, analizin zaman adımlarını, iterasyon sayılarını, yakınsama kriterlerini ve diğer ilgili parametreleri içerir. Bu parametreler, analizin doğruluğunu, hassasiyetini ve hesaplama süresini etkileyen önemli faktörlerdir.

Name: Step-1  
Type: Static, General

Basic Incrementation Other

Type:  Automatic  Fixed

Maximum number of increments: 10000

Increment size:	Initial	Minimum	Maximum
	0.1	1E-09	1

OK Cancel

**Şekil 3.15.** Analiz adımı oluşturulması

Step adımında analiz başlatılır ve sonuçlar elde edilir. Abaqus analizini başlatmak için uygun komutlar kullanılır ve sistemdeki kuvvetler, deformasyonlar, gerilimler ve diğer ilgili çıktılar hesaplanır. Elde edilen sonuçlar, analiz hedeflerine ve gereksinimlerine uygun olarak yorumlanır ve raporlanır.

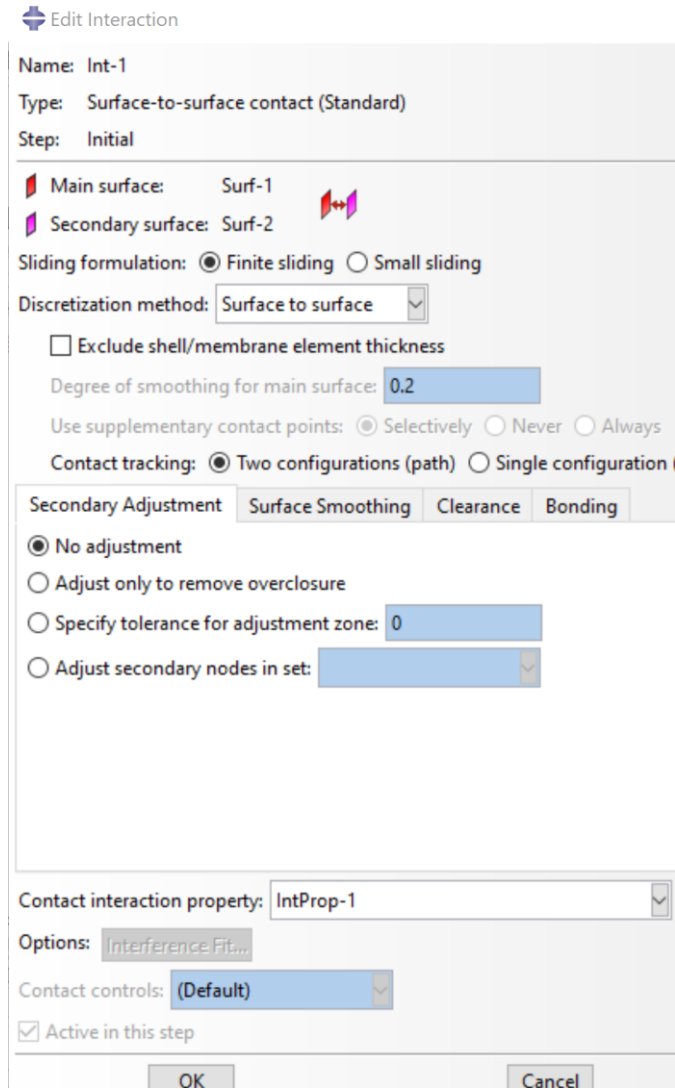
Statik analiz, sistem veya bileşenin dengede duran durumunu incelemek için kullanılan önemli bir adımdır ve doğru sonuçlar üretmek için dikkatlice planlanmalı ve uygulanmalıdır.

#### **3.4.1.5. Bağlantıların tanımlanması**

Abaqus'de bağlantı ve etkileşimin belirlenmesi 'Interaction' modülü altında gerçekleştirilir. Bu modül, bileşenler veya parçalar arasındaki etkileşimleri modellemek için kullanılır ve analiz sürecinde doğru bir şekilde tanımlanması önemlidir.

Bu modül, farklı parçalar veya bileşenler arasındaki temas, bağlantı veya sürtünme etkilerini tanımlamak için kullanılır. Modül, bu etkileşimleri matematiksel olarak ifade eder ve analiz sürecinde uygun kuvvetler, sınırlamalar ve davranış kuralları uygulanmasını sağlar.

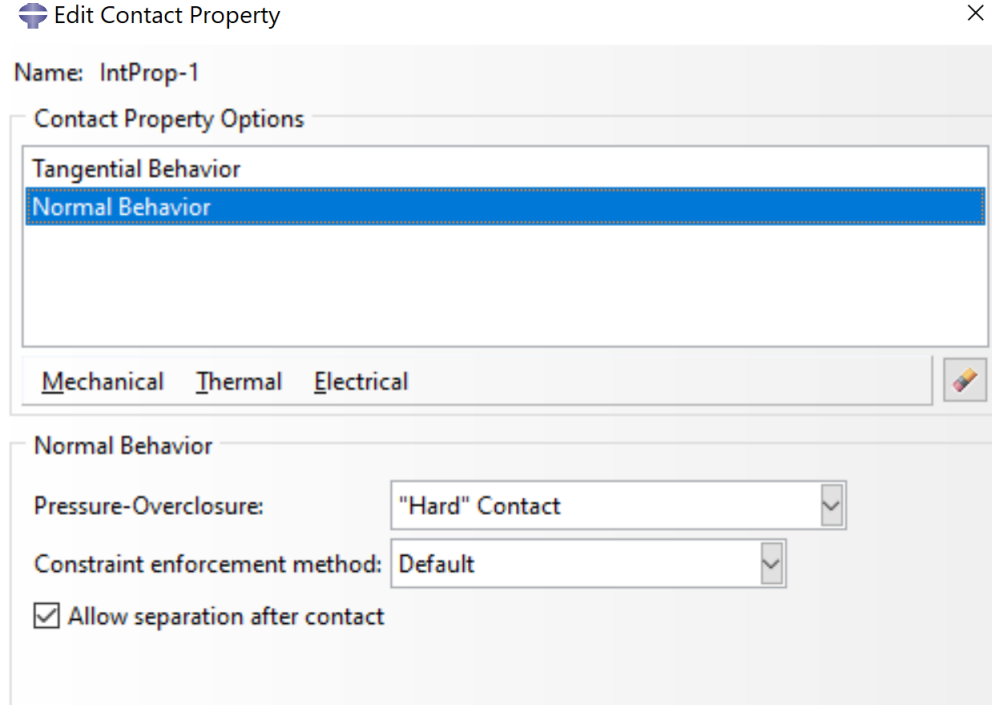
Bu çalışmada yüzeyler arasında etkileşim (Surface-to-Surface Contact) ve tie ile bağlantı yapılmıştır. Surface-to-Surface Contact modülü, Abaqus yazılımında kullanılan bir bağlantı yöntemidir. Bu modül, bir sistemdeki iki yüzeyin etkileşimini modellemek ve bu yüzeyler arasındaki teması tanımlamak için kullanılır.



Şekil 3.16. Abaqus'de 'Surface to surface contact'



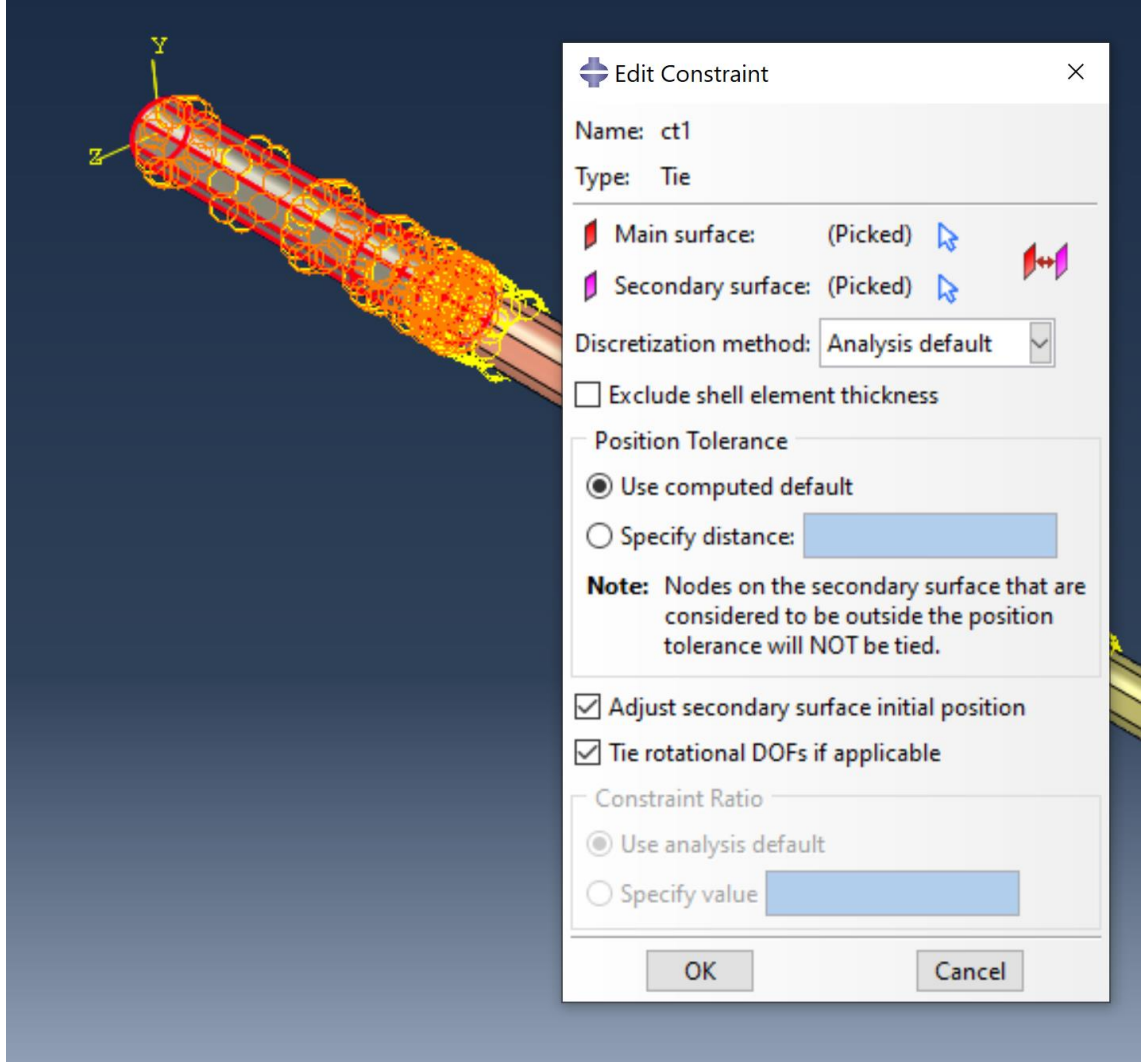
Bu modül, birbirine temas eden iki yüzey arasında sürtünme, yapışma veya kayma gibi çeşitli etkileşimlerin modellenmesine olanak sağlar. İki yüzey arasındaki temas noktaları otomatik olarak tanımlanır ve analiz sürecinde bu temas noktalarında uygun kuvvetler ve sınırlamalar uygulanır. Bu özellikler de bu modülde sürtünme özelliklerinin belirlenmesi kısmında belli olur.



**Şekil 3.17.** Abaqus'de kontak özellikleri

"Tie" modülü ise iki yüzey arasındaki bağlantıyı tanımlamak için kullanılır. Bu modül, birbirine bağlanması gereken iki yüzey arasındaki ilişkiyi belirler.

"Tie" modülü, iki yüzeyin birbirine sabitlenmesini sağlar, böylece bir yüzeydeki deformasyonlar diğer yüzeyi etkiler. Bu modül, yüzeyler arasında enerji veya kuvvet iletimini modellemek için kullanılır. Yüzeyler arasındaki bağlantı noktaları otomatik olarak tanımlanır ve analiz sürecinde uygun bağlantı sınırlamaları uygulanır.



**Şekil 3.18.** Abaqus'de 'tie' bağlantısı

#### **3.4.1.6. Yüklerin ve sınır koşullarının tanımlanması**

Abaqus, çeşitli yükleme durumlarını analiz etmek için kullanılan farklı yöntemleri sunmaktadır. Bu yükleme durumları, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılan ve farklı analiz ihtiyaçlarına yönelik olanaklar sağlayan yöntemlerdir.

Statik yüklemeler, bir yapıya sabit yükler uygulanarak yapı üzerindeki gerilim ve deformasyon dağılımını analiz etmek için kullanılır. Bu yükleme durumu, sabit yüklerin yapıya uygulandığı bir durumu temsil eder ve genellikle yapısal analizlerde tercih edilen bir yöntemdir.

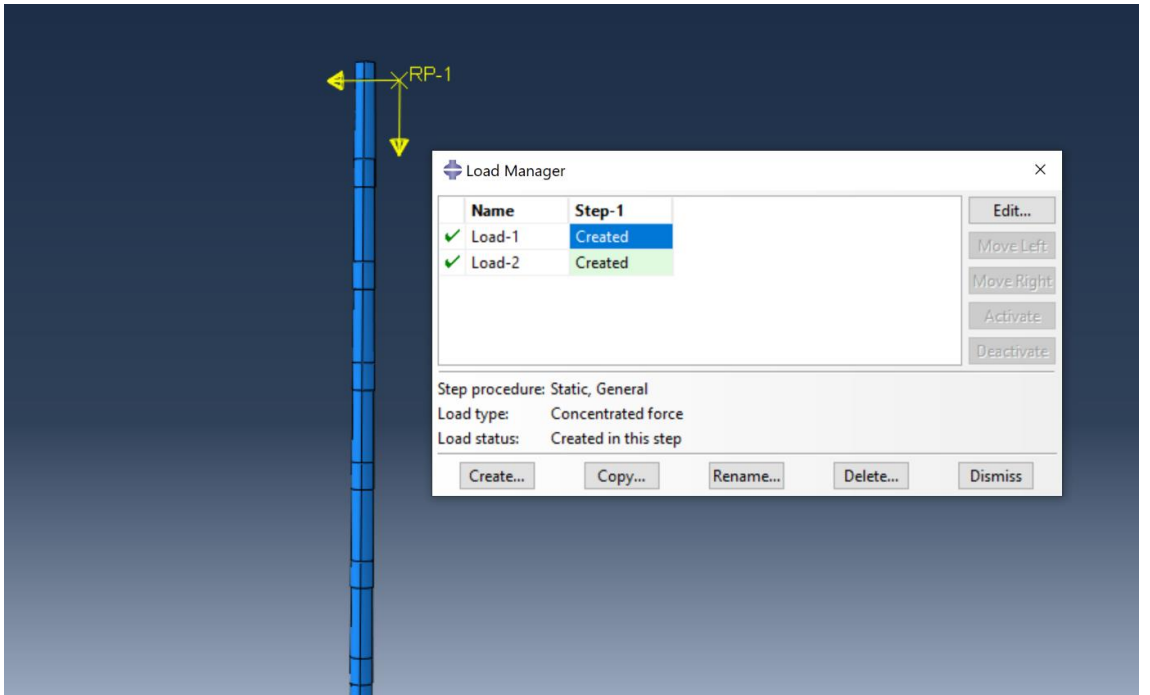
Dinamik yüklemeler, bir yapıya zamanla değişen yüklerin uygulandığı durumları modellemek için kullanılır. Bu yükleme durumu, titreşim analizi, darbe analizi veya dinamik yükleme altında yapı davranışının incelenmesi gibi uygulamalarda kullanılır.

Termal yüklemeler, yapıya ısı transferi nedeniyle oluşan sıcaklık değişikliklerini modellemek için kullanılır. Bu yükleme durumu, ısı iletimi veya termal genişleme gibi termal etkilerin analizi için kullanılır.

Kinetik yüklemeler, hareketli yüklerin yapı üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılır. Örneğin, hareketli bir yükün bir kiriş üzerindeki etkisini modellemek için kinetik yüklemeler kullanılabilir.

Yüzey yüklemeleri, bir yüzey üzerine uygulanan basınç, kuvvet veya moment gibi yükleme tiplerini temsil eder. Bu yükleme durumu, yüzey gerilimi analizi veya temas problemlerinin çözümü gibi uygulamalarda kullanılır.

Her yükleme durumu, farklı analiz gereksinimlerine yönelik çözüm sağlar. Bu çalışmada statik yükleme durumu kullanılmıştır. Biraz daha detaylı incelendiğinde;



Şekil 3.19. Abaqus'de yükleme durumu

Statik yüklemeler, yapının durağan bir durumda olduğu ve yüklerin zamanla değişmediği durumları temsil eder. Bu durumda, yükler ve reaksiyon kuvvetleri denge halindedir. Yapı üzerine uygulanan yükler, yer çekimi, dış kuvvetler, sabit kuvvetler veya sabit momentler olabilir.

Statik yüklemeler, yapıyı tasarlamak, gerilim dağılımını analiz etmek, deformasyonları belirlemek ve yapısal güvenlik faktörlerini değerlendirmek için kullanılır. Bu yüklemeler altında yapısal analizler yapılırken, yapı elemanlarındaki gerilimler, deformasyonlar, yer değiştirmeler ve reaksiyon kuvvetleri hesaplanır, karmaşık yapıları basitleştirmek ve gerçek dünya koşullarını modellemek için kullanılır. Bu durumda, yapıya etki eden yükler ve sınırlayıcı koşullar belirlenir ve bu bilgiler Abaqus yazılımında tanımlanır. Ardından, yapı üzerindeki gerilimler ve deformasyonlar hesaplanarak yapısal analizler gerçekleştirilir.

#### 3.4.1.6.1. Yüklerin belirlenmesi

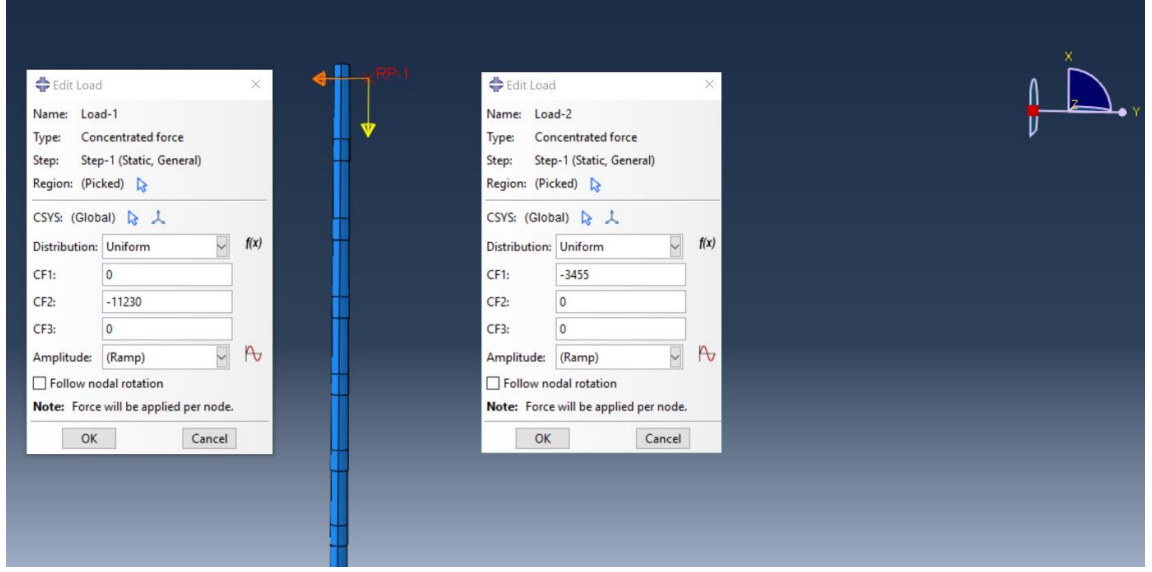
Bu çalışmada durdurucu direk kullanılacaktır ve direğe uygulanacak dikey ve düşey kuvvetler Çizelge 3.1'deki gibidir.

**Çizelge 3.1.** Durdurucu direk yükleri

Dikey Kuvvetler		Düşey Kuvvetler			
Rüzgâr	İletken	Travers	Montör	Buz	Bağlantı
Yükü	Çekme Yükü	Ağırlığı	Ağırlığı	Yükü	Elemanları Ağırlığı
95,55 kg	1027,62 kg	130 kg	100 kg	Ağırlığı	3.51 kg
					111,9 kg

Belirlenen kuvvetler direğe direk tepe kuvveti olarak uygulanacaktır.

Tepe kuvveti, direğin tepesine yatay olarak etkililmektedir. Bu kuvvet, direği etkileyen kuvvetlerin bileşkesinin, direk tepesinden 25 cm aşağıya, direğin eksenine dik olarak uygulanan değerdir ve Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.20.** Durdurucu direk yükleri

### 3.4.1.7. Sabitleme(Ankrajlama) durumları

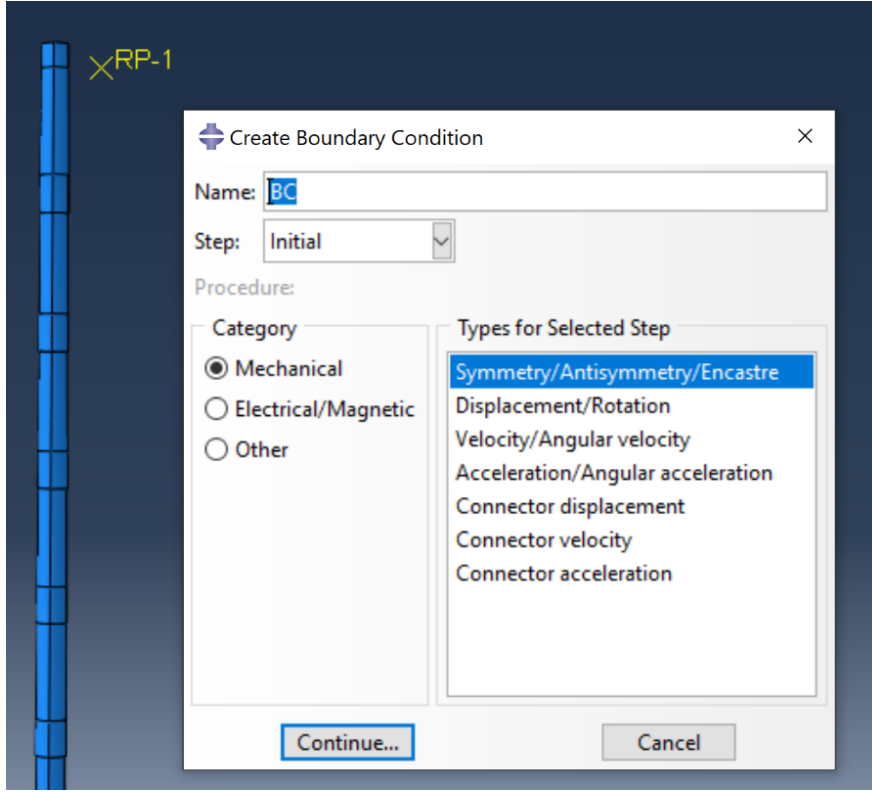
Sınır koşulları, bir yapı üzerindeki etkileşimleri ve yapısal analizlerdeki sınırlayıcı durumları temsil eden yöntemlerdir. Bu koşullar, yapı elemanlarının belirli bölgelerinde uygulanarak yapı üzerindeki gerilim dağılımını ve yer değiştirmeleri etkiler.

Abaqus, çeşitli sınır koşullarını tanımlama ve uygulama imkânı sunar. Bu koşullar, yapı elemanlarının düğüm, kenar, yüzey veya hacim bazında etkileşimlerini kontrol etmek amacıyla kullanılır.

Düğüm sınır koşulu, bir düğüm noktasına doğrudan uygulanan koşulları temsil eder. Örneğin, bir düğüm noktasına sabit bir yük veya belirli bir yer değiştirme uygulanabilir. Kenar sınır koşulu, yapı elemanlarının kenarlarına uygulanan koşulları temsil eder. Bu koşullar, kenar boyunca belirli bir sınır kuvveti, moment veya yer değiştirme uygulayarak elemanların davranışını etkileyebilir.

Yüzey sınır koşulu, bir yüzeye uygulanan koşulları temsil eder. Bu koşullar, yüzey boyunca belirli bir yüzey kuvveti, moment veya yer değiştirme uygulayarak yapı elemanlarının tepkisini kontrol eder.

Hacim sınır koşulu, yapı elemanlarının bir hacim bölgesine uygulanan koşulları temsil eder. Bu koşullar, yapı elemanlarının belirli bir hacimde belirli bir sınır kuvveti, moment veya yer değiştirme etkisi altında davranmasını sağlar.

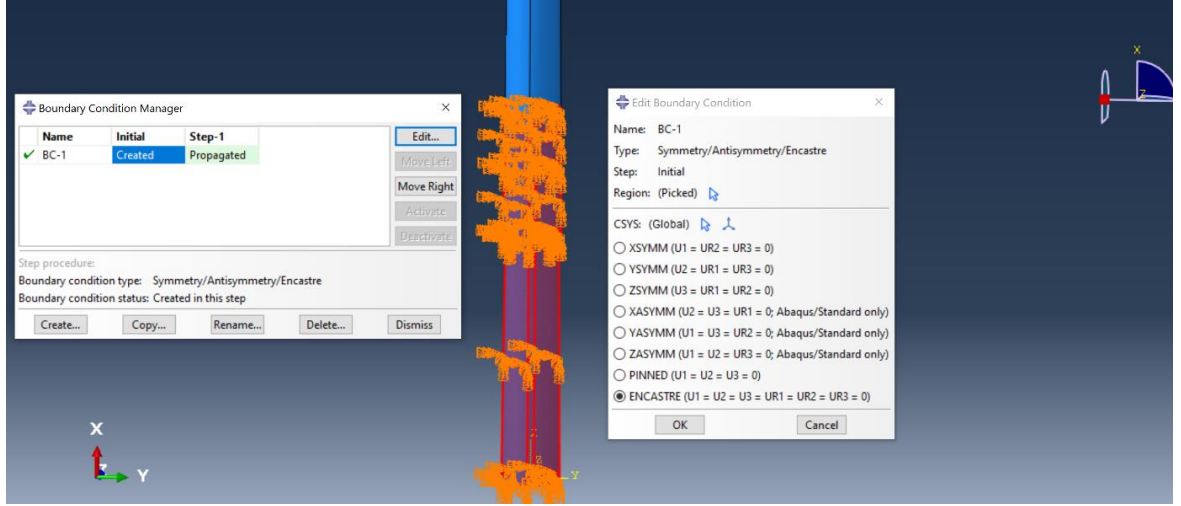


Şekil 3.21. Sabitleme durumu

Sınır koşulları, yapı üzerindeki etkileşimleri ve yükleme durumlarını modellemek için kullanılır. Bu koşullar, analiz sonuçlarını etkileyen önemli faktörlerdir.

#### 3.4.1.7.1. Sınırlar koşullarının belirlenmesi

Yapılan bu çalışmada, betonarme model referans alınmıştır ve sabitlenmesine göre yapılmıştır. Betonarme modelde de 2,2 m derinliğinde sabitleme olmuştur ve 6 yönden de tutulmuştur. (DOF 1,2,3,4,5,6)



**Şekil 3.22.** Durdurucu direk sabitleme durumu

### 3.4.1.8. Mesh oluşturma

Abaqus yazılımında, yapısal analizlerde kullanılan çeşitli element tipleri bulunmaktadır ve bu element tipleri, farklı malzeme davranışlarını ve geometrileri doğru bir şekilde temsil etmek için kullanılabilir.

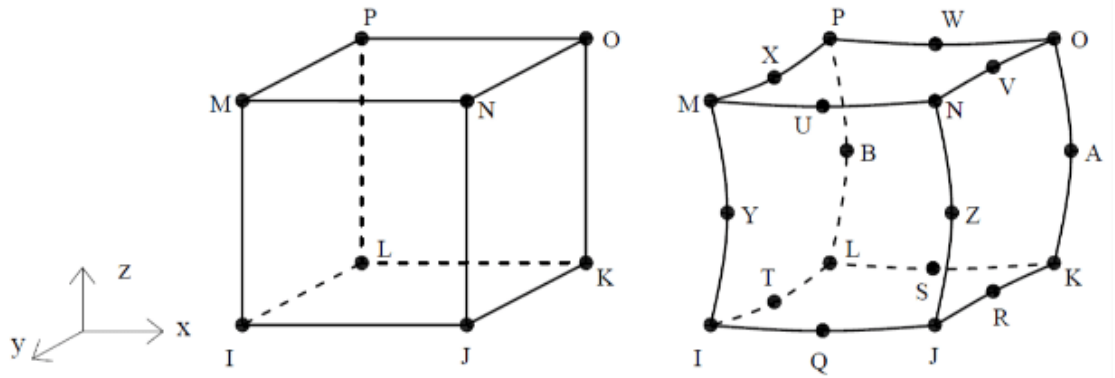
Lineer 1D elementler, basit yapısal analizlerde kullanılır ve doğrusal gerilim ve deformasyonlara dayanan basit davranışları temsil eder.

Doğrusal 2D elementler, düzlem gerilim durumlarını analiz etmek için kullanılır ve yüzey gerilimi, plaka davranışı ve basit yapısal analizler gibi uygulamalarda kullanılabilir.

Quadratik 2D elementler, daha karmaşık geometrileri ve gerilim durumlarını temsil etmek için kullanılır ve düzlemsel ve zemin mekaniği problemleri gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir.

Doğrusal 3D elementler, hacimsel gerilim durumlarını ve karmaşık 3D yapıları analiz etmek için kullanılır ve yapısal analizler, akış analizi ve ısı transferi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

Quadratik 3D elementler, daha yüksek doğruluk gerektiren analizlerde tercih edilir ve ayrıntılı stres analizi, deformasyon analizi ve zorlanma analizi gibi uygulamalar için kullanılabilir.



**Şekil 3.23.** İntegrasyon noktaları (Petrik, 2019)

Abaqus yazılımı, kullanıcılara çeşitli element tipleri sunar ve her bir element tipi farklı özelliklere ve kullanım alanlarına sahiptir.

Sonuç olarak, Abaqus, yapısal analizlerde kullanılan çeşitli element tiplerini sunmaktadır ve bu element tipleri, farklı malzeme davranışlarını ve geometrileri doğru bir şekilde temsil etmek için kullanılabilir. Bu elemanların isimlendirmeleri aşağıdaki gibidir.

B31 elemanı, düzlem gerilme varsayımlarıyla iki boyutlu bir kiriş kesitini temsil eder. Bu eleman genellikle düzlem gerilim koşullarına maruz kalan kiriş yapılarının analizi için kullanılır.

C3D4 elemanı, kübik üç boyutlu bir elemandır ve her bir kenarı dört düğüm ile temsil eder. Bu eleman, genel 3D yapıların analizi için kullanılır ve yapısal analizlerde yaygın olarak tercih edilir.

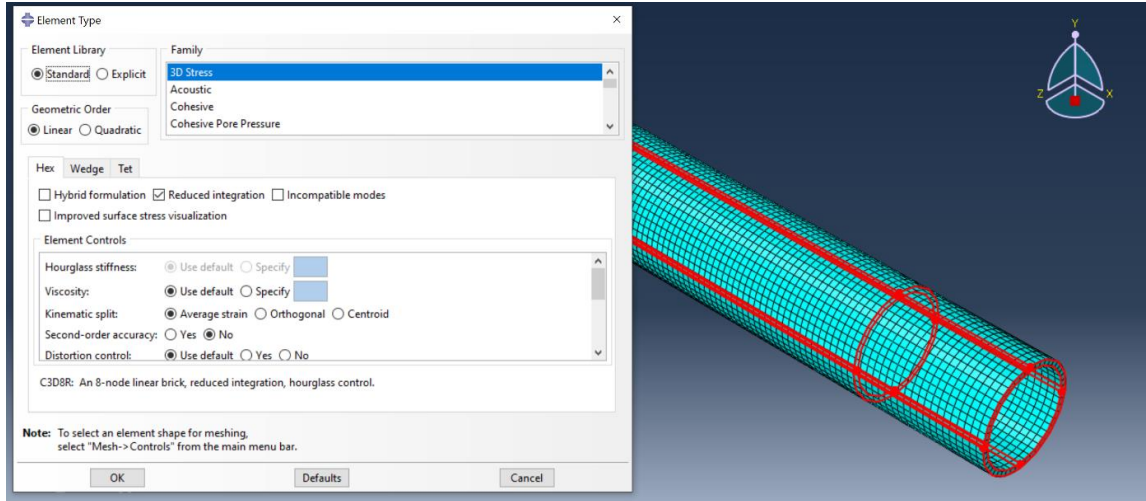
S4R elemanı, dört düğüm ve düzlem gerilme varsayımlarıyla yüzey elemanını temsil eder. Bu eleman, plaka ve kabuk yapılarının analizi için kullanılır ve düzlemsel gerilim durumlarını doğru bir şekilde temsil eder.

T3D2 elemanı, üç düğüm ve üç boyutlu gerilme varsayımlarıyla bir üçgen elemanını temsil eder. Bu eleman, yüzeylerin veya hacimlerin analizinde kullanılır ve çeşitli malzeme davranışlarını modellemek için kullanılabilir.



C3D8 (Cubic 3D, 8-Düğüm): Bu eleman, kübik üç boyutlu bir elemandır ve her bir kenarı sekiz düğüm ile temsil eder. Genel 3D yapıların analizi için kullanılır ve çeşitli malzeme davranışlarını modellemek için kullanılabilir.

Bu çalışmada da 3D doğrusal elemanlar kullanılmıştır ve kullanılan eleman isimlendirmesi C3D8R'dir.



Şekil 3.24. Durdurucu direk meshlenmesi

## 4. BULGULAR

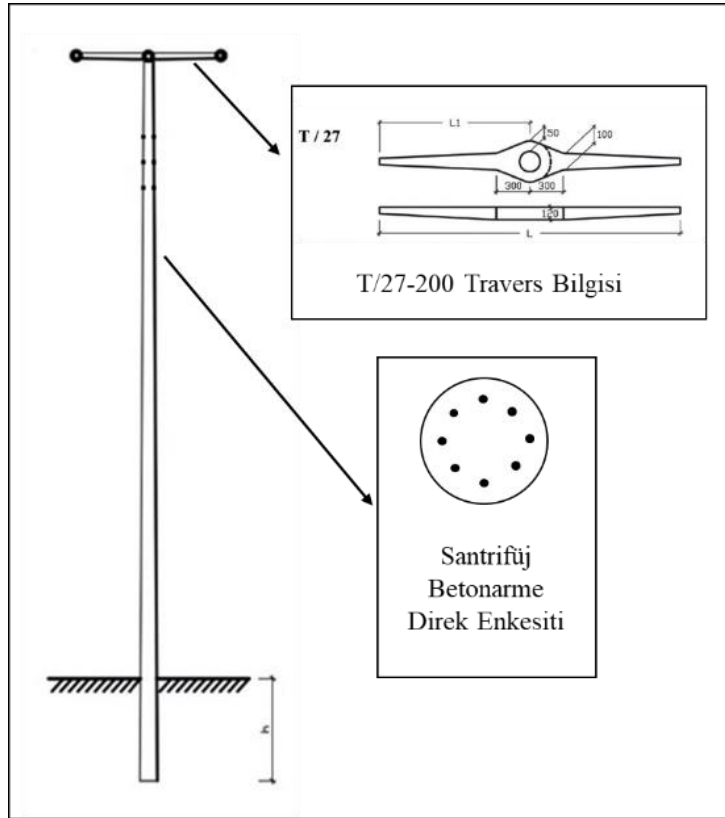
### 4.1. Sonlu Elemanlar Analizleri

Bu çalışmada önce durdurucu direkler için güncel olarak kullanılan betonarme direk referans alınarak diğer çalışmalar için tasarım ve boyutlandırma için yardımcı olmuştur.

#### 4.1.1. Betonarme durdurucu direkler

İletkenlerin çekme kuvvetleri ve rüzgâr kuvvetlerinin direğin tepesinde oluşturduğu kuvvet olan tepe kuvveti dikkate alınarak maksimum rüzgâr ve kablo yükleri analizi gerçekleştirilmiştir.

Teknik şartnamelerden yola çıkarak direkler için maksimum sehim 270 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Betonarme direk modeli

Betonarme direk için TS 500 şartnamesine göre minimum donatı oranı %1, maksimum donatı oranı %4 olarak belirlenmiştir. Modelde donatı oranı %2,2 olarak alınmıştır. Model ile ilgili bilgilendirme Çizelge 4.1 'de görülmektedir.

**Çizelge 4.1.** Betonarme model özellikleri

<b>Direk Boyu</b>	<b>12 m</b>
<b>Ankraj Boyu (h)</b>	2,2 m
<b>Travers</b>	T/27 – 200, L: 200 cm, Ağırlığı: 65 kg
<b>Direk Geometrisi</b>	Tepe Çapı: 270 mm, Dip Çapı: 450 mm
<b>Sehim Bilgisi</b>	Maksimum sehim: 270 mm

#### 4.1.1.1. Betonarme durdurucu direkler malzeme özellikleri

Betonarme modelde beton kısmı için C25 betonu, donatı olarak ise 8φ14 S420 çeliği kullanılmıştır. Beton ve donatının malzeme özellikleri Çizelge ve Çizelge 'da verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Beton malzeme özellikleri

<b>Beton</b>		<b>Elastisite Modülü (E)</b>	<b>Poison Oranı</b>
		<b>(GPa)</b>	
<b>Beton tipi</b>	C25	30	0,2

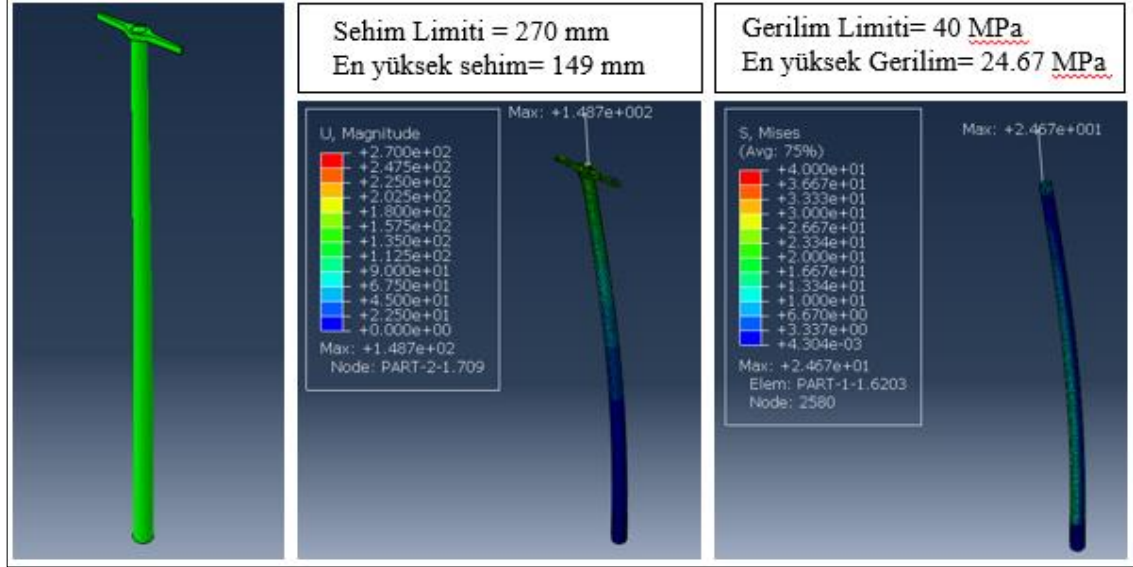
**Çizelge 4.3.** Çelik malzeme özellikleri

<b>Donatı (8φ14)</b>		<b>Elastisite Modülü (GPa)</b>	<b>Poison Oranı</b>	<b>Donatı Oranı</b>
<b>Çelik tipi</b>	S420	200	0,3	0,022

#### 4.1.1.2. Betonarme model analiz sonuçları

Mevcutta kullanılan betonarme direk modeli üzerinde analizler yapılmıştır. Analizde kablo ve rüzgâr kuvvetleri, en yüksek sehim ve gerilim limitlerine göre incelenmiştir. Şekil 4.2'de betonarme santrifüj model çizimi ile maksimum rüzgâr ve kablo yükleri

analizi görülmektedir. Analizlerde 270 mm sehim limitindeki en yüksek sehim 149 mm, 40 MPa gerilim limitine göre en yüksek gerilim değeri 24,67 MPa'dır.

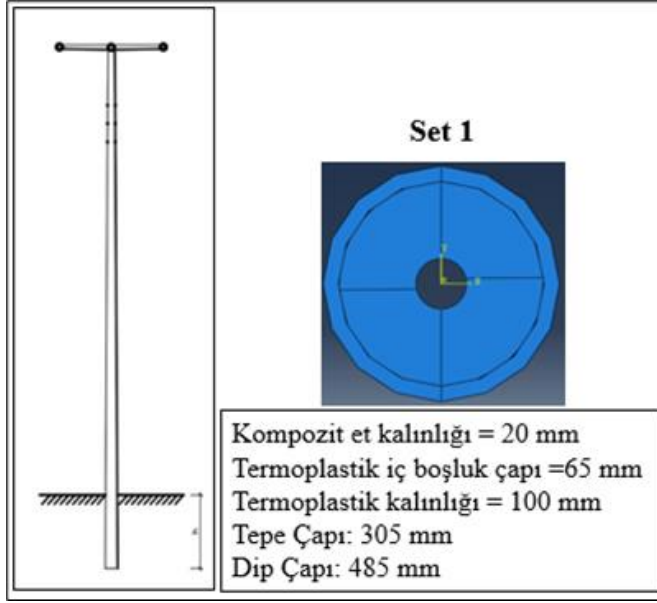


**Şekil 4.2.** Betonarme model analiz sonuçları

Betonarme direğin analiz sonuçlarına göre en yüksek sehim ve en yüksek gerilim değerleri limitin altında kalmaktadır. Bu sonuç beton direk modelinin kompozit ile karşılaştırma için referans olabileceğini göstermektedir.

#### 4.1.2. Yekpare polimer kompozit model çalışması

Daha önceki çalışmalar mevcut santrifüj betonarme direk ve polimer kompozit direk modelleri Enton Test Tutanağı ve Santrifüj Direkleri Teknik Şartnamesi ve TS 500 şartnameleri baz alınarak oluşturulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde performans ve maliyet yönüyle optimum bir tasarım oluşturmak için polimer kompozit direk modelinde tasarım değişikliği gerçekleştirilmiştir. Mevcut model geometrisinde tepe çapı 270 mm, dip çapı 450 mm'dir. Optimum geometriye ulaşmak için üzerinde çalışma yapılmıştır. Hazırlanan yeni modellerin ilk ilkinde tepe çapı 305 mm olarak belirlenmiştir. Polimer kompozit modele ait direk bilgisi Şekil 4.3'de verilmiştir.



**Şekil 4.3.** Yekpare kompozit direk modeli

**Çizelge 4.4.** Yekpare kompozit direk modeli özellikleri

<b>Direk Boyu</b>	<b>12 m</b>
<b>Ankraj Boyu (h)</b>	2,2 m
<b>Kompozit Üretim Yöntemi</b>	Elyaf Sarma
<b>Direk Geometrisi</b>	Tepe Çapı: 305 mm, Dip Çapı: 485 mm
<b>Katman Bilgisi</b>	Dış Katman: Glass Fiber katkılı Epoksi (Kompozit) İç Katman: PA-GF30 (Termoplastik)

#### 4.1.2.1. Yekpare polimer kompozit model malzeme özellikleri

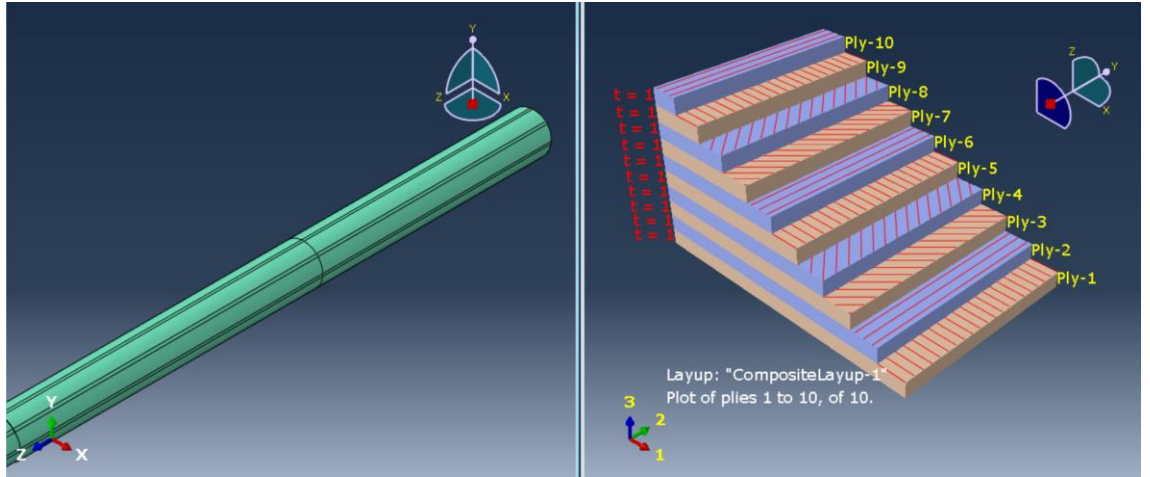
Dış katmanda kullanılacak olan Glass fiber katkılı epoksi ve iç katmanda kullanılacak olan termoplastik ile ilgili malzeme özellikleri Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da görülmektedir.

Çizelge 4.5. PA-GF30 malzeme özellikleri

PA-GF30	
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,36
Elastite Modülü (Gpa)	9,51
Poison Oranı	0,35

Çizelge 4.6. Kompozit malzeme özellikleri

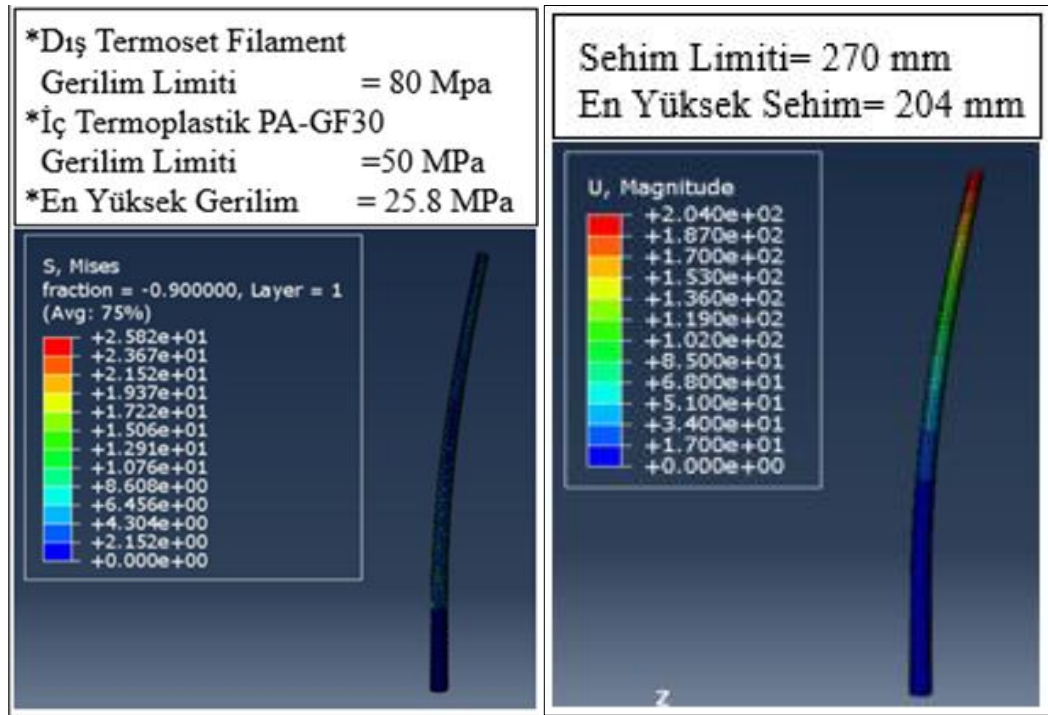
Yoğunluk( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	Katman Kalınlığı (mm)	Çekme Modülü (GPa)	Enine Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1,05	1	44,7	12,7	5800
Bası Mukavemeti (G) (MPa)	Düzlem Kayma Mukavemeti G) (MPa)	Poisson Oranı ( $\nu$ )		
5800	4500	0,297		



Şekil 4.4. Yekpare kompozitin tanımlanması

#### 4.1.2.2. Yekpare polimer kompozit model analiz sonuçları

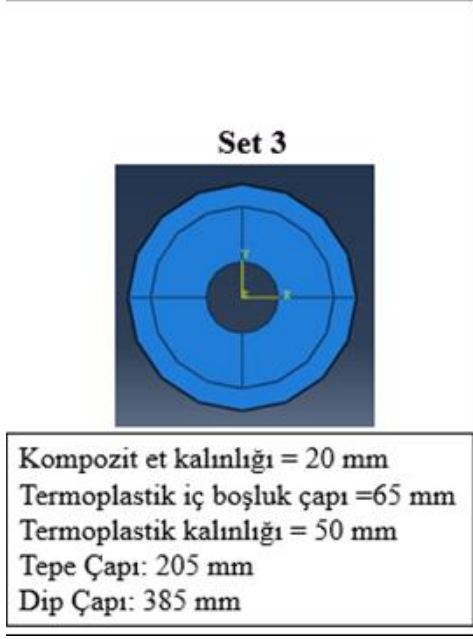
12 metrelik polimer kompozit modele düşey ve yatay yüklerin uygulanması sonucunda yapılan analiz Şekil 4.5’de görüldüğü gibidir. Katmanlı kompozit direk için yapılan ilk çalışmanın sonucunda sehim değeri betonarme direk için limit olan 270 mm altında kalmıştır ve 204 mm olarak çıkmıştır. Polimer kompozit direğin en yüksek gerilim değeri olan 37,1 MPa limit değerlerinin (iç malzeme termoplastik: 50 MPa, termoset elyaf sarma: 80 MPa) altındadır. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere kullanılan materyaller akma limitine ulaşmamışlardır ve herhangi bir plastik deformasyona maruz kalmamıştır.



Şekil 4.5. Yekpare kompozit model sonuçları

#### 4.1.3. Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit model çalışması

Elyaf sarma yöntemi kullanılarak oluşturulacak olan dış katmanın maliyetini azaltmak için farklı tasarımlar denenmiştir. Bu denemeler sonucunda yeni bir tasarım oluşturulmuştur ve bu tasarıma ait bilgiler Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



**Şekil 4.6.** Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit direk modeli

İç katman PA-GF 30 termoplastik, dış katman cam elyaf katkılı epoksi olacaktır. Üretim yöntemi ve detay bilgileri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit model özellikleri

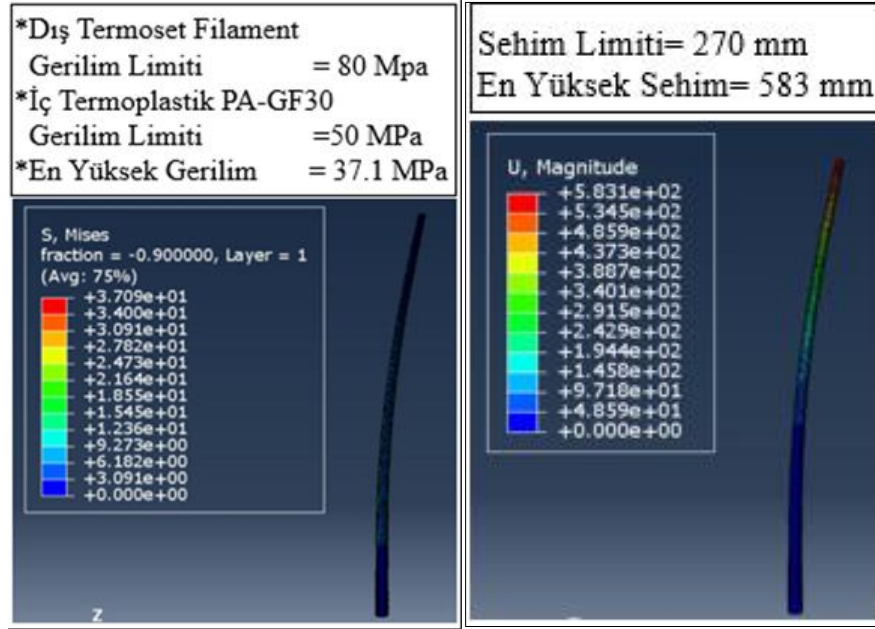
<b>Direk Boyu</b>	<b>12 m</b>
<b>Ankraj Boyu (h)</b>	2,2 m
<b>Kompozit Üretim Yöntemi</b>	Elyaf Sarma
<b>Direk Geometrisi</b>	Tepe Çapı: 205 mm, Dip Çapı: 385 mm
<b>Katman Bilgisi</b>	Dış Katman: Glass Fiber katkılı Epoksi (Kompozit) İç Katman: PA-GF30 (Termoplastik)

Dış katmanda kullanılacak olan Glass fiber katkılı epoksi ve iç katmanda kullanılacak olan termoplastik ile ilgili malzeme özellikleri bir önceki model ile aynı olup Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da görülmektedir.



#### 4.1.3.1. Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit model sonuçları

Betonarme model referans alınarak uygulanan düşey ve yatay yüklemeler sonucunda çıkan gerilme ve deplasman değerleri Şekil 4.7'deki gibidir.



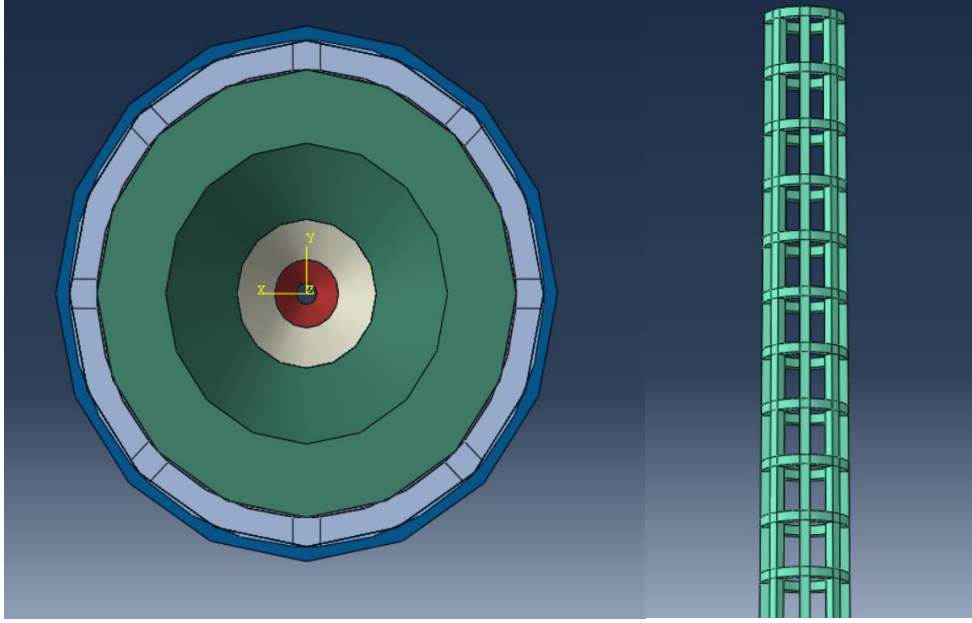
Şekil 4.7. Geliştirilmiş Yekpare kompozit model analiz sonuçları

Bu sonuçlar doğrultunda iç katman ve dış katmanda gerilmelere bakıldığında limitlerin altında kalmıştır ve plastik deformasyon meydana gelmemiştir. Sehim değerine bakıldığında ise betonarme direk için belirlenen değerden daha fazla sehim yapmıştır.

#### 4.1.4. Fens teli kullanarak oluşturulan model

Bu bölümde model revize edilerek ve astar kısmında farklı termoplastik çeşitleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Termoplastik iç boşluğunu çapı 25 mm ye indirilmiş ve termoplastik kısmın dışına 20 mm et kalınlığı sahip 12m uzunluğunda fens teli sarılmıştır. Termoplastik ve kompozit 3 modülden oluşacak şekilde 4,5- 4- 3,5 m uzunluklarından oluşan iç içe geçerek yerleşen parçalardan oluşmuştur. Kompozit kısım için %50 glass-fiber katkılı epoksi, telfens için ise DC-04 çeliği kullanılmıştır.



**Şekil 4.8.** Fens teli modeli

**Çizelge 4.8.** Fens teli modeli özellikleri

<b>Direk Boyu</b>	<b>12 m</b>
<b>Ankraj Boyu (h)</b>	2,2 m
<b>Kompozit Üretim Yöntemi</b>	Elyaf Sarma
<b>Direk Geometrisi</b>	Tepe Çapı: 205 mm, Dip Çapı: 385 mm
<b>Katman Bilgisi</b>	Dış Katman: Glass Fiber katkılı Epoksi (Kompozit) Fens Teli: DC04 Çeliği İç Katman: HDPE (Termoplastik)

#### 4.1.4.1. Fens teli kullanılarak oluşturulan modelin malzeme özellikleri

Farklı termoplastik malzeme denemeleri için çalışmalar yapılmıştır ve bu çalışmaların sonucunda iç katmanda PA-GF30 yerine HDPE için analizler yapılmıştır. HDPE termoplastiğin malzeme özellikleri Çizelge 4.9'daki gibidir.

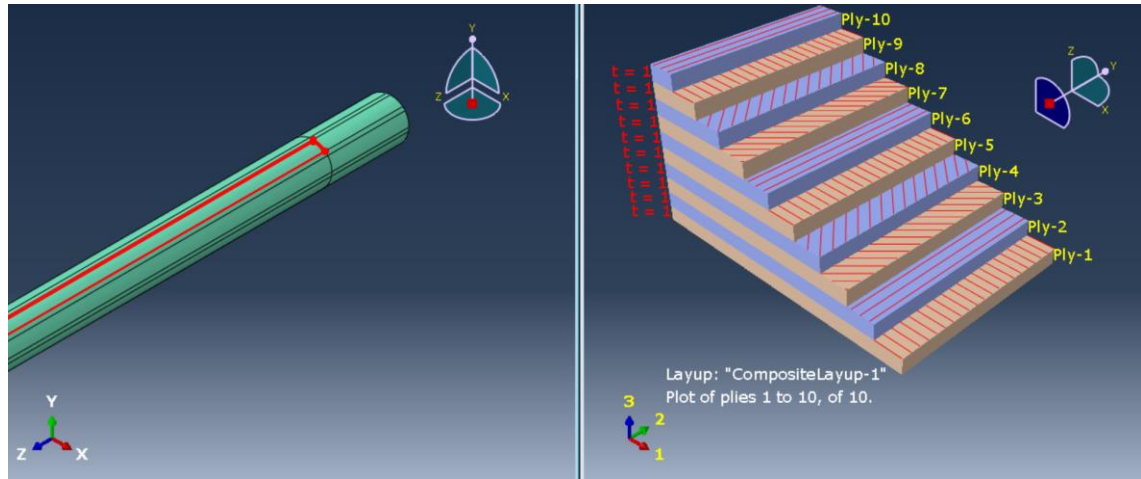
**Çizelge 4.9.** HDPE malzeme özellikleri

HDPE	
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,94
Elastite Modülü(Gpa)	1
Poison Oranı	0,4

Modelde dış katmanda kullanılacak olan glass fiber katkıli epoksi için malzeme özellikleri Çizelge 4.10'daki gibidir. Tüm kompozit modüller 10 katmandan oluşmuştur.

**Çizelge 4.10.** Katmanlı kompozit malzeme özellikleri

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Katman Kalınlığı (mm)	Çekme Modülü (GPa)	Enine Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1,05	1	44,7	12,7	5800
Bası Mukavemeti (MPa)	Düzlem Kayma Mukavemeti (MPa)	Poison Oranı( $\nu$ )		
5800	4500	0,297		



**Şekil 4.9.** Fens teli kompozitin tanımlanması

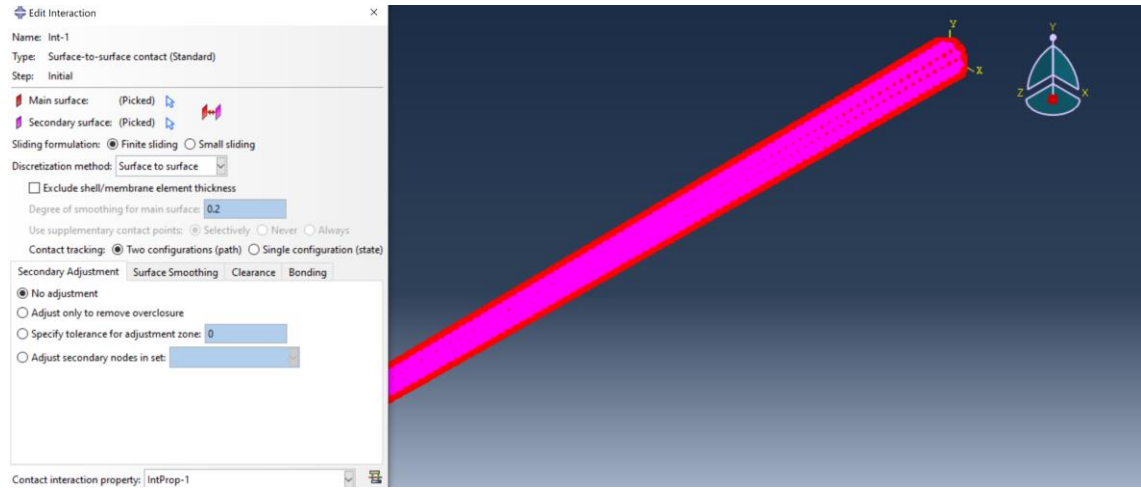
Orta katmanda rijitliği arttırmak için kullanılacak telfens için malzeme özellikleri Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.11.** DC04 çeliği malzeme özellikleri

HDPE	
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7,85
Elastiste	210
Modülü(Gpa)	
Poison Oranı	0,3

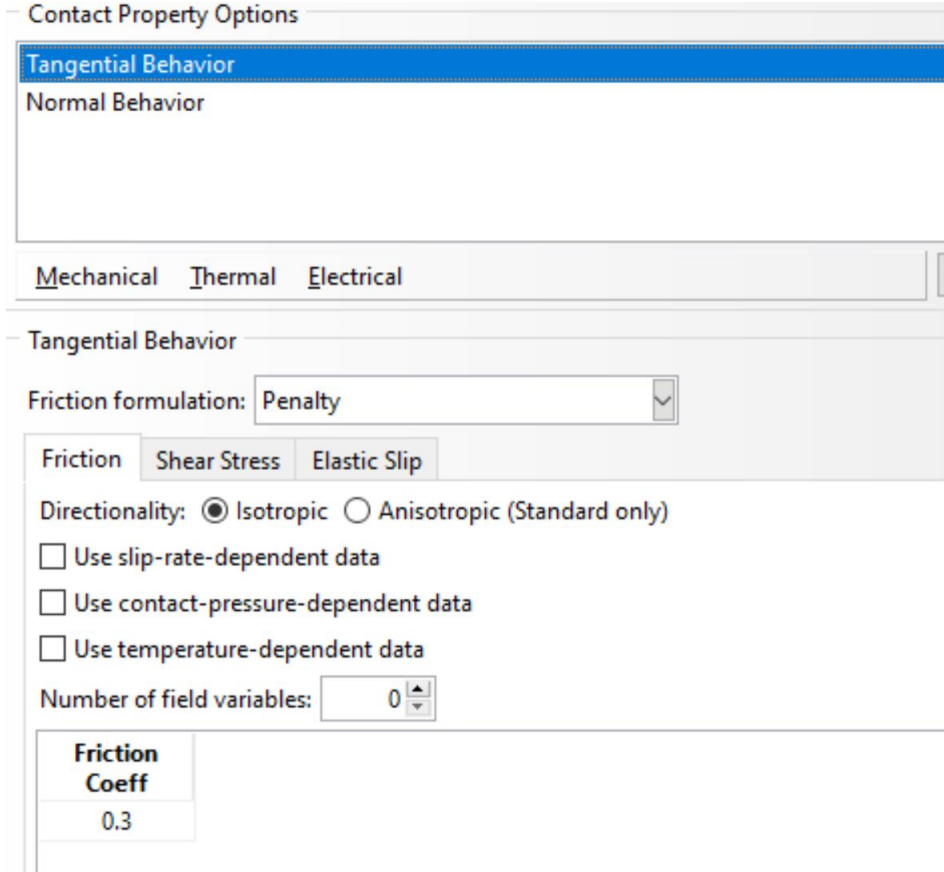
#### 4.1.4.2. Fens teli kullanılarak oluşturulan modelin bağlantı özellikleri

Modelde rijitliği arttırmak için kullanılan telfensin diğer kısımlar olan kompozit kısım ve termoplastik kısım ile etkileşimi ‘Surface to surface contact’ ile tanımlanmıştır.



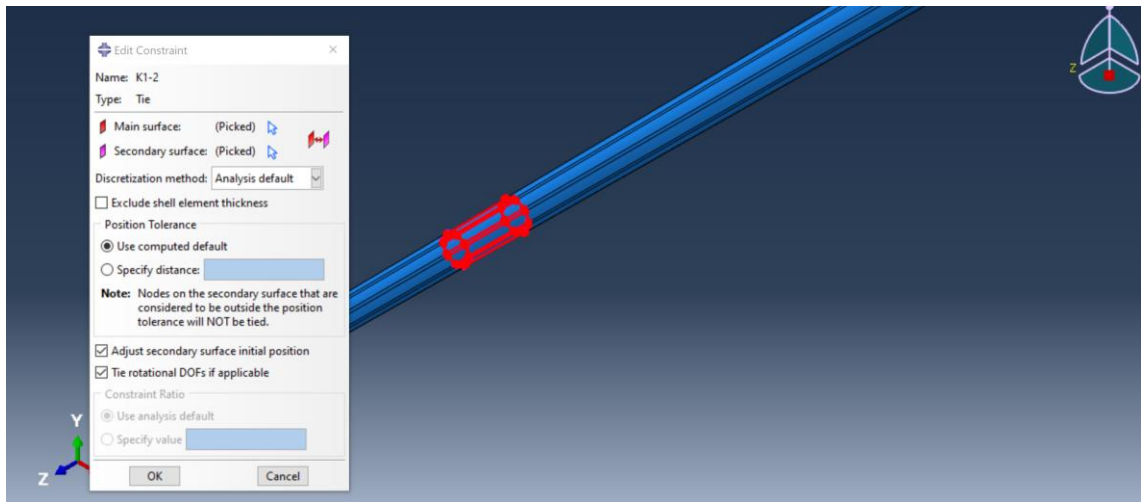
**Şekil 4.10.** Fens teli kompozit ve termoplastik arasındaki bağlantı

Bu kısımda tanımlanan yüzeyler arası sürtünme katsayıları Şekil 4.11’deki gibidir. İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı 0,3 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.11.** Fens teli kontakt özellikleri

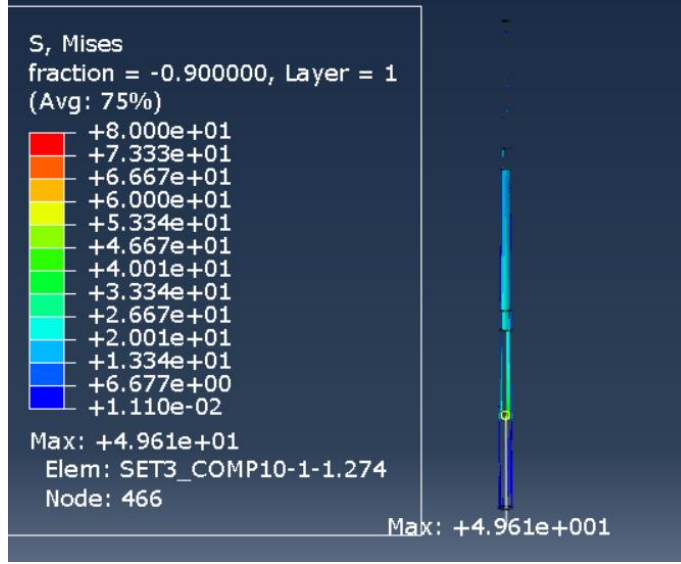
İç kısımda ve dış kısımda yer alan kompozit ve termoplastik modüllerin arasındaki etkileşim ise birbiri içine geçebilir bir yapıda olduğu için 'tie' bağlantı tipi kullanılarak yapılmıştır.



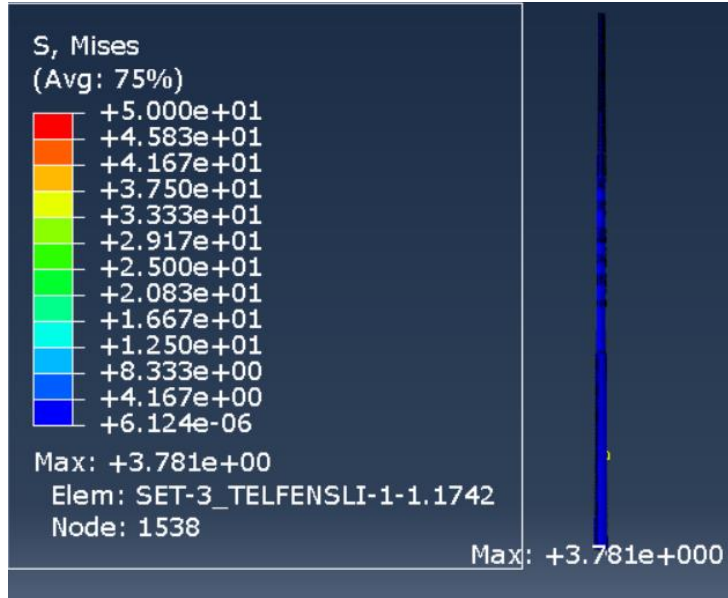
**Şekil 4.12.** Termoplastik ve kompozit arasındaki bağlantı

#### 4.1.4.3. Fens teli kullanılarak oluşturulan modelin analiz sonuçları

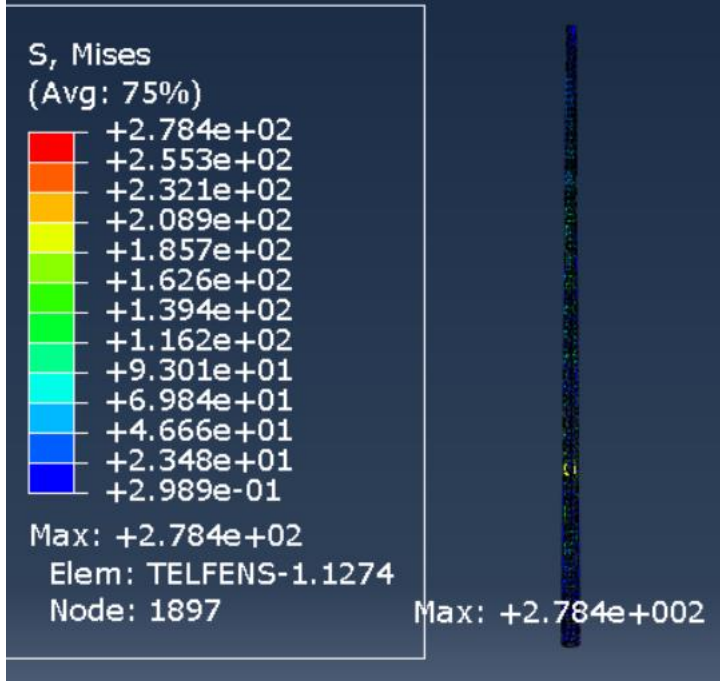
Fens teli kullanılarak yapılan analizin fens teli, termoplastik ve dış katmandaki kompozit bazındaki gerilme sonuçları sonuçları Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.13. Kompozit katman gerilme değeri

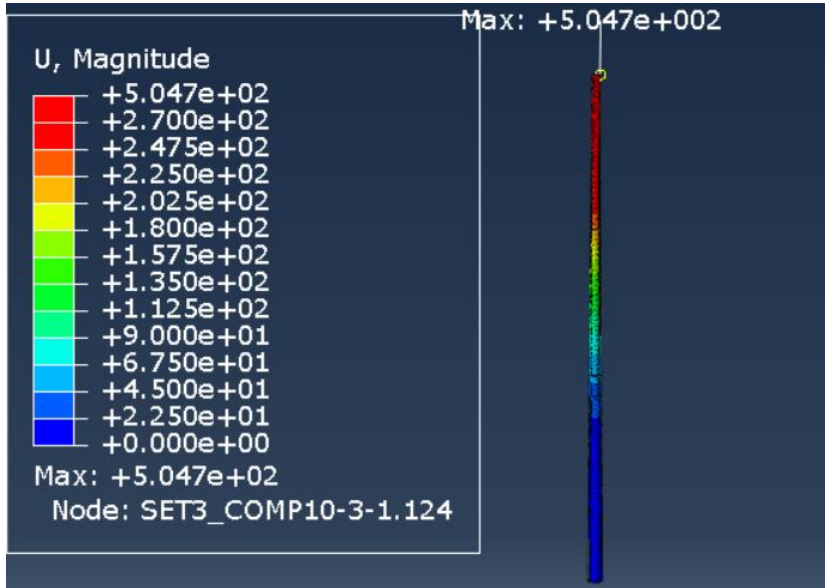


Şekil 4.14. Termoplastik katman gerilme değeri



**Şekil 4.15.** Telfens gerilme değeri

Yapılan iyileştirmeler ve azaltılan kalınlıklarla birlikte deplasman değeri 504,7 mm kadar düşmüştür. Ama bu çalışmanın amaçlarından biri olan ağırlık içinde çok büyük dezavantaj getirdiği için yeni tasarımlar aranmıştır.



**Şekil 4.16.** Fens teli kompozit model deplasman değeri

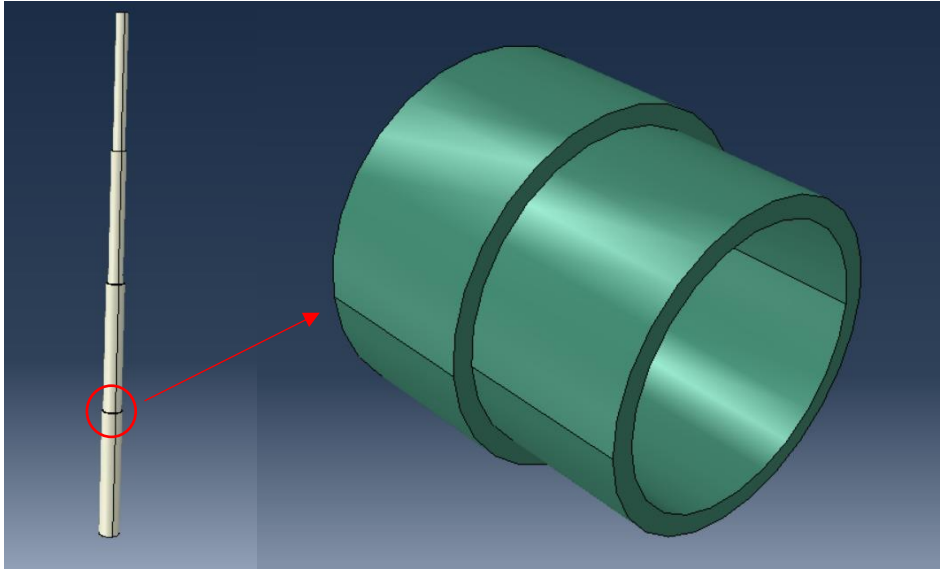
#### 4.1.5. Modüler kompozit direk manşon kullanımı

Fens teli kullanılarak yapılan analizlerde dayanım ve deplasman değerlerinde iyileştirilmeye ulaşılmıştır ancak telfens kullanımı direk mevcut ağırlığını büyük oranda arttırmıştır. Bu sebeple iyileştirme ve aslında birleşim bölgelerinin güçlendirilmesi amacıyla farklı bir çözüm yoluna gidilmiştir. Bağlantı bölgelerinde alüminyum manşon kullanılmasına karar verilmiştir. Manşonda kullanılacak malzeme olarak alüminyum belirlenmiş ve 6061 alüminyuma göre analizler gerçekleştirilmiştir. Dış kompozit kısımda PP UD, iç termoplastik kısımda ise HDPE kullanıldı.

Toplam 3'er metre 4 adet parçadan 12 m modüler direk elde edildi. Kesit özellikleri Çizelge 4.12'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.12. Manşonlu model kesit özellikleri

	Çapı (mm)	Kompozit Kalınlığı (mm)	Termoplastik Kalınlığı (mm)	Manşor Uzunluğu (mm)
1 Parça	480	15	11	200
2. Parça	430	15	9,80	200
3. Parça	339	12	9,70	200
4. Parça	274	12	9,10	200



Şekil 4.17. Manşonlu model



**Çizelge 4.13.** Manşonlu model özellikleri

<b>Direk Boyu</b>	<b>12 m</b>
<b>Ankraj Boyu (h)</b>	2,2 m
<b>Kompozit Üretim Yöntemi</b>	Elyaf Sarma
<b>Direk Geometrisi</b>	Tepe Çapı: 274 mm, Dip Çapı: 480 mm
<b>Katman Bilgisi</b>	Dış Katman: PP UD (Kompozit) İç Katman: HDPE (Termoplastik) Birleştirme Aparatı: 6063 Alüminyum

#### **4.1.5.1. Manşonlu model malzeme özellikleri**

Manşonlu kompozit direk için iç katmanda kullanılan HDPE malzeme özellikleri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Birleşim bölgelerinde kullanılan manşon için kullanılan 6061 Alüminyum için malzeme özellikleri Çizelge 4.14’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.14.** Alüminyum malzeme özellikleri

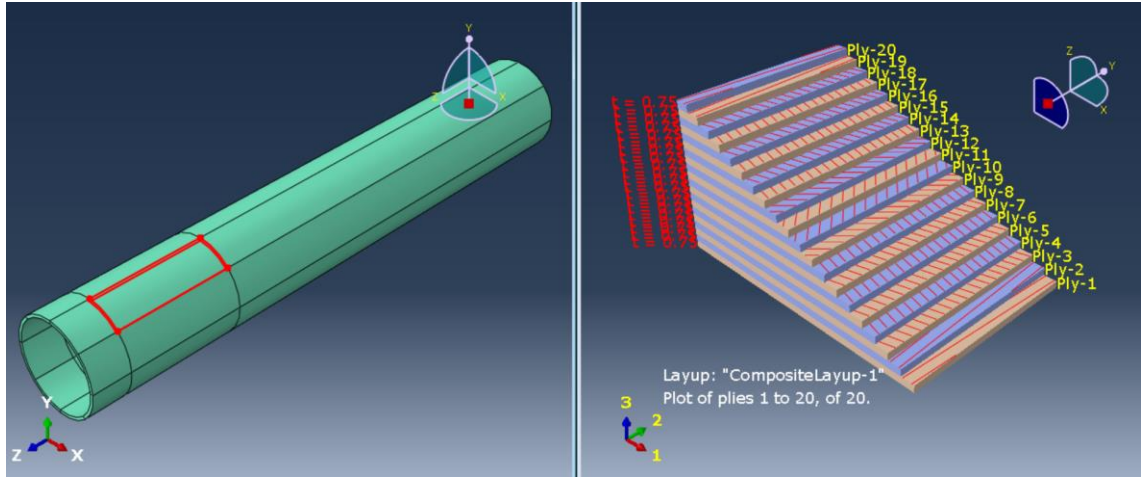
<b>Alüminyum 6061</b>	
<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,7
<b>Elastite Modülü (GPa)</b>	68,9
<b>Poisson Oranı</b>	0,33

Dış katmanda ise kullanılan katmanlı kompozit malzeme özellikleri Çizelge 4.15’de gösterilmiştir.

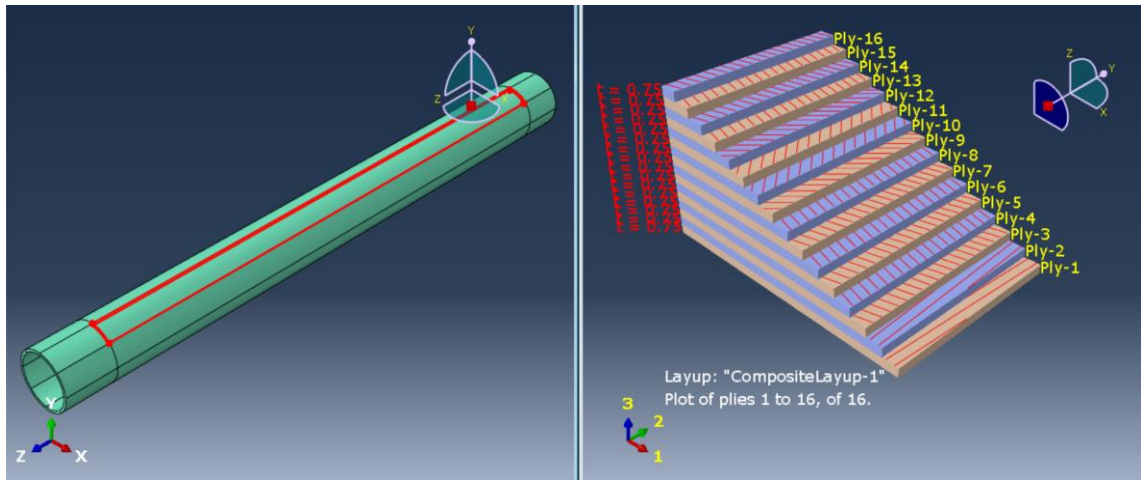
Katman kalınlıkları her modülde aynıdır ama ilk iki modülde 20 katman sonraki iki modülde ise 16 katman vardır.

Çizelge 4.15. Manşonlu model kompozit özellikleri

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Katman Kalınlığı (mm)	Çekme Modülü (GPa)	Enine Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1,05	0,75	44,7	12,7	5800
Bası Mukavemeti (MPa)	Düzlem Kayma Mukavemeti (MPa)	Poisson Oranı( $\nu$ )		
5800	4500	0,297		



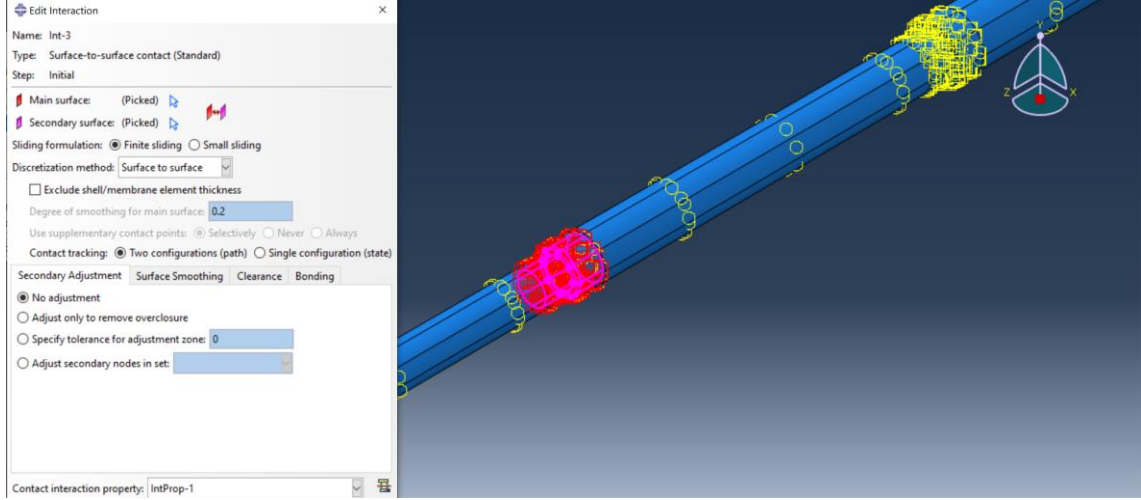
Şekil 4.18. İlk iki katman kompozitin tanımlanması



Şekil 4.19. Son iki katman kompozitin tanımlanması

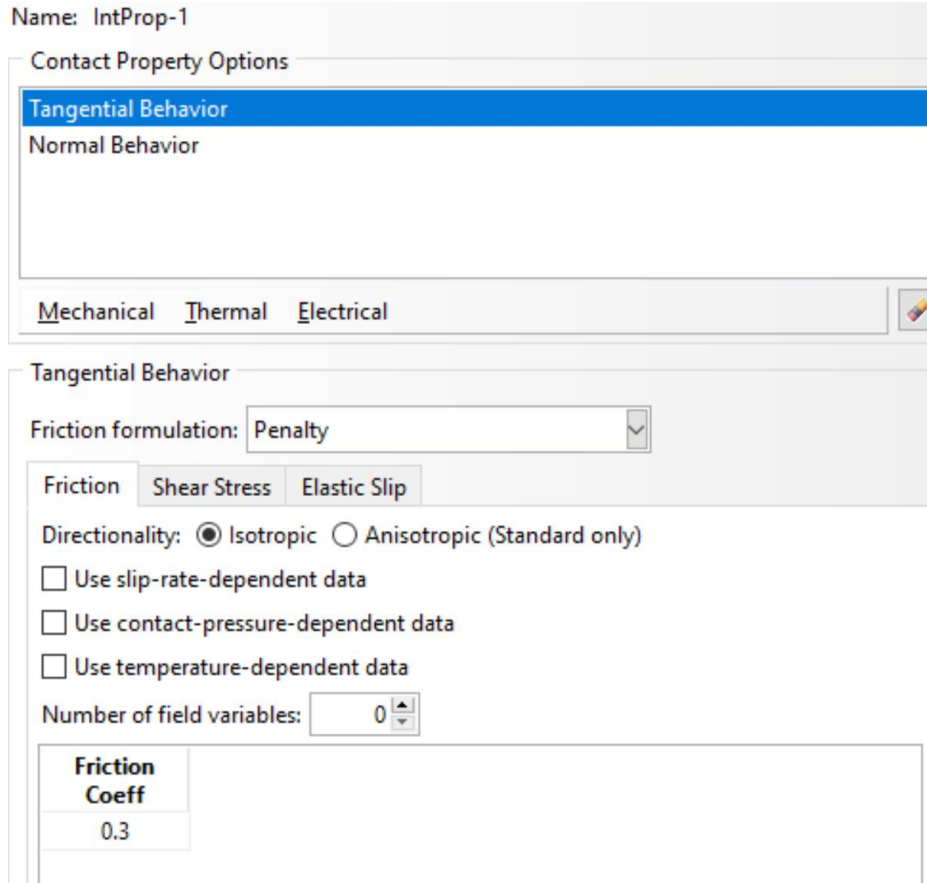
#### 4.1.5.2. Manşonlu model bağlantısı

Modelde termoplastik ve katmanlı kompozit modüller arasında bağlantıyı sağlamak amacıyla alüminyumdan üretilen manşon kullanılmıştır. Bu bağlantı Abaqus'de etkileşimi 'Surface to surface contact' ile tanımlanmıştır.



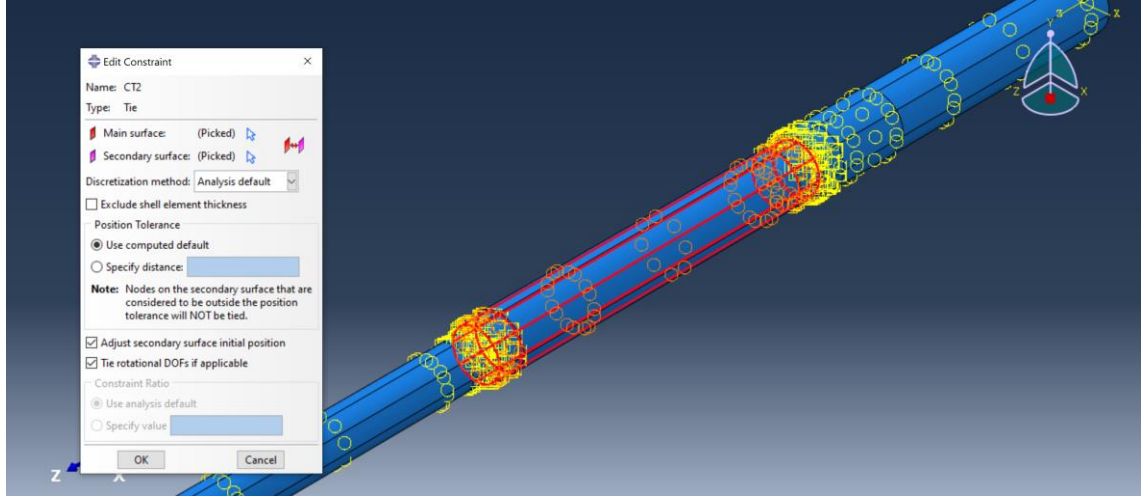
Şekil 4.20. Manşon bağlantısı

Bu kısımda tanımlanan yüzeyler arası sürtünme katsayıları Şekil 4.21'deki gibidir. İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı 0,3 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.21.** Manşon kontak özellikleri

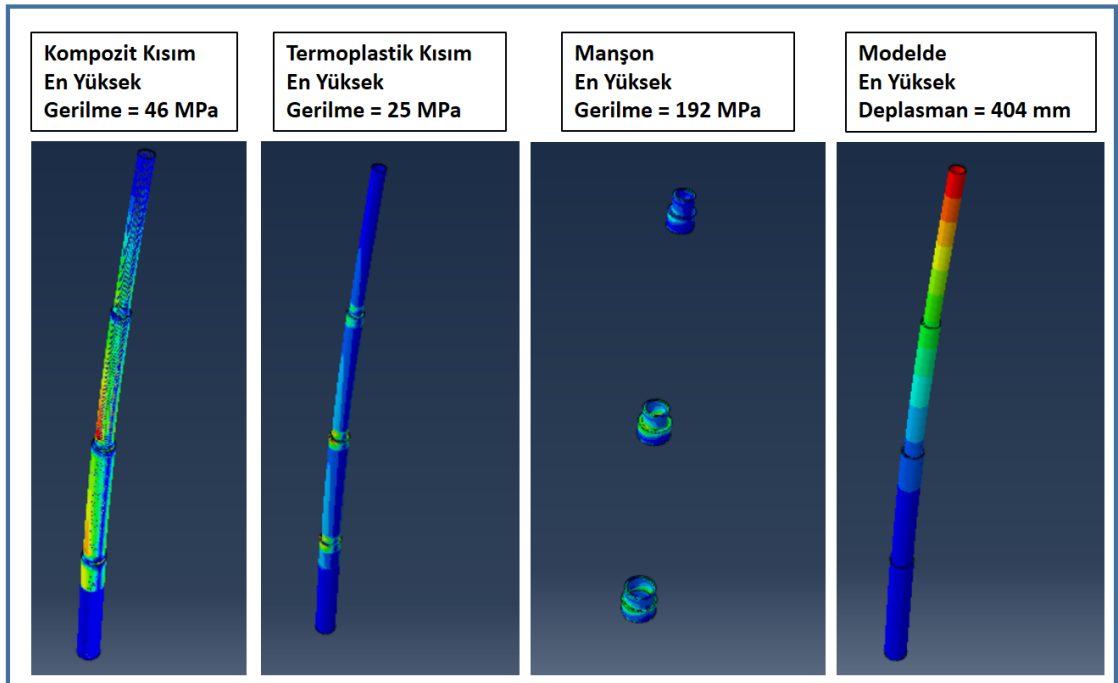
İç kısımda ve dış kısımda yer alan kompozit ve termoplastik modüllerin arasındaki etkileşim ise birbiri içine geçebilir bir yapıda olduğu için 'tie' bağlantı tipi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.22. Termoplastik ve kompozit arasındaki bağlantı

#### 4.1.5.3. Manşonlu kompozit analiz sonuçları

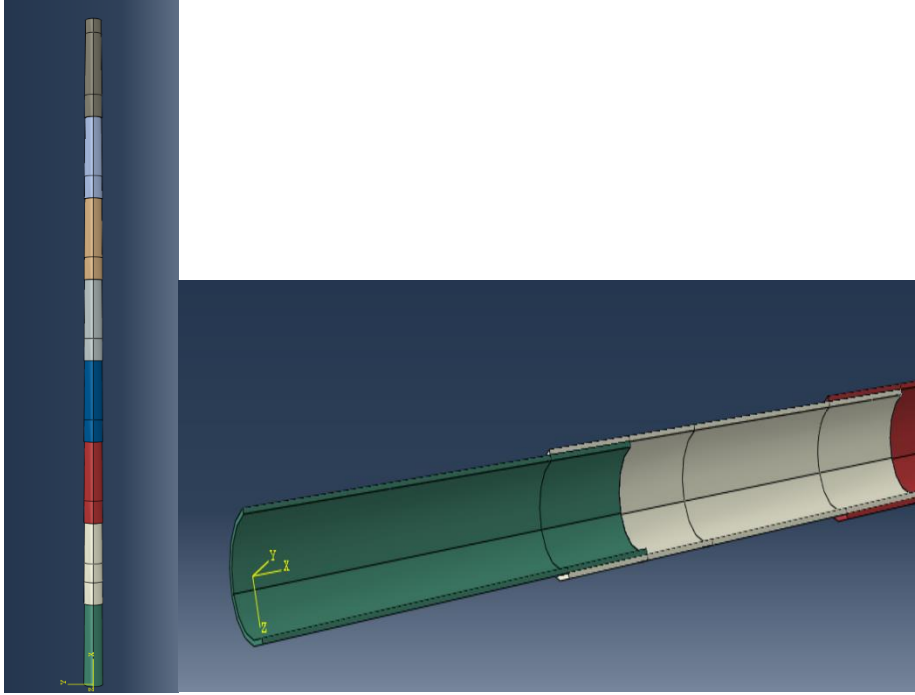
Birleşim bölgesinde kullanılan alüminyum manşon ile yapılan analizlerde gerilme ve deplasman değerlerinde gerekli iyileşme sağlanmıştır, limit değerlerinin altında kalmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen gerilme ve deplasman değerleri Şekil 4.23’de görülmektedir.



Şekil 4.23. Manşonlu kompozit direk analiz sonuçları

#### 4.1.6. Nihai modüler kompozit sıkı geçme ile tasarımı

Manşonlu modelde ağırlığı daha da azaltmak için sıkı geçmeli model ile geçmeli model ile yeni bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarımda sadece PP UD kullanılmıştır. Bu şekilde yapılan iyileştirme ile birlikte ağırlık açısından iyi bir iyileşme elde edilmiştir. Toplamda 8 parçadan 12 m modüler direk tasarımı yapılmıştır. Kesit özellikleri Çizelge 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Nihai model

Çizelge 4.16. Nihai model özellikleri

<b>Direk Boyu</b>	12 m
<b>Ankraj Boyu (h)</b>	2,2 m
<b>Kompozit Üretim Yöntemi</b>	Elyaf Sarma
<b>Direk Geometrisi</b>	Tepe Çapı: 316 mm, Dip Çapı: 344 mm
<b>Katman Bilgisi</b>	Dış Katman: Glass Fiber katkılı Epoksi (Kompozit)

**Çizelge 4.17.** Nihai kompozit özelliklerin kesit özellikleri

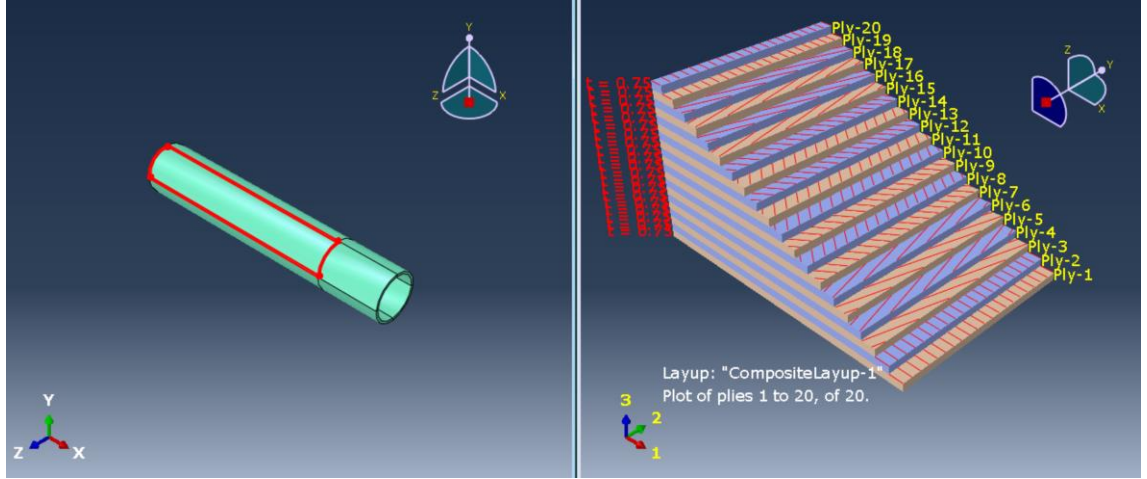
Parça No	Kompozit Boru Ölçüsü [mm]			Geçme Mesafesi [mm]
	L	Ddış	t	
1	1862	344	15	400
2	1862	343,4	15	400
3	1862	342,8	15	400
4	1862	342,2	15	400
5	1862	335,5	12	400
6	1862	328,9	12	400
7	1862	322,3	12	400
8	1762	316	12	400

#### 4.1.6.1. Nihai modüler kompozit sıkı geçme malzeme özellikleri

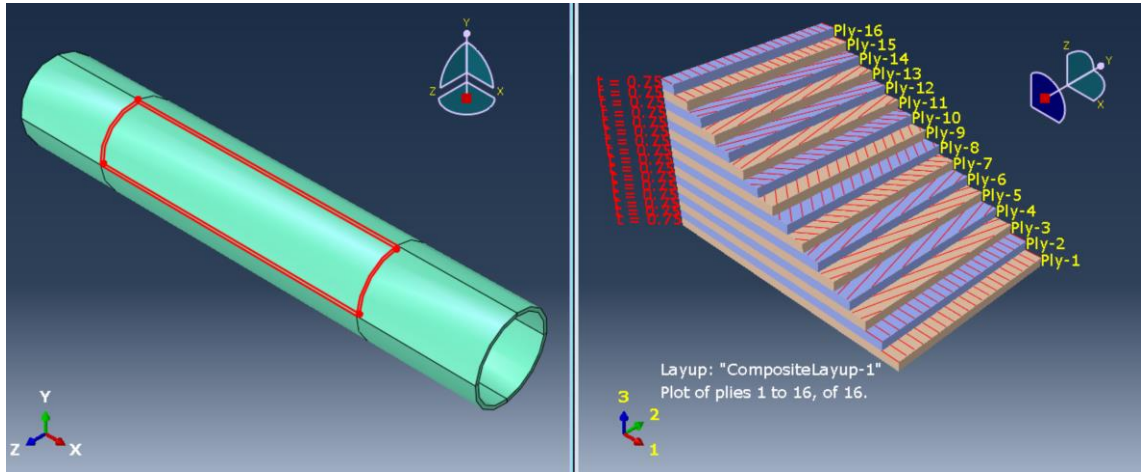
Tek katmandan oluşan tasarımda PP UD malzeme kullanılmıştır ve bu malzemeye ait malzeme özellikleri Çizelge 4.18’de gösterilmiştir. Sekiz modülden oluşan kompozit direkte ilk dört modül 20 katmandan, sonraki dört modül ise 16 katmandan oluşmaktadır.

**Çizelge 4.18.** Nihai model kompozit özellikleri

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Katman Kalınlığı (mm)	Çekme Modülü (GPa)	Enine Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1,05	0,75	44,7	12,7	5800
Bası Mukavemeti (MPa)	Düzlem Kayma Mukavemeti (MPa)	Poisson Oranı( $\nu$ )		
5800	4500	0,297		



Şekil 4.25. İlk dört modül kompozit tanımlanması

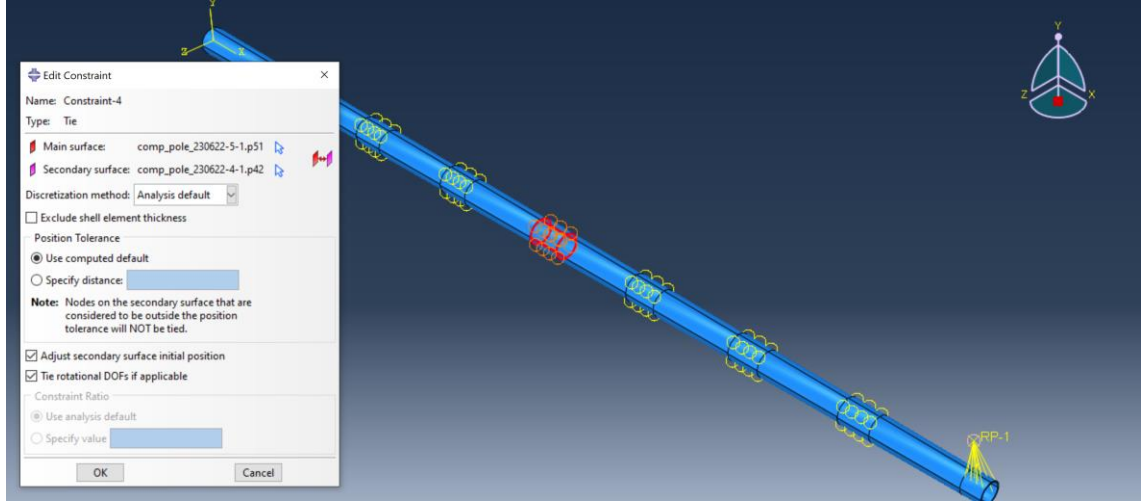


Şekil 4.26. İlk dört modül kompozit tanımlanması

#### 4.1.6.2. Nihai modüler kompozit sıkı geçme bağlantısı

Modüller arasındaki etkileşim birbiri içine geçebilir bir yapıda olduğu için 'tie' bağlantı tipi kullanılarak yapılmıştır. Bu şekilde bağlantıları tanımlanmıştır.

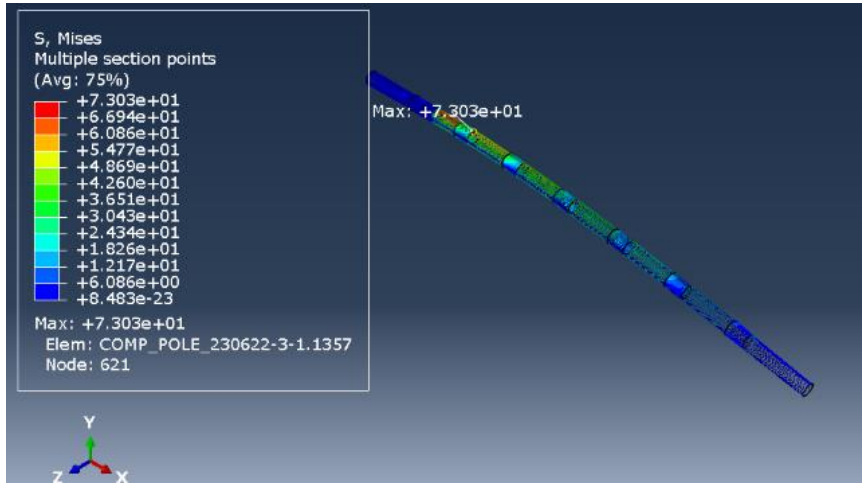




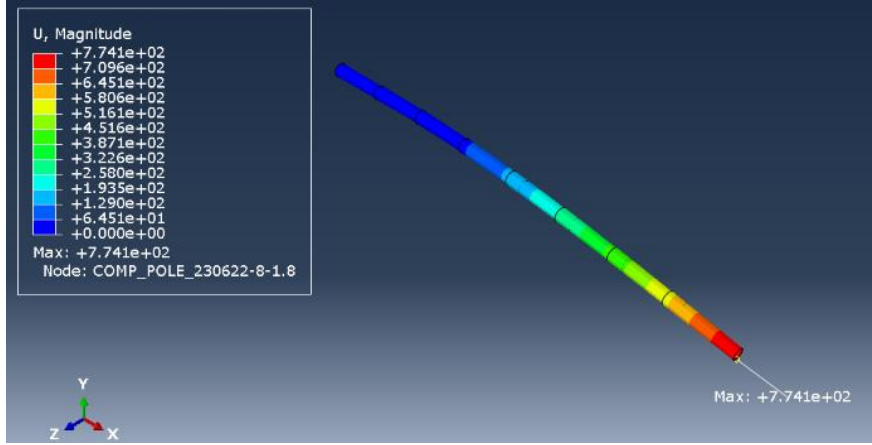
Şekil 4.27. Modüller arasında bağlantı

#### 4.1.6.3. Nihai sıkı geçmeli model analiz sonuçları

Birleşim bölgeleri sıkı geçme ile yapılmış olan modelde analiz sonuçları Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da gösterilmiştir. Kompozit malzeme akma limitine ulaşmamıştır ve kullanılabilir bir model olduğu görülmüştür.



Şekil 4.28. Nihai model kompozit gerilmesi



Şekil 4.29. Nihai model deplasman sonuçları

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada yekpare betonarme direk referans modüler kompozit direğe geçiş için tasarımsal çalışmalar yapılmış ve bu tasarımlar için analizler yapılmıştır.

Bu analizlerde betonarme direğe gelen rüzgâr ve kablo yükleri kullanılmış ve betonarme direkte olduğu gibi bir sabitleme durumu gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 5.1'deki gibidir.

**Çizelge 5.1.** Sonlu elemanlar analiz sonuçları

Direk modelleri	Maksimum gerilme	Maksimum Deplasman
Betonarme	24,67	144,09
Yekpare polimer kompozit	25,8	204
Geliştirilmiş yekpare polimer kompozit	37,1	583
Modüler fens teli ile sıkı geçme	278,4	504,7
Modüler manşonlu	192	404
Nihai modüler kompozit sıkı geçme	73,03	774,1

Bu sonuçlar incelendiğinde betonarme modelin sonlu elemanlar analizinden sonra modüler kompozit enerji direklerine geçmek için öncelikle yekpare kompozit direk çalışmaları yapılmış ve bununla birlikte de geliştirilecek olan modüler kompozit direğin nihai tasarımı belirlenmiştir. Kompozit kullanmanın en önemli avantajlarından olan hafiflik parametresi göz önüne alındığında fens teli ve manşonlu modellerde kullanılan fens teli ve manşonun ağırlığı artırmasının önüne geçmek için sıkı geçmeli model tercih edilmiştir ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

### 5.1. Kompozit Direk Üretimi

Yapılan analiz çalışmaları sonucunda prototip için model olarak sıkı geçmeli model seçilmiştir. Üretim yöntemi olarak farklı açılarda da sarım yapılabildiği için elyaf sarma yöntemi kullanılmıştır.

Elyaf sarma yöntemi ile sarım açısı değiştirilebilirdir, bu sayede yönlere göre mekanik dayanım parametreleri ayarlanabilmektedir. Güç direği hem düşey hem de yatay yüklerle maruz kaldığından farklı açılardan gelebilecek darbelere ve yüklerle karşı iyi bir dayanım sergilemelidir. Bu doğrultuda diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında elyaf sarma yöntemi oldukça olumlu sonuçlar vermektedir.



**Şekil 5.1.** Elyaf sarımı

Altı kat cam elyaf mandrele dayanım isterlerini sağlayacak açılarda sarılmıştır. Cam elyaflar arasına epoksi emdirilmiştir. Prototip, olarak 8 modülden oluşmaktadır ve her modül bu şekilde üretilmiştir.



**Şekil 5.2.** Üretilmiş kompozit direk

Üretimi tanımlanan prototip direğin burulma ve çekme testleri ilk aşama da gerçekleştirilecektir.

## **5.2. Sonuç**

Çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle modüler kompozit direklerin analizi gerçekleştirilmiştir. Mevcut durumda kullanılan betonarme direk boyutları ve yükleme koşulları referans alınmıştır ve 12 m'lik durdurucu direklerle çalışılmıştır. Enton Test Tutanağı ve Santrifüj Direkleri Teknik Şartnamesinden yola çıkarak maksimum sehim 270 mm olarak belirlenmiştir.

Polimer kompozit direğin modüler çalışılması için önem arz eden ve en yüksek yer değiştirme oranının azaltılması amacıyla bağlantı özelinde farklı tasarımlar oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, betonarmeden direktan kompozit direğe geçişte modüler olmayan modelde analizler gerçekleştirilmiştir. Modüler direk analizlerine geçişte tasarımın belirlenmesi için yapılan analizler yol gösterici olmuştur. Ağırlık deplasman ve kalınlığı optimize etmek amacıyla farklı tasarımlar çalışılmıştır. Bu tasarımlar; ara katmanda fens telinin kullanılması, modüller arası bağlantı bölgelerinde manşon kullanımı ve modüller arası aparat kullanımı olmadan içi içe geçmeleriyle yani sıkı geçmeyle model rijitliği sağlanmıştır.

Fens teli uygulandığında sehim ve gerilme değerlerinde iyileşme görölmüştür. Modöler kompozit direğin tasarım ve kullanım amacı ağırlıkta hafifletme sağlanması ayrıca kolay taşınabilir ve fonksiyonel olmasıdır. Fens teli kullanımıyla mekanik özelliklerde iyileşme sağlasa da hafiflik şartını sağlayamamıştır. Manşonlu birleşimle yapılan analiz sonucunda kompozit, termoplastik ve manşon için elde edilen en yüksek sehim ve gerilme değerleri malzeme limit değerlerinin altındadır. Fakat manşon ağırlığı ve üst modöllerde uygulama zorluğu düşünölerek tasarımda bağlantı bölgelerinin sıkı geçme çalışması hedeflenmiştir. Sıkı geçme modelin analiz sonuçlarında da en yüksek sehim ve ve gerilme değerleri limti değerlerinin altında kalmıştır. Aynı zamanda çalışılan tasarımlar arasında en hafif ve uygulama kolaylığı sağlayan model oluşturulmuştur.

Seçilen üretim yöntemi elyaf sarma metoduyla sarım açları idealize edilmiştir. Farklı yönlerdeki yüklere karşı mekanik dayanım performansının arttırılması için bu adım önem arz etmektedir. Bu doğrultuda 8 modölden oluşan prototip direk üretilmiştir.

Sonraki adımda şartnamelerde yer alan burulma ve çekme testleri gerçekleştirildiğinde, modelin doğrulanması sağlanabilecektir. Doğrulanma sağlanamaması durumunda tasarım ve üretim yönteminin en iyileştirilmesi için ek çalışmalar yapılabilecektir.

## KAYNAKLAR

Baghmisheh, A. G., & Mahsuli, M. (2021). Seismic performance and fragility analysis of power distribution concrete poles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150, 106909.

Bayraktar, Ö. 2016. "Ön Gerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 18-24.

Çelik, Y. (2011). Kaynak işleminde meydana gelen kalıcı gerilmelerin ve çarpılmaların bilgisayarla simülasyonu (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).

Han, H., Wang, X., Wu, D. (2012). Preparation, crystallization behaviors, and mechanical properties of biodegradable composites based on poly(L-lactic acid) and recycled carbon fiber. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1947–1958

Hang, X., Li, Y., Hao, X., Li, N., & Wen, Y. (2017). Effects of temperature profiles of microwave curing processes on mechanical properties of carbon fibre–reinforced composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(8), 1332-1340.

Kaw, A.K. (1997). *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press.

Korkmaz, N. 2014. "Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma" Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 4.

Mazumdar, S.K. (2002). *Composite Manufacturing: Product, Materials and Process Engineering*. CRC Press.

Metiche, S., & Masmoudi, R. (2013). Analysis and design procedures for the flexural behavior of glass fiber-reinforced polymer composite poles. *Journal of composite materials*, 47(2), 207-229. Bessa, M. A., Bostanabad, R., Liu, Z., Hu, A., Apley, D. W., Brinson, C., Liu, W. K. 2017. "A framework for data-driven analysis of materials under uncertainty: Countering the curse of dimensionality". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 320, 633-667

Mohamed, H., & Masmoudi, R. (2009). Design optimization of GFRP pole structures using finite element analysis. *American Composites Manufacturers Association Tampa, FL USA, COMPOSITES & POLYCON*.

Petrik, A., & Aroch, R. (2019, June). Usage of true stress-strain curve for FE simulation and the influencing parameters. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 566, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.

Polyzois, D., Ibrahim, S., Burachynsky, V., & Hassan, S. K. (1999). Glass fiber-reinforced plastic poles for transmission and distribution lines: an experimental investigation. In *Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials*.

Polyzois, D., Raftoyiannis, I. G., & Ibrahim, S. (1998). Finite elements method for the dynamic analysis of tapered composite poles. *Composite Structures*, 43(1), 25-34.

Saboori, B., & Khalili, S. M. R. (2011). Static analysis of tapered FRP transmission poles using finite element method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(3), 247-255.

Sarmiento, M., & Lacoursiere, B. (2006, August). A state of the art overview: composite utility poles for distribution and transmission applications. In *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America* (pp. 1-4). IEEE.

Tripathi, S., Gupta, S., Kumar, V., & Tiwari, P. (2020, February). Hybrid Utility Poles and their application in Power System: Refinement in Construction and Design of Conventional Utility Pole. In *2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)* (pp. 606-611). IEEE

URL-1 <https://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/> (Haziran, 2023)

URL-2 <https://www.galaxy3dm.com/RTM-Technology> (Haziran,2023)

URL-3 <https://www.deangeliprodotti.com/en/articles/how-an-accm-conductor-is-born/> (Haziran,2023)

URL-4 <https://www.abitape.eu/composite-moulding-tapes> (Haziran,2023)

URL-5 <https://www.esnmetal.com/fens-teli/> (Haziran,2023)

URL-6 <http://www.empflans.com/dislifitings.html> (Haziran,2023)

URL-7 <https://www.etmd.org.tr/elektrik-direklerinin-cesitleri-ve-ozellikleri/> (Haziran,2023)

Vanderbilt, M. D., & Criswell, M. E. (1988). Reliability analysis of pole-type transmission structures. *Computers & structures*, 28(3), 335-343.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa AKOĞLU  
Doğum Yeri ve Tarihi : Giresun, 1998  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Keşap Anadolu Öğretmen Lisesi  
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Vimansys Digital AR-GE Teknolojileri

İletişim (e-posta) : mustafa.akoglu05@gmail.com

Yayımları :