

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KROM KAPLAMA YAPILMIŞ POLİAMİD MALZEMELERİN SICAKLIK YÜKÜ
ALTINDAKİ GERİLME DAĞILIMLARININ SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre Esvet MÜFTÜOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

OCAK 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KROM KAPLAMA YAPILMIŞ POLİAMİD MALZEMELERİN SICAKLIK
YÜKÜ ALTINDAKİ GERİLME DAĞILIMLARININ SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Emre Esvet MÜFTÜOĞLU
(162080109)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bahattin KANBER

OCAK 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 162080109 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Emre Esvet MÜFTÜOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KROM KAPLAMA YAPILMIŞ POLİAMİD MALZEMELERİN SICAKLIK YÜKÜ ALTINDAKİ GERİLME DAĞILIMLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Bahattin KANBER**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Rukiye ERTAN**
Uludağ Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK
Bursa Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi : 14 Ocak 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi/...../.....



Sevgili aileme ve arkadaşlarıma,

ÖNSÖZ

Tüm Yüksek Lisans eğitimim süresince yanımda olan ve bu tez çalışmasını gerçekleştirirken ihtiyaç duyduğum her an benimle tecrübesini paylaşmaktan çekinmeyen, maddi manevi her konuda her an yardımına koşan ve beni asla geri çevirmeyen saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Bahattin Kanber'e, yüksek lisans eğitimim boyunca verdikleri derslerle yol göstericim olan Prof Dr. Osman Kopmaz, Doç. Dr. Onur Saray, Dr. Shukwinder Kaur Bhullar ve Dr. Münevver Müge Çağal'a teşekkür ederim.

Çalışmanın çeşitli noktalarında yardımlarını sunan çalışma arkadaşlarım Ayhan Şenol ve Coşkun Keskin'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı gerçekleştirirken varlıklarıyla bana destek olan değerli arkadaşlarım Ana Prado, İbrahim Köse, Ladan Sojudi, Taner Saner, Elif Özince, Merve Sönmez, Yasin Çini, Muhammet Arslan, Mehmet Kıvanç Turan, Olgun Madak, Raif Peker, Banu Peker, Seher Özen, Ahmed Burak Tapan, Kübra Baştaş, Merve Altay ve Büşra Aslan'a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan ve bu tez çalışmasını gerçekleştirecek gücü bana veren, çok sevdiğim, kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Tüm bu emek ve değerlerle oluşturulan bu çalışmanın, ileride yapılacak benzer çalışmalara ışık tutmasını temenni ederim.

Ocak 2019

Emre Esvet MÜFTÜOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	11
2. PLASTİK KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ	13
2.1 Yüzey Hazırlama.....	14
2.1.1 Yüzey temizleme.....	15
2.1.1.1 Kimyasal temizleme.....	15
2.1.1.2 Mekanik temizleme.....	15
2.1.2 Yüzey modifikasyonu	15
2.1.3 Durulama.....	16
2.2 Elektrolitik Metal Bırakımı	16
2.2.1 Doğru akımlı elektro-bırakım	16
2.2.2 Atımlı kaplama.....	16
2.2.3 Lazerli metal bırakım	17
2.3 Elektrolit Kaplama	17
2.3.1 Elektrolit tipleri ve bileşenleri.....	17
2.3.2 Elektrolit özellikleri	17
2.3.3 Elektrolit iletkenliği	17
2.4 Elektro-kaplama Prosesi Tipleri.....	18
2.4.1 Yığın kaplama	18
2.4.2 Askılı kaplama	18
2.4.3 Sürekli kaplama.....	18
2.4.4 Sıralı kaplama	18
2.5 Metalik Kaplama Türleri.....	18
2.5.1 Anodik kaplamalar	19
2.5.2 Dekoratif kaplamalar.....	19
2.5.3 Mühendislik kaplamaları.....	19
2.5.4 Diğer metalik kaplama türleri	20
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS.....	22
4. SONUÇLARIN DOĞRULANMASI	25
4.1 Analitik Çözüm	25
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Çözüm	31

4.2.1 Silindir çubuk model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	33
4.2.2 Kiriş model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	35
4.2.3 Halka model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması.....	38
4.2.4 Tutamak model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
5.1 Silindir Çubuk Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları.....	47
5.2 Kiriş Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları.....	53
5.3 Halka Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	58
5.4 Tutamak Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	63
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ.....	73



KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril-Butadien-Stiren
ASPN	: Aktif Eleme Plazma Metodu
C	: Celcius
cm	: Santimetre
CPN	: Geleneksel Plazma Nitrüleme Metodu
gr	: Gram
MPa	: Mega Paskal
mm	: Minimetre
No.	: Numara
Ör.	: Örnek
PA	: Poliamid
PFOS	: Perflorooktan Sülfonik Asit
PVD	: Physical Vapor Deposition
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
vm	: Von mises
3D	: Three Dimensional (Üç Boyutlu)

SEMBOLLER

A	: Malzemenin kesit alanı
E	: Malzemenin elastisite modülü
L	: Malzeme uzunluğu
P	: Bileşke kuvvet
T	: Termal yük
U	: Toplam deformasyon
W	: Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu
°	: Derece
~	: Yaklaşık olarak
α	: Termal genişleme katsayısı
ΔT	: Sıcaklık farkı olarak termal yük
σ	: Normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
ϵ	: Şekil değiştirme miktarı
δ_{PT}	: Termal yük sebebiyle Poliamid malzemede meydana gelen uzama miktarı
δ_{CrT}	: Termal yük sebebiyle Krom malzemede meydana gelen uzama miktarı
δ_{CrP}	: Bileşke kuvvete bağlı olarak krom malzemede meydana gelen ekstra uzama miktarı
δ_{PP}	: Bileşke kuvvet kaynaklı poliamid malzemede oluşan kısalma miktarı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Analizlerde kullanılan mühendislik verileri.	25
Çizelge 4.2 : Analitik Yöntem çözüm sonuçları.....	27
Çizelge 4.3 : Sonlu Elemanlar Yöntemi çözüm sonuçları.	30
Çizelge 4.4 : Termal yükün adımlara bağlı değişimi.....	32
Çizelge 4.5 : Kaplama katman kalınlıkları.	33
Çizelge 4.6 : Silindir çubuk modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları.	34
Çizelge 4.7 : Kiriş modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları.	37
Çizelge 4.8 : Halka modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları.....	41
Çizelge 4.9 : Tutamak modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları. ..	43

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Temel elektro-kaplama ünitesi şeması.	13
Şekil 2.2 : Tipik bir elektro-kaplama tesisinin akış şeması.	20
Şekil 3.1 : ANSYS Workbench kullanıcı ara yüzü.....	23
Şekil 4.1 : Analitik çözüm için kullanılan model.	25
Şekil 4.2 : Numune üzerindeki uzama miktarları.	26
Şekil 4.3 : Mesh işlemi sonrası analitik çözüm numunesi.....	29
Şekil 4.4 : Fixed Support ile tutulan yüzey.	29
Şekil 4.5 : Displacement ile sınırlanan yüzey.....	29
Şekil 4.6 : Sonlu elemanlar yöntemi ve analitik sonuçların zamana bağlı değişimi.	30
Şekil 4.7 : Bonded Contact ile birbirine ideal yapışık olarak bağlanan yüzeyler.....	31
Şekil 4.8 : Silindir çubuk geometrisi.	33
Şekil 4.9 : Silindir çubuk kenar ölçülendirme.	34
Şekil 4.10 : Kaplama katmanlarına uygulanan Face Meshing metodu.	34
Şekil 4.11 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu silindir çubuk model.....	35
Şekil 4.12 : 1 No.lu silindir çubuk model üzerinde Fixed Support ile tutulan yüzey.	35
Şekil 4.13 : Kiriş model geometrisi.	36
Şekil 4.14 : Mesh işlemi sonrası poliamid malzeme.	36
Şekil 4.15 : Kaplama katmanlarına uygulanan Face Meshing metodu.	36
Şekil 4.16 : Kaplama köşelerine uygulanan kenar ölçülendirme.	37
Şekil 4.17 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu kiriş model.....	37
Şekil 4.18 : 1 No.lu kiriş model üzerinde Fixed Support ile tutulan yüzey.....	38
Şekil 4.19 : Halka model tasarımı ilk adımı.	38
Şekil 4.20 : Üçüncü boyut kazandırılmış çeyrek halka model.	39
Şekil 4.21 : 15 mm radyus uygulanan köşe.	39
Şekil 4.22 : İç boşaltma işlemi için seçilen yüzeyler.....	39
Şekil 4.23 : 3 mm kalınlığa sahip içi boşaltılmış model.....	40
Şekil 4.24 : 0,5 mm radyus uygulanan köşeler.	40
Şekil 4.25 : Halka modelde öteleme işleminde hariç tutulan yüzeyler.....	40
Şekil 4.26 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu halka model.	41
Şekil 4.27 : Halka model üzerinde Z düzleminde sabitlenen yüzey.....	42
Şekil 4.28 : Displacement uygulanan kaplama katman kenarları (Üst).....	42
Şekil 4.29 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu tutamak model.	43
Şekil 4.30 : Tutamak model üzerinde Cylindrical Support ile sınırlandırılan yüzeyler.	43
Şekil 5.1 : 1 No.lu silindir çubuk modelde -40 °C, 0 °C ve 40 °C'lik termal yük altında krom katmanda oluşan Von Mises gerilmeleri.	47
Şekil 5.2 : Silindir çubuk model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu A noktası ve (b) deformasyonların okunduğu E noktası.	48

Şekil 5.3 : 4, 8 ve 11 No.lu silindir çubuk modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak A noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.	49
Şekil 5.4 : 4, 8 ve 11 No.lu silindir çubuk modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak E noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	49
Şekil 5.5 : 7, 8 ve 9 No.lu silindir çubuk modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak A noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.	50
Şekil 5.6 : 7, 8 ve 9 No.lu silindir çubuk modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak E noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	51
Şekil 5.7 : 6, 8 ve 10 No.lu silindir çubuk modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak A noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.	51
Şekil 5.8 : 6, 8 ve 10 No.lu silindir çubuk modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak E noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	52
Şekil 5.9 : Kiriş model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu B noktası ve (b) deformasyonların okunduğu F noktası.....	53
Şekil 5.10 : 4, 8 ve 11 No.lu kiriş modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak B noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.....	54
Şekil 5.11 : 4, 8 ve 11 No.lu kiriş modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak F noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	54
Şekil 5.12 : 7, 8 ve 9 No.lu kiriş modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak B noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.....	55
Şekil 5.13 : 7, 8 ve 9 No.lu kiriş modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak F noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	56
Şekil 5.14 : 6, 8 ve 10 No.lu kiriş modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak B noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.....	56
Şekil 5.15 : 6, 8 ve 10 No.lu kiriş modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak F noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	57
Şekil 5.16 : Halka model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu C noktası ve (b) deformasyonların okunduğu G noktası.	58
Şekil 5.17 : 4, 8 ve 11 No.lu halka modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak C noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.....	59
Şekil 5.18 : 4, 8 ve 11 No.lu halka modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak G noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	59
Şekil 5.19 : 7, 8 ve 9 No.lu halka modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak C noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.....	60
Şekil 5.20 : 7, 8 ve 9 No.lu halka modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak G noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.....	61
Şekil 5.21 : 6, 8 ve 10 No.lu halka modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak C noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.....	61
Şekil 5.22 : 6, 8 ve 10 No.lu halka modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak G noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	62
Şekil 5.23 : Tutamak model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu D noktası ((b) yaklaştırılmış) ve (c) deformasyonların okunduğu H noktası.....	63

Şekil 5.24 : 4, 8 ve 11 No.lu tutamak modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak D noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.	64
Şekil 5.25 : 4, 8 ve 11 No.lu tutamak modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak H noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	64
Şekil 5.26 : 7, 8 ve 9 No.lu tutamak modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak D noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.	65
Şekil 5.27 : 7, 8 ve 9 No.lu tutamak modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak H noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	66
Şekil 5.28 : 6, 8 ve 10 No.lu tutamak modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak D noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.	66
Şekil 5.29 : 6, 8 ve 10 No.lu tutamak modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak H noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.	67



KROM KAPLAMA YAPILMIŞ POLİAMİD MALZEMELERİN SICAKLIK YÜKÜ ALTINDAKİ GERİLME DAĞILIMLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde halen hızla devam etmekte olan teknolojinin de gelişimiyle birlikte pek çok farklı alanda ve mühendislik çalışmasında rekabet ön plana çıkmıştır. Söz konusu rekabet sadece ürün-hizmet sağlayıcılar arasında değil, üretilen ürünün malzemesi ve özellikleri arasında da oluşmaktadır. Buradan yola çıkarak aynı ürünün oluşturulması için her zaman daha iyi prosesler, daha iyi malzemeler kullanmak gerektiğini düşünebiliriz. Ancak daha iyi malzeme ya da daha iyi proses elde etmek için de sonsuz bir seçenek söz konusu olmadığından çoğu zaman mevcut olan malzeme üzerinde yapılan değişiklikler sayesinde daha az girdi vererek, çıktı olarak daha iyi özellikler almak mümkün olacaktır. Kaplama teknikleri buna örnek olarak gösterilebilir. Malzeme üzerine yapılacak kaplamalar ile ana malzemedan farklı özellik ya da boyutlara sahip yüzeyler elde edilir. Bu tür uygulamalar ile kaplama malzemesi ve kaplanan malzeme olmak üzere her iki malzemenin istenen özelliklerine sahip ürün oluşturulabilir.

Bu tez çalışması kapsamında plastik malzemeler üzerine yapılan metalik kaplamalar incelenmiştir. Metalik kaplamalarda katman kalınlığıyla ilişkili olarak termal yük altında termal genleşme sebebiyle oluşan gerilme dağılımları araştırılmıştır. Çalışmada silindir çubuk, kiriş, halka ve bu üç modele kıyasla daha karmaşık bir geometriye sahip olan tutamak isimli modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, ana malzeme poliamid olacak şekilde üzerine sırasıyla bakır, nikel ve kromdan oluşan katmanlar ilave edilerek elde edilmiştir. Poliamid ana malzeme katı elemanlarla modellenirken, kaplamalar için kabuk elemanlar kullanılmıştır. Her bir katmanın alt yüzeyle teması, ideal yapışık olarak varsayılmıştır. Modeller SolidWorks yazılımı ile oluşturulup termal yükün uygulandığı analizler, ANSYS Workbench yazılımı ile yapılmıştır.

Dört modelde her bir katmanın farklı kalınlık varyasyonları için farklı geometri ve analizler oluşturulup katman kalınlıklarındaki değişimin tüm katmanlar üzerindeki gerilmelere olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak sıcaklığın artışına karşın Von Mises gerilme grafikleri, her bir model için verilmiştir. Ayrıca sıcaklık artışından dolayı meydana gelen şekil değişiklikleri, grafik olarak sunulmuştur. Sonuç olarak katman kalınlığına bağlı değişen gerilme dağılımında etkisi en büyük olan katman, her bir model için belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kaplama kalınlığı arttıkça genel olarak gerilmeler düşmektedir. Ancak geometride köşe veya eğri şeklinde şekiller varsa gerilme yığılmalarının bu bölgelerde daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, ANSYS, krom kaplama, poliamid, plastik.

INVESTIGATION OF STRESS DISTRIBUTIONS OF CHROME COATED POLYAMIDE MATERIALS UNDER THERMAL LOADS USING FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

Competition has come to the forefront in many different fields and engineering studies with the development of the technology, which is still continuing today. This competition is not only between the product-service providers but also between the material and the properties of the products being produced. Starting from this point of view, we can assume that better processes and better materials can always be used to create the same product. However, there are no infinite options to choose better materials and better processes. Because of this assumption, most of the time it is being possible to gain more output with less input by the help of the changes made on existing material; hence, coating techniques are examples of this. With the coatings to be made on the materials, surfaces with different characteristics and/or dimensions can be obtained different from the main material. With such applications, the product with the desired properties of both materials, including the coating material and the coated material can be produced.

In this thesis, metallic coatings on plastic materials were examined. Stress distributions due to thermal expansion under thermal load in relation to layer thickness in metallic coatings were investigated. In the study, models were created with the names of roll bar, beam, circle and handle. The models were obtained by adding layers of copper, nickel and chromium, respectively, on the base material polyamide. Polyamide main material is modeled with solid elements while shell elements are used for coatings. The contact of each layer with the lower surface is assumed to be ideally adherent. 3D models has been created with SolidWorks software and the finite element analysis models has been created within ANSYS Workbench software where thermal loads has been applied.

In all models, different geometry and analyzes were made with different thickness variations of each layer and the effect of change in layer thickness on the stresses on all layers was investigated. Using the results obtained, Von Mises stress graphics are given for each model despite of the increase in temperature. In addition, the shape changes due to temperature increase are presented graphically. As a result, the layer having the greatest impact on varying stress distribution due to layer thickness is determined for each model. According to the results obtained, as the thickness of the coating increases, the stresses are generally reduced. However, if there are discontinuities in the shape like corners or curves in geometry, it is observed that the stress distributions are bigger in these regions.

Keywords: Finite Element Method, ANSYS, chromium plating, polyamide, plastic.

1. GİRİŞ

Plastiklere uygulanan elektro-kaplama yöntemi, 1960'ların başlarında düşük bir kabul edilebilirlik ile ticari olarak Amerika ve Avrupa'da kullanıma sunulmuştur. Bu sektörde çığır açan yenilik ise metal kaplama ile plastik yüzey arasında kuvvetli bağlar oluşmasına yardımcı olan kimyasal prosesler olmuştur.

Günümüzde kaplama teknolojileri gelişmiş ve yüksek verimli kaplama ürünleri elde etmek oldukça mümkün olmuştur fakat teknolojinin gelişimi sırasında endüstri pek çok zorluk ile karşı karşıya gelmiş ve bu sorunları aşmak için çaba sarf etmiştir. Bu süreçte aşılması en büyük zorluk, yalıtkan plastik malzeme üzerine iletken metal malzemeden oluşan ilk katmanın yerleştirilmesi olmuştur. Bu katman, geleneksel elektro-depozisyonun gerçekleştiği katman olmakla birlikte bu katmanın metal ile yapışma kabiliyeti, plastik malzeme üzerine verimli ve sağlam bir kaplama yapmanın kilit noktasıdır. Teknolojinin gelişmeye başladığı zamanlarda bu iletken katmanın plastik ile yapışma özelliği yeterince iyi değildi. İletken katman olarak grafit ya da gümüş esaslı boyalar kullanılmaktaydı. Bu malzemelerden oluşan kaplamalar, yüke maruz kaldığında ya da kimyasal ile temas ettiğinde bozulmaya uğruyordu. 1960'larda kromik asit bazlı kimyasalların geliştirilmesiyle plastik malzeme üzerinde daha efektif aşınma sağlanmış ve böylelikle plastik malzemenin metal ile yapışma özelliği muazzam şekilde gelişmiştir. Aynı zamanlarda krom ve nikel kaplamalarda da gelişmeler devam etmekteydi. Bu iki paralel gelişmeyle birlikte plastik malzeme üzerine metalin daha iyi yapıştığı, ekonomik ve büyük ölçekli üretim sağlayabilen kaplama prosesleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde uygulanan kaplama prosesleri bu tekniklere dayanmaktadır.

Genel olarak plastikleri elektro-kaplamaya hazırlama aşamaları üçe ayrılmaktadır:

- Plastiğin yüzeyini aşındırarak sonraki adımlarda kullanılacak kimyasallarla etkileşime geçecek hale getirmek,
- Aşınmış yüzeyi aktive edip iletken olmayan plastik malzeme üzerinde katalizör alan oluşturarak nikel ya da bakırın elektriksiz kaplanmasına hazır hale getirmek,

- Elektriksiz kaplama yöntemiyle ince bir bakır ya da nikel katmanının plastik malzeme üzerinde oluşmasını sağlayarak daha sonra uygulanacak katmanlar için iletken bir taban katman meydana getirmek olarak sıralanabilir.

İletken katman oluşturulduktan sonra malzeme daha sonraki katmanların elektro-kaplama yöntemiyle uygulanmasına hazırlanmış olur. Nikel, çoğu kaplama modelinde uygulanmakta ve bakır katmanı da beraberinde gelmektedir. Nikel kullanımının ana sebepleri: İyi korozyon dayanımı ve parlak metalik görünümüdür.

Plastik üzerine metal kaplama prosesinin kendine yer bulduğu en önemli uygulama alanlarının başında otomotiv endüstrisi gelmektedir. Zararlı atık miktarı ve dolayısıyla yakıt tüketiminde tasarrufa gitme trendi; sektörü, araçların hafifletilmesi ile ilgili çalışmaya yönlendirmiştir. Bu noktada otomotiv endüstrisi, plastiklerin hafif, dayanıklı ve kolay üretilebilir olma özelliklerini göz önünde bulundurarak araç parçalarını metal yerine plastik malzemeyle üretme yoluna girmiştir. Plastik malzemelerden üretilen parçaların, metalin görüntüsüne ve özelliklerine sahip olması için ise kaplama yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Bu yöntemle üretilen radyatör ızgaraları, ayna çerçeveleri, aydınlatma muhafazaları, amblemler ve araç iç ve dış trim aksesuarlarında kullanılan yansımalı parlak yüzeyler araçlarda kullanılmaktadır.

Kaplama teknolojisinin kullanım alanı, en yaygın olduğu alan olmasına rağmen otomotiv sektörü ile sınırlı kalmayıp farklı uygulama alanı ve pazarlara yayılmıştır. Havacılık, denizcilik, uzay, elektronik, su tesisatı ürünleri, banyo ve mutfak aksesuarları, elektronik devre elemanları, kişisel bakım ürünleri, tekstil sektöründe kullanılan düğme ve benzeri aksesuarlar, kozmetik sektöründe kullanılan parfüm şişesi kapağı ya da amblemleri ve mobilyalar üzerinde kullanılan dekoratif parçalar bu ürün ve alanlara örnek olarak gösterilebilir.

1.1 Literatür Özeti

Plastik malzeme üzerine elektro-kaplama yöntemiyle metalik kaplama uygulamalarının geçmişi 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Bu yöntem genel olarak plastik malzemenin hafifliğini, kolay şekillendirilme ve kolay üretilebilirlik yeteneğini, metalin dayanım ve görsel özellikleriyle birleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Elektro-kaplama teknolojisi, hala gelişmekte olan ve gelecek vadeden bir teknoloji olarak görülmektedir. Geçmişten bu yana proses mantığı genel

olarak aynı kalırken proste kullanılan adımlardan bazılarının ve yine proste kullanılan malzemelerin bir kısmının zamanla değiştiği ve geliştiği görölmektedir. Bu değişimde teknolojinin gelişimi, istek ve beklentilerin farklılaşması, kullanım, çevre ve sağlık şartları gibi faktörler etkili olmuştur. Bu bölümde elektro-kaplama prosesiyle ilgili literatürdeki mevcut çalışmalara değinilecektir.

Uygun şekilde kaplanmış olan ürünler, parçanın ağırlığında hafifletici etkiye sahiptir. Kaliteli kaplamalar, daha dayanıklı parçaların daha ucuza üretilebilmesini sağlar. Krom elektro-kaplama ile ürüne kazandırılan parlak krom görüntüsü çekicidir ve müşteri talebini olumlu yönde etkilemektedir.

Douglas A. Thompson'ın 1979 yılında yaptığı çalışmada, uygun kaplama koşulları sağlanarak kaplama deneyleri yapılmış; kaplama ortamındaki sıcaklık ve nem oranının, kaplanmış final ürününün dayanımı üzerinde çok büyük etkilere sahip olmadığı görölmüştür [1].

M. M. Amin ve arkadaşlarının 2002 yılında yaptığı çalışma kapsamında nikel tuzları kullanılarak elektro-kaplama uygulaması gerçekteştirilmiştir. Dökme nikel anotlar kullanılarak kaplanan ürünler, normal şartlarda oldukça iyi korozyon dayanımı göstermişlerdir. Ayrıca parlatici kullanılmadığı halde oldukça iyi bir görüntü sergilemişlerdir.

Akım yoğunluğuna bağlı olarak ağırlık miktarındaki değişimler göstermiştir ki anot malzemedeki ağırlık kaybı ile katot malzeme üzerinde oluşan kaplamanın ağırlığı, kaplama süresi ve akım yoğunluğuyla orantılıdır. Sıcaklık ise elektrotlardaki ağırlık değişiminde büyük bir etkiye sahip değildir. Elektro-kaplama süresi uzadıka anotlarda daha fazla ağırlık kaybı ve dolayısıyla katotlarda daha fazla ağırlık kazanımı olduğu sonucu elde edilmiştir. Sıcaklıktaki değişimin bu ağırlık değişimine direkt etkisinin olduğunu gösteren gözle görölür bir sonuç elde edilmemiştir. Fakat 30 °C ve 40 °C gibi düşük sıcaklıklarda kaplanmış ürünlerin mat bir görünüme, 50 °C ve 70 °C sıcaklıkta kaplanan ürünlerin ise parlak bir görünüme sahip olduğu görölmüştür. 100 °C gibi daha yüksek sıcaklıklarda ise ürünlerdeki kaplama, daha yapışkan ve kahverengimsi bir görünüme sahip olurken korozyon dayanımı özelliğini hala koruduğu görölmüştür [2].

Krom elektro-kaplamalar, otomotiv sektöründe araçlarda fark yaratmak ve değer katmak adına uzun süreli bir geleceğe sahiptir. Bu tür kaplamalar, yüksek korozyon

ve darbe dayanımı, nispeten düşük uygulama maliyetleri ile çoğu tasarım mühendisinin tercihi haline gelmiştir. Krom trioksitli elektrolit bazlı dekoratif krom kaplama, yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Oluşan katman; estetik, dayanım ve ekonomik özellikler gibi pek çok talebi karşılamaktadır. Fakat krom trioksit kanserojen bir madde olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca PFOS (Perflorooktan Sülfonik Asit (proseste duman önleyici olarak kullanılır)) biyobirikimlidir.

Alan Gardner'in 2008 yılında yaptığı çalışmayla bu sorunları önleyen ve talep edilen yüksek performans standartlarını karşılayabilen trivalent krom sülfat tuzu bazlı ve PFOS içermeyen bir sistem oluşturulmuştur. Üretim deneyimi, bu yeni sistemin en zorlu otomotiv krom kaplama uygulamalarını bile karşılayabildiğini kanıtlamıştır.

Bu çalışmada kaplamacıların bu alternatif teknolojiye yönelmesini gerektiren konular ortaya koyulmuş ve tedarik zinciri ortaklarının neden bu konuların farkında olması gerektiği belirtilerek bu yeni teknolojinin neden geleneksel krom kaplama yöntemine alternatif olabileceği açıklanmıştır.

İleri görüşlü firmalar, trivalent elektrolitli krom kaplama olarak adlandırılan alternatifler için test üretimi yapmaktadır. Proseste yapılacak herhangi bir büyük değişiklikte müşteriler, kaplamacılar ve endüstri dahilindeki tüm organizasyonlar dahil ilgili tarafların tamamı teknoloji değişiminde hemfikir olmalı ve bunu onaylamalıdır.

Çalışmada trivalent krom sülfat bazlı yeni bir elektrolit içeren potansiyel bir alternatif önerilmiştir. Yapılan testlerde heksavalent ve trivalent bazlı malzeme kullanılan elektro-kaplama sonucu üretilen ürünler arasında hiçbir fark gözlenmemiştir [3].

Licia Barchi ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptığı çalışmada, metal malzemeler üzerine korozyon önleyici olarak elektro-kaplama yöntemiyle uygulanmış alüminyum kaplamalar incelenmiştir.

Çalışmanın amacı, korozyon önleyici ve dekoratif amaçlarla uygulanan geleneksel nikel-krom kaplamalara toksik olmayan bir alternatif sunmaktır. Alüminyum, 1,10-fenantrolin eklenerek ve eklenmeden kloroaluminat bazlı iyonik sıvılarda karbonlu çelik malzeme üzerine elektro kaplanmıştır.

Sonuç olarak ilk durumda alüminyum kaplama yoğun fakat mat bir şekilde oluşurken; ikinci durumda, dekoratif uygulamalar için uygun, homojen ve parlak bir katman elde edilmiştir.

Mat ve parlak alüminyum ile kaplanmış malzemelerin özellikleri elektrokimyasal teknikler ve korozyon testleri uygulanarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda alüminyum kaplamanın, daha az tatmin edici olmasına rağmen neredeyse krom-nikel kaplama ile aynı seviyede nem kaynaklı korozyon dayanımını sağladığı ve bunu gerçekleştirirken zararlı metallere tamamen arındırılmış bir prostesten geçtiği görülmüştür. Bu sonuç sınırlı testler ardından elde edilmiştir. İleride farklı yükler ve asit ya da benzeri farklı korozif malzemeler kullanılarak yapılabilecek çalışmalar için kaplamanın özelliklerinin ve davranışının detaylıca incelenmesi gerekmektedir [4].

Elektro-kaplamalar, korozyona dayanıklı ve dekoratif ürünlerin oluşturulması gibi pek çok büyük ölçekli endüstriyel uygulamada büyük öneme sahip kilit teknolojidir. Reaktiflerin toksitesisi ve düşük akım verimi gibi mevcut prosesler ile ilgili sorunlar genellikle iyonik sıvılar kullanılarak aşılabilmektedir. Bu yaklaşım iyonometalurjiyi hızlı büyüyen bir araştırma alanına dönüştürmüştür.

Andrew P. Abbott ve arkadaşları tarafından 2013 yılında gerçekleştirilmiş olan çalışmada, elektro-kaplama prosesinde avantajlı özellikler sağlayan iyonik sıvıların etkileşimi incelenmiştir.

Çalışmada iyonik sıvıların, nano boyutta kaplamaların elde edilmesini kolaylaştırdığı görülmüştür. Ayrıca iyonik sıvılar, tam olarak çevreci olmasa da bileşenlerin doğru seçimiyle daha sürdürülebilir kaplama sistemleri sağlama potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir [5].

ABS (Akrilonitril-Butadien-Stiren), akrilonitril-stiren matrisi üzerinde homojen olarak dağılmış bütadien kısımdan oluşan bir mühendislik plastiğidir. İyi boyutsal kararlılık, tokluk, kolay işleme yeteneği, kimyasal direnç ve ucuzluk gibi özelliklere sahiptir. Fakat mekanik dayanım ve çevre koşullarına karşı hassasiyet gibi bazı doğal eksikliklerden mustarıdır. Dahası, iletken değildir ve kolayca yıpranır. ABS üzerine kaplama, mukavemeti, termal dayanımı ve yapısal bütünlüğü artırma yönünde hizmet edebilir. ABS, kaplamalar için en uygun malzeme olarak gösterilmektedir.

Bunun sebebi; hiçbir mekanik aşındırma gerektirmeden, tek bir kimyasal aşındırıcı kullanılarak üzerinde kaplama katmanı oluşturmanın mümkün olmasıdır.

Sharon Olivera ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı çalışmada ABS plastiklerinin tarihi, kaplama proses ve mekanizmaları ve son yıllarda literatürde yapılan başlıca çalışmalardan çevre dostu olan metotların incelenmesi yapılmıştır.

Plastik elektro-kaplama, yeni malzemeler için tipik bir işleme teknolojisidir. Metal parçalarla kıyaslandığında metal kaplamalı plastik parçalar sadece metal bir yüzey sağlamakla kalmaz. Ürünün ağırlığını düşürür; elektrik, ısı, korozyon ve benzeri uygulamalarda daha iyi performans vermesini sağlar. Yüzeyin mekanik dayanımını etkin bir şekilde iyileştirir, görünüm ve dekoratif gereksinimleri karşılar.

Kaplama işlem akışı; malzeme özellikleri, mekanik özellikler, malzeme maliyeti, kaplama maliyeti ve boyutsal doğruluk gibi faktörlere bağlı olarak seçilmelidir. Yüzey kaplamada alanında önemli bir yere sahip olan plastik kaplama, endüstrinin hızlı gelişimiyle birlikte hızla yayılmaya devam eden kullanım alanlarına sahip olmuştur. Polipropilen, polisülfon, polikarbonat, naylon, fenolik cam elyaf takviyeli plastik ve polistiren genellikle kaplanmış olmasına rağmen ABS'nin elektro-kaplama amacıyla en çok kullanılan plastik olduğu görülmüştür.

Bu çalışma göstermiştir ki ABS malzeme üzerine kaplama mekanik yapışmayı arttırmakta, estetik görünüm kazandırmakta ve numuneye korozyon direnci sağlamaktadır. Kaplama işlemindeki en önemli gelişme ise geleneksel yüzey iyileştirme yöntemlerinin çevre dostu süreçlerle değiştirilmesi olarak gösterilmiştir [6].

Sert krom elektro-kaplamaların endüstriyel ve dekoratif amaçlarla kullanımı oldukça yaygındır. Fakat uygulamayı kısıtlayan mikro-çatlaklar gibi bazı problemler oluşabilmektedir. Bu durum korozif ajanların ana malzemeye ulaşana kadar katmanlar arasında ilerlemesine sebep olan yolların oluşmasına sebep olabilmektedir. Plazma nitrüleme işlemi bu tür problemlerin önlenmesinde etkilidir.

Shayan Hossein Sarraf ve arkadaşları 2016 yılında bu konuyla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada, çatlaklara etki eden zaman ve sıcaklık gibi plazma nitrüleme işlemi parametreleri incelenmiştir.

Sert krom kaplamalı sıcak iş takım çeliğinden oluşan test numuneleri, geleneksel plazma nitrüleme metodu (CPN) ve aktif eleme plazma metoduyla (ASPN) sırasıyla

500 °C ve 550 °C'de 5 saat ve 10 saat, 550 °C ve 600 °C'de 10 saat ve 15 saat süreyle ısıtılma maruz bırakılmıştır. Numunelerin morfolojisi ve mikro-yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleme sistemi ile karakterize edilmiştir. Test numunelerinin korozyon özellikleri anodik polarizasyon testleri ile incelenmiştir.

Test sonuçları her iki yöntemle (CPN ve ASPN) çatlakların iyileştirildiğini göstermiştir. CPN yönteminde, kromun krom nitritlere dönüşerek hacimsel büyüme yapması sonucu çatlaklar ortadan kalkmıştır. Bu durum ASPN yöntemine göre daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürelerde gerçekleşmiştir. ASPN yönteminde ise aktif yüzeyden ayrılan demir nitrürlerin, çatlak bölgeyi doldurarak ortadan kaldırdığı görülmüştür. Ayrıca CPN yöntemiyle elde edilen numunelerin, ASPN yöntemiyle elde edilen numunelerden çok daha üstün bir korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür. Nitritleme sonucu sert krom kaplamanın korozyon dayanımında büyük bir iyileşme görülmüştür [7].

Krom kaplamalar, dekoratif ya da korozyon dayanımlı kaplamalar olarak kullanılabilir. Fakat tribolojik özellikler konusunda zayıftır. Sert krom elektro-kaplamaları bile bazı problemlere sahip olabilir. İçerdikleri mikro çatlaklar, korozyon dayanımlarını azaltır ve yorulma kaynaklı hatalara sebep olabilir. Ayrıca krom kaplama ve kaplama prosesini tehlikeli hale getirebilen hegzavalent krom bazlı banyolar bazı ülkelerde yasaklanmıştır.

Yüzey özelliklerini geliştirmek için yüksek sıcaklık oksidasyonu, kimyasal banyolar veya iyon implantasyonu gibi fiziksel ya da kimyasal kaplama sonrası işlemler uygulanabilir.

C.B. Mello ve arkadaşları 2017 yılında bir çalışma gerçekleştirmiş ve bu çalışmada PVD (Physical Vapor Deposition) krom kaplamaları üzerine plazma daldırma iyon implantasyonu işlemi uygulanarak krom kaplama yüzeyine nitrojen iyonları yerleştirmiştir. İyon implantasyonu için iki farklı plazma kaynağı kullanılmıştır. Her iki konfigürasyonda da kaplama yüzeyinde nitrit bileşenleri oluşturulmuştur. Bu işleme maruz kalan kaplamalar, işlem görmemiş kaplamalar ile kıyaslandığında daha düşük sürtünme katsayısı, daha iyi yüzey sertliği ve daha iyi yapışma sergilemiştir. Plazmanın yoğun olduğu katotta nitrit oluşumunun daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Fakat yüzeye uygulanan yoğun implantasyon işleminin, kaplama kalınlığının azalmasına sebep olduğu görülmüştür [8].

Edinéia P. S. Schmitz ve arkadaşları tarafından 2016 yılında tamamlanan çalışma ile ticari elektrolit katkı maddelerinin nikel elektro-kaplama özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Karbon çeliği parçaları elektro-kaplama yöntemiyle kaplanmıştır. Farklı katkı maddeleri ile değişken sürelerde kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunlarla ilişkili olan üç değişken incelenmiştir: Parlaklık, pürüzlülük ve yük aktarma direnci. İncelenen faktörler arasındaki etkileşimler araştırılmıştır.

Çalışmada nikel kaplama endüstrisinde sıklıkla kullanılan üç katkı maddesi üzerinde çalışılmıştır. Katkı maddeleri kullanılarak kaplama şartlarının değiştirilebileceği ve bu sayede daha iyi kaplamalar elde edilebileceği görülmüştür. Yapılacak bu değişikliklerle enerji verimi daha iyi ve üretim maliyeti daha düşük kaplamaların yapılabileceği belirtilmiştir [9].

Paslanmaz çelik ya da krom elektro-kaplamalı metallerin yüzeylerine uygulanacak ince kaplamalar ile görünümünde değişiklik sağlanabilir, renkleri değiştirilebilir.

L. Milschi ve arkadaşlarının 2018 yılında tamamladığı çalışmada titanyum karbonitrit kaplamalarının renk değişimi incelenmiştir. İşlem 125 °C sıcaklıkta dekoratif amaçlı kaplama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Örnekler; X ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskopu, ışımaya duyarlı optik emisyon spektroskopisi, nano sertlik, nano çizik testi ve kolorimetrik analiz ile analiz edilmiştir.

Karbon ilavesiyle birlikte rengin sarı altın renginden; açık bronz rene hafifçe değiştiği görülmüştür. Çizik testi sonunda, karbon içeriğinin artmasıyla birlikte plastik deformasyon ve katmanlara ayrılma yükünün de arttığı görülmüştür. Karbon ilavesiyle birlikte hata modu, gevrek/sünek moddan sünek moda değişim göstermiştir. En çok karbon içeren ince kaplamaların en düşük sertliği gösterdiği görülmüştür. Daha düşük sertlik daha yüksek süneklığe sebebiyet vermekle birlikte karbon içeriği arttıkça çizilme direncinin ve delaminasyonun da arttığı görülmüştür [10].

T. I. Devyatkina ve arkadaşları tarafından 2017 yılında gerçekleştirilen çalışmada çeşitli alüminyum alaşımları üzerine nikel kaplamak için yeni bir teknik geliştirilmiştir. Bu kaplama, hem tek başına hem de çok katmanlı kaplamalar altında

bir alt katman olarak (özellikle nikel, kalay-bizmut, parlak nikel ve parlak kromun altında) kullanılabilir. (11)

Çalışmada uygulanan teknik; anodizasyon, kimyasal işlem ve nikelin özel solüsyon içinde elektrikli bırakımı adımlarından oluşmaktadır. Elektrolit çalışma modları seçilmiş ve kimyasal önışlemin gerekli olduğu belirlenmiştir. Nikel katman için asitli elektrolitin bileşimi, tampon malzeme ve iyileştirici katkı maddeleri ile geliştirilmiştir.

Bu yöntemle oluşturulan elektrolize nikel kaplamalar, ilave ısıl işlem yapılmadan alüminyum malzeme üzerinde yüksek bir yapışma sergilemiştir. Bu sayede çok katmanlı kaplamalar için sadece işlem süresi kısaltmakla kalmamış aynı zamanda süreç tamamen otomatikleştirilmiştir.

Alüminyum alaşımlarının kaplama aşamalarına hazırlanması için bir yöntem önerilmiştir. Alüminyum malzeme üzerine nikel kaplama uygulaması için elektrolit ve bu elektrolitin optimum bileşimi ile çalışma modları belirlenmiştir.

Anodize edilmiş alüminyum malzeme üzerine uygulanan nikel kaplamanın iyi yapışma sergilediği pek çok farklı yöntem ile doğrulanmıştır. Elde edilen nikel kaplamanın morfolojik incelemesi gerçekleştirilmiştir [11].

P. C. Crouch ve A. C. Hart tarafından 2017 yılında yapılan çalışmalarda, yumuşak çelik üzerine kaplanmış çeşitli nikel-krom ve bakır-nikel-krom kaplama sistemleri için atmosferik korozyon testleri dört yıl kadar bir süre boyunca Birmingham'da uygulanmıştır. Üç farklı sistemin performansı incelenmiştir:

- Mikro-çatlak ve mikro-gözenekli krom katmanlı, tek katman parlak nikel kaplama (bakır alt katman bulunduran ve bakır alt katman bulundurmeyen varyasyonlarla),
- Mikro-çatlak ve mikro-gözenekli krom katmanlı, çift katman nikel kaplama (bakır alt katman bulunduran ve bakır alt katman bulundurmeyen varyasyonlarla),
- Geleneksel krom katmanlı, çift katman nikel kaplama (bakır alt katman bulunduran ve bakır alt katman bulundurmeyen varyasyonlarla).

Farklı katman kalınlıklarına sahip tek katmanlı parlak nikel kaplama ve çift katmanlı nikel kaplamalar, iki farklı bakır alt katman kalınlığına sahip sistemlerle incelenmiştir.

Yapılan çalışmayla görülmüştür ki bakır alt katman, nikel kaplamanın korozyon direncini arttırıcı etkide bulunmamıştır. Hatta çok ince nikel kaplama bulunan sistemlerde bakır katman zararlı bir etkide bile bulunabilmektedir. Nikel katman kalınlığı, geleneksel yöntemlerle elde edilen değer aralığında olduğu takdirde (~30mikrometre) kalın bir bakır alt katman (~20mikrometre) ilavesi ile korozyon direncinde iyileşme olduğu görülmüştür [12].

Bakır-Nikel-Krom kaplama sistemleri, korozyon dayanımı ve dekoratif özellikler konusunda teknolojideki ilerlemeyle birlikte gerekli teknik ve ekonomik norm ve göstergeleri kapsayan ürünlere yol açmıştır. Fakat her bir katmana ya da tüm kaplama sistemine ait elastik ve plastik özellikler gibi çeşitli mekanik özellikler hakkındaki bilgi hala oldukça kısıtlıdır.

Maria Datcheva ve arkadaşlarının 2018 yılında bu konuyla ilgili olarak yaptığı çalışmanın amacı; morfoloji, yapı, doku ve bileşim gibi özellikleri önceden belirlenen standart Bakır-Nikel-Krom kaplama sistemlerinin, mekanik özelliklerinin nano-iz deney yöntemiyle elde edilmesidir. Katmanlardan oluşan kaplamaya, dikey yönde ve kesme düzlemi boyunca yanal yönde nano iz testleri uygulanmıştır. Katmanların mekanik özelliklerindeki değişim, hem katmanlar arasında hem de katmanlar ile ana malzeme arasında derinlik ve katman düzlemi boyunca incelenmiştir.

Testler, dekoratif Bakır-Nikel-Krom elektro-kaplama uygulanmış çelik levha üzerinde gerçekleştirilmiştir. Levha kesilerek çok katmanlı sisteme enine düzlemde nano-iz testleri uygulanmıştır. Dört farklı deney programı kullanılarak bir dizi nano iz testi gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı kaplamayı oluşturan her bir katmanın girinti modülü ve sertliğini hesaplamak için girinti verileri kullanılmıştır. Krom katmanının, ortalama nano-sertlik değerinin diğer iki katmana kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Krom ve nikel katmanların girinti modülü değerleri birbirine yakinken bakır katman için bu değer neredeyse yarı yarıya daha küçük olduğu görülmüştür [13].

Elektro-kaplama prosesleri, teknolojik uygulamalardan dekoratif uygulamalara kadar endüstrinin pek çok farklı kısmına yayılmış geniş bir uygulama alanına sahiptir. Galvanik kaplamalar çoktan olgunlaşmış bir teknoloji olmasına rağmen yeni uygulamalara, yeni konseptlere, çevre mevzuatlarına ve yeni malzeme özelliklerine bağlı olarak bu alandaki çalışmalar hala aktiftir.

Walter Giurlani ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı çalışmalar, daha çok dekoratif kaplamalara odaklanarak geçmişten gelen bilgi ile prosesin geleceği arasında bir köprü kurmak amacıyla hazırlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, akademik ve uygulama alanlarıyla kaplama ile ilgili çalışmaların oldukça aktif olduğu görülmüştür.

Odaklanılan noktalardan bazılarının

- Kaplamada iyi korozyon direnci korunurken, altın ve benzeri değerli metallerin kullanım miktarının azaltılmaya çalışılması,
- Proses dahilinde kullanılan toksik kimyasalların toksik olmayan alternatifleri ile değiştirilmesi,
- Kullanılan ağır metallerin azaltılması, proses sebebiyle oluşan atıkların azaltılması, yeni proses ve malzeme grupları için çalışmaların yapılması

gibi konular olduğu görülmüştür. Her alanda olduğu gibi elektro-kaplama teknolojileri alanının da ucu açık, gelişime ve yeniliğe açık yönlere sahip bir teknoloji olduğu belirtilmiştir [14].

1.2 Tezin Amacı

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda, elektro-kaplama konusuyla ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalarda genel olarak; elektro-kaplama prosesi, proseste kullanılan bileşenler, kaplamanın korozyon direnci, elektro-kaplamanın görsel özellikleri, prosesin toksikolojisi, toksik olmayan elektrolit alternatiflerinin değerlendirilmesi, proseste kullanılan ağır metallerin azaltılması, ortam şartlarının prosese etkisi gibi konuların incelendiği görülmüştür.

Genel olarak elektro-kaplama prosesiyle ilgili çalışmalar barındıran literatürde; elektro-kaplamalı ürünlerin yükleme altındaki davranışı, kaplamayı oluşturan katman kalınlığının sıcaklık yüküne maruz kalan ürünün dayanımına etkisi ya da gerekli yükleme koşulları altında kaplamayı oluşturan katmanların kalınlıklarının

belirlenmesi gibi konularla ilgili çalışmalarla karşılaşılmamıştır. Bu tez çalışması, literatürdeki bu açığa katkı sağlamak ve benzer konularla ilgili gelecekte yapılacak çalışmalara fikir vermesi amacıyla yapılmıştır.

Çalışma dahilindeki analizler, sonlu elemanlar yöntemiyle sanal olarak gerçekleştirildiğinden kaplama katmanları için pek çok farklı kalınlık kombinasyonu, yapılabilecek pratik çalışmalara oranla çok daha kısa sürede incelenmiştir.



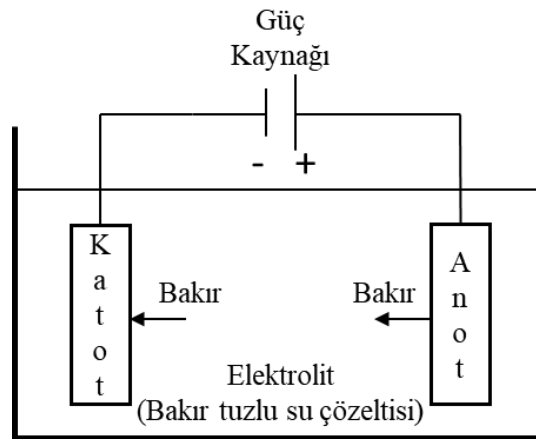
2. PLASTİK KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ

Bu bölümde, plastik malzemeler üzerine uygulanan metalik kaplama teknolojileri hakkında genel bilgi verilecektir. Metalik kaplama proseslerinin adımları, gereklilikleri ve uygulama alanlarına göre metalik kaplama türlerinden bahsedilecektir.

Elektro-kaplama yönteminde kilit nokta kaplama ünitesidir. Kaplama ünitesi; anot, katot ve akımın geçtiği banyo olan elektrolitten oluşmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda genel olarak ön işlemler ve son işlemler de uygulanır.

Şekil 2.1’de temel elektro-kaplama ünitesi şeması verilmiştir. Bu düzenekte kaplanacak parça katottur. Anot ise kaplama malzemesi olup iki türde olabilir: Kalıcı anot ya da zamanla malzemesinden kaybeden anot. Zamanla malzemesinden kaybeden anotlar, metal malzemeler olup ana malzeme üzerindeki yeni katmanları oluştururlar. Kalıcı anotlar, devredeki elektrik akışını tamamlama görevinde kullanılırlar. Yeni bir metal yüzey oluşturmazlar [15].

Kaplama işleminin gerçekleşmesi için güç kaynağı ile sisteme elektrik akımı verilir. Akım dolaşımı sebebiyle kaplama ünitesi içerisindeki anot malzemedan parçacıklar kopartarak katot parçaya yapışır, böylece kaplama katman ve/veya katmanları oluşur [16].



Şekil 2.1 : Temel elektro-kaplama ünitesi şeması.

Kaplama işlemi başlamadan önce kaplama için kullanılacak malzemeler temizlenmelidir. Kaplanacak malzeme yüzeyindeki toz, kir, yağ ve benzeri kirlilik unsurları kaplama işlemi sırasında gerçekleşen yapışma işinin yeterince etkili bir şekilde yapılmamasına sebep olur. Kaplama işlemi gerçekleşse bile katmanlar iyi yapışmayacağından soyulma ve dökülme gibi istenmeyen sonuçlara sebebiyet verir.

Proses süresi, kaplama ünitesinden geçen akım ve kullanılan elektrolit çözeltiye bağlıdır. Anot malzeme bazlı elektrolit içerisindeki çözelti oranı ve devreden geçen akımın artmasıyla birlikte proses hızı da artar.

Plastiklerde kaplama yapılırken başlangıçta plastik malzeme, elektrik iletkenliği özelliğine sahip olmadığı için ön işlem uygulanır. Plastik yüzeyi temizlenir. Metalin yapışmasını sağlamak için yüzey aşındırılır. Aşındırılmış yüzeyli plastik parça, ilk katman olan metal malzemeye daldırılır. Böylece plastik malzeme üzerinde metal bir katman oluşur ve ön işlem öncesi elektrik iletkenliği özelliğine sahip olmayan malzemeye elektrik iletkenliği özelliği kazandırılmış olur. Elektrik iletkenliği özelliği kazanmış malzemeye, elektro-kaplama ünitesinde gerçekleşen elektro-kaplama işlemi uygulanır [17].

Kaplama işlemi, kaplanacak yüzeyin kaplama prosesine hazırlanması ile başlar.

2.1 Yüzey Hazırlama

Kaplanacak parçaların yüzeyleri pek çok farklı ön işleme maruz kalabilir. Bu işlemler yüzey temizleme, yüzey modifikasyonu ve durulama olarak sıralanabilir [3,15].

Yüzey ön işlemlerinin uygulama amacı malzeme yüzeylerindeki yağ ve toz benzeri kirliliklerden kurtulmaktır. Bu kirlilikler önceki işlem adımlarından gelen kirlilikler ya da sitemde oksitlenme benzeri sebepler ile oluşan kirlilikler olabileceği gibi dış çevreden gelen sistem dışı kirlilikler de olabilir. Bu istenmeyen unsurlar, malzemeler arası bağlanmaya olumsuz etkide bulunabilir ki bu durum yetersiz yapışmaya hatta bağlanmayı tamamen önleyerek hiç yapışma olmamasına ve kaplama katmanlarının oluşmamasına sebep olabilir. Bu sebeple yüzey ön işlemleri, kaliteli kaplamaların oluşturulması açısından oldukça önemlidir.

Çoğu malzeme için yüzey işleme işlemleri üç temel aşamadan oluşur: Yüzey temizleme, yüzey modifikasyonu ve durulama [15].

2.1.1 Yüzey temizleme

Yüzey temizleme işlemleri kir, toz ve döküntü gibi kirlilikleri temizlerken malzeme yüzeyine zarar vermemeli ya da bu zararı minimum seviyede tutmalıdır. Temizleme işlemi, kimyasal temizleme ya da mekanik temizleme olarak iki şekilde yapılabilir.

2.1.1.1 Kimyasal temizleme

Kimyasal yöntemler genellikle solvent yağ alma, alkalimli temizleme ve asitli temizleme gibi yöntemlerden oluşur.

Solvent yağ alma: Kirleticiler çeşitli türde yağ ve yağ benzeri organik maddelerden içerebilir. Bu kirleticiler uygun solventler kullanılarak temizlenebilir. Temizleme işlemi malzemeyi solvante daldırarak ya da buhara maruz bırakarak gerçekleştirilebilir.

Alkalimli temizleme: Malzemeler kir ve tozdan arındırılmak için sıcak alkali tanklarına daldırılır. Alkalimli temizlemenin özel bir türü elektro-temizlemedir. Elektro-temizlemede iş parçası bir anot ya da katot olarak kullanılabilir. Elektro-temizleme iş parçasının yüzeyindeki gaz oluşumunun neden olduğu mekanik etkiyi temizleyici kimyasal etkisine ekler.

Asitli temizleme: Asitli temizleme ağır türde, ısıl türde ya da oksit ve benzeri türdeki kirlilikleri temizlemekte kullanılır. En sık kullanılan asit türleri sülfirik asit ve hidroklorik asitlerdir. Akım kullanılarak daha etkili hale getirilebilir.

2.1.1.2 Mekanik temizleme

Mekanik temizleme yöntemleri parlatma ve varyasyonlarından oluşur. Burada söz konusu parlatma, malzemeyi aşındırıcı parçacıklardan arındırmaktır. Önceki adımlardan kalan ya da iş parçasıyla birlikte gelen ve kusur olarak görülen istenmeyen parçacıklardan ve kirleticilerden kurtulma işlemidir. Malzeme yüzeyi ince işlenir, temizlenir ve kusurlardan ve kirleticilerden arınmış; pürüzsüz ve parlak yeni bir yüzey oluşturulur.

2.1.2 Yüzey modifikasyonu

Yüzey modifikasyonu, malzeme yüzeylerindeki metal tabaka ya da tabakaların uygulama şekilleri ve sertliği gibi özelliklerinde yapılan değişiklikleri içerir.

2.1.3 Durulama

Islak, solüsyonlu işlem adımı bulunan kaplama süreci boyunca malzemeler; işleme sıvılarının birinden bir diğerine aktarılırken ya da son adımdaki solüsyondan çıkarıldığında üzerinde ilgili işlem adımından gelen bir miktar sıvı bulundurabilir.

Kaplama süreci için çoğu durumda iş parçası bir sonraki adıma girmeden ya da son adımdaki solüsyondan çıktıktan sonra bu sıvıdan arındırılması gerekmektedir. Bu arındırma durulama işlemiyle yapılır.

2.2 Elektrolitik Metal Bırakımı

Elektrolitik metal bırakımı yöntemleri; doğru akımlı elektro-bırakım, atımlı kaplama ve lazerli metal bırakım olmak üzere üçe ayrılır.

2.2.1 Doğru akımlı elektro-bırakım

Doğru akımlı elektro-bırakım, devrede güç kaynağı olarak doğru akım ünitesi ya da alternatif akımı doğru akıma çeviren bir dönüştürücüye sahip bırakım türüdür. Elektro-kaplama bir kaplama ünitesi içerisinde gerçekleşir. Ünite içindeki elektrolite daldırılmış elektrotlar doğru akım kaynağına bağlıdır. Ünite içerisindeki kaplanacak olan parça negatif yüklü katot olarak görev yapar. Pozitif yüklenmiş anot ya da anotlar devrenin tamamlanmasını sağlar. Devrede akımla birlikte elektronlar güç kaynağından katoda (kaplanacak parçaya) doğru taşınır.

Kaplanacak parçanın geometrik şekli ve dış hatları oluşacak katmanların kalınlığına doğrudan etki eder.

Genel olarak kaplanacak iş parçasının dış köşelerinde daha kalın kaplama katmanları oluşurken girintili bölgelerde daha ince katmanlar oluşur. Bunun sebebi, akımın uniform olmaması ve keskin köşelere daha yoğun akmasıdır. Bu tür kalınlık farklarının oluşmasını önlemek için akımın yoğunluğu ve anot yerleşimi ile ilgili ayarlamalar yapılmalıdır.

2.2.2 Atımlı kaplama

Atımlı akımın kullanıldığı elektro-bırakım yöntemine atımlı kaplama denir. Atımlı akımlar tek kutuplu ya da çift kutuplu olabilir.

2.2.3 Lazerli metal bırakım

Lazerli metal bırakım yönteminde metal bırakımını arttırmak için odaklı lazer çubuk kullanılır. Deneyler bu sayede bırakım oranının 1000 kata kadar artabildiğini göstermiştir.

2.3 Elektrolit Kaplama

Farklı metaller farklı tipte elektrolite ihtiyaç duyabilir. Elektrolit bileşimi ve özellikleri kaliteli bir kaplama için oldukça önemlidir.

2.3.1 Elektrolit tipleri ve bileşenleri

Elektrolit tipleri; asit, baz ya da metal tuzlarının sulu çözeltileri, saf sıvılar ve eriyik tuzlardır. Yüksek ısı ve düşük basınç altında gazlar da elektrolit görevi görebilir.

Metal tuzlarına ek olarak elektrolitler çeşitli kullanım amacına bağlı olarak çeşitli katkı maddeleri de içerir. Bazı bileşenler, elektrolit yoğunluğu arttırmak için kullanılırken bazıları ise elektrolit banyosunun dengesini korumak için, yüzey aktivasyonu için, metal bırakım miktarını arttırmak için ya da kaplamanın kimyasal, fiziksel ya da teknolojik özelliklerini optimize etmek için kullanılabilir. Bu kaplama özellikleri; korozyon direnci, parlaklık ya da yansıtma, sertlik, mekanik dayanım, süneklik, içsel gerilme, aşınma direnci ve lehimlenebilirliktir [15,17].

2.3.2 Elektrolit özellikleri

Elektrolitlerin özellikleri; genellikle elektrolitik iletkenliğe, kaplama gücüne, mikro atış gücüne ve makro atış gücüne bağlı olarak karakterize edilir [3,15]. Pek çok farklı faktöre bağlı olan elektrolit özellikleri, kaplama ile oluşturulacak üründen beklenen özelliklere göre değerlendirilir.

2.3.3 Elektrolit iletkenliği

Elektrolit iletkenliği, metalik elektrik iletkenliğinden farklıdır. Organik ve inorganik tuzlar, asitler ve alkaliler elektrolit iletkenliğini arttırmak için kullanılabilir.

Elektrolit iletkenliği; ayrışma derecesi, bağımsız iyonların hareketliliği, viskozite, sıcaklık ve elektrolit bileşenlerine bağlı değişir.

2.4 Elektro-kaplama Prosesi Tipleri

Kaplanacak parçanın geometrisine ve boyutlarına bağlı olarak yığın kaplama, askılı kaplama, sürekli kaplama ya da sıralı kaplamadan oluşan kaplama proses tiplerinden biri uygulanabilir [15,17].

2.4.1 Yığın kaplama

Yığın kaplama, somun ve cıvata gibi çok fazla sayıda kaplanması istenen küçük parçalar için uygulanır. Yığın kaplama hassas parçalara uygulanmaz. Yığın kaplamanın en çok kullanılan tipi, fiçı kaplama olarak adlandırılan ve kaplanacak parçaların kaplama fiçisi içine doldurulduğu yöntemdir. Çanlar, ziller ve titreşim üniteleri de yığın kaplama uygulanan parçalardır.

2.4.2 Askılı kaplama

Bazı parçalar özel fonksiyonlarına, şekillerine ya da boyutlarına bağlı olarak yığın kaplama uygulaması ile kaplanamazlar. Bu tip parçalar için askılı kaplama yöntemi kullanılabilir. Askılı kaplamada parçalar bir raf ya da askıya yerleştirilir. Böylece kaplama ön işlemleri ya da son işlemleri uygulanabilir. Askılar parçaların solüsyona daldırılmasına uygundur. Askılı kaplama bazen toplu kaplama olarak da adlandırılır.

2.4.3 Sürekli kaplama

Sürekli kaplamada kaplanacak iş parçaları bir ya da iki sıra anot boyunca devamlı olarak hareket eder. Sürekli kaplama genel olarak metal şerit, tüp ya da tel gibi basit ve uniform geometriye sahip parçaların kaplanması için kullanılır.

2.4.4 Sıralı kaplama

Sıralı kaplama yöntemi, kaplama ve son işleme proseslerini ana üretim hattında birleştirmek amacıyla kullanılır. Sıralı kaplama yöntemiyle ön işlem adımlarının sayısını azaltabilir. Ayrıca kaplama için kullanılan gerekli malzeme miktarını, kimyasal madde miktarını ve enerji tüketimini azaltır.

2.5 Metalik Kaplama Türleri

Metalik kaplama türleri, tipik örneklerle birlikte kabaca aşağıdaki gruplara ayrılabilir:

2.5.1 Anodik kaplamalar

Genel olarak çelik ya da demirden yapılmış olan ana malzemeyi korumak için uygulanırlar. Anodik kaplama olarak adlandırılma sebebi, kaplama malzemesinin anot görevi görerek kendinden parçalar kaybetmesi ve katot durumundaki kaplanacak parça üzerinde yeni kaplama katmanı oluşturmalarıdır.

2.5.2 Dekoratif kaplamalar

Dekoratif kaplamalar, genel olarak ana malzeme üzerine görsel olarak daha çekici olan ve bazı koruyucu özelliklere sahip olan bir katmanın eklenmesi şeklinde uygulanır. Bu kategoride kullanılan metaller; bakır, nikel, krom, kalay ve çinkodur.

Elektro-kaplamanın plastik üzerine uygulamasında geçerli adımların uygulanma süreleri ve sıcaklıkları aşağıdaki gibidir:

- Alkalimli temizleme: 43-60 °C sıcaklıkta 1-5 dakika,
- Asitli temizleme: 54-65 °C sıcaklıkta 1-3 dakika,
- Yüzey aşındırma: 60-71 °C sıcaklıkta 1-10 dakika,
- Nötrleştirme: 21-60 °C sıcaklıkta 1-5 dakika,
- Katalize: 24-32 °C sıcaklıkta 1-3 dakika,
- Yüzey aktifleştirme: 24-32 °C sıcaklıkta 1-5 dakika,
- Bakır katmanının kaplanması: 24-29 °C sıcaklıkta 7-10 dakika

olarak uygulanır ve kaplanacak parçaya sonraki katmanın kaplanması için proses adımları devam eder [18].

2.5.3 Mühendislik kaplamaları

Bazen fonksiyonel kaplamalar olarak da adlandırılan mühendislik kaplamaları; lehimlenebilirlik, aşınma direnci, yansıtma ve iletkenlik gibi yüzeye ait bazı özgül özellikleri iyileştirmek için uygulanır.

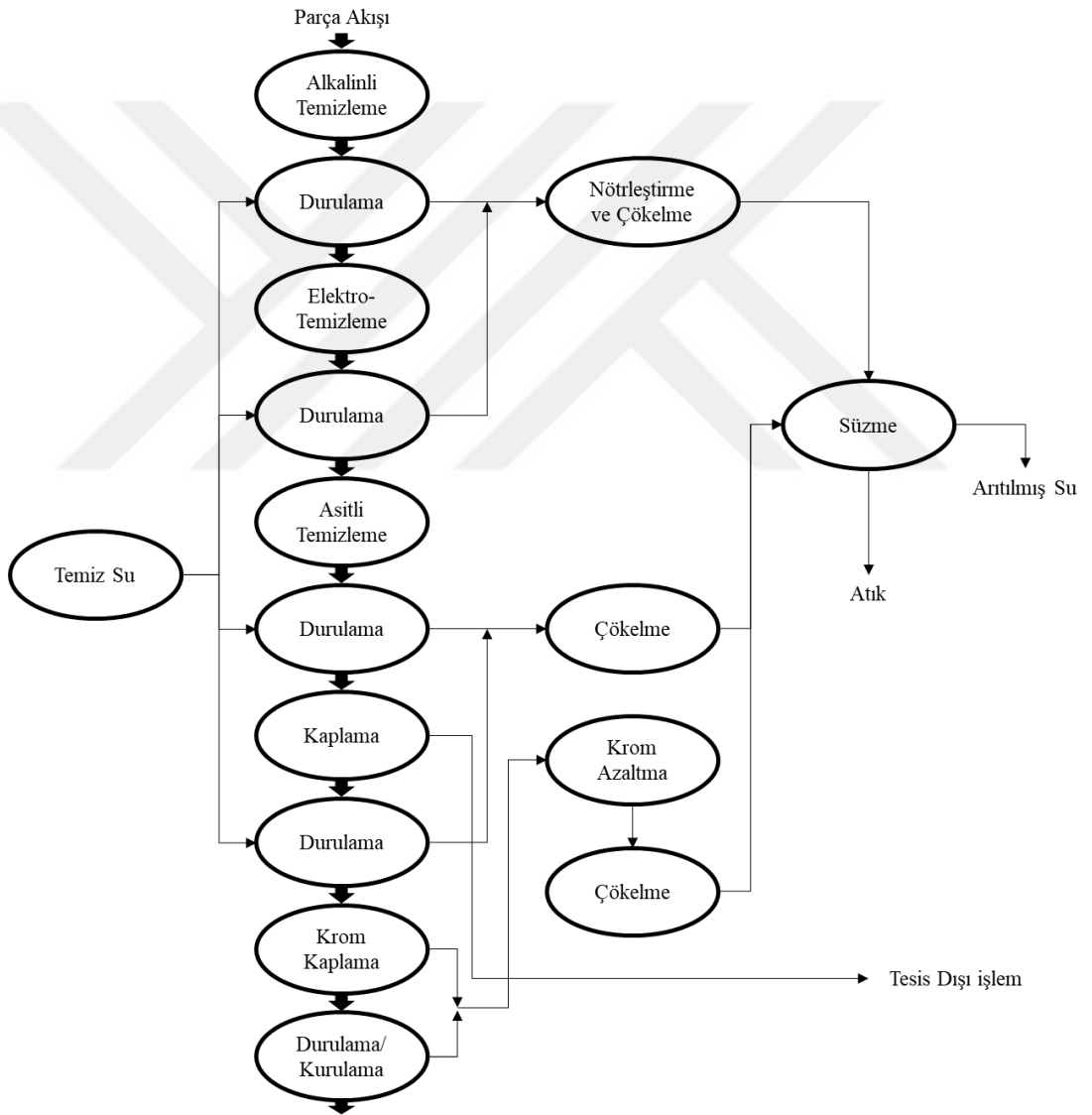
Mühendislik kaplamaları için kullanılan malzemelerden bazıları; altın, gümüş, kurşun, rutenyum, rodyum, paladyum ve iridyumdur.

2.5.4 Diğer metalik kaplama türleri

Çok katmanlı bazı metalik kaplama türleri, alaşımli kaplamalar, kompozit kaplamalar, dönüşüm kaplamaları gibi metalik kaplama türlerini bu kategori altında sıralamak mümkündür.

Bu tez çalışmasında, sırasıyla bakır, nikel ve krom katmanlardan oluşan dekoratif elektro-kaplama yöntemi uygulanmış poliamid malzeme ile modellenmiş geometriler değerlendirilecektir.

Aşağıda tipik bir elektro-kaplama tesisinin akış şeması verilmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Tipik bir elektro-kaplama tesisinin akış şeması.

Bakır katman iki önemli özelliği için tercih edilir. Bunlardan ilki aşındırılmış, mikro işlenmiş yüzeye iyi yapışma kabiliyeti; ikincisi ise sünekliği sayesinde diğer kaplama katmanları ve plastik malzeme arasında tampon görevi görerek sıcaklık sebebiyle oluşan etkiyi absorbe etme özelliğidir [18].

Nikel katman kaplamadaki korozyon direnci ve aşınma direncini sağlaması için kullanılmıştır [6].

Krom katman ise mükemmel sertlik ve matlaşma direncini sağlayan katmandır [19].

Ayrıca yapılan çalışmalarda bakırdan oluşan bir alt katman kullanıldığında nikelin korozyon direncinin arttığı görülmüştür [12].

Bu tez çalışmasında uygulamada sıklıkla kullanılan ABS yerine PA (Poliamid, Naylon) seçilmesinin sebebi: ısıtıldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında tekrar sertleşen termoplastik grubu bir malzeme olan poliamidin daha iyi çekme modülü ve daha iyi çekme dayanımına sahip olması ve gerilme yükü altında daha iyi dayanıma sahip olmasıdır.

ABS malzeme, metal kaplama çatlamaya başladığında çatlarken PA malzemede bu davranış gözlenmez. PA malzeme, metal kaplamanın dayandığı gerilmenin iki katı değerindeki gerilme yüklerine kadar dayanabilir [1].

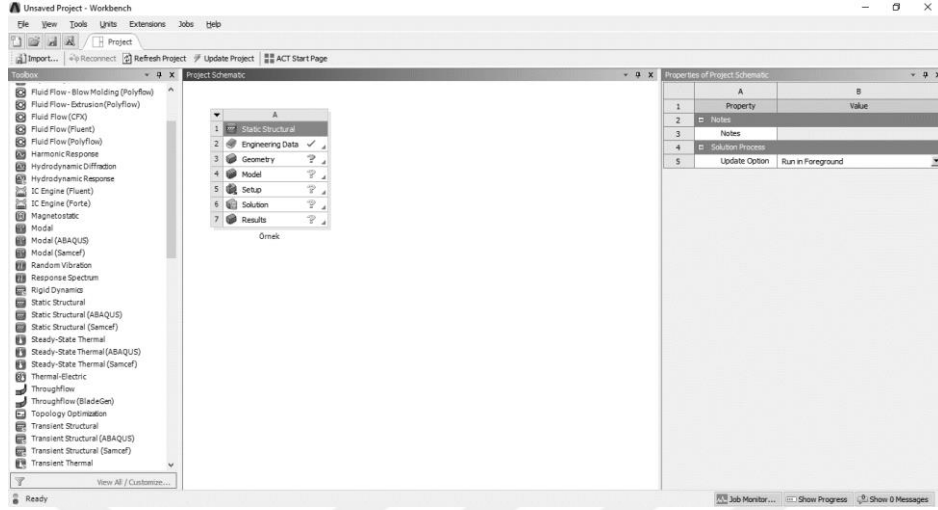
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS

Sonlu elemanlar yöntemi, pek çok farklı analiz yönteminden biridir ve bu tez çalışmasında da bu yöntem kullanılmıştır. Yöntem, aslında kısmi diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini bulmak için kullanılan bir tekniktir. İnşaat, Havacılık ve Makine Mühendisliği alanlarındaki karmaşık yapısal analiz ve elastisite problemlerini çözmek ihtiyacından doğmuştur. Yapısal simülasyonlarda sonlu elemanlar yöntemi, şekil değiştirme ve mukavemet görselleştirmelerinin oluşturulmasına yardımcı olur. Örneğin; bu yöntemin kullanılmasıyla yapılacak analizlerden elde edilen sonuçlar, malzeme ağırlığını azaltmaya yardımcı olarak ağırlık kaynaklı maliyetin iyileştirilmesine de yardımcı olabilir [20].

Ticari olarak kullanılmakta olan pek çok farklı sonlu elemanlar yöntemi paket programı mevcuttur. Bu tez çalışmasında, ANSYS paket programı kullanılmıştır. ANSYS, mühendislik çalışmalarında da en çok kullanılan programlardan biri olup yapısal, dinamik, ısı transferi, akışkan dinamiği, akustik, elektromanyetik, modal gibi pek çok farklı türde analiz yapabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca paket program içerisinde iki ve üç boyutta modellemeyi sağlayan tasarım modelleme yazılımı da mevcuttur. Tez çalışmasında kullanılan modellerin tasarımlarının bir kısmında bu yazılımdan yararlanılırken ayrıca SOLIDWORKS modelleme programı da kullanılmıştır.

ANSYS Workbench kullanıcı arayüzü görüntüsü, Şekil 3.1'de verilmiştir. Ekranın solundaki araç çubuğundan probleme uygun analiz türü seçilir. (Bu tez çalışması kapsamında, Statik Yapısal (Static Structural) analiz tipi kullanılmıştır.) ANSYS programı içerisinde sonlu elemanlar analizleri, üç ana kısımdan oluşur. Bu kısımlar; ön işlemler, çözüm ve son işlemler olarak adlandırılır. Analiz tipi seçildikten sonra analize uygun girdiler, ön işlemler kısmında tanımlanır. Ön işlemler: malzeme özelliklerinin tanımlanması, sonlu elemanlar tipinin seçilmesi, parçaların modellenmesi, malzemelerin parçalara atanması, mesh işlemi, bağlantı türlerinin tanımlanması ve ilişkilendirmenin yapılması olarak sıralanabilir. Ön işlemlerden

sonra çözüm işlemi gerçekleştirilir. Çözümünden sonra analiz sonuçlarının listelenmesi ve görselleştirilmesi ise son işlemler olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.1 : ANSYS Workbench kullanıcı ara yüzü.

Sonlu elemanlar analizlerinin en önemli adımlarından birisi, mesh işlemidir. Bu işlem, analiz edilecek parça ya da parçaların küp, prizma, piramit ya da daha farklı geometri tiplerinde sonlu eleman olarak adlandırılan küçük elemanlara sanal olarak bölünmesi işlemi olarak adlandırılabilir. Bahsi geçen elemanlar, düğüm noktalarına (node) sahiptirler ve bu düğüm noktaları mesh çizgileri ile birbirine bağlıdır. Mesh işleminde parçaların küçük elemanlara bölünmesi tanımı, parça ya da parçaların gerçek anlamda bölünmesini işaret etmez. Bu bölme işlemi, yürütülen analizin daha sağlıklı gerçekleştirilmesi ve daha tutarlı sonuçlar vermesi adına yapılan sanal bir bölme işlemidir.

Mesh işlemi sonuçların kesinliği için önemlidir. İyi uygulanmış mesh, daha doğru çözümü daha az iterasyonla yaparak çözüm süresini kısaltır ve dolayısıyla zamandan tasarruf etmeyi sağlar.

Zayıf ya da hatalı mesh ise daha fazla iterasyonla çözüm yapacağı gibi çözüm süresini uzatır. Çözüm süresinin uzamasıyla birlikte çözümde hatalar oluşabilir. Hatalar, sonucu doğruluktan uzaklaştırır. Tüm bunlar sonuç elde etmek için geçen işlem süresini uzatacaktır.

Kullanılan eleman sayısı sonucun hassasiyetine doğrudan etki eder. Gerekli alanda yetersiz ya da hatalı mesh kullanımı sonucunda eksik ve hatalı olmasına sebep olabilir. Değişken geometrilerde, tek tip ve boyutta eleman kullanmak bu sebeple doğru olmayacaktır. Yapılan bu çalışmada, kullanılan geometrilerle bağlı olarak

gereken bölgelerde daha küçük boyutlara sahip daha hassas sonuçlar elde etmeye yardımcı olacak meshler kullanılmıştır.

Doğrudan düşünüldüğünde eleman sayısını arttırmanın daha hassas sonuçlar elde etmekte faydalı olacağı görülmektedir. Fakat eleman sayısını arttırmanın da bir limiti mevcuttur. Çünkü gereğinden fazla kullanılan elemanlar, gereksiz çözümleme süresi artımına ve bu sırada oluşabilecek hataların çoğalmasına sebep olacaktır. Eleman sayısını arttırmak sonuçların değişiminde baskın bir etkiye sahip olmamaya başlıyorsa yeterli sayıda elemana sahip olunduğu söylenebilir.



4. SONUÇLARIN DOĞRULANMASI

Çalışmanın analiz kısmına başlamadan önce ANSYS Workbench ile analitik yöntemin kıyaslanması amacıyla analitik çözüm gerçekleştirilmiştir. Analitik çözüm için tek katmanlı krom kaplama ve poliamid malzemeden oluşan basit bir model oluşturulmuştur. Bu model üzerindeki uzama miktarının sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntemle elde edilen sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçların tutarlılığı görüldükten sonra analiz işlemleri bu sonuçların referansı ile gerçekleştirilmiştir.

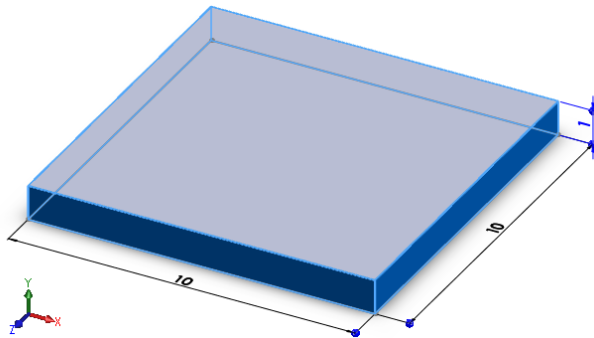
Tüm analizler gerçekleştirilirken her bir malzeme için aynı malzeme özelliği değerleri kullanılmış olup bu değerlerden oluşan mühendislik verileri tablosu Çizelge 4.1’de verilmiştir. Veriler matweb.com isimli web sitesinden elde edilmiştir [21].

Çizelge 4.1 : Analizlerde kullanılan mühendislik verileri.

Malzeme Adı	Yoğunluk (gr/cm ³)	Termal Genleşme Katsayısı (°C ⁻¹)	Elastisite Modülü (Pa)	Poisson Oranı
Poliamid	1,22	7,80E-05	6,10E+09	0,350
Bakır	8,93	1,64E-05	1,10E+11	0,343
Nikel	8,88	1,31E-05	2,07E+11	0,310
Krom	7,19	6,20E-06	2,79E+11	0,210

4.1 Analitik Çözüm

Analitik çözüm için tek yüzü 0,01 mm kalınlığa sahip krom kaplama ile kaplanmış 1 mm kalınlığındaki poliamid malzeme modeli kullanılmıştır (Şekil 4.1).

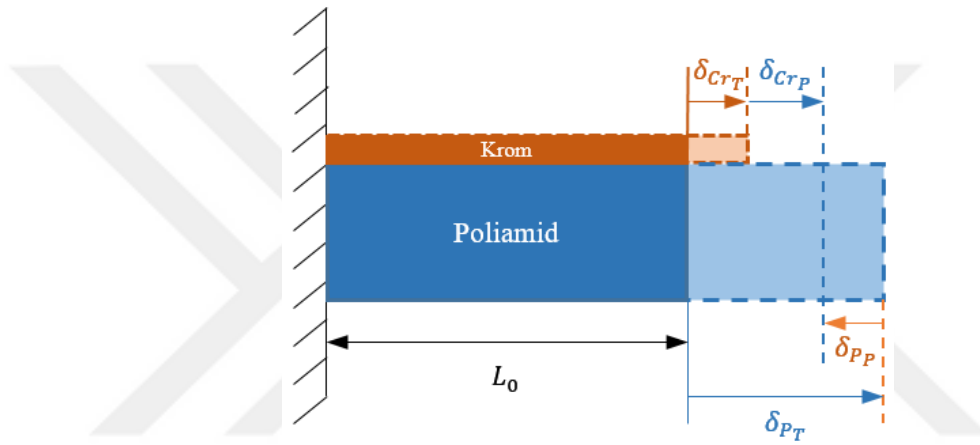


Şekil 4.1 : Analitik çözüm için kullanılan model.

Termal yüke maruz kalan modelde sadece (+X) doğrultusundaki uzama miktarı için işlem yapılmış; diğer eksenlerdeki uzamalar dikkate alınmamıştır. Numune Y ve Z eksenlerinde sabitlenmiş ve X ekseninde yan yüzlerinden birinden tutulmuştur. 80 °C'lik termal yük altında serbest yüzeyde oluşan uzama miktarları kıyaslanmıştır.

Analitik çözüm ve kıyas için yapılan aynı çözümün sonlu elemanlar yöntemi modelinde, her iki malzemenin doğrusal davranışı simüle edilerek süper pozisyon prensibi modellenmiştir.

Şekil 4.2'de numuneyi oluşturan katmanlar ve 80 °C'lik termal yük altında bu katmanlarda oluşan boyutsal değişim tek eksen üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Numune üzerindeki uzama miktarları.

Şekilde de gösterildiği üzere, termal yük altında genleşme katsayıları farkına bağlı olarak poliamid malzeme daha fazla uzayacak; krom malzeme ise daha az uzayacak ve aynı zamanda üzerine yapıştığı poliamid malzemenin uzama isteğini kısıtlayacak şekilde davranacaktır.

Analitik çözüm için kullanılan denklemlerde bu bileşke etki P ile sembolize edilen bir bileşke kuvvet olarak:

δ_{P_T} : Termal yük sebebiyle Poliamid malzemede meydana gelen uzama miktarı,

δ_{Cr_T} : Termal yük sebebiyle Krom malzemede meydana gelen uzama miktarı,

δ_{Cr_P} : Bileşke kuvvete bağlı olarak krom malzemede meydana gelen ekstra uzama miktarı ve

δ_{P_P} : Bileşke kuvvet kaynaklı poliamid malzemede oluşan kısılma miktarı olarak verilmiştir.

Burada δ : Uzama miktarını sembolize etmekte olup termal yük kaynaklı uzama Denklem 4.1’de, bileşke yük kaynaklı uzama ise Denklem 4.2’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\delta = \alpha \Delta T L \quad (4.1)$$

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (4.2)$$

Bu denklemlerde:

α : Termal genleşme katsayısı, ΔT : Sıcaklık farkı olarak termal yükü, L: Malzeme uzunluğunu, P: Bileşke kuvveti, A: Malzemenin kesit alanını ve E: Malzemenin elastisite modülünü sembolize eder.

Termal etkiye bağlı olarak poliamid malzemede oluşan toplam uzama miktarı; termal yük sebebiyle krom malzemede meydana gelen uzama miktarı, bileşke kuvvete bağlı olarak krom malzemede meydana gelen ekstra uzama miktarı ve bileşke kuvvet kaynaklı poliamid malzemede oluşan kısalma miktarının toplamına eşittir. (Denklem 4.3)

$$\delta_{P_T} = \delta_{Cr_T} + \delta_{Cr_P} + \delta_{P_P} \quad (4.3)$$

Denklem 3.3 her bir malzemeye etki eden kuvvet ve uzama miktarı dikkate alınarak tekrar düzenlendiğinde Denklem 3.4 elde edilir:

$$\alpha_p \Delta T L_P = \alpha_{Cr} \Delta T L_{Cr} + \frac{PL_{Cr}}{A_{Cr} E_{Cr}} + \frac{PL_P}{A_P E_P} \quad (4.4)$$

Burada; alt simge olarak verilen P: Poliamidi ve Cr: Kromu sembolize eder.

Gereken tüm veriler yerine koyulduğunda Çizelge 4.2’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.2 : Analitik Yöntem çözüm sonuçları.

T (°C)	$\delta_{Cr_T} + \delta_{Cr_P}$	δ_{P_T}	δ_{Cr_T}	δ_{Cr_P}	δ_{P_P}	P
80	6,24E-05	4,96E-06	3,94E-05	1,80E-05	1,10E+02	5,32E-02
60	4,68E-05	3,72E-06	2,96E-05	1,35E-05	8,25E+01	3,81E-02
40	3,12E-05	2,48E-06	1,97E-05	9,01E-06	5,50E+01	2,35E-02
20	1,56E-05	1,24E-06	9,85E-06	4,51E-06	2,75E+01	1,05E-02
0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Aynı numune, aynı malzeme ve yükleme özellikleri kullanılarak ANSYS Workbench yazılımında oluşturulmuş ve Static Structural analizi gerçekleştirilmiştir. 3 Boyutlu model, 10 mm genişlik, 10 mm derinlik ve 1 mm kalınlığa sahip olacak şekilde SOLIDWORKS yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 4.1).

Poliamid malzeme için katı elemanların kullanıldığı modellerde, kaplama katmanı için iki alternatif oluşturulmuş, birinde katı elemanlar diğerinde ise kabuk elemanlar kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde kabuk elemanlar kullanılarak efektif sonuçlar alınması mümkündür. Kabuk elemanlar, ince yapıların modellenmesini katı elemanlara oranla daha az mesh ile gerçekleştirme yeteneği sebebiyle çözümleme zamanında oldukça büyük tasarruflar sağlar. Ayrıca kabuk elemanların mesh işlemi de daha basit bir şekilde yapılır ve bu sayede oluşabilecek bazı hatalar önlenmiş olur.

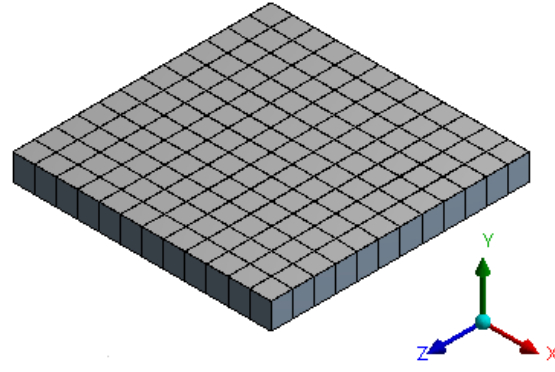
Katı elemanlar, geometrinin tamamını katı olarak modellerken kabuk elemanlar, geometriyi iç kısmı oyuk bir kabuk şeklinde modelleme mantığıyla çalışır. Kabuk elemanlar geometrinin matematiksel olarak basitleştirilmiş halidir.

Kalınlığı diğer iki boyutunun ölçülerine göre daha küçük (ortalama 20 kat kadar) olan yapılarda kabuk elemanlar, katı elemanlara oranla daha iyi sonuçlar vermektedir [22]. Katı elemanlarla, kabuk elemanlar kadar verimli sonuçlar elde etmek için kalınlık boyunca daha fazla sayıda mesh kullanmak gerekmektedir.

SOLIDWORKS yazılımı içerisinde poliamid malzeme olarak kullanılacak katının XZ düzlemindeki üst yüzeyi ötelenerek yeni bir kabuk yüzey oluşturulmuştur. Bu kabuk yüzeye sonlu elemanlar analizinde kalınlık verilmiş ve krom kaplama özellikleri eklenmiştir. Bu sayede katı+kabuk olarak adlandırılan ve poliamid malzeme için katı elemanlardan, kaplama katmanları için kabuk elemanlardan oluşan model elde edilmiştir. Kalınlığı SOLIDWORKS yazılımı içerisinde modellenmiş kaplama katmanına sahip model ise katı+katı olarak adlandırılmış ve aynı koşullardaki analize tabi tutulmuştur.

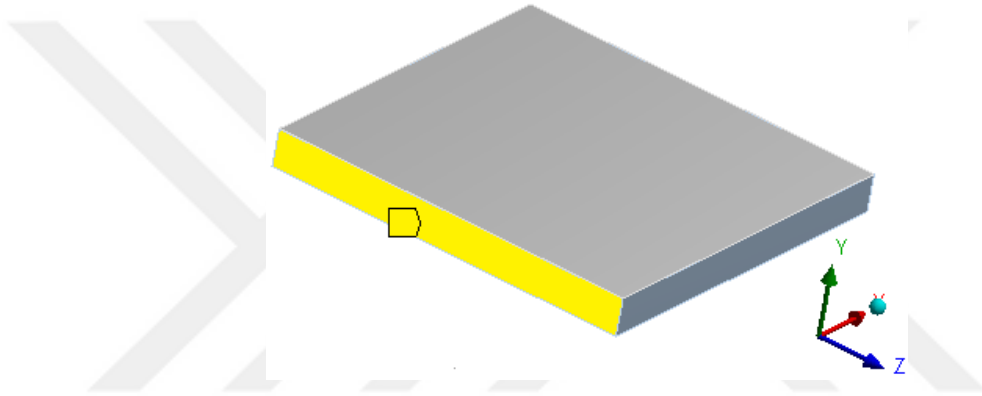
Poliamid malzeme ile krom kaplama malzeme arasına bağlantı tipi olarak Bonded Contact eklenmiş, krom katmanın alt yüzü poliamid malzemenin üst yüzeyine ideal olarak yapıştırılmıştır.

Mesh işlemi gerçekleştirilirken Hex Dominant Method seçilmiştir. Free Face Mesh Type: All Quad, Element Order: Use Global Setting olarak belirlenmiştir. Katı+katı model için toplamda 200 eleman ve 1606 düğüm noktası; katı+kabuk model için toplamda 288 eleman ve 1300 düğüm noktasına sahip analiz modelleri oluşturulmuştur. Mesh işlemi sonrası analitik çözüm numunesi Şekil 4.3'de verilmiştir.



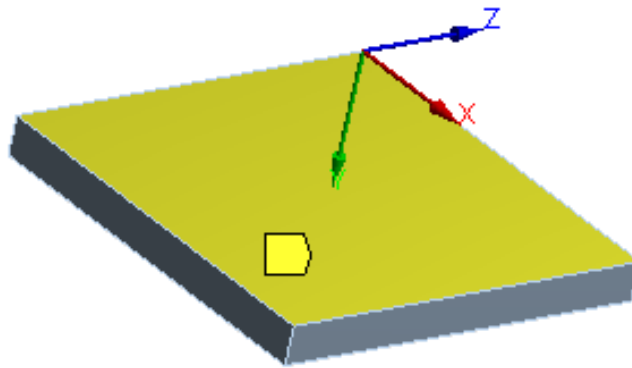
Şekil 4.3 : Mesh işlemi sonrası analitik çözüm numunesi.

Numune YZ düzlemindeki yan yüzeyinden Fixed Support ile sabitlenmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Fixed Support ile tutulan yüzey.

XZ düzlemindeki taban yüzeyinden sınırlandırılan malzeme üzerine Displacement uygulanmış; X: Free, Y: 0 mm, Z: 0 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.5).



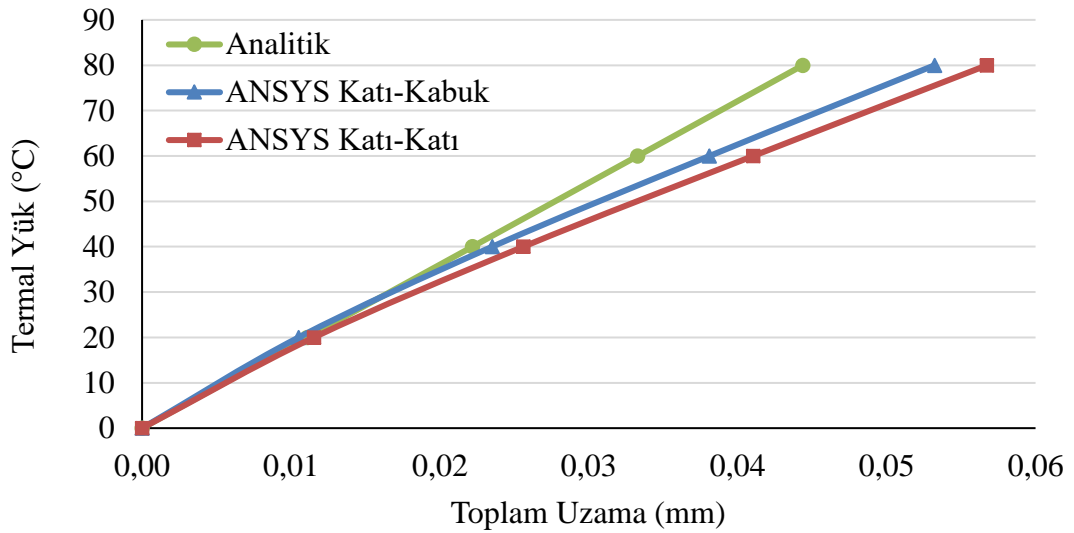
Şekil 4.5 : Displacement ile sınırlanan yüzey.

Numunenin poliamid ve kromdan oluşan katmanların ikisine de 80 °C'lik termal yük uygulanmış ve analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.3'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.3 : Sonlu Elemanlar Yöntemi çözüm sonuçları.

T (°C)	Katı+Kabuk	Katı+Katı
	$\delta_{CrT} + \delta_{CrP}$	$\delta_{CrT} + \delta_{CrP}$
80	6,24E-05	4,96E-06
60	4,68E-05	3,72E-06
40	3,12E-05	2,48E-06
20	1,56E-05	1,24E-06
0	0,00E+00	0,00E+00

Şekil 4.6’da Analitik çözüm sonuçlarıyla elde edilen sıcaklık değişimine bağlı X eksenindeki uzama miktarıyla sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen çözümlerin sonuçları verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapılırken katman ve ana malzeme arasındaki bağlantı ve yükleme koşulları hem katı+katı elemanlar olarak hem de katı+kabuk elemanlar olarak modellenmiştir.



Şekil 4.6 : Sonlu elemanlar yöntemi ve analitik sonuçların zamana bağlı değişimi. Grafik üzerinden de görülebileceği üzere üç modelin sonuçları birbirine oldukça yakındır. Sonuçların tam örtüşmeme sebebi; analitik çözümde termal yükün tek bir kuvvet olarak uygulandığı varsayılırken sonlu elemanlar yönteminde bu yüklemenin yüzeylerin tamamına yayılı şekilde kabul edilmesi, analitik çözümde poisson oranı göz ardı edilirken sonlu elemanlar yönteminde poisson oranının da hesaplamalara dahil edilmesi ve buna benzer bazı ihmal edilen koşulların var olmasıdır.

Katı+katı model, katı+kabuk modelle kıyaslandığında daha fazla düğüm noktasına ve dolayısıyla daha fazla veri işleme ve çözüm süresine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca mesh işlemi uygulanırken kabuk elemanların kullanıldığı kaplama modellerinde,

geometri karmaşıklığı arttıkça katı elemanlara oranla daha iyi mesh uygulandığı ve keskinliği daha yüksek sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Buradan yola çıkılarak analitik yöntemle kıyaslandığında sonlu elemanlar yönteminin sonuç kesinliği konusunda yeterli olduğunu ve gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini söylemek mümkün olacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılan modeller kıyaslandığında ise kaplama katmanlarında kabuk elemanların kullanıldığı modelin mesh ve dolayısıyla analiz işlemi ve sonuçların tutarlılığı konusunda daha verimli bir model olduğu görülmüştür. Bu sebeple bu tez çalışmasının analiz kısmında sonlu elemanlar yöntemi, poliamid malzeme için katı elemanlardan; kaplama katmanları için kabuk elemanlardan meydana gelen modellerle gerçekleştirilmiştir.

4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Çözüm

ANSYS Workbench ile sonlu elemanlar analiz modelleri oluşturulurken bağlantı türü olarak statik yapısal analiz altında sunulan farklı bağlantı türlerinden biri olan Bonded Contact seçilmiştir. Söz konusu bağlantı türünde parçaların seçilen yüzleri birbirine tüm yüzey boyunca ideal olarak yapıştırılmış gibi davranır (Şekil 4.7). Kaplama katmanlarının tüm yüzeyler boyunca hatasız ve boşluksuz kaplandığı öngörülerek tüm modellerin tüm katmanları için bu bağlantı türü seçilmiştir. Poliamid malzemenin dış yüzeyi bakır kaplamanın taban yüzeyine, bakır kaplamanın üst yüzeyi nikel kaplamanın taban yüzeyine ve nikel kaplamanın üst yüzeyi krom kaplamanın taban yüzeyine bağlanmıştır.



Şekil 4.7 : Bonded Contact ile birbirine ideal yapışık olarak bağlanan yüzeyler. Yükleme tipi olarak termal şart (Thermal Condition) seçilmiştir. Tüm modeller için her bir katmana ve ana malzeme olan poliamid üzerine sıcaklık yükü uygulanmıştır.

Termal yük 5 adımlı olarak uygulanmış olup başlangıç değeri -40 °C, son değeri 40 °C, ortam sıcaklığı 0 °C olarak belirlenmiştir. Termal yükün adımlara bağlı değişimi Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Her bir model için alt bölümlerde belirtilen ayarlamalar dışında analiz için gerekli tüm seçimler Program Controlled olarak seçilmiş ve programın, analizi optimum sürede en iyi sonuçlarla gerçekleştireceği öngörülmüştür.

Sonuçlar için her bir katmanın ve poliamid malzemenin tüm yüzeyleri üzerinde oluşan Von Mises gerilmeleri ve toplam uzamalar hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4 : Termal yükün adımlara bağlı değişimi.

Adım No	Termal yük değeri (°C)
1	-40
2	-20
3	0
4	20
5	40

Çalışmada silindir çubuk, kiriş, halka ve bu üç modele kıyasla daha karmaşık bir geometriye sahip olan tutamak isimli modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, ana malzeme poliamid olacak şekilde üzerine sırasıyla bakır, nikel ve kromdan oluşan katmanlar ilave edilerek elde edilmiştir. Poliamid ana malzeme katı elemanlarla modellenirken kaplamalar için kabuk elemanlar kullanılmıştır.

Plastik (Poliamid) malzeme ölçüleri sabit olup her bir modelde katmanların kalınlıkları için 11 farklı kombinasyon kullanılmıştır (Çizelge 4.5).

Katman kalınlıkları, her bir katman için literatürde bulunan maksimum ve minimum katman kalınlığı değer aralığında kalacak şekilde üç farklı değerde verilmiştir [23,24].

Katmanlar, 3 boyutlu katı olarak modellenen ana malzeme üzerine öteleme yöntemi kullanılarak kabuk şeklinde oluşturulmuştur.

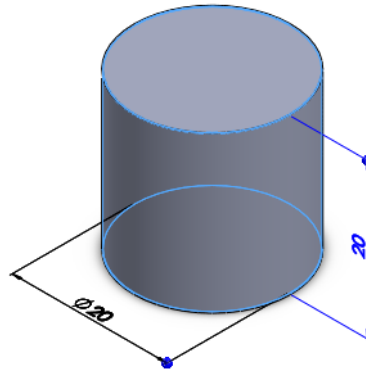
Model üzerinde kalınlığa sahip olmayan kabuk yapıları, ANSYS yazılımında oluşturulan sonlu elemanlar analiz modeli içerisinde kabuk etkisi tanımlanmıştır. Kabuk etkisi tanımlanan katmanlara, yine ANSYS yazılımında oluşturulan sonlu elemanlar analiz modeli içerisinde gerekli kalınlık değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Kaplama katman kalınlıkları.

Model No	Katman kalınlıkları (mm)		
	Bakır	Nikel	Krom
1	0,0254	0,03302	0,001778
2	0,0127	0,03302	0,001778
3	0,0254	0,01524	0,001778
4	0,0127	0,01524	0,001778
5	0,0254	0,03302	0,000508
6	0,0127	0,03302	0,000508
7	0,0254	0,01524	0,000508
8	0,0127	0,01524	0,000508
9	0,01905	0,01524	0,000508
10	0,0127	0,02413	0,000508
11	0,0127	0,01524	0,001143

4.2.1 Silindir çubuk model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

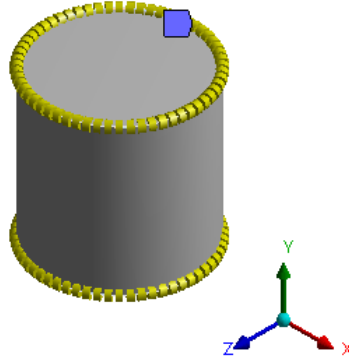
Silindir çubuk model 3 boyutlu olarak SOLIDWORKS yazılımında oluşturulmuştur. 3 boyutlu modelleme, pek çok farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Bu model oluşturulurken XZ düzleminde 20 mm çapa sahip bir çember çizilmiştir. Daha sonra bu çember, y eksenini boyunca ekstrüzyon ile 20 mm çekilerek 20mm çapa ve 20 mm yüksekliğe sahip silindirik çubuk elde edilmiştir. Şekil 4.8’de silindir çubuk geometrisi verilmiştir.



Şekil 4.8 : Silindir çubuk geometrisi.

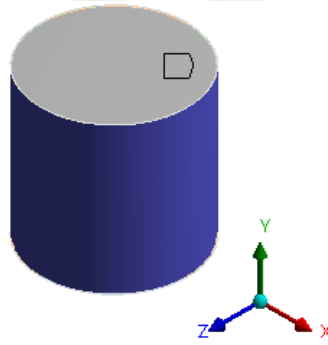
Silindir çubuk üzerine mesh işlemi uygulanırken poliamid malzeme için Sweep Method kullanılmıştır. Free Face Mesh Type ayarı All Quad olarak seçilmiş, Element Order ise Use Global Setting olarak belirlenmiştir. Poliamid malzeme için Hacim Ölçülendirme (Body Sizing) seçeneği kullanılmış ve Element Size 2 mm olarak ayarlanmıştır. Modelin alt ve üst köşelerinde tüm katmanlar ve poliamid malzeme için Kenar Ölçülendirme (Edge Sizing) seçeneği kullanılmış ve Bölme Sayısı

(Number of Divisions) 60 olarak girilerek dairenin çevresi 60 elemana bölünmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Silindir çubuk kenar ölçülendirme.

Modelin yan yüzünde tüm katmanlar için Face Meshing kullanılmış ve Method Quadtilaterals olarak seçilmiştir (Şekil 4.10).



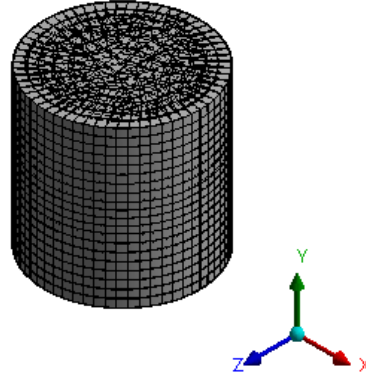
Şekil 4.10 : Kaplama katmanlarına uygulanan Face Meshing metodu.

Mesh işlemi sonrası silindir çubuk modellerde oluşturulan toplam eleman ve düğüm noktası sayısı Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Silindir çubuk modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları.

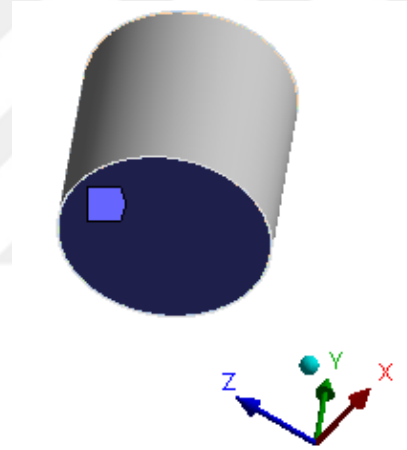
Model No.	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
1	50676	15612
2	50656	15593
3	50660	15596
4	50702	15638
5	50664	15604
6	50667	15607
7	50690	15625
8	50693	15633
9	50667	15606
10	50658	15600
11	50683	15616

1 No.lu silindir çubuk modelin poliamid ve tüm kaplama katmanlarına mesh işlemi uygulandıktan sonraki görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu silindir çubuk model.

Silindir çubuk numune Şekil 4.12’de görülen taban yüzeyinden (Krom katman dış yüzü) Fixed Support ile tutularak sınırlandırılmıştır.

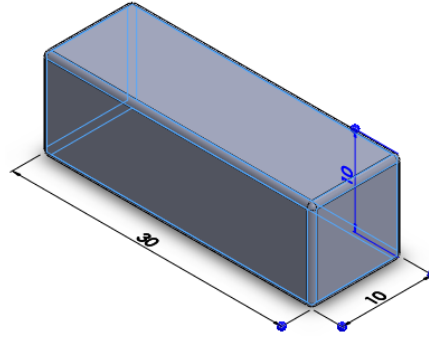


Şekil 4.12 : 1 No.lu silindir çubuk model üzerinde Fixed Support ile tutulan yüzey.

4.2.2 Kiriş model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

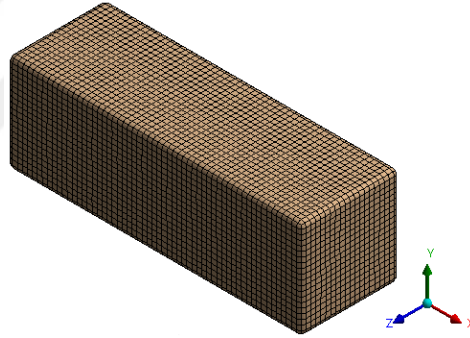
Kiriş model 3 boyutlu olarak SOLIDWORKS yazılımı ile oluşturulmuştur. XZ düzlemi üzerinde 30 mm x 10 mm dikdörtgen taban çizilmiştir. Daha sonra bu taban, Y eksenini boyunca ekstrüzyon ile 10 mm çekilerek üç boyutlu katı model elde edilmiştir. Oluşturulan dikdörtgen katının tüm kenarlarına 0,5 mm radyus uygulanarak poliamid malzeme olarak da kullanılacak olan model elde edilmiştir.

Kiriş modelin geometrisi Şekil 4.13’de verilmiştir. Bu model üzerinden katmanların elde edilmesi için tüm yüzeylere öteleme yöntemi uygulanmıştır. Bu sayede katı malzeme ve kabuk katmanların modellenmesi tamamlanmıştır.



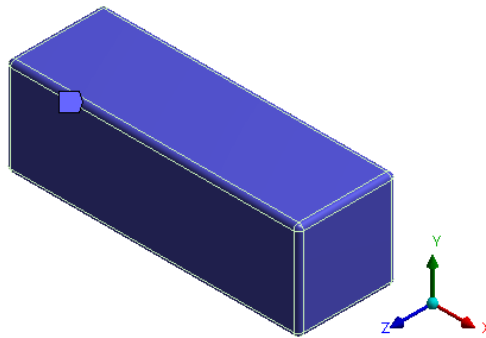
Şekil 4.13 : Kiriş model geometrisi.

Kiriş model için mesh işlemi uygulanırken Poliamid malzeme üzerine Hex Dominant Method uygulanmıştır. Free Face Mesh Type ayarı All Quad olarak seçilmiş, Element Order ise Use Global Setting olarak belirlenmiştir. Poliamid malzeme için Hacim Ölçülendirme seçeneği kullanılmış ve element Size 0,5 mm olarak ayarlanmıştır. Poliamid malzemenin Mesh işlemi sonrası görüntüsü Şekil 4.14’de verilmiştir.



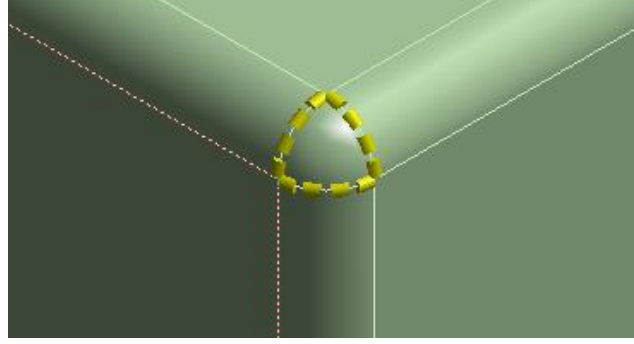
Şekil 4.14 : Mesh işlemi sonrası poliamid malzeme.

Kaplama katmanlarının tüm yüzeylerine Face Meshing ve Yüzey Ölçülendirme (Face Sizing) uygulanmış ve Element Size 0,25 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Kaplama katmanlarına uygulanan Face Meshing metodu.

Kaplama katmanlarının köşelerinde Kenar Ölçülendirme uygulanmış ve Element Size 0,25 mm olarak girilmiştir (Şekil 4.16). Method Quadliterals olarak seçilmiştir.



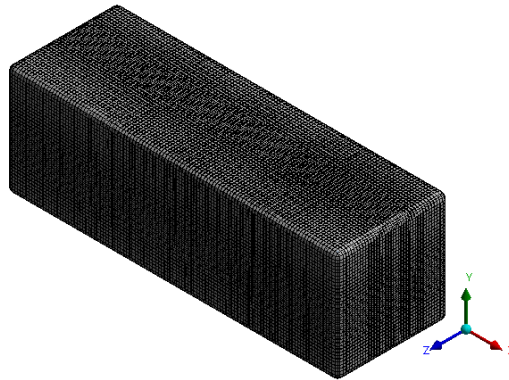
Şekil 4.16 : Kaplama köşelerine uygulanan kenar ölçülendirme.

Mesh işlemi sonrası kiriş modellerde oluşturulan toplam eleman ve düğüm noktası sayısı Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Kiriş modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları.

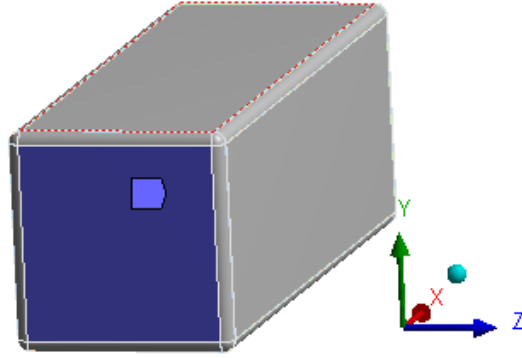
Model No.	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
1	183005	94483
2	182545	94023
3	182849	94327
4	182545	94023
5	183005	94483
6	182545	94023
7	182849	94327
8	182545	94023
9	182849	94327
10	182545	94023
11	182545	94023

1 No.lu kiriş modelin poliamid ve tüm kaplama katmanlarına mesh işlemi uygulandıktan sonraki görüntüsü Şekil 4.17’de verilmiştir



Şekil 4.17 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu kiriş model.

Kiriş model Şekil 4.18’de görülen kenar yüzeyinden (Krom katman dış yüzü) Fixed Support ile tutularak sınırlandırılmıştır.

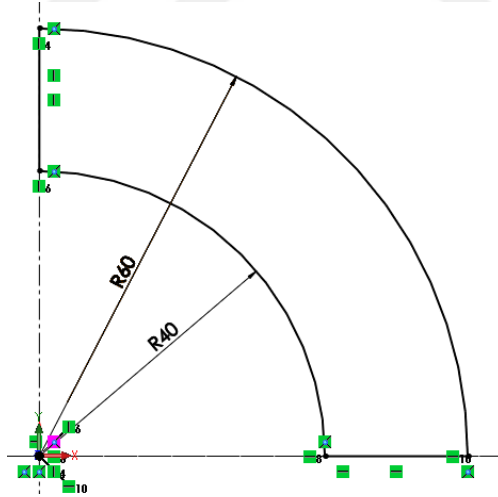


Şekil 4.18 : 1 No.lu kiriş model üzerinde Fixed Support ile tutulan yüzey.

4.2.3 Halka model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Halka model SOLIDWORKS yazılımı kullanılarak 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur.

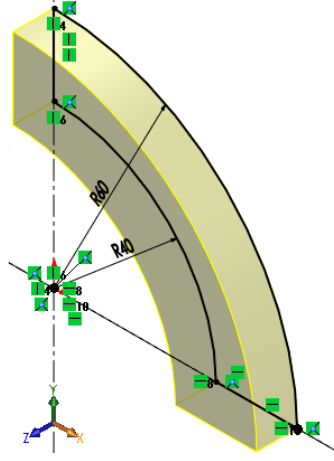
Model, eğimli yüzlere sahip çeyrek dairesel geometriye sahiptir. Model, XY düzleminde aynı merkezli, yarıçapları 40 mm ve 60 mm olan iki yayın birleştirilmesiyle oluşturulmaya başlanmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 : Halka model tasarımı ilk adımı.

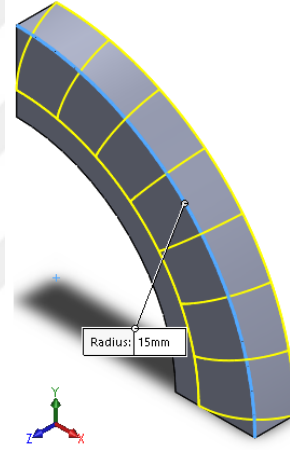
2 boyutlu çizim oluşturulduktan sonra Z eksenini boyunca ekstrüzyon ile 10 mm çekilerek geometri üç boyutlu katıya dönüştürülmüştür.

Üçüncü boyut kazandırılmış çeyrek Halka model Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20 : Üçüncü boyut kazandırılmış çeyrek halka model.

Üç boyutlu hale gelen model üzerine 15 mm'lik radyus Şekil 4.21'de gösterilen köşe boyunca uygulanmıştır.



Şekil 4.21 : 15 mm radyus uygulanan köşe.

Radyus uygulanan geometri üzerine Şekil 4.22'de gösterilen yüzeyleri seçilerek iç boşaltma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.22 : İç boşaltma işlemi için seçilen yüzeyler.

Böylece geometrinin kalınlığının her yerde 3 mm olması sağlanmıştır (Şekil 4.23).



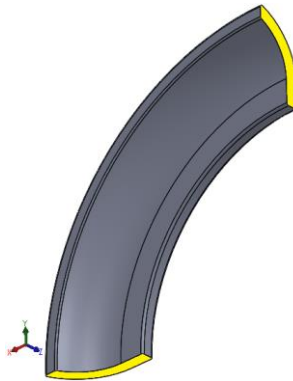
Şekil 4.23 : 3 mm kalınlığa sahip içi boşaltılmış model.

İçi boşaltılmış model üzerinde Şekil 4.24’de gösterilen köşeler boyunca 0,5 mm radyus uygulanmıştır.



Şekil 4.24 : 0,5 mm radyus uygulanan köşeler.

Poliamid için katı model oluşturulduktan sonra yüzey öteleme ile kabuklar oluşturulmuştur. Kabuk katmanları oluşturmak için Şekil 4.25’de görülen yüzeyler dışında kalan tüm yüzeyler seçilmiş ve daha sonra analiz dahilinde kalınlık kazandırılacak kabuklar oluşturulmuştur.



Şekil 4.25 : Halka modelde öteleme işleminde hariç tutulan yüzeyler.

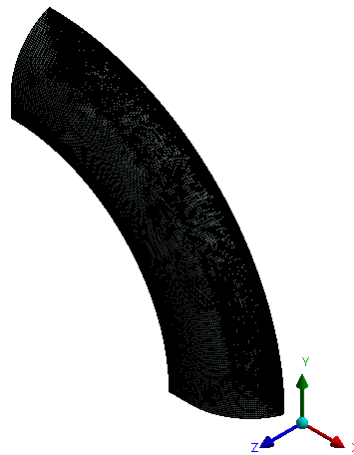
Halka model üzerine mesh işlemi uygulanırken poliamid hacim için Hex Dominant Method kullanılmıştır. Free Face Mesh Type ayarı All Quad olarak seçilmiş, Element Order ise Use Global Setting olarak belirlenmiştir. Poliamid malzeme ve tüm kaplama katmanlarının Şekil 4.24’de gösterilen 0,5 mm radyus uygulanarak oluşturulan yüzeylerine, Yüzey Ölçülendirme işlemi uygulanmış ve Element Size 0,2 mm olarak belirlenmiştir. Yine poliamid malzeme ve tüm katmanlar için 0,5 mm radyus uygulanan yüzeyler dışında kalan yüzeylerin tamamına, Yüzey Ölçülendirme uygulanmış ve Element Size 0,4 mm olarak girilmiştir.

Mesh işlemi sonrası halka modellerde oluşturulan toplam eleman ve düğüm noktası sayısı Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Halka modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları.

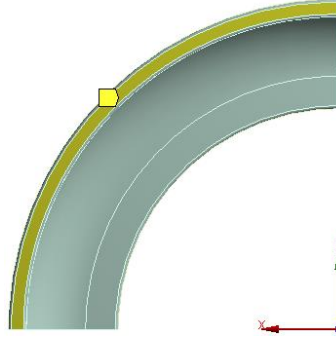
Model No.	Eleman sayısı	Node Sayısı
1	762181	288759
2	758170	287632
3	758837	287636
4	756131	288662
5	761342	288885
6	754732	286715
7	759065	288354
8	763923	290428
9	759148	287623
10	760146	288529
11	758554	287365

1 No.lu Halka modelin poliamid ve tüm kaplama katmanlarına mesh işlemi uygulandıktan sonraki görüntüsü Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.26 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu halka model.

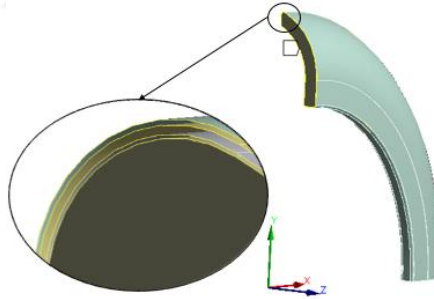
Halka model Şekil 4.27'de görülen yüzeyinden (Krom katman dış yüzü) Displacement ile sınırlandırılmıştır (X: Free, Y: Free, Z: 0 mm).



Şekil 4.27 : Halka model üzerinde Z düzleminde sabitlenen yüzey.

Poliamid malzemede modelin alt ve üst kısmında kalan yüzeyler (Şekil 4.25 : Hariç tutulan yüzeyler) Displacement ile sınırlandırılmıştır. Üst kısımda kalan yüzey sınırlandırılırken X: 0 mm, Y: Free, Z: Free; alt kısımda kalan yüzey sınırlandırılırken X: Free Y: 0 mm, Z: Free olarak ayarlanmıştır.

Kaplama katmanları için sınırlandırma işlemi yapılırken yine Displacement metodu uygulanmıştır (Şekil 4.28). Üst kenarlar için: X: 0 mm, Y: Free, Z: Free; alt kısımda kalan kenarlar için ise X: Free Y: 0 mm, Z: Free olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.28 : Displacement uygulanan kaplama katman kenarları (Üst).

4.2.4 Tutamak model için sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Bu tezde kullanılan Tutamak isimli model, ticari bir otomobil markasının üretmiş olduğu araç üzerinde kaput tutamak olarak kullanılan parça üzerinden elde edilmiştir.

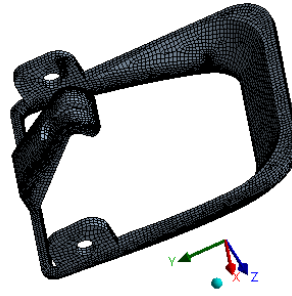
Model üzerinde mesh işlemi uygulanırken Hex Dominant Method kullanılmıştır. Free Face Mesh Type ayarı ilk dört model için All Quad, geri kalan tüm modeller için Quad/Tri olarak seçilmiştir. Element Order Use Global Setting olarak belirlenmiştir. İlk üç model dışındaki tüm modellere Hacim Ölçülendirme uygulanmış ve Element Size: Default olarak ayarlanmıştır.

Mesh işlemi sonrası tutamak modellerde oluşturulan toplam eleman ve düğüm noktası sayısı Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Tutamak modellerde oluşturulan düğüm noktası ve eleman sayıları.

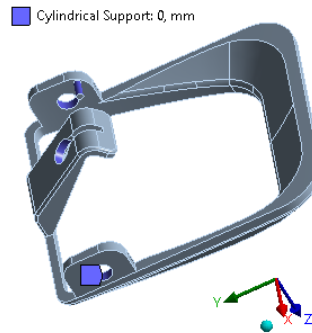
Model No.	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
1	380156	165935
2	384078	167298
3	378405	164976
4	145465	94863
5	136155	91614
6	136816	91687
7	136001	91411
8	135906	91275
9	136502	91497
10	137776	91975
11	137757	91952

Mesh işlemi uygulanmış 1 No.lu tutamak modeli Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29 : Mesh işlemi sonrası 1 No.lu tutamak model.

Tutamak model Şekil 4.30’da belirtilen silindirik yüzeylerden (Krom katman dış yüzü) Cylindrical Support ile sınırlandırılmış; Radial: Fixed, Axial: Fixed ve Tangential: Fixed olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.30 : Tutamak model üzerinde Cylindrical Support ile sınırlandırılan yüzeyler.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dört modelde (silindirik çubuk, kiriş, halka ve tutamak), her bir katmanın (bakır, nikel ve krom) farklı kalınlık varyasyonları için farklı geometri ve analizler oluşturulup katman kalınlıklarındaki değişimin tüm katmanlar üzerindeki gerilmelere olan etkisi incelenmiştir.

Bu bölümde, elde edilen sonuçlar kullanılarak sıcaklığın artışına karşın Von Mises gerilme grafikleri her bir model için verilmiştir. Ayrıca katman kalınlıklarındaki değişim ve termal yükten dolayı meydana gelen toplam deformasyonların (Total Deformation), her bir katman üzerindeki değerleri de grafik olarak sunulmuştur.

Malzemeler, belirli bir yüklemeye maruz kaldığında malzemenin durum ya da fiziksel yapısında değişiklik görülmesi beklenir. Bu; durağan bir haldeki malzemenin kuvvet etkisi altında belirli bir miktarda yer değiştirmesi ya da fiziksel olarak şeklinin değişmesi, çekme ile uzaması, basma ile kısılması ve deforme olması gibi pek çok farklı şekilde gerçekleşebilir. Bu çalışmada numuneler üzerine termal yük uygulanmıştır. Termal yüke maruz kalan numunelerde gerilme yükleri meydana gelmiştir. Numuneler üzerinde oluşan gerilme değerleri okunurken Von Mises eşdeğer gerilme değerleri kullanılmıştır.

Her model için farklı malzemelerden oluşan katmanlar ve poliamid ana malzeme üzerinde termal yük, aynı adım ve büyüklüklerde uygulanmış olmasına rağmen oluşan gerilme değerleri geometriye bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Malzeme, maruz kaldığı termal yük kaynaklı gerilme ile şekil değişimine uğramış ve sıcaklık, negatif değerlerdeyken özellikle plastik malzeme üzerinde büzüşme hali gözlemlenirken sıcaklık pozitif değerlerde yükseldikçe bu etki tersine dönerek malzemenin genişleme davranışı olarak gözlemlenmiştir. Ana malzeme olan poliamid ve katmanlarda kullanılan bakır, krom ve nikelin termal genişleme özellikleri birbirinden farklıdır. Dolayısıyla genişleme ve büzüşme davranışı da her malzeme için farklı oranlarda gerçekleşmiştir. Birbirine ideal yapışık olarak kabul edilen katmanlar ve ana malzemedeki bu termal davranış farkı, gerilmelere sebep olmaktadır. Katman kalınlığı ve geometri gibi fiziksel özelliklerin değişmesi ile

birlikte her bir malzeme üzerinde ortaya çıkan bu gerilme değeri, diğer katmanlar üzerinde oluşan gerilmeleri de doğrudan etkilemektedir.

Bahsi geçen bu gerilme yükü, tek bir düzlem ya da doğrultuda var olan skaler bir değer değil farklı bileşenlere sahip bir tensördür. Örneğin; çekme yüküne maruz kalan bir malzeme de yük altında belli bir süre elastik olarak davranırken yükleme değeri kritik bir noktayı aştığında plastik davranış göstermeye başlayacaktır. Elastik davranıştan plastik davranışa geçişin gerçekleştiği noktadaki değer, akma dayanımı ya da akma gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Numune üzerindeki gerilme değeri, akma gerilmesi olarak adlandırılan bu değeri aştığında numunenin plastik olarak şekil değiştireceğini söyleyebiliriz. Aynı şekilde, çekme testi örneği için x yönünde çekilen numune üzerinde gerilmenin x-x bileşeninin değeri, akma gerilmesi değerini geçtiğinde numune üzerinde plastik şekil değiştirme davranışının gerçekleşeceğini söyleyebiliriz. Fakat unutulmamalıdır ki gerçek hayatta karşımıza çıkan yükleme türleri çoğunlukla tek eksenli değildir ve tensör bileşenlerinin tamamı da sıfıra eşit olmamaktadır.

Deneyisel yöntemle elde edilen akma gerilmesi değeri ile de kıyaslanabilen ve malzemenin plastik şekil değiştirme davranışı göstermeye başladığını söylemek için kullanabileceğimiz değere karşılık olan bu gerilme, Von Mises eşdeğer gerilmesi olarak tanımlanabilir. Gerilim tensörü bağımsız altı bileşenden oluşmaktadır ve hacimsel (volümetrik) ve deviatorik parçalar olarak ayrılabilir. Matematiksel olarak volümetrik şekil değiştirme ve gerilme, şekil değiştirme ve gerilme tensörünün izinin üçte biri olarak tanımlanabilir. Geri kalan fark ise deviatorik gerilmedir.

Volümetrik şekil değiştirme, doğrudan cismin şeklinde herhangi bir değişim olmadan hacminde gerçekleşen değişime karşılık gelir ve cismin hacimsel ölçeklendirilmesi gibi de tanımlanabilir. Buna karşın deviatorik gerilim ise cisimde oluşan bozunma ve kayma etkilerine karşılık gelir.

Mekanik davranışlar termodinamik kanunlarına göre gerçekleşir. Bu kanunlar kısaca; enerjinin yoktan var, vardan yok olamayacağını fakat bir formdan bir başka forma değişebileceğini savunmaktadır. Buradan hareketle bir parçaya mekanik bir kuvvet uygulandığında söz konusu parça üzerinde bir miktar iş gerçekleştirildiği söylenebilir. Bu enerji, şekil değiştirme enerjisi olarak parça üzerinde depolanır. Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu:

$$W = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (5.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada σ : gerilme değerini, ε : şekil değiştirme miktarını ifade eder.

Diğer bir ifadeyle bu enerji, parçanın her bir diferansiyel hacminde depolanan şekil değiştirme enerjisidir. Bu enerji tüm diferansiyel hacimler için toplanırsa parçada depolanan toplam şekil değiştirme enerjisi elde edilir.

Toplam enerjinin bir miktarı parçanın hacmi üzerinde değişiklik gerçekleşmesine sebep olan volümetrik enerji, geri kalan kısmı ise parçanın şeklinin bozulmasına sebep olan deviatorik enerjidir. Von Mises gerilmesi, deviatorik enerji olarak adlandırılan bu bileşenle ilgilidir.

Von Mises gerilmesi, herhangi bir noktada parçanın akma davranışı sergileyip sergilemediğini göstermekte kullanılan skaler bir ölçüm metriği olarak tanımlanabilir. Şekil değiştirme enerjisinden hareketle herhangi bir noktada hesaplanan gerilmelerin bileşenlerinin bileşkesi alınarak matematiksel olarak Von Mises olarak bilinen skaler bir değer olarak yazılabilir ve deneysel metotlarla elde edilen değerlerle kıyaslanabilir. 3 boyutlu yükleme koşulları için aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{zz}\sigma_{xx} + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{1}{2} (\sigma_{kk})^2} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad (5.5)$$

Burada; σ_{vm} : Von mises gerilme değerini, σ : normal gerilmeleri, τ : kayma gerilmelerini, x, y ve z bu gerilmelerin bulunduğu düzlemleri, i, j ve k düzlem değişkenini ifade eder.

Sonuçlar değerlendirilirken kıyaslanan toplam deformasyon (Total Deformation) değerleri (U) ise malzemenin X, Y ve Z düzlemlerindeki uzama miktarlarının (U_x, U_y, U_z) bileşkesi alınarak elde edilmekte ve aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

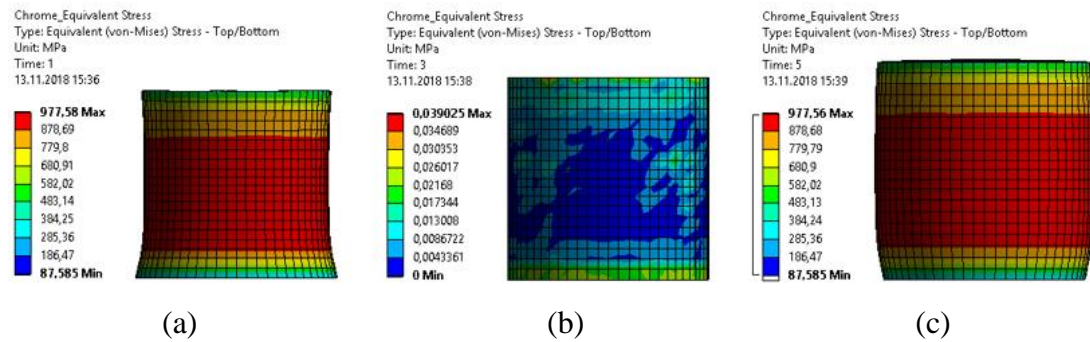
$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (5.6)$$

Malzeme özelliklerinin farklı doğrulama yöntemleriyle doğrulandığı bu çalışmada, Von Mises gerilme değerlerinden oluşan sonuçlar kullanılarak malzemenin akma davranışının değerlendirilmesi mümkün kılınmıştır. Bu sayede, gerilme değeri ve bu değerin yoğunlaştığı bölgelerden hareketle numunelerin akma davranışı sergileyip sergilemeyeceği, sergileyecekse bu davranışın hangi bölgelerde oluşabileceğini öngörmek mümkün olacaktır.

Daha önce Çizelge 4.5’de de belirtildiği üzere, bu çalışmada modellenen kaplama katmanları farklı kalınlık varyasyonlarına sahiptir. Silindir çubuk, kiriş, halka ve tutamak modelleri için bu değerler 11 farklı şekilde uygulanmıştır. Her bir katman (Ör. Bakır) üç farklı kalınlıkta modellenmiş ve benzer şekilde diğer katmanların kalınlıkları da her seferinde değiştirilerek uygulanmıştır. Her iki katmanın kalınlığı sabit tutulup üçüncü katman kalınlığının değişimi ve bu değişimin tüm katmanlardaki gerilme durumuna etkisi grafiklerle verilmiştir.

5.1 Silindir Çubuk Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

1 No.lu silindir çubuk model için sırasıyla (a) -40 °C, (b) 0 °C ve (c) 40 °C’lik termal yük altında krom katmanda oluşan Von Mises gerilmeleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



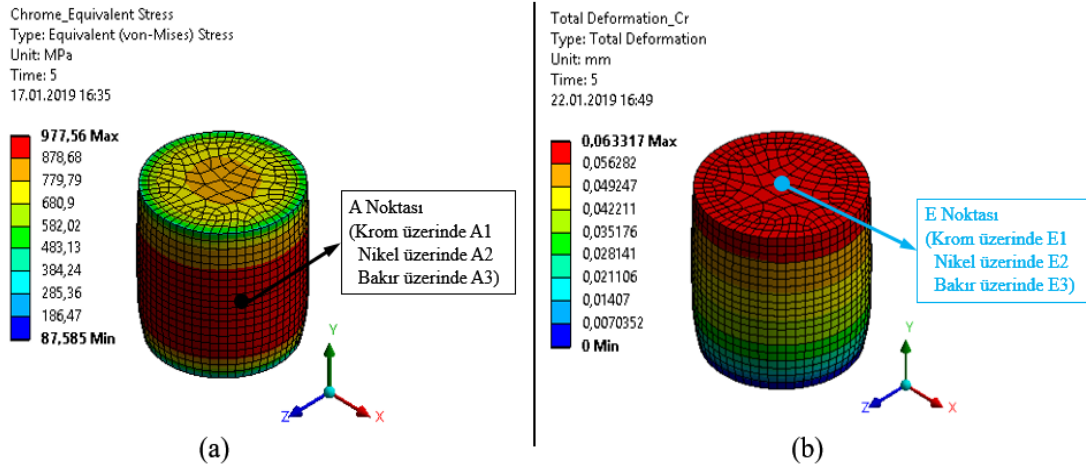
Şekil 5.1 : 1 No.lu silindir çubuk modelde (a) -40 °C, (b) 0 °C ve (c) 40 °C’lik termal yük altında krom katmanda oluşan Von Mises gerilmeleri.

Şekilden de görüldüğü üzere negatif termal yükleme şartları altında büzüşme davranışı gösteren silindir çubuk modelde, pozitif termal yük uygulandıktan sonra ortaya çıkan gerilmelerle birlikte fıçı etkisi oluşmuştur. Diğer modellerde de benzer etki oluşmuştur. Bu etkiyle birlikte modelin silindirik yan yüzeyi genişlemiş, geometri bombeli bir görünüm kazanmıştır. Sonuçlar üzerinden oluşturulan grafikler için bu etki göz önünde bulundurulmuştur. Modelin en kritik yani diğer bir deyişle en

fazla gerilmeye maruz kalan bölgesi olarak silindirik yan yüzeyin en dışta kalan, alt ve üst tabanların tam ortasında bulunan kısım seçilmiştir. Seçilen bu yüzey üzerinde minimetre cinsinden X:10, Y:10, Z:0 koordinatına sahip A noktası belirlenmiştir. Gerilme değerleri değerlendirilirken bu noktadan alınan veriler kullanılmıştır. İlgili konum A noktası olarak adlandırılırken krom üzerinde bu nokta A1, nikel üzerinde A2 ve bakır üzerinde A3 olarak adlandırılmıştır. Tüm A noktaları çakışıktır ve silindir çubuk modelin değerlendirilmesi yapılırken gerilme değerleri bu noktalardan ya da bu noktalara en yakın konumdaki düğüm noktalarından okunmuştur.

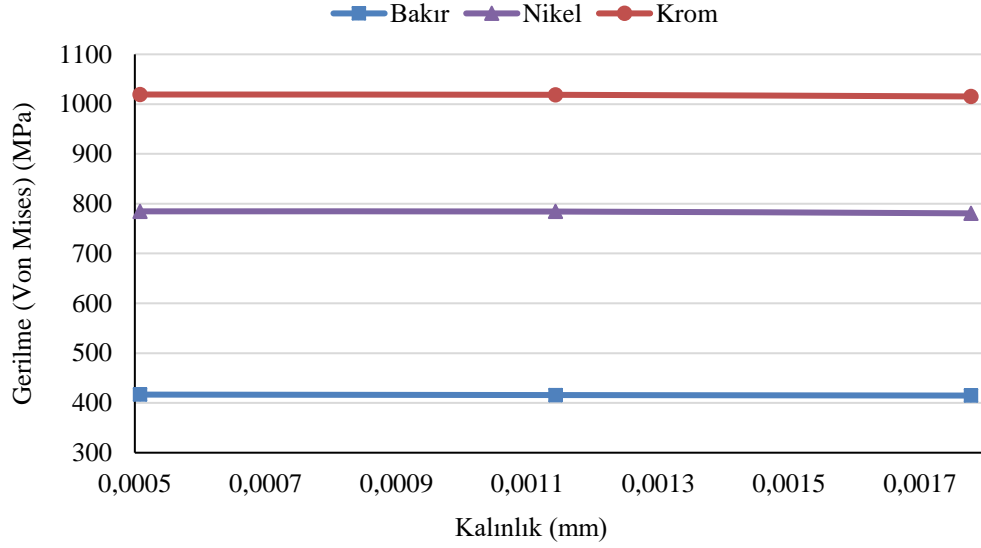
Benzer şekilde model üzerinde deformasyonun en çok gerçekleştiği yer olarak X:0, Y:20, Z:0 koordinatlarına sahip E noktası seçilmiştir. Krom, nikel ve bakır katmanlar üzerinde sırasıyla E1, E2, E3 noktaları tanımlanmış ve deformasyon miktarlarını değerlendirmek için kullanılan grafikler oluşturulurken bu çakışık noktalardan alınan değerler kullanılmıştır (Şekil 5.2).

Görseller 1 no.lu silindir çubuk modelin analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Modelin krom katmanı üzerinde 5 no.lu yükleme adımı sonucunda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.2 : Silindir çubuk model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu A noktası ve (b) deformasyonların okunduğu E noktası.

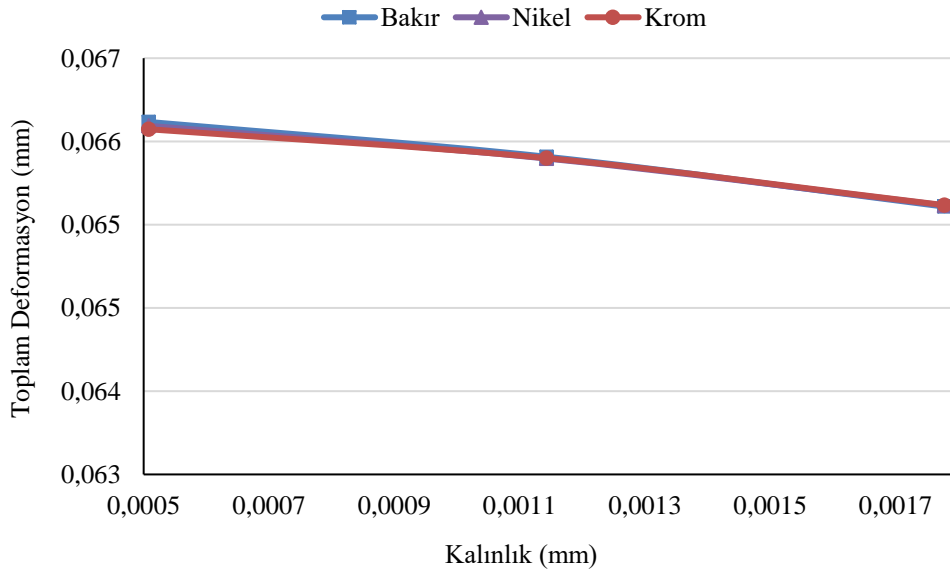
Silindir model üzerinde krom katman kalınlığı değişirken nikel ve bakır katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 4, 8 ve 11 No.lu modellerde oluşan gerilme değişimlerinin A noktasındaki değerleri Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3 : 4, 8 ve 11 No.lu silindir çubuk modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak A noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerinin neredeyse hiç değişmediği görülmektedir. Gerilmelerdeki değişimin, krom katman kalınlığıyla ters orantılı olduğu ve %0,38 ile %0,46 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

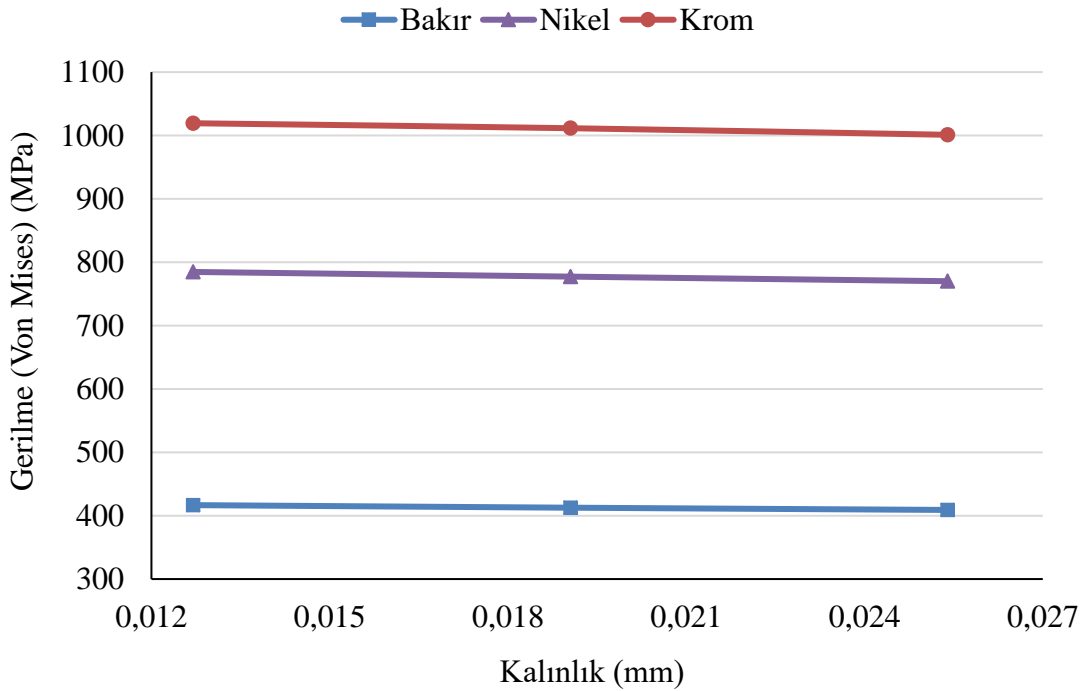
Krom katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu aynı modeller için E noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4 : 4, 8 ve 11 No.lu silindir çubuk modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak E noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerindeki değişimin oldukça az olduğu ve %1,11 ile %1,24 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Buradan hareketle deformasyon miktarının her katmanda birbirine yakın değerlerde oluştuğunu söylemek mümkündür.

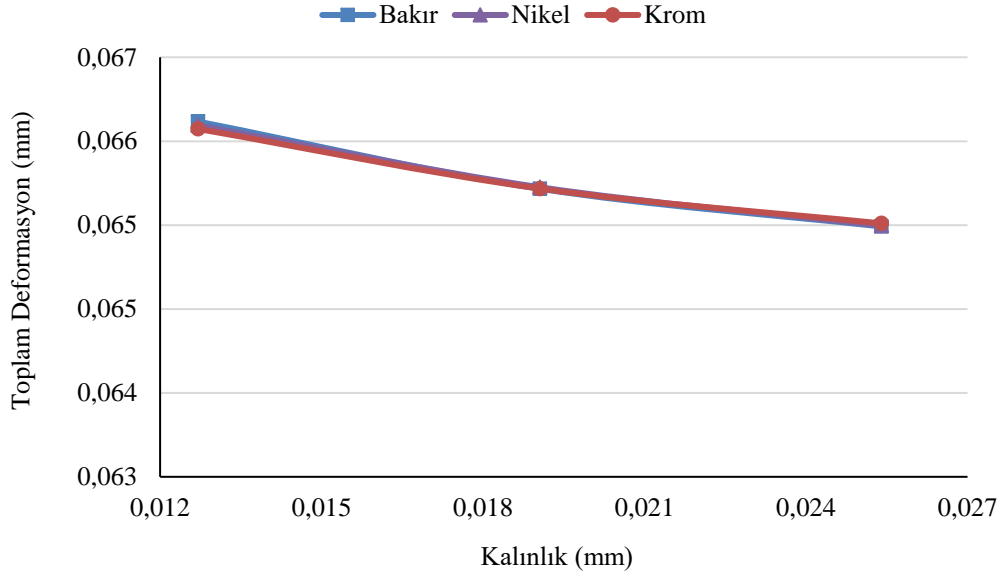
Bakır katman için farklı değerlerin uygulandığı 7, 8 ve 9 No.lu silindir çubuk modellerde krom ve nikel katman kalınlığı sabit tutulmuştur. Şekil 5.5'te, bakır katman kalınlığının değişimine bağlı olarak bakır, nikel ve krom katmanlar üzerinde oluşan Von Mises gerilmelerinin A noktasındaki değerleri verilmiştir.



Şekil 5.5 : 7, 8 ve 9 No.lu silindir çubuk modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak A noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Grafik incelendiğinde, bakır katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerindeki değişimin, krom katman kalınlığına bağlı olarak oluşan değişime oranla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bakır katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının %1,8 - %1,9 arasında değiştiği görülmüştür.

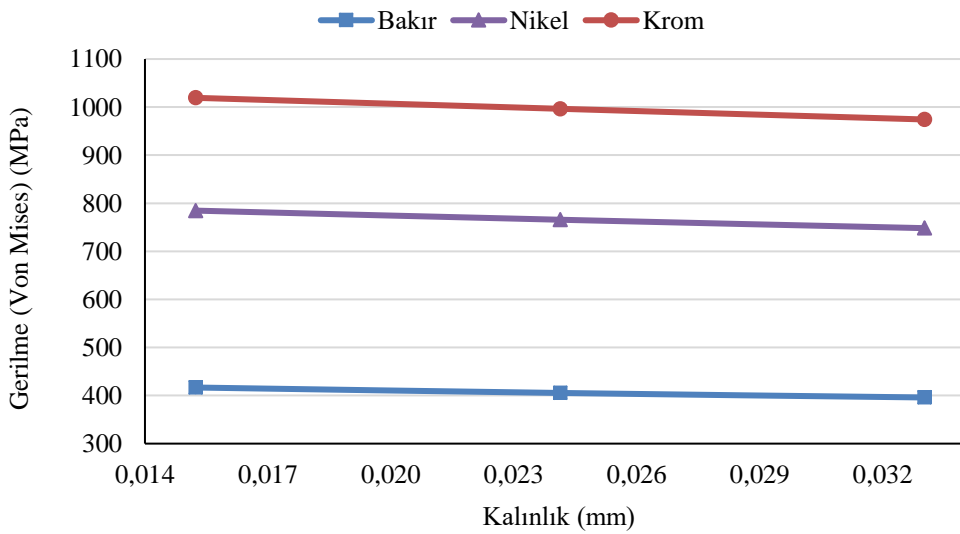
Bakır katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu aynı modeller için E noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 : 7, 8 ve 9 No.lu silindir çubuk modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak E noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, bakır katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerindeki değişimin oldukça az olduğu ve %1,4 ile %1,5 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Buradan hareketle deformasyon miktarının her katmanda birbirine yakın değerlerde oluştuğunu söylemek mümkündür.

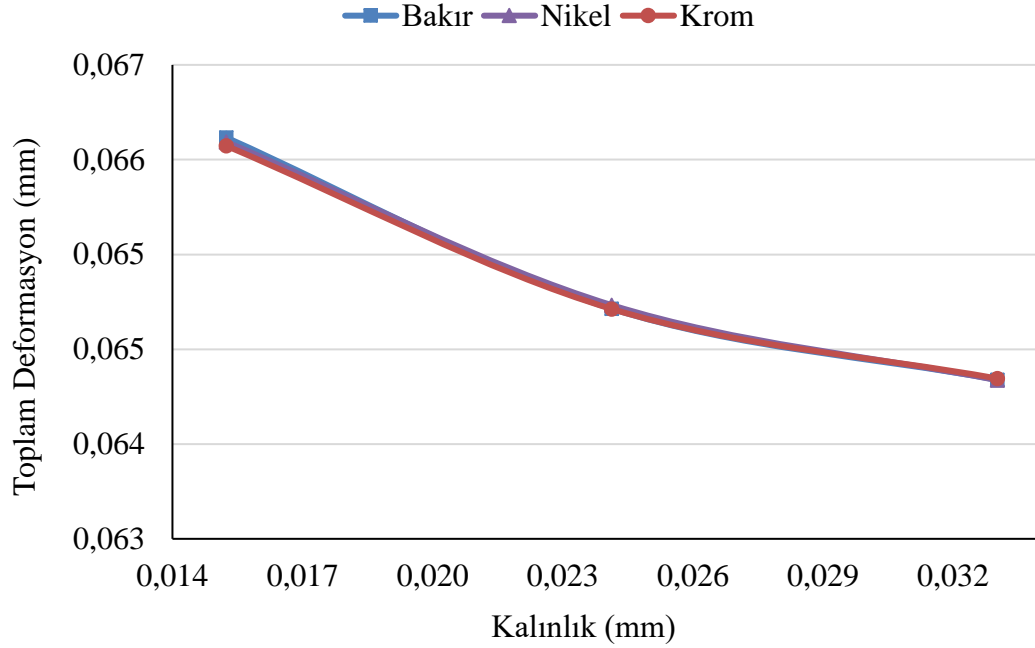
Nikel katman kalınlığı değişirken krom ve bakır katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu silindir çubuk modellerde oluşan gerilme değişimlerinin A noktasındaki değerleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7 : 6, 8 ve 10 No.lu silindir çubuk modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak A noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Nikel katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının yaklaşık olarak %4,6 ile %5,2 arasında değiştii görülmüştür.

Nikel katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu modeller için E noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8 : 6, 8 ve 10 No.lu silindir çubuk modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak E noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Nikel katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerindeki değişimin %3,05 ile %3,2 arasında değiştii gözlemlenmiştir.

Her bir malzeme için (bakır, nikel ve/veya krom) bir katmanın kalınlığı değişirken diğer katmanların kalınlıklarının sabit tutulmasıyla oluşturulan modeller üzerinde yürütölen analizlerle elde edilen grafikler incelenmiştir. Bu grafiklerden de görölmektedir ki, nikel katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerindeki değişim, diğer katmanların kalınlık değişiminin oluşturduğu etkiye oranla daha fazladır.

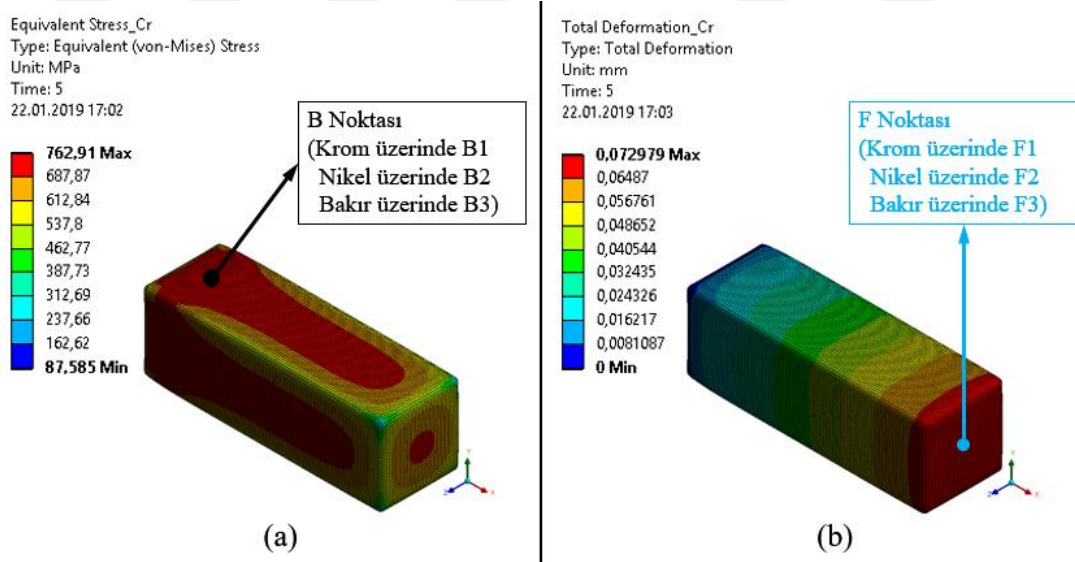
Kısaca, silindir çubuk model için gerilme ve deformasyonların değişiminde en etkili katman nikel olarak belirlenmiştir ve bu katmanı sırasıyla bakır ve krom katmanlar takip etmektedir.

5.2 Kiriş Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Kiriş modelde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçlarında gerilme dağılımları incelenerek gerilmelerin yoğun olduğu ve dolayısıyla kritik bölge olarak adlandırılabilir bölgede B noktası belirlenmiştir. Grafikler oluşturulurken okunan değerler, bu noktadan ya da bu noktaya mümkün olan en yakın noktadan alınmıştır. Minimetre cinsinden koordinatları X:5, Y:10 ve Z:-5 olan B noktası ile çakışan B1 noktası krom katman üzerinde, B2 noktası nikel katman üzerinde ve B3 noktası da bakır katman üzerinde belirlenmiştir. Tüm B noktalarının çakışık olduğu varsayılmış ve gerilme değerleri ilgili katman üzerindeki B noktasından alınmıştır.

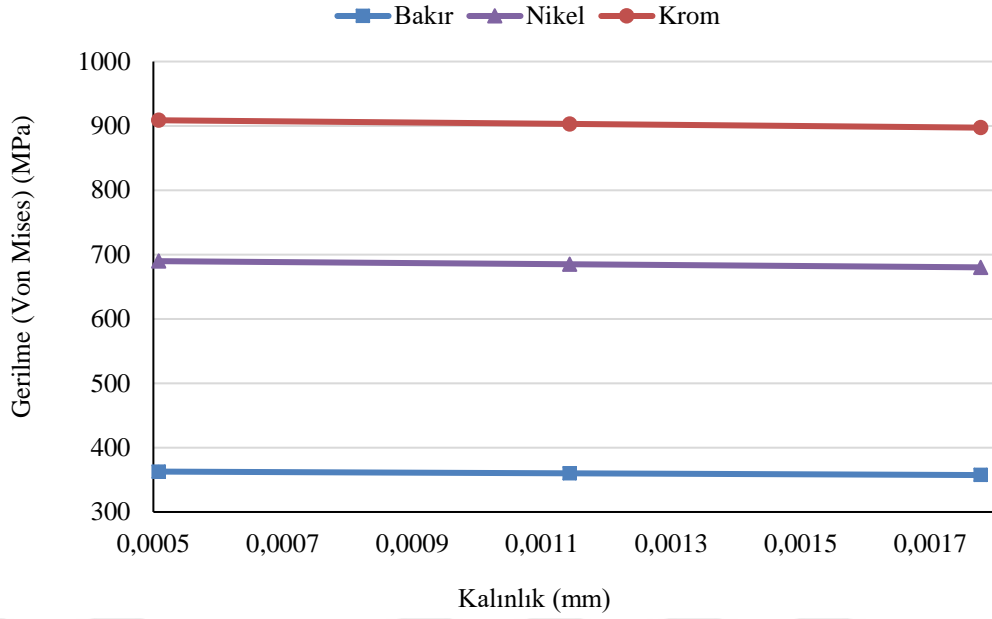
Benzer şekilde model üzerinde deformasyonun en çok gerçekleştiği yer olarak X:30, Y:5, Z:-5 koordinatlarına sahip F noktası seçilmiştir. Krom, nikel ve bakır katmanlar üzerinde sırasıyla F1, F2, F3 noktaları tanımlanmış ve deformasyon miktarlarını değerlendirmek için kullanılan grafikler oluşturulurken bu çakışık noktalardan alınan değerler kullanılmıştır (Şekil 5.9).

Görseller 1 no.lu kiriş modelin analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Modelin krom katmanı üzerinde 5 no.lu yükleme adımı sonucunda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.9 : Kiriş model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu B noktası ve (b) deformasyonların okunduğu F noktası.

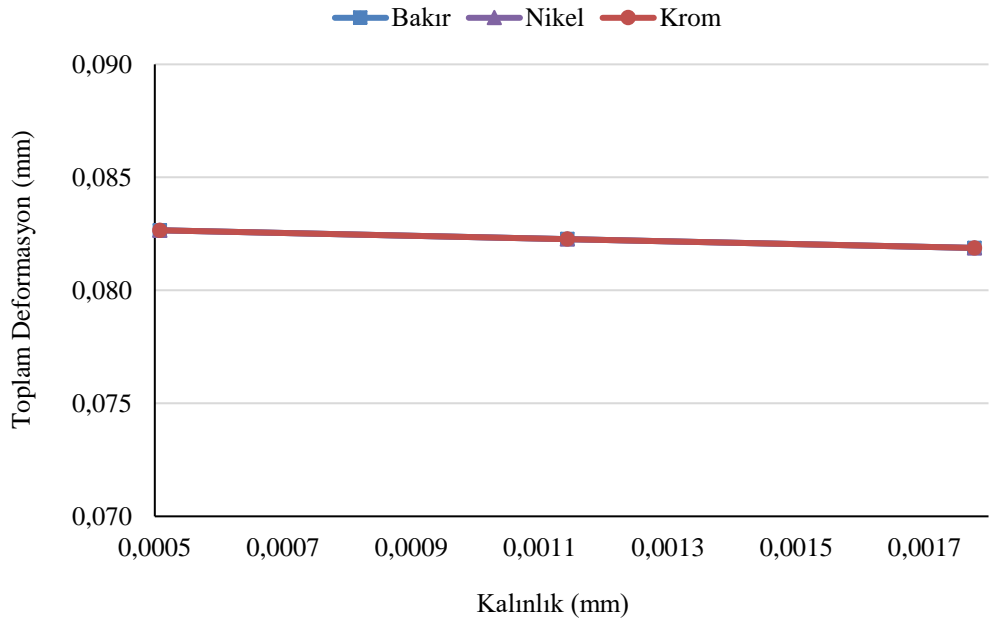
Kiriş model üzerinde krom katman kalınlığı değişirken nikel ve bakır katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 4, 8 ve 11 No.lu modellerde oluşan gerilme değişimlerinin B noktasındaki değerleri Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 : 4, 8 ve 11 No.lu kiriş modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak B noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerindeki değişimin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu değişim, krom katman kalınlığıyla ters orantılı olup; %1,3 ile %1,5 arasında gözlemlenmiştir.

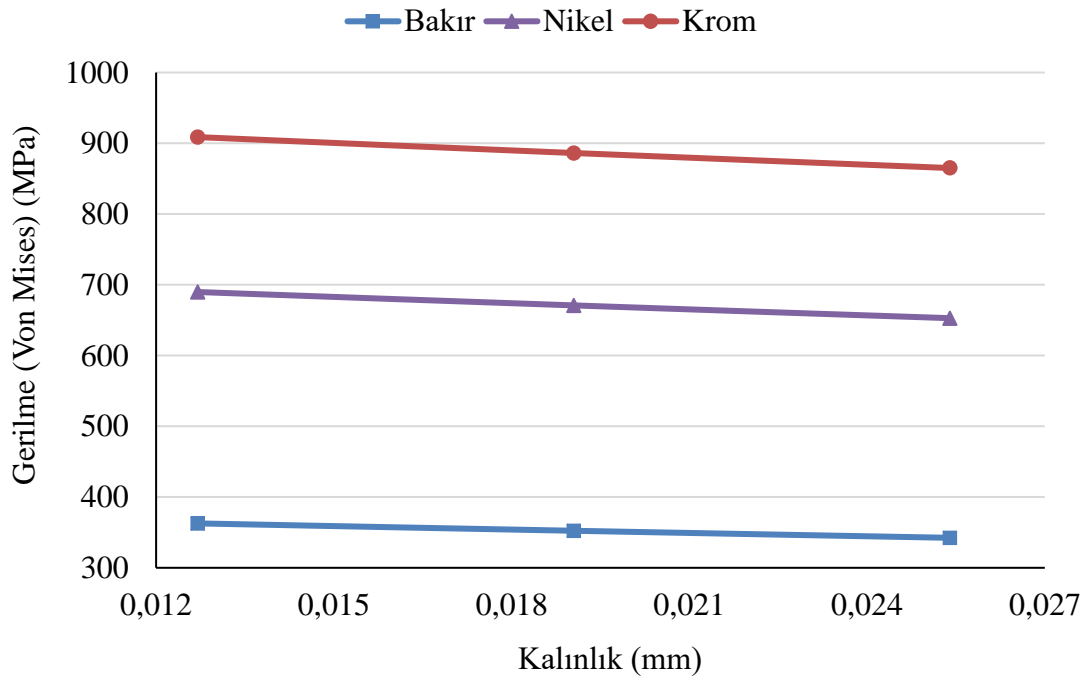
Krom katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu aynı modeller için F noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11 : 4, 8 ve 11 No.lu kiriş modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak F noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerinin her katmanda birbiriyle aynı olduğu görülmüştür. Söz konusu deformasyon değişiminin her katmanda %0,95 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Bakır katman için farklı değerlerin uygulandığı 7, 8 ve 9 No.lu kiriş modellerde krom ve nikel katman kalınlığı sabit tutulmuştur. Şekil 5.12’de bakır katman kalınlığının değişimine bağlı olarak bakır, nikel ve krom katmanlar üzerinde oluşan Von Mises gerilmelerinin B noktasındaki değerleri verilmiştir.

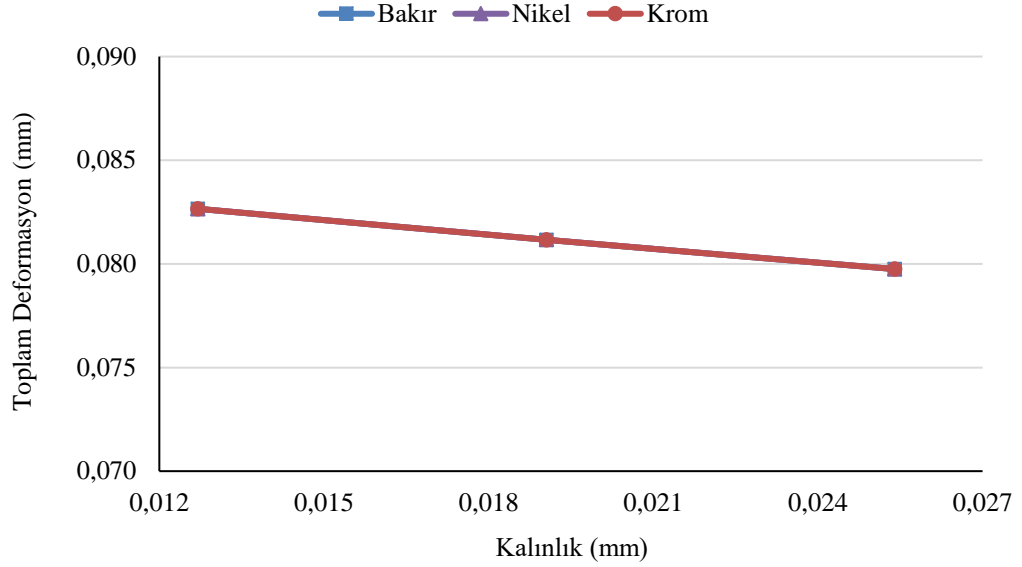


Şekil 5.12 : 7, 8 ve 9 No.lu kiriş modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak B noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Bakır katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerindeki değişimlerin krom katmandan kaynaklanan değişime oranla 4 kat kadar daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Bakır katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının %5 - %6 aralığında değiştiği görülmüştür.

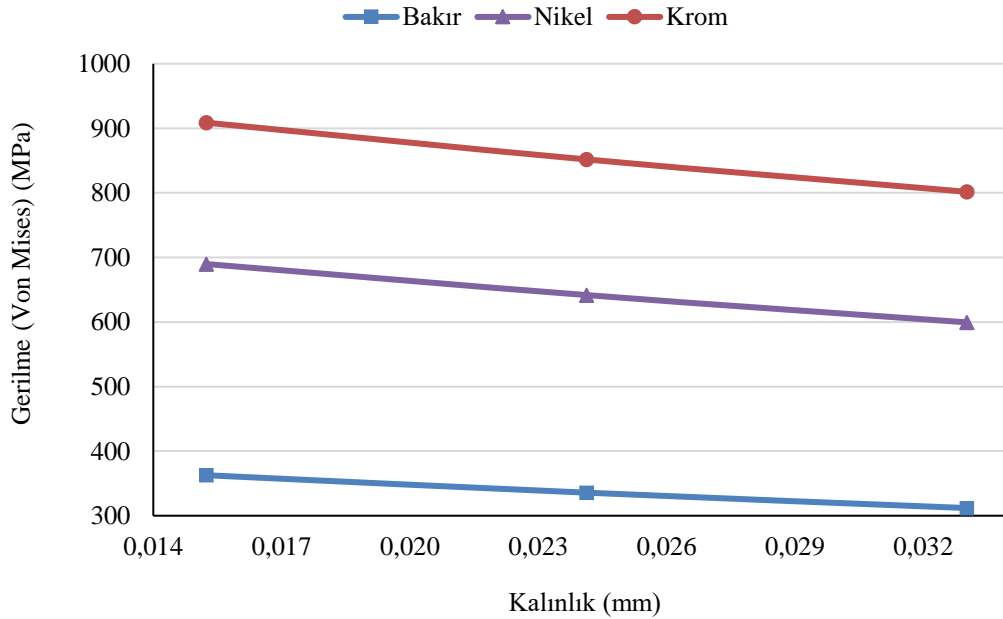
Bakır katman kalınlığı değişirken nikel ve krom katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 7, 8 ve 9 No.lu modeller için F noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13 : 7, 8 ve 9 No.lu kiriş modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak F noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, bakır katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerinin her katmanda birbiriyle aynı olduğu görülmüştür. Söz konusu deformasyon değişiminin her katmanda %3,65 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

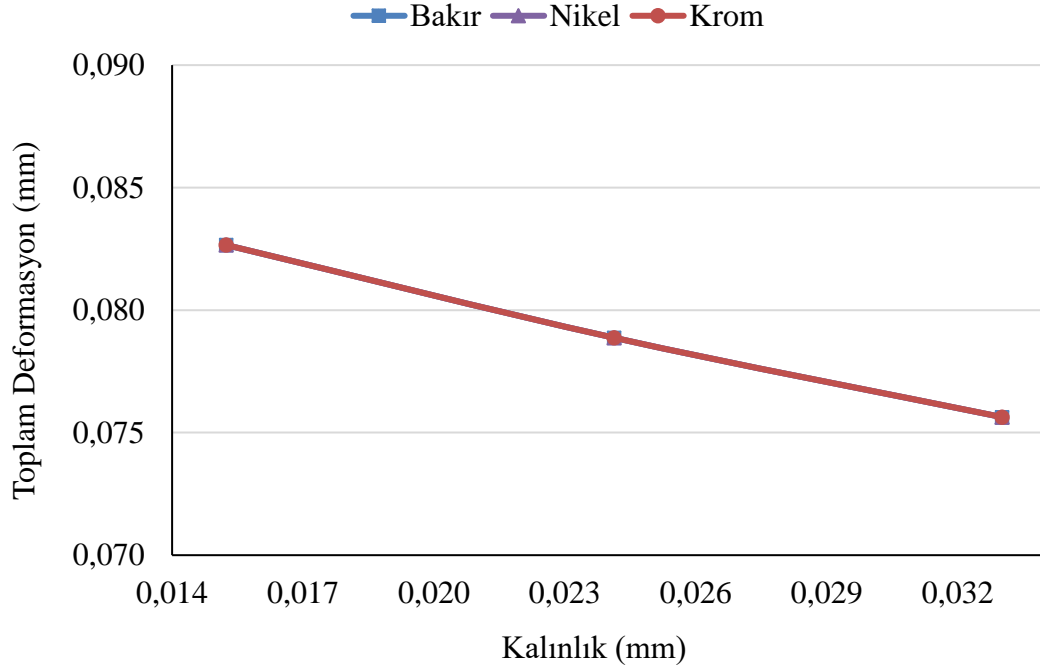
Nikel katman kalınlığı değişirken krom ve bakır katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu modellerde oluşan gerilme değişimlerinin B noktasındaki değerleri Şekil 5.14’de verilmiştir.



Şekil 5.14 : 6, 8 ve 10 No.lu kiriş modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak B noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Nikel katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının %13,4 ile %16,3 arasında değiştii görülmüştür.

Nikel katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu kiriş modeller için F noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.15'de verilmiştir.



Şekil 5.15 : 6, 8 ve 10 No.lu kiriş modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak F noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

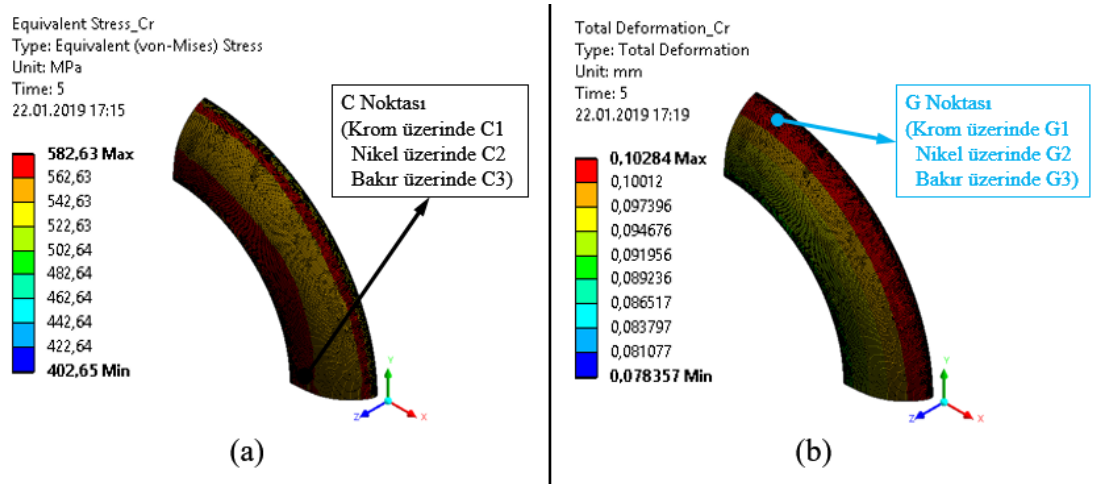
Nikel katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerindeki değişimin her katmanda %9,3 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Her bir malzeme için bir katmanın kalınlığı değişirken diğer katmanların kalınlıklarının sabit tutulmasıyla oluşturulan modeller üzerinde yürütölen analizlerle elde edilen grafikler incelenmiştir. Bu grafiklerden de görölmektedir ki nikel katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerindeki değişim, diğer katmanların kalınlık değişiminin oluşturduğu etkiye oranla daha fazladır.

Özetle, kiriş model için gerilme ve deformasyonların değişiminde en etkili katman nikel olarak belirlenmiştir ve bu katmanı sırasıyla bakır ve krom katmanlar takip etmektedir.

5.3 Halka Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

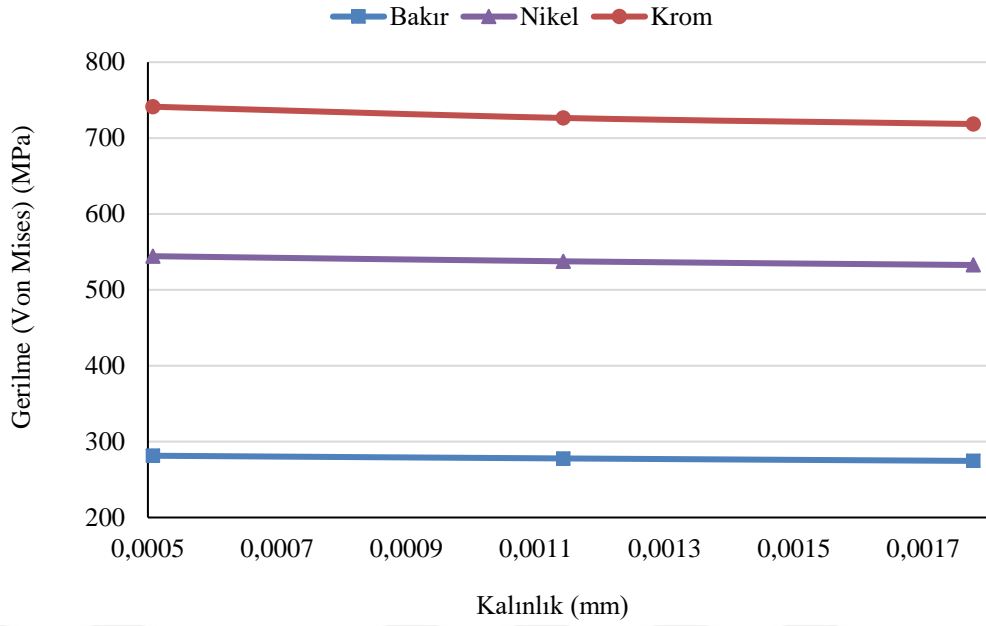
Halka modelde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçlarında gerilme dağılımları incelenerek geometri üzerinde gerilmelerin yoğun olduğu ve dolayısıyla kritik bölge olarak adlandırılabilir bölgede C noktası belirlenmiştir. Grafikler oluşturulurken okunan değerler bu noktadan ya da bu noktaya mümkün olan en yakın noktadan alınmıştır. Minimetre cinsinden koordinatları X:42,5, Y:0 ve Z:10 olan C noktası ile çakışan C1 noktası krom katman üzerinde, C2 noktası nikel katman üzerinde ve C3 noktası da bakır katman üzerinde belirlenmiştir. Tüm C noktalarının çakışık olduğu varsayılmış ve gerilme değerleri ilgili katman üzerindeki C noktasından alınmıştır. Benzer şekilde model üzerinde deformasyonun en çok gerçekleştiği yer olarak X:30, Y:51,5, Z:1,5 koordinatlarına sahip G noktası seçilmiştir. Krom, nikel ve bakır katmanlar üzerinde sırasıyla G1, G2, G3 noktaları tanımlanmış ve deformasyon miktarlarını değerlendirmek için kullanılan grafikler oluşturulurken bu çakışık noktalardan alınan değerler kullanılmıştır (Şekil 5.16).

Görseller 1 no.lu halka modelin analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Modelin krom katmanı üzerinde 5 no.lu yükleme adımı sonucunda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.16 : Halka model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu C noktası ve (b) deformasyonların okunduğu G noktası.

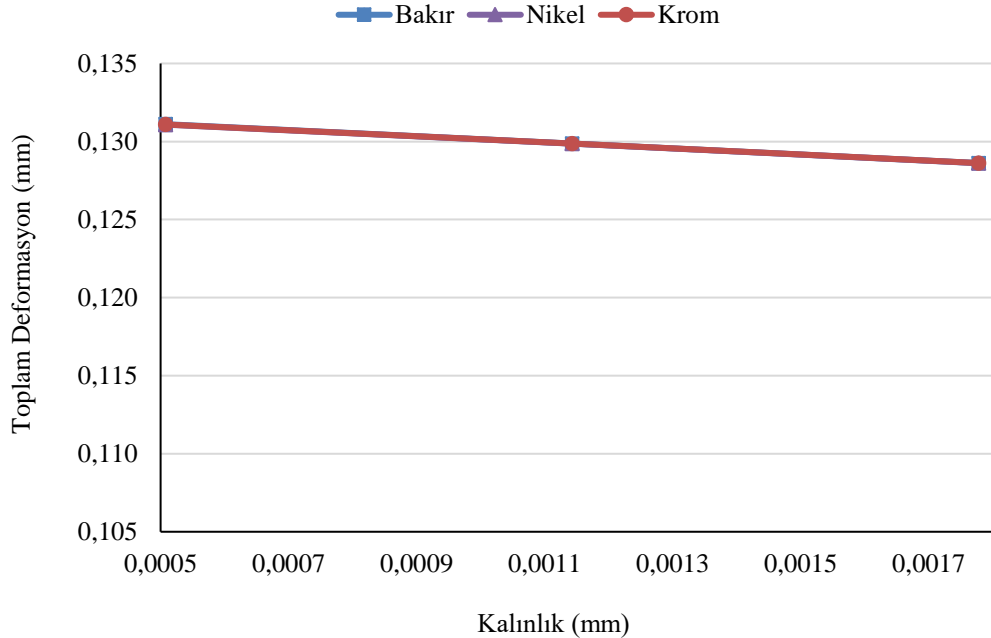
Halka model için 4, 8 ve 11 No.lu modellerde bakır ve nikel katman kalınlığı sabit tutulmuş, krom katman için farklı değerler uygulanmıştır. Şekil 5.17’de, krom katman kalınlığının değişimine bağlı olarak bakır, nikel ve krom katmanlar üzerinde oluşan Von Mises gerilmelerinin C noktasındaki değerleri verilmiştir.



Şekil 5.17 : 4, 8 ve 11 No.lu halka modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak C noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerinin krom katman kalınlığıyla ters orantılı olduğu ve %2,2 ile %3,2 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

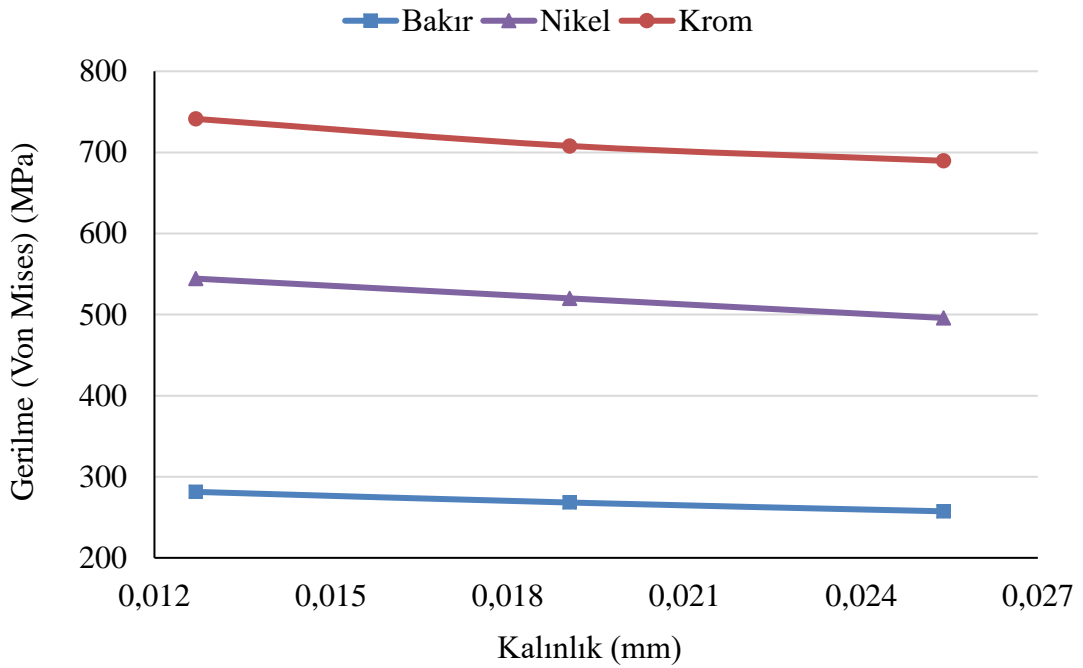
Krom katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu aynı modeller için G noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18 : 4, 8 ve 11 No.lu halka modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak G noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerinin her katmanda birbiriyle aynı olduğu görülmüştür. Söz konusu deformasyon değişiminin her katmanda %1,92 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Bakır katman için farklı değerlerin uygulandığı 7, 8 ve 9 No.lu halka modellerde krom ve nikel katman kalınlığı sabit tutulmuştur. Şekil 5.19'da bakır katman kalınlığının değişimine bağlı olarak bakır, nikel ve krom katmanlar üzerinde oluşan Von Mises gerilmelerinin C noktasındaki değerleri verilmiştir.

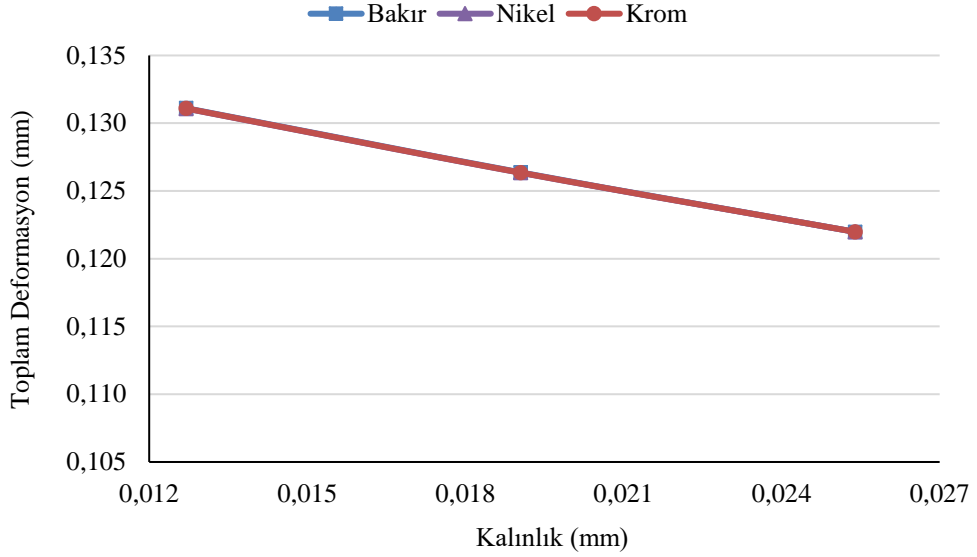


Şekil 5.19 : 7, 8 ve 9 No.lu halka modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak C noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Grafik incelendiğinde, bakır katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerindeki değişimin, krom katman kalınlığına bağlı olarak oluşan değişime oranla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Bakır katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının %7,5 - %9,8 aralığında değiştiği görülmüştür.

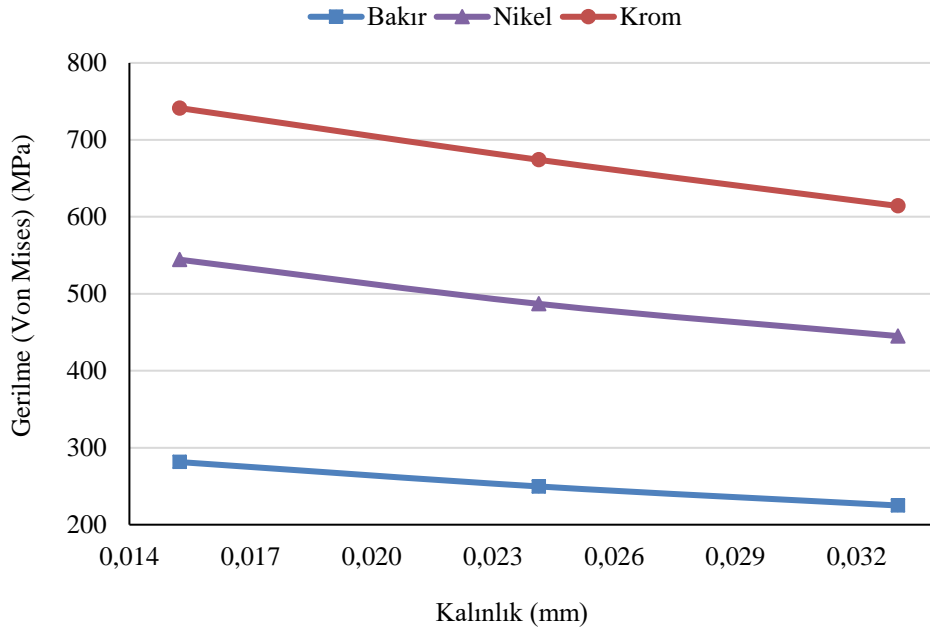
Bakır katman kalınlığı değişirken nikel ve krom katman kalınlıklarının sabit tutulduğu aynı modeller için G noktasındaki deformasyon değerlerindeki değişim durumu Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.20 : 7, 8 ve 9 No.lu halka modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak G noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, bakır katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerinin, her katmanda birbiriyle aynı olduğu görülmüştür. Söz konusu deformasyon değişiminin her katmanda %7,47 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

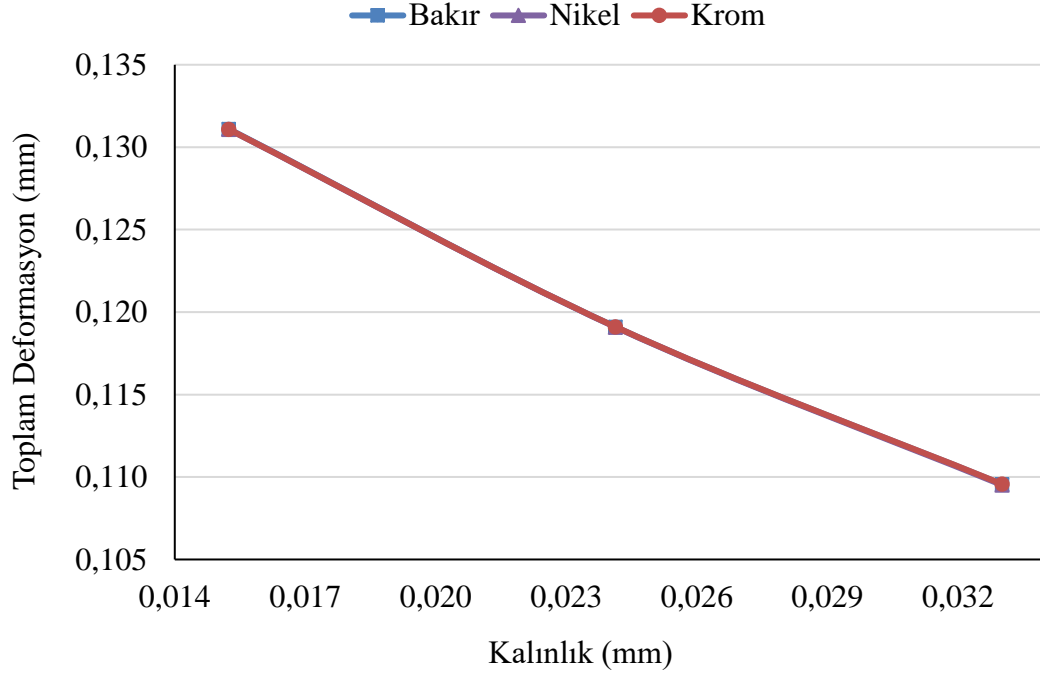
Nikel katman kalınlığı değişirken krom ve bakır katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu halka modellerde oluşan gerilme değişimlerinin C noktasındaki değerleri Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 : 6, 8 ve 10 No.lu halka modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak C noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Nikel katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının yaklaşık olarak %20,7 ile %25,1 arasında değiştii görülmüştür.

Nikel katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu modeller için G noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22 : 6, 8 ve 10 No.lu halka modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak G noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Nikel katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerindeki değişimin her katmanda %19,7 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Her bir malzeme için (bakır, nikel ve/veya krom) bir katmanın kalınlığı değişirken diğer katmanların kalınlıklarının sabit tutulmasıyla oluşturulan halka modeller üzerinde yürütölen analizlerle elde edilen grafikler incelenmiştir. Bu grafiklerden de görölmektedir ki, nikel katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerindeki değişim, diğer katmanların kalınlık değişiminin oluşturduğu etkiye oranla daha fazladır.

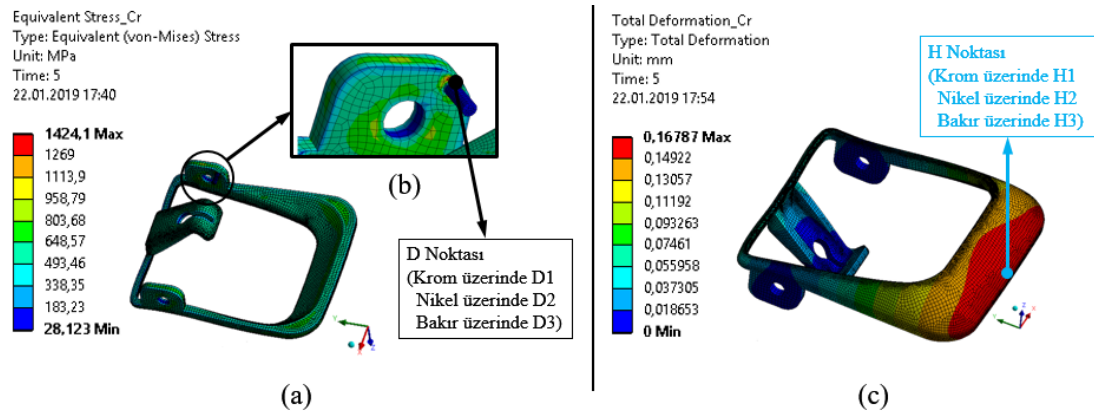
Kısaca, halka model için gerilme ve deformasyonların değişiminde en etkili katman nikel olarak belirlenmiştir ve bu katmanı sırasıyla bakır ve krom katmanlar takip etmektedir.

5.4 Tutamak Modelin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Tutamak modelde; sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçlarında gerilme dağılımları incelenerek geometri üzerinde keskin köşeli geçişin bulunduğu, gerilmelerin yoğun olduğu ve dolayısıyla kritik bölge olarak adlandırılabilen bölgede D noktası belirlenmiştir. Grafikler oluşturulurken okunan değerler bu noktadan ya da bu noktaya mümkün olan en yakın noktadan alınmıştır. Minimetre cinsinden koordinatları X:-43, Y:64,1 ve Z:-11,4 olan D noktası ile çakışan D1 noktası krom katman üzerinde, D2 noktası nikel katman üzerinde ve D3 noktası da bakır katman üzerinde belirlenmiştir. Tüm D noktalarının çakışık olduğu varsayılmış ve gerilme değerleri ilgili katman üzerindeki D noktasından alınmıştır.

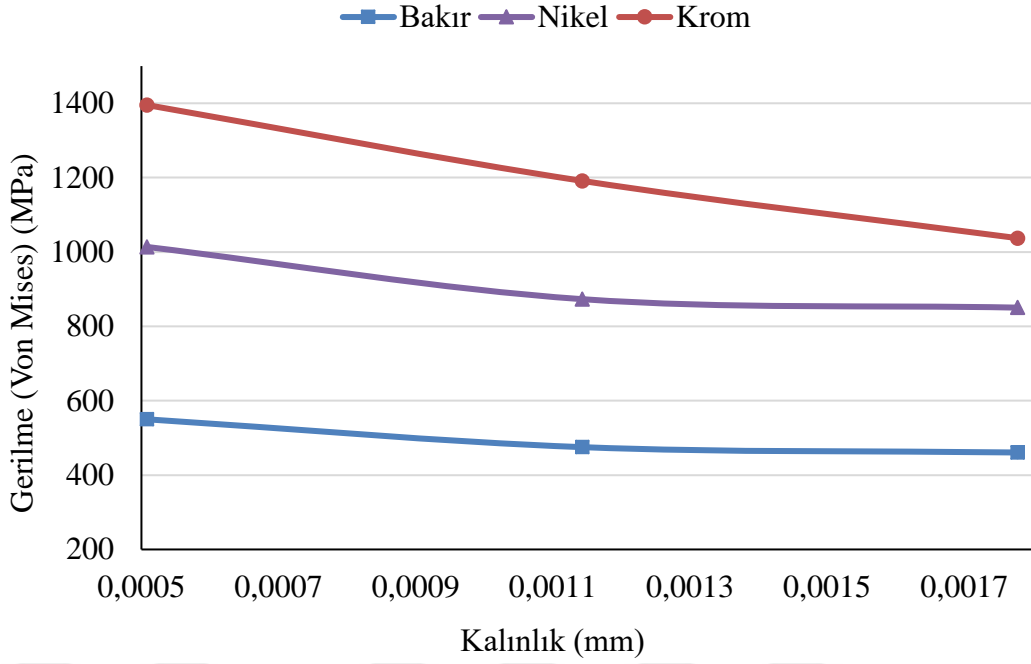
Benzer şekilde model üzerinde deformasyonun en çok gerçekleştiği yer olarak X:-6, Y:-1,2, Z:2,4 koordinatlarına sahip H noktası seçilmiştir. Krom, nikel ve bakır katmanlar üzerinde sırasıyla H1, H2, H3 noktaları tanımlanmış ve deformasyon miktarlarını değerlendirmek için kullanılan grafikler oluşturulurken bu çakışık noktalardan alınan değerler kullanılmıştır (Şekil 5.23).

Görseller 1 no.lu tutamak modelin analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Modelin krom katmanı üzerinde 5 no.lu yükleme adımı sonucunda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.23 : Tutamak model üzerinde (a) gerilmelerin okunduğu D noktası ((b) yakınlaştırılmış) ve (c) deformasyonların okunduğu H noktası.

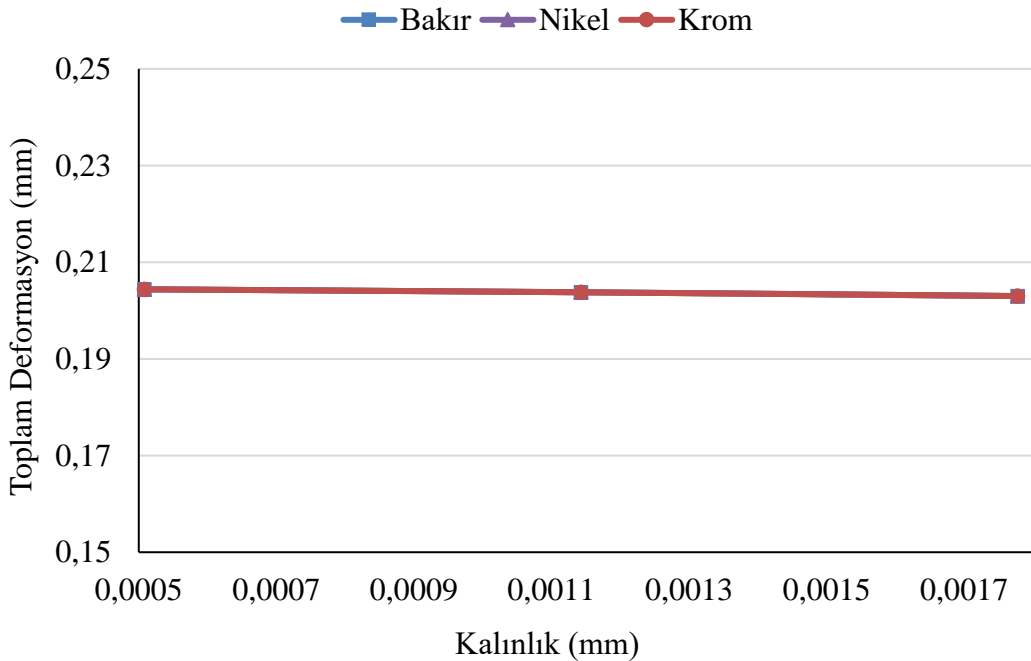
Tutamak model üzerinde krom katman kalınlığı değişirken, nikel ve bakır katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 4, 8 ve 11 No.lu modellerde oluşan gerilme değişimlerinin D noktasındaki değerleri Şekil 5.24’de verilmiştir.



Şekil 5.24 : 4, 8 ve 11 No.lu tutamak modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak D noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerinin %19,2 ile %34,5 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

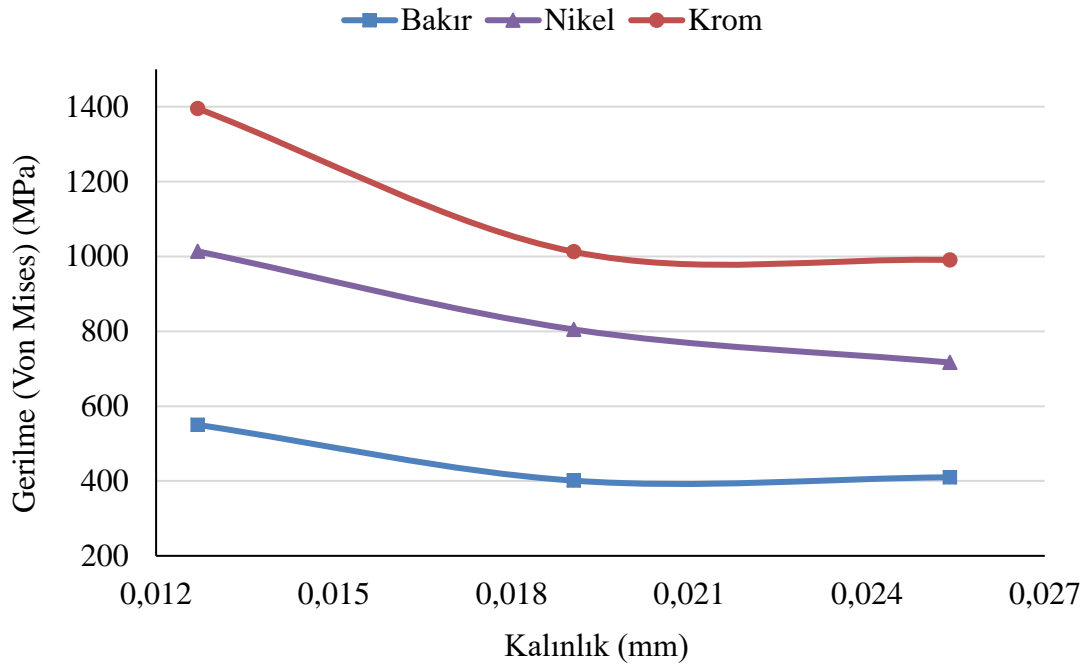
Krom katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu aynı modeller için H noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.25’de verilmiştir.



Şekil 5.25 : 4, 8 ve 11 No.lu tutamak modellerde krom katman kalınlığı değişimine bağlı olarak H noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, krom katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerinin her katmanda birbiriyle aynı olduğu görülmüştür. Söz konusu deformasyon değişiminin her katmanda %0,68 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Bakır katman için farklı değerlerin uygulandığı 7, 8 ve 9 No.lu tutamak modellerde krom ve nikel katman kalınlığı sabit tutulmuştur. Şekil 5.26'da, bakır katman kalınlığının değişimine bağlı olarak bakır, nikel ve krom katmanlar üzerinde oluşan Von Mises gerilmelerinin D noktasındaki değerleri verilmiştir.

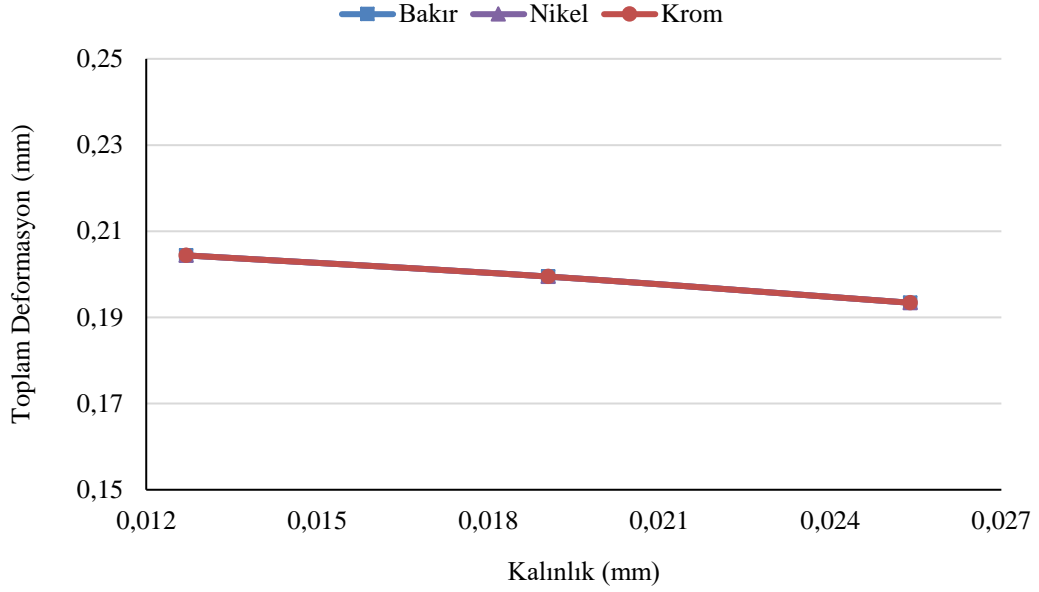


Şekil 5.26 : 7, 8 ve 9 No.lu tutamak modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak D noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Grafik incelendiğinde, bakır katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme değerlerindeki değişimin, krom katman kalınlığına bağlı olarak oluşan değişime oranla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Bakır katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının %34,1 - %40,9 arasında değiştiği görülmüştür.

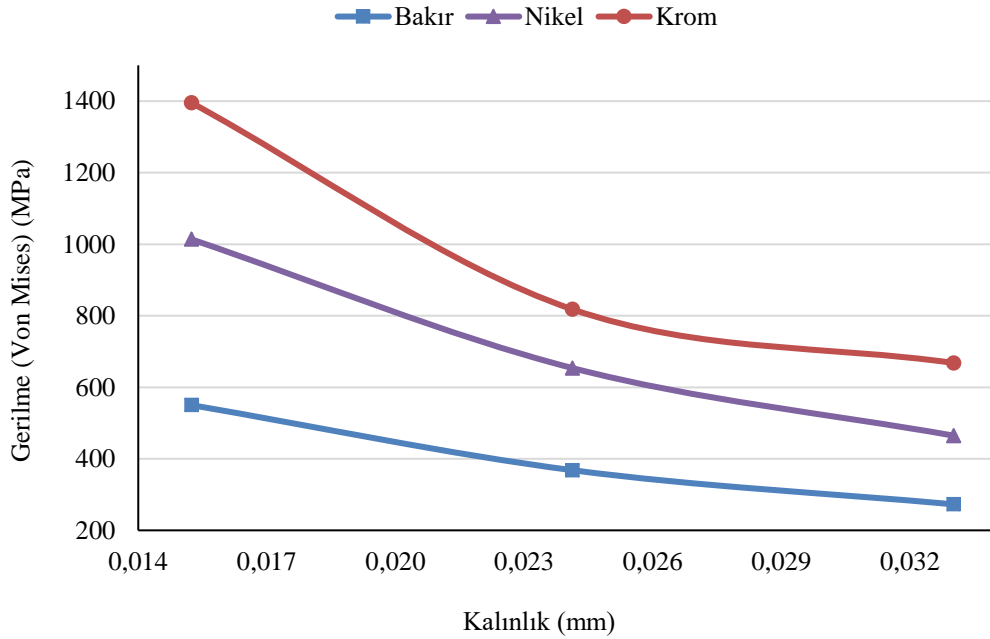
Bakır katman kalınlığı değişirken krom ve nikel katman kalınlıklarının sabit tutulduğu aynı modeller için H noktasındaki deformasyon değerlerindeki değişim durumu Şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5.27 : 7, 8 ve 9 No.lu tutamak modellerde bakır katman kalınlığı değişimine bağlı olarak H noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Grafik incelendiğinde, bakır katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerinin, her katmanda birbiriyle aynı olduğu görülmüştür. Söz konusu deformasyon değişiminin her katmanda %5,7 oranında gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

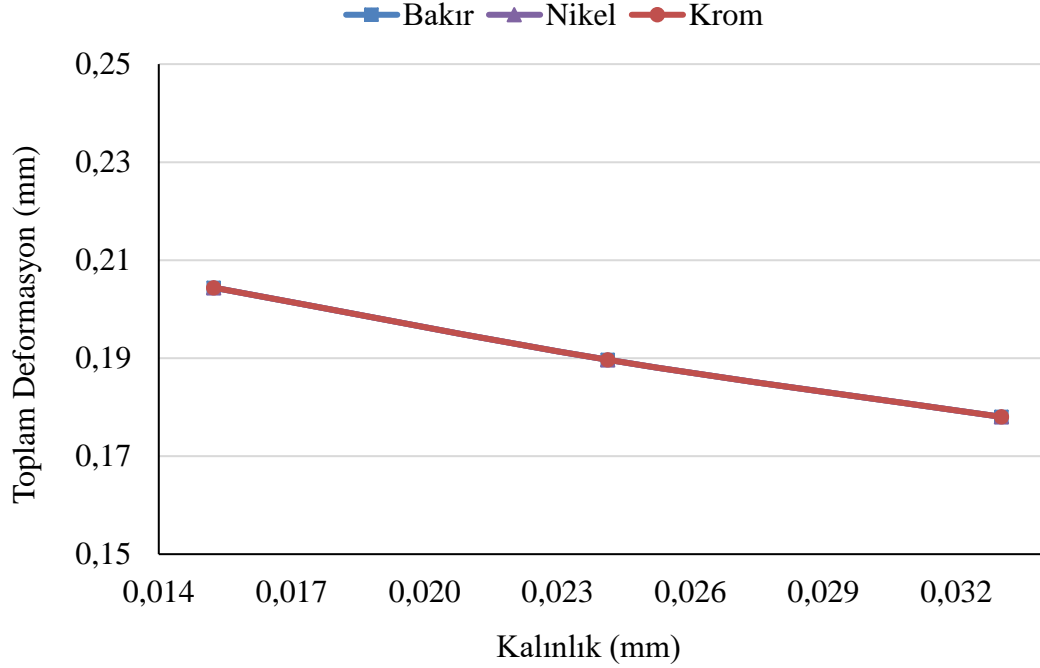
Nikel katman kalınlığı değişirken krom ve bakır katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu tutamak modellerde oluşan gerilme değişimlerinin D noktasındaki değerleri Şekil 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.28 : 6, 8 ve 10 No.lu tutamak modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak D noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme durumu.

Nikel katman kalınlığıyla ters orantılı olarak değişen gerilme miktarlarının yaklaşık olarak %101 ile %118 arasında değiştii görülmüştür.

Nikel katman kalınlığı değişirken diğer katman kalınlıklarının sabit tutulduğu 6, 8 ve 10 No.lu modeller için H noktasındaki deformasyon değerleri Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.29 : 6, 8 ve 10 No.lu tutamak modellerde nikel katman kalınlığı değişimine bağlı olarak H noktasında tüm katmanlar üzerinde oluşan deformasyon durumu.

Nikel katmanın kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan deformasyon değerlerindeki değişimin her katmanda %14,8 oranında gerçekteştiği gözlemlenmiştir.

Her bir malzeme için (bakır, nikel ve/veya krom) bir katmanın kalınlığı değişirken diğer katmanların kalınlıklarının sabit tutulmasıyla oluşturulan tutamak modeller üzerinde yürütölen analizlerle elde edilen grafikler incelenmiştir. Bu grafiklerden de görölmektedir ki nikel katman kalınlığının değişimiyle birlikte katmanlarda oluşan gerilme ve deformasyon değerlerindeki değişim, diğer katmanların kalınlık değişiminin oluşturduğu etkiye oranla daha fazladır.

Kısaca, tutamak model için gerilme ve deformasyonların değişiminde en etkili katman nikel olarak belirlenmiştir ve bu katmanı sırasıyla bakır ve krom katmanlar takip etmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Piyasada dekoratif kaplama yöntemiyle poliamid malzeme üzerine metalik kaplama uygulamaları yapılırken katman kalınlıklarının belirlenmesi için herhangi bir matematiksel yöntem kullanılmamaktadır. Numuneler farklı kalınlıklardaki katmanlarla kaplanıp yükleme koşullarına maruz bırakılarak deneme yanılma yöntemiyle uygun katman kalınlığının belirlenmesi için çalışılmaktadır.

Bu tez çalışması ile birlikte, matematiksel bir metot oluşturulmuştur. Bu metot ile, üretim esnasında kaplama uygulaması için deneme yanılma yöntemi kullanılırken oluşan maliyet ve zaman kayıplarını büyük oranda azaltmak mümkündür.

İstenilen geometri, gerekli yükleme şartları altında simüle edilebilir. Böylece, ideal katman kalınlıkları öngörülerek zaman ve maliyetten kazanç sağlanabilir.

Bahsi geçen metodu oluşturmak için gerçekleştirilen bu tez çalışmasında dekoratif kaplama yöntemiyle poliamid malzeme üzerine sırasıyla bakır, nikel ve krom kaplanmış parçalar aynı termal yük altında incelenmiştir.

Her bir katmanın kalınlığındaki değişimin, tüm katmanlar üzerinde oluşan gerilme değişimlerine ve deformasyon miktarlarına etkisi araştırılmıştır.

Bu araştırma sonucunda özetle şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Tüm modellerde, negatif termal yükleme koşulları altında malzemeler hacimsel olarak küçülerek büzüşme davranışı sergilerken pozitif termal yükleme durumunda bu davranış hacimsel genişleme olarak gözlemlenmiştir.
- Silindir çubuk modelde termal yük altında fiçı etkisi oluşmuştur. Bu etkiyle birlikte gerilmelerin en yoğun olduğu bölge, silindirik yan yüzün ortasında kalan bölge olmuştur. Deformasyon, en büyük değerlerini sabitlenen alt taban yüzeye en uzak bölge olan üst yüzeyde sergilemiştir.

- Kiriş modelde gerilmeler sabitlenen yüzey dışında kalan tüm yüzeylerin orta bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Deformasyonlar ise sabitlenen sol yüzeye paralel ve en uzakta bulunan sağ yüzeyde oluşmuştur.
- Halka modelde gerilmeler, taban ve taban arasında kalan yan yüzeyin orta kısmında yoğunlaşmıştır. Deformasyonların en yoğun olduğu bölge ise halkanın merkezine en uzak olan, en dışta kalan bölge olarak belirlenmiştir.
- Tutamak modelde gerilmeler, geometriye bağlı olarak keskin geçişlerin bulunduğu bölgede gerçekleşmiştir. Gerilmelerin en yüksek olduğu değerler, noktasal alanlarda gözlemlenmiştir. Geometrinin genelinde gerilmelerin bu noktalara kıyasla çok daha küçük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu sebeple belirtilen yükleme koşulları altında gerilmelere bağlı olarak geometrik bütünlüğün bozulmayacağı öngörülmüştür. Geometri üzerindeki deformasyonlar, silindirik destek ile tutulan silindirik yüzeylere en uzakta kalan bölgede oluşmuştur.
- Kaplama kalınlıklarındaki değişimin deformasyon değerlerindeki değişime olan etkisinin gerilmelere oranla çok daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.
- Tüm geometriler için kalınlığı değiştiğinde gerilme ve deformasyon değişimlerine en çok etki eden katmanlar, sırasıyla Nikel, Bakır ve Kromdur.
- Katman kalınlığı arttıkça oluşan gerilme değerleri ve deformasyon miktarları azalmaktadır.
- Aynı model için deformasyonlar tüm kaplama katmanlarında birbirine çok yakın ya da aynı miktarlarda meydana gelmektedir.
- Gerilme değişimleri katman kalınlığına bağlı olduğu gibi geometriye de bağlıdır. Eğri yüzeyler, keskin köşeler, süreksiz şekiller gibi geometriyi karmaşıktıraran unsurlar arttıkça gerilimlerde katman kalınlığına bağlı olarak oluşan değişim miktarı artmaktadır.
- Analizlerle elde edilen sonuçlar üzerinden gerilme değerleri ve bu değerlerin yoğunlaştığı bölgelerden hareketle numunelerin akma davranışı sergileyip sergilemeyeceği, sergileyecekse bu davranışın hangi bölgelerde oluşabileceğini öngörmek mümkündür.

Gelecekte benzer konularda yapılacak çalışmalar için öneriler ise şu şekildedir:

- Deneysel çalışmalar yapılarak analiz modelleri kıyaslanabilir.
- Bu tez çalışmasında genel olarak basit modeller modellenerek analiz edilmiştir. Daha karmaşık geometriler üzerinde yapılacak analizlerle değerlendirmeler yapılabilir.
- Çalışma kapsamında, otomotiv endüstrisinde yer bulan bir araç parçası olan tutamak isimli model incelenmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı endüstri ve uygulama alanlarında kullanılan geometriler incelenebilir.
- Üzerinde çalışılacak geometriye bağlı olarak termal yükleme şartları değiştirilerek farklı sıcaklıklar ve çevre koşulları altında analizler yapılabilir.
- Bu çalışma kapsamında geometriler üzerine sadece termal yükler uygulanmıştır. Yükleme için basınç, kuvvet vb. farklı değişkenler kullanılabilir.
- Uygulanacak yüklere bağlı olarak bu yükleme değişkenlerinin üzerinde çalışılacak geometrinin performansına etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Thompson, D. A.** (1979). Durability of Decorative Electroplated Plastics for Exterior Automotive Use—A Review, *SAE Transactions*, 88 (1), 798-807. doi:10.4271/790215.
- [2] **Amin, M. M., Kee, L.K. ve Yunus, K.** (2002). The process of electroplating in presence of Nickel salts, *Journal of Ultra Scientist of Physical Sciences*, 14 (3), 309-318.
- [3] **Gardner, A.** (2008). Meeting high performance decorative chromium plating specifications using trivalent chrome plating systems, *SAE World Congress & Exhibition*, (ss. yok). Detroit, Michigan, Nisan 14-17.
- [4] **Barchi, L., Bardi, U., Caporali, S., Fantini, M., Scrivani, A. ve Scrivani, A.** (2010). Electroplated bright aluminium coatings for anticorrosion and decorative purposes, *Progress in Organic Coatings*, 67, 146-151. doi:10.1016/j.porgcoat.2009.10.017.
- [5] **Abbott, A. P., Frisch, G. ve Ryder, K. S.** (2013). Electroplating Using Ionic Liquids, *The Annual Review of Materials Research*, 43, 335-358. doi:10.1146/annurev-matsci-071312-121640.
- [6] **Olivera, S., Muralidhara, H. B. ve Venkatesh, K.** (2016). Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review, *Journal of Materials Science*, 51, 3657-3674. doi:10.1007/s10853-015-9668-7.
- [7] **Sarraf, S. H., Soltanieh, M. ve Aghajani, H.** (2016). Repairing the cracks network of hard chromium electroplated layers using plasma nitriding technique, *Vacuum*, 127, 1-9. doi:10.1016/j.vacuum.2016.02.001.
- [8] **Mello, C. B., Mansur, R. A. F., Santos, N. M., Viana, W. E. S. S. ve Ueda, M.** (2017). Experimental study of mechanical and tribological behavior of nitrogen ion-implanted chromium thin films, *Surface Coatings and Technology*, 312, 123-127. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.12.100.
- [9] **Schmitz, E. P. S., Quinania, S. P., Garcia, J. R., de Andrade, C. K. ve Lopes, M. C.** (2016). Influence of Commercial Organic Additives on the Nickel Electroplating, *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 983-997.
- [10] **Milschi, L., Belahsen, I., Lain, C., Tomiello, S. S., Boeira, C. D., Bim, L. T., Cemin, F., Menezes, C. M., Perotti, B. L., Catafesta, J. ve Figueroa, C. A.** (2018). Optical and tribological properties of decorative titanium carbonitride coatings, *Surface Engineering*, 34, 562-568. doi:10.1080/02670844.2017.1388996.
- [11] **Devyatkina, T. I., Luchneva, S. I., Borisova, A. E., Belyaev, E. S., Mikhailenko, M. G., Rogozhin, V. V. ve Naumov, V. I.** (2017). Deposition of Protective-Decorative Coatings onto Aluminum Alloys, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 90, 1075–1081. doi:10.1134/S1070427217070084.
- [12] **Crouch, P. C. ve Hart, A. C.** (2017). The Corrosion Resistance of Nickel-Chromium and Copper- Nickel-Chromium Coatings on Mild Steel Substrates, *Transactions of the IMF, The International Journal of Surface Engineering and Coatings*, 52, 59-65. doi:10.1080/00202967.1974.11870305.

- [13] **Datcheva, M., Chalakova, G., Nikolov, A., Dimitrova, R., Iankov, R., Kamburov, V., Guergova, D., Stoyanova, E. ve Stoychev, D.** (2018). Indentation hardness and modulus of electrochemically deposited triple protective decorative Cu-Ni-Cr system, *MATEC Web of Conferences*, (ss.1-7). Sofia, Eylül, 6-10.
- [14] **Giurlani, W., Zangari, G., Gambinossi, F., Passaponti, M., Salvietti, E., Di Benedetto, F., Caporali, S. ve Innocenti, M.** (2018). Electroplating for Decorative Applications: Recent Trends in Research and Development, *MDPI; Coatings*, 8, 260, doi:10.3390/coatings8080260.
- [15] **Lou, H. H. ve Huang, Y.** (2006). Electroplating, *Encyclopedia of Chemical Processing*. Erişim tarihi 2 Ekim 2018, <https://the-eye.eu/public/WorldTracker.org/Reference/Encyclopedia%27s/Encyclopedia%20of%20Chemical%20Processing.pdf>.
- [16] **Woodford, C.** (2018). *Electroplating*, Erişim tarihi 25 Aralık 2018, <https://www.explainthatstuff.com/electroplating.html>
- [17] **Parkinson, R. ve Hart, T.** (1995). Electroplating on Plastics, *Nickel Development Institute Technical Series, 10 078*, 1-9.
- [18] **Smith, H. M., Snyder, D. L., Tremmel, R., Varuolo, A. J., Zaki, N., Harshaw, M., Harshaw, T., Omi, E., Macdermid ve Frederick Gumm Chemical.** (1973). *Quality Metal Finishing Guide*, Wisconsin, Amerika: Metal Finishing Suppliers Association (MFSA), 14, 377-399.
- [19] **Holzapfel Group.** (2018). *Copper-nickel-chrome*, Erişim tarihi 3 Aralık 2018, https://holzapfel_group.com/en/applications/automotive/copper-nickel-chrome.html
- [20] **Kharagpur, I. NPTEL.** (2012). *Introduction to Finite Element Analysis*, Erişim tarihi 3 Aralık 2018, <https://nptel.ac.in/courses/105105041/>
- [21] **MatWeb, LLC.** (1996-2018). *MatWeb Material Property Data Material Database*. Erişim tarihi 3 Aralık 2018, <http://www.matweb.com/index>
- [22] **Kuusisto, E.** (2017). SHELLS vs. SOLIDS | *Finite Element Analysis Quick Review*, Online Derleme, Erişim tarihi 3 Aralık 2018, <https://www.linkedin.com/pulse/shells-vs-solids-finite-element-analysis-quick-review-kuusisto-p-e-/>
- [23] **Svenson, E.** (2006). *DuraChrome Hard Chromium Plating, Surface Finishing Technology*. Cocoa, Florida, Amerika: Plating Resources, Inc. (Orijinal eser 1980de basıldı.)
- [24] **Kuzmik, J. J.** (1990). *Plating on Plastics, Electroless Plating: Fundamentals and Applications*, 14. Orlando, Florida: American Electroplaters and Surface Finishers Society.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Emre Esvet Müftüoğlu
Doğum Tarihi ve Yeri : 29.06.1991 Torul
E-posta : emreesvet@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017-2018 TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. – Prova+ Long Term R&D Intern
- 2016-2017 Presmetal Otomotiv Yan Sanayi A. Ş. – Üretim Mühendisi

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Krom Kaplama Yapılmış Poliamid Malzemelerin Sıcaklık Yüğü Altındaki Gerilme Dağılımlarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi, 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (ISAS 2018 Winter), 2018