

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ İLE FONKSİYONEL  
DERECELENDİRİLMİŞ TABAKALARDAKİ TEMAS PROBLEMİ ANALİZİ**

**Muhammed Taha POLAT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**DANIŞMAN**  
**Doç. Dr. Alper POLAT**

**TUNCELİ-2023**

T.C.  
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ İLE FONKSİYONEL  
DERECELENDİRİLMİŞ TABAKALARDAKİ TEMAS PROBLEMİ ANALİZİ

Muhammed Taha POLAT  
(200150014)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

DANIŞMAN  
Doç. Dr. Alper POLAT

TUNCELİ-2023

**T.C.**  
**MUNZUR ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMİ İLE FONKSİYONEL  
DERECELENDİRİLMİŞ TABAKALARDAKİ TEMAS PROBLEMİ ANALİZİ**

**Muhammed Taha POLAT**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 20/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

**İmza**

Doç. Dr. Özal YILDIRIM  
(Fırat Üniversitesi)

**BAŞKAN**

**İmza**

Doç. Dr. Alper POLAT  
(Munzur Üniversitesi)

**DANIŞMAN**

**İmza**

Dr. Öğr. Üyesi Berivan  
YILMAZER POLAT  
(Munzur Üniversitesi)

**ÜYE**

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR  
Enstitü Müdürü

**NOT:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

20.06.2023

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza  
Muhammed Taha POLAT

Danışman  
Doç. Dr. Alper POLAT

## TEŞEKKÜR

Tüm araştırmalarım boyunca bana yol gösteren, her daim destekleyen, bilgi ve birikimlerini her konuda paylaşan çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Alper POLAT'a teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimlerini esirgemedен paylaşan saygı değer hocalarım Sn. Doç. Dr. Özal YILDIRIM, Sn. Dr. Öğr. Üyesi Berivan YILMAZER POLAT ve Sn. Arş. Gör. Yusuf KAYA' ya teşekkür ederim.

Araştırmalarımın her aşamasında birlikte çalıştığım, çok değerli yol arkadaşlarım Müslüm ÇOLAK ve Fatih KAYA'ya teőekkürü bir borç bilirim.

Yaşantım boyunca her daim maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.

**Muhammed Taha POLAT**  
**TUNCELİ - 2023**

## İÇİNDEKİLER

<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ</b> .....	<b>I</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>III</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>IV</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>VII</b>
<b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler .....	2
1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	3
1.3. Makine Öğrenmesi .....	3
1.3.1. Makine öğrenmesi ile tahmine dayalı analizin ilişkisi .....	4
1.3.2. Makine öğrenmesi teknikleri.....	4
1.3.2.1. Denetimli öğrenme .....	4
1.3.2.2. Denetimsiz öğrenme.....	5
1.3.2.3. Yarı denetimli öğrenme.....	5
1.3.2.4. Karar ağaçları .....	5
1.3.2.5. Destek vektör makineleri.....	5
1.3.3. Makine öğrenmesinde işlem sırası .....	6
1.4. Literatür Özeti .....	7
1.5. Çalışmanın Kapsam ve Amacı .....	17
<b>2. PROBLEMİN TANIMI</b> .....	<b>18</b>
<b>3. BULGULAR ve İRDELEME</b> .....	<b>19</b>
3.1. Problemin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi .....	19
3.2. Rijit Pançlar Altında Temas Sonucu Oluşan Gerilmelerin İncelenmesi .....	22
3.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Tabakalar Arasındaki İlk Ayrılma Yükleri ve Uzaklıklarının Araştırılması .....	27
3.4. Gerilmelerin İncelenmesi .....	29
3.5. Derinlik Boyunca Gerilmelerin İncelenmesi.....	33
3.6. Makine Öğrenmesi Yöntemiyle Temas Uzunluklarının Tahmin Edilmesi.....	41
3.6.1. Veri setinin oluşturulması ve analizi .....	41
3.6.2. Veri seti ile doğru algoritma arasındaki ilişki .....	42
3.6.3. Lineer regresyon yöntemi ile temas uzunlukları tahmini .....	50
3.6.4. Rastgele orman yöntemi ile temas uzunlukları tahmini .....	53
3.6.5. En yakın komşu algoritması yöntemi ile temas uzunlukları tahmini .....	56
<b>4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b> .....	<b>62</b>
<b>5. KAYNAKLAR</b> .....	<b>66</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Temas probleminin geometrisi ve yükleme durumu.....	18
Şekil 3.1.	Temas probleminin sonlu elemanlar modeliyle geometrisi ve yükleme durumu.....	20
Şekil 3.2.	Problem geometrisinin üçgen mesh hali .....	20
Şekil 3.3.	Problem geometrisinin üçgen mesh zoom hali .....	21
Şekil 3.4.	Problem geometrisinde FD tabakalar ve pançların malzeme özelliklerinin tanımlanmış hali .....	21
Şekil 3.5.	Problem geometrisinde FD tabakalar ve pançların malzeme özelliklerinin tanımlanmış zoom hali .....	22
Şekil 3.6.	Pançdaki yük değişimine göre panç altındaki gerilme dağılımları( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	23
Şekil 3.7.	Pançların yarıçap değişimine göre 1.panç altındaki gerilme dağılımları( $(c-b)/h=4$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $Q=2P$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	24
Şekil 3.8.	Pançların yarıçap değişimine göre 2.panç altındaki gerilme dağılımları( $(c-b)/h=4$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $Q=2P$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	24
Şekil 3.9.	Pançlar arasındaki mesafe değişimine göre 1.panç altındaki gerilme dağılımları( $(c-b)/h=4$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $Q=2P$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	25
Şekil 3.10.	Pançlar arasındaki mesafe değişimine göre 2.panç altındaki gerilme dağılımları( $(c-b)/h=4$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $Q=2P$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	25
Şekil 3.11.	Tabaka rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre 1. panç altındaki gerilme dağılımları( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h2}=0.6931$ , $Q=2P$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	26
Şekil 3.12.	Tabaka rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre 2. panç altındaki gerilme dağılımları( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h2}=0.6931$ , $Q=2P$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	26
Şekil 3.13.	Tabaka rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimine göre 2. panç altındaki gerilme dağılımları( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h1}=0.6931$ , $Q=2P$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	27
Şekil 3.14.	1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$ temas gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $Q=2P$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ) .....	31
Şekil 3.15.	2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$ temas gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h1}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $Q=2P$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ) .....	31
Şekil 3.16.	Pançlara ait yarıçap değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$ temas gerilmesi dağılımı( $(c-b)/h=4$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $Q=2P$ , $\mu_0=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ) .....	32

- Şekil 3.17.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan  $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$  temas gerilmesi dağılımı(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 32
- Şekil 3.18.** 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 34
- Şekil 3.19.** 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 34
- Şekil 3.20.** 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 35
- Şekil 3.21.** 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 36
- Şekil 3.22.** 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 36
- Şekil 3.23.** 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 37
- Şekil 3.24.** Pançlara etki eden farklı yükleme durumlarına göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 38
- Şekil 3.25.** Pançlara etki eden farklı yükleme durumlarına göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 38
- Şekil 3.26.** Pançlara etki eden farklı yükleme durumlarına göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) ..... 39
- Şekil 3.27.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) .... 40
- Şekil 3.28.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) .... 40
- Şekil 3.29.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ ) .... 41
- Şekil 3.30.** Veri setinin excel ortamında görünümü ..... 44

<b>Şekil 3.31.</b>	Veri setinin python programına aktarılması.....	46
<b>Şekil 3.32.</b>	Pythonda veri setinin csv formatında görünümü.....	47
<b>Şekil 3.33.</b>	Pythonda veri setinin nihai görünümü .....	47
<b>Şekil 3.34.</b>	Verilere ait histogram grafiği .....	48
<b>Şekil 3.35.</b>	Verilere ait korelasyon ısı grafiği.....	49
<b>Şekil 3.36.</b>	1.pança ait temas uzunluğu için lineer regresyon grafiği.....	52
<b>Şekil 3.37.</b>	2.pança ait temas uzunluğu için lineer regresyon grafiği.....	53
<b>Şekil 3.38.</b>	Temas uzunlukları rastgele orman regresyon grafiği.....	56
<b>Şekil 3.39.</b>	Temas uzunluklarının k-en yakın komşu algoritması regresyon grafiği.....	60



## TABLolar LİSTESİ

<b>Tablo 3.1.</b> Pançlar arası mesafe değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi( $(c-b)/h=4$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_o=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ) .....	28
<b>Tablo 3.2.</b> Rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ )değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_o=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ) .....	29
<b>Tablo 3.3.</b> Rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ )değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi( $b/h=4$ , $(c-b)/h=4$ , $c/h=8$ , $\beta_{h1}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $R_1=R_2=1$ , $\mu_o=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ) .....	29
<b>Tablo 3.4.</b> Pançların yarıçap değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi( $(c-b)/h=4$ , $\beta_{h1}=-0.6931$ $\beta_{h2}=0.6931$ , $\gamma_{h1}=2.0794$ , $\gamma_{h2}=2.0794$ , $\mu_o=1$ , $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ , $\kappa_1=\kappa_2=2$ , $y=2$ ).....	29
<b>Tablo 3.5.</b> Lineer regresyon yöntemiyle temas uzunluğu tahmini.....	53
<b>Tablo 3.6.</b> Rastgele orman yöntemiyle temas uzunluğu tahmini.....	56
<b>Tablo 3.7.</b> En yakın komşu algoritması yöntemiyle temas uzunluğu tahmini.....	60

## SEMBOLLER LİSTESİ

$a$	: 1. Pançın temas uzunluğu
$b$	: 1. Panç orta noktasının $y$ eksenine uzaklığı
$c$	: 2. Panç orta noktasının $y$ eksenine uzaklığı
$d$	: 2. Pançın temas uzunluğu
$h$	: FD tabakaların yüksekliği
$P$	: 1. panç üzerindeki tekil yük
$Q$	: 2. panç üzerindeki tekil yük
$R_1$	: 1. Pança ait yarıçap uzunluğu
$R_2$	: 2. Pança ait yarıçap uzunluğu
$x_{cr}$	: İlk ayrılma uzaklığı
$\beta$	: Rijitlik parametresi
$\gamma$	: Yoğunluk değişim parametresi
$\kappa_1$	: 1. FD tabakaya ait kolosov sabiti
$\kappa_2$	: 2. FD tabakaya ait kolosov sabiti
$\lambda_{cr}$	: Kritik yük faktörü (ilk ayrılma yükü)
$\mu_1(y)$	: 1. FD tabakaya ait kayma modülü
$\mu_{1b}$	: 1. FD tabakanın alt yüzeyine ait kayma modülü
$\mu_2(y)$	: 2. FD tabakaya ait kayma modülü
$\mu_{2t}$	: 2. FD tabakanın üst yüzeyine ait kayma modülü
$\rho_1(y)$	: 1. FD tabakanın yoğunluğu
$\rho_2(y)$	: 2. FD tabakanın yoğunluğu
$\sigma_x, \sigma_y$	: $x, y$ doğrultularındaki normal gerilme bileşenleri
$\tau_{xy}$	: Kayma gerilmesi bileşeni

## KISALTMALAR LİSTESİ

ÇİP	: Çok İfadeli Programlama
DVM	: Destek Vektör Makineleri
EYKA	: En Yakın Komşu Algoritması
FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
GRSA	: Genel Regresyon Sinir Ağı
KA	: Karar Ağı
MÖ	: Makine Öğrenmesi
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
RO	: Rastgele Orman
SA	: Sinir Ağı
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu



## ÖZET

Bu çalışmada, dairesel iki panç ile yüklenmiş fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalardaki temas analizi sonlu elemanlar metodu (SEM) ve Makine Öğrenmesi teknikleri kullanılarak çözüm gerçekleştirilmiştir. Problem, dairesel geometrideki rijit iki panç ile yüklenmiş fonksiyonel dereceli iki tabakadan oluşmaktadır. Dış yükler P ve Q, tabakaya iki rijit panç aracılığıyla aktarılmıştır. Tüm yüzeyler sürtünmesiz olarak dikkate alınmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş tabakaların sonlu elemanlar modeli ANSYS paket programı kullanılarak oluşturulmuş ve problemin 2 boyutlu analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki pançtan elde edilen temas uzunlukları Python ortamına aktararak bilgisayara öğretilmiştir. Verilere uygun Makine Öğrenmesi algoritmaları vasıtasıyla ek bir çözüme gerek kalmadan temas uzunluklarının tahmini gerçekleştirilmiştir. Temas uzunlukları tahmin işlemi için Makine Öğrenmesi yöntemlerinden Lineer Regresyon, Rastgele Orman ve En Yakın Komşu Algoritması kullanılmıştır. Temas uzunlukları tahmini için Makine Öğrenmesi yöntemi ile kısa sürede ve hata oranı düşük sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca çalışmada pançlar arası mesafeler, yükler, rijitlik parametreleri ve panç yarıçapları gibi parametrelerin temas bölgeleri, ilk ayırma yükleri ve mesafeleri, normal gerilmeler, derinlik boyunca gerilmeler ve temas gerilmeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular tablo ve grafik halinde sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Temas Uzunluğu, makine öğrenmesi, fonksiyonel derecelendirilmiş tabaka, sonlu elemanlar metodu, gerilme analizi

## ABSTRACT

### **Contact Problem Analysis in Functionally Graded Layers with Machine Learning Method**

In this study, the solution is realized using contact analysis finite element method (FEM) and Machine Learning techniques in functionally graded layers loaded with two circular punches. The problem consists of two layers of functional grade loaded with two rigid punches of circular geometry. The external loads  $P$  and  $Q$  were transferred to the sheet via two rigid punches. All surfaces are considered actionless. The finite element model of functionally graded layers was created using the ANSYS package program, and a 2-dimensional problem analysis was performed. The contact lengths obtained from both punches were transferred to the Python environment and taught to the computer. By means of Machine Learning algorithms suitable for the data, the contact lengths were estimated without the need for an additional solution. Linear Regression, Random Forest and Nearest Neighbor Algorithm from Machine Learning methods were used for contact length estimation. The estimation of contact lengths aims to obtain results in a short time and with a low error rate with the Machine Learning method. In addition, the effects of parameters such as distances between punches, loads, stiffness parameters, and punch radius on contact zones, initial separation loads and distances, normal stresses, stresses through depth, and contact stresses were investigated. The findings are presented in tables and graphics.

**Keywords:** Contact length, machine learning, functionally graded layer, finite element method, stress analysis

## 1. GİRİŞ

Mekanik sistemler ve çoğu yapı birbirine sürtünen elemanlara sahiptir. Temas problemi terimi altında, elemanlar içindeki sürtünme ve aşınma nedeniyle yapısal davranış ve mekanik özelliklerdeki değişiklikler incelenir. Özellikle yapısal elemanlar ve mekanik sistemler genellikle sürtünme ile temas geçer. Temas problemleri, günümüzde mühendisliğin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnekler arasında temeller, demiryolları, tahıl asansörleri, yakıt tankları, silindirik şaftlar ve şaftlar bulunur.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte yeni türdeki sistem ve elemanların ihtiyaçlarının giderilebilmesi için kullanılan malzemelerde homojen olmayan kademeli veya sürekli olarak değişen bir yapıya gereksinim vardır. Özellikle uzay araçları için yüksek mukavemet ve ısı direnç özelliğini sağlayan bir malzemenin bulunamaması bilim adamlarını yeni araştırmalara yönlendirmiştir. Bu araştırmalar sonucunda fiziksel ve kimyasal olarak birbirlerinden farklı özellikler gösteren iki madde arasında farklı ısı genleşme katsayılarının sebep olduğu ısı gerilmeleri azaltan ve iki madde arasındaki fiziksel ve kimyasal değişimlerden dolayı ortaya çıkabilecek dezavantajları en aza indiren fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler, uzay, savunma, tıp, elektronik, enerji ve diğer birçok endüstride kullanılmaktadır. Termal dirençlerinin ve dayanımlarının yüksek olması sebebiyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

Birçok alanda teknolojinin gelişmesi ile birlikte problemlerin çözülmesi ve ihtiyaçların daha hızlı ve verimli bir şekilde giderilebilmesi için Yapay Zeka ve tekniklerinin kullanımı gitgide yaygınlaşmıştır. Özellikle mühendislik alanlarında Yapay Zeka tekniklerinin kullanımı ile daha kısa sürede çözümler elde edilmeye başlanmıştır.

Yapay zeka, insan benzeri zeka ve davranışları simüle etmek için kullanılan genel bir kavramdır. Makine öğrenmesi ise yapay zeka alanında önemli bir alt alanı temsil eder. Makine öğrenmesi, bilgisayar sistemlerinin veri üzerinde otomatik olarak öğrenme yapabilme yeteneğini ifade eder. Bu sistemler, belirli bir görevi gerçekleştirebilmek için veri analizi ve model oluşturma süreçlerini kullanır. Makine öğrenmesi, algoritmaların ve istatistiksel modellerin kullanımını içerir ve bu modeller, veri üzerinde yapılan işlemleri ve ilişkileri belirleyebilir. Makine Öğrenmesi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Örnek olarak, otomatik sürüş teknolojisi, yüz tanıma sistemleri, doğal dil işleme uygulamaları ve tıbbi teşhis sistemleri gibi birçok alanda makine öğrenmesi teknikleri kullanılmaktadır.

Makine öğrenmesi, veri analizi ve örüntü tanıma konularında büyük bir potansiyele sahiptir ve giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada, dairesel geometride rijit iki panç ile yüklenmiş fonksiyonel olarak dereceli iki tabakadaki temas analizi incelenmiştir. Çalışmada yapılan analizin geometrisi ANSYS programında modellenerek sonlu elemanlar metodu ile oluşturulmuştur. Dairesel pançlardan elde edilen temas uzunlukları Makine Öğrenmesi algoritması ile Python programına aktararak bilgisayara öğretilmiştir. Sonraki aşamada ek bir çözüme ihtiyaç duymadan istenen bilgiler kısa bir sürede tahmin edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada tabakalarda oluşan ilk ayrılma yükleriyle ilk ayrılma uzaklıkları ve tabakalarda oluşan temas gerilmeleri bulunmuştur.

### **1.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler**

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), mekanik özellikleri sürekli olarak bir noktadan diğerine değişen, benzer olmayan özel bir malzeme sınıfıdır. Belirli hacim oranlarında karıştırılan iki malzemeden yapılan FDM yapıları, kompozit malzemelerin teknik olarak reaksiyona giremediği durumlar için bir çözüm kaynağı sağlar. Bu malzemeler, geleneksel malzemelerin özelliklerine ek olarak ek işlevsellik sunar ve genellikle ileri teknolojilerin bir ürünüdür.

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin tarihsel süreci, insanların malzemeleri işlevlerine göre geliştirmeye ve özelleştirmeye olan ilgisiyle başlamıştır. İnsanlık tarihinin erken dönemlerinde bile, özel amaçlar için malzemelerin seçilmesi ve işlenmesi yaygın bir uygulama olmuştur. Ancak, modern fonksiyonel malzemelerin gelişimi ve kullanımı, daha ileri bilim, teknoloji ve mühendislik gelişmeleriyle birlikte ortaya çıkmıştır. II. Dünya Savaşı dönemi, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin gelişimi için büyük bir dönüm noktası oldu. Savaş sırasında, askeri uygulamalar için özel malzemelere olan talep arttı. Örneğin, radar sistemlerinin geliştirilmesi için mikrodalga emici malzemeler ve nükleer enerji uygulamaları için özel alaşımlar gibi malzemelerin araştırılması ve üretimi hızlandı. 20. yüzyılın başlarında, malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini anlamak ve kontrol etmek üzerine yapılan araştırmalar hız kazandı. Bu dönemde, bazı metal alaşımlarının özel özelliklere sahip olduğu keşfedildi ve endüstriyel uygulamalar için kullanılmaya başlandı. Örneğin, nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklılıklarıyla uçak motorları gibi alanlarda kullanıldı.

Son yıllarda, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi faktörlerin ön plana çıkmasıyla fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin kullanımı daha da yaygınlaşmıştır. İnşaat mühendisliği gibi alanlarda, malzemelerin dayanıklılığını artırmak, enerji verimliliğini optimize etmek ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla sıklıkla yer almaktadır. Bugün, gelişmiş araştırma ve üretim yöntemleri sayesinde, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin kullanımı hızla artmaktadır. Malzeme bilimi ve mühendisliği alanındaki ilerlemeler, daha önce hayal edilemeyen özelliklere ve işlevlere sahip malzemelerin tasarlanmasını ve üretilmesini mümkün kılmıştır. Bu da inşaat mühendisliği ve diğer endüstrilerde daha yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sağlama potansiyelini artırmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı, yapıların uzun ömürlü olmasını sağlar ve inşaat endüstrisinde daha güvenli, verimli ve çevre dostu yapılar inşa etmek için önemli bir araçtır

## **1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi**

Sonlu Elemanlar Yöntemi, kısaca bahsetmek gerekirse karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözümü yapmaktır. Sonlu elemanlar yöntemi, bir yapıyı küçük parçalara (elemanlara) ayırarak her bir elemanın davranışını analiz eder ve sonuçları birleştirerek tüm yapıyı modelleyerek analiz eder. Bu yöntem sayesinde, karmaşık yapıların davranışı daha kolay ve doğru bir şekilde hesaplanabilir. Ağlara bölme (mesh) işleminde problemin tek parça ve bütün olarak analiz yapılması yerine fazla sayıda küçük parça oluşturarak bu parçalarla daha hassas bir şekilde çözüm yapılarak problem daha detaylı ve doğruluğu yüksek şekilde analiz edilmektedir. Oluşan bu küçük parçaların sayısının fazla olması analizlerin daha doğru sonuca ulaşılmasına fayda sağlarken problemin çözüm süresini artırması zaman açısından dezavantaj olmaktadır. Sonlu Elemanlar Model tabanlı bilgisayar programlarının kullanımı günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır.

## **1.3. Makine Öğrenmesi**

Makine öğrenmesi, bilgisayar sistemlerinin veri ve deneyimlere dayanarak kendilerini geliştirme yeteneğine sahip olmalarını sağlayan bir yapay zeka alanıdır. Makine öğrenmesi algoritmaları, belirli bir görevi gerçekleştirebilmek için verilerden örüntüleri

tanımlar ve bu örüntülerden genelleme yaparak yeni veriler üzerinde tahminler yapabilmektedir. Makine öğrenmesi, geleneksel programlamadan farklı olarak, belirli bir görevi yerine getirmek için doğrudan program kodu yazmak yerine veri kullanımına dayanır. Bir makine öğrenmesi modeli, veriler üzerindeki istatistiksel analizleri kullanarak öğrenir ve sonuçları tahmin etmek veya kararlar vermek için bu öğrenmeyi kullanır.

Makine öğrenmesi algoritmaları genellikle veri setlerinden örnekler alarak modeli eğitirler. Bu eğitim süreci sırasında model, veri setindeki örüntüleri ve ilişkileri belirlemeye çalışır. Eğitim tamamlandıktan sonra, model yeni verilere uygulanabilir ve tahminler veya sınıflandırmalar yapabilir. Makine öğrenmesi, birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır. Örnekler arasında görüntü ve ses tanıma, doğal dil işleme, otomatik sürüş, finansal tahminler, tıbbi teşhisler, pazarlama analizi ve hızlı veri işleme yer alır. Makine öğrenmesi, veri miktarı ve karmaşıklığı arttıkça büyük bir önem kazanmıştır.

### **1.3.1. Makine öğrenmesi ile tahmine dayalı analizin ilişkisi**

Makine öğrenmesi ile tahmine dayalı analiz arasında sıkı bir ilişki vardır. Tahmine dayalı analiz, gelecekteki olayları veya sonuçları tahmin etmek için mevcut verilere dayanan analitik bir yaklaşımdır. Makine öğrenmesi ise, verilerden örüntüler ve ilişkiler belirleyerek tahmin yapma yeteneğine sahip algoritmaları içeren bir disiplindir. Sonuç olarak, makine öğrenmesi, tahmine dayalı analizin temelini oluşturan bir araçtır. Verilerin analiz edilerek gelecekteki olaylar veya sonuçlar hakkında tahminler yapılmasına olanak sağlar ve bu sayede karar alma süreçlerini iyileştirir.

### **1.3.2. Makine öğrenmesi teknikleri**

Makine öğrenmesinde bir dizi farklı yöntem kullanılmaktadır.

#### **1.3.2.1. Denetimli öğrenme**

Bu yöntemde, eğitim veri setindeki giriş özellikleri (bağımsız değişkenler) ile hedef çıktıları (bağımlı değişkenler) arasındaki ilişkiyi modellemek için algoritmalar kullanılır. Sınıflandırma (classification) ve regresyon (regression) bu yöntemin alt dallarıdır.

- Sınıflandırma: Giriş verilerini farklı sınıflara ayırmak için kullanılır. Örnek olarak, e-postaları spam ve spam olmayan olarak sınıflandırmak.
- Regresyon: Giriş verilerini bir sürekli değere tahminlemek için kullanılır. Örnek olarak, ev fiyatlarını özelliklerine göre tahminlemek.

### **1.3.2.2. Denetimsiz öğrenme**

Bu yöntemde, eğitim veri setindeki yapıyı ve örüntüleri keşfetmek için algoritmalar kullanılır. Etiketlenmemiş veri kullanılır, yani çıktı etiketleri veya hedef değerler bulunmaz. Bu yöntem, veri keşfi ve veri kümesi özetleme için kullanılır.

- Kümeleme (Clustering): Benzer özelliklere sahip verileri gruplandırmak için kullanılır.
- Boyut Azaltma (Dimensionality Reduction): Veri setindeki boyutu azaltarak veri özelliklerini daha anlaşılır hale getirmek için kullanılır.

### **1.3.2.3. Yarı denetimli öğrenme**

Bu yöntem, hem etiketlenmiş hem de etiketlenmemiş verilerin kullanıldığı bir öğrenme şeklidir. Sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılır.

### **1.3.2.4. Karar ağaçları**

Karar ağaçları, bir dizi karar kuralını kullanarak verileri sınıflandırmak veya tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Basit, yorumlanabilir ve hızlı sonuçlar sağlar.

### **1.3.2.5. Destek vektör makineleri**

Sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan bir örüntü tanıma yöntemidir. Verileri bir hiperdüzlemle en iyi şekilde ayırmaya çalışır.

Bu sadece bazı makine öğrenmesi yöntemlerine örneklerdir. Makine öğrenmesi alanında birçok başka yöntem ve algoritma bulunmaktadır ve yeni yöntemler de sürekli olarak geliştirilmektedir.

### 1.3.3. Makine öğrenmesinde işlem sırası

#### 1. Adım: Verileri toplama ve hazırlama

İlk adım, problemi çözmek için gerekli olan verilerin toplanmasıdır. Bu veriler, eğitim, doğrulama ve test setleri olarak ayrılabilir. Veri toplama aşamasında, doğru ve temsilci veri setlerinin seçimi önemlidir.

#### 2. Adım: Veri Ön İşleme

Veri ön işleme adımında, toplanan verilerin temizlenmesi, dönüştürülmesi ve hazırlanması yapılır. Bu aşamada, eksik veya bozuk verilerin düzeltilmesi, aykırı değerlerin ele alınması, ölçeklendirme veya normalizasyon gibi işlemler gerçekleştirilebilir.

#### 3. Adım: Model Seçimi

Makine öğrenmesi algoritmaları, farklı problemler için farklı modeller sunar. Bu adımda, probleme en uygun modelin seçilmesi gerekmektedir. Sınıflandırma problemleri için destek vektör makineleri (DVM), karar ağaçları veya derin öğrenme modelleri gibi farklı modeller arasından seçim yapılabilir.

#### 4. Adım: Modeli eğitme

Seçilen model, eğitim veri seti üzerinde eğitilir. Bu adımda, modelin verilere uyum sağlaması ve istenilen çıktıları tahmin etmesi için öğrenme süreci gerçekleştirilir. Modelin parametreleri ayarlanır ve eğitim veri setine iteratif olarak uyarlanır.

#### 5. Adım: Modeli değerlendirme

Modelin performansını değerlendirmek için doğrulama veri seti kullanılır. Modelin doğruluğu, hassasiyeti, geri çağırması gibi performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilir. Modelin doğru tahminler yapma yeteneği ve genelleme yeteneği önemlidir.

#### 6. Adım: Model uygulama

Eğitilen ve değerlendirilen model, gerçek verilere uygulanır ve tahminler veya sınıflandırmalar yapar. Bu aşamada, yeni veriler üzerinde modelin performansı takip edilir ve gerektiğinde model güncellenir veya yeniden eğitilir.

Bu işlem sırası, makine öğrenmesi projelerinin genel bir yolunu temsil etmektedir.

#### 1.4. Literatür Özeti

Hertz'in birçok araştırmacıya ilham veren 1882 tarihli çalışması temas problemleri alanının temeli olduğu bilinmektedir (Johnson, 1985).

Muskhelishvili tarafından sürtünmesiz temas problemine genel bir çözüm oluşturulmuş ve karmaşık bir değişken yöntemi denenmiştir (Muskhelishvili, 1953).

Özellikle temas probleminde Sneddon'un integral dönüşüm yöntemlerini denemesiyle temas problemlerine olan alaka gitgide yükselmiş, bilgisayar ve sayısal çözüm yöntemlerindeki gelişmelere paralel olarak daha da yaygınlaşmıştır (Sneddon, 1951).

Weitsman, elastik düzlem ve tabaka arasında oluşan temas alanının mesafesini incelemek için elastik tabaka ve elastik düzlem konulu temas analizi yapmıştır (Weitsman, 1969).

Conway, silindir bloklarla yüklenen tabakanın sürtünmeli temas analizini araştırmıştır. Yaptığı çalışmada sürtünmeyi baz alarak temas gerilimi üzerindeki etkisini araştırmış ve bu etkinin çok küçük olduğunu bulmuştur (Conway, 1971).

Erdoğan ve Ratwani yaptıkları çalışmada, çift elastik tabakaya oturmuş elastik tabakadaki temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Analitik metodu kullanarak, temas alanının yükün etkisiyle değişmediğini ancak yükün etki mesafesine bağlı olduğunu göstermiştir. Farklı yük durumlarını dikkate alan problem, genelleştirilmiş bir Cauchy tekil integral denkleme indirgeyipve sayısal sonuçları sunmuştur (Erdogan ve Ratwani, 1974).

Adams, elastik bir yarı sonsuz düzlem üzerinde duran ve sabit eğilim gösteren, tekil yük etkisindeki elastik bir tabakadaki temas analizini araştırmıştır. Çalışmasındaki karmaşık problemi, Fredholm integral yöntemine göre inceleyerek farklı malzeme değişimlerinin etkisini gözlemlemiştir (Adams, 1978).

Keer ve Miller çalışmalarında, kenarlarda basit veya girintili destekler üzerine yerleştirilmiş kavisli blokların ve dairesel plakaların temas problemini araştırmışlardır (Keer ve Miller, 1983).

Adams ve Zeid yaptıkları çalışmada, elastik bir düzlemde sabit elastik bir bloğun etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, çeşitli malzeme kombinasyonları için temas yüzeyi boyunca gerilme dağılımı, kayma hızları ve sürtünme katsayıları elastisite teorisi kullanılarak tartışılmıştır (Adams ve Zeid, 1984).

Geçit ve Gökpinar, rijit özellikteki dairesel blok yerleştirilmiş elastik levhanın temas analizini incelediler. Temas bölgelerinde sürtünmeyi hesaba katmadıklarını yalnızca basınç

gerilmesinin iletildiği esas alınmıştır. Üniform olarak etki eden kuvvetle, farklı geometrideki bloklar için temas bölgesinde oluşan gerilme dağılımları ile temas mesafeleri araştırılmıştır (Geçit ve Gökpinar, 1985).

Nowell ve Hills yaptıkları çalışmada, silindir bloklar tarafından birbirine etki ettirilen elastik özellikteki levhaların sürtünmeli ve sürtünmesiz analizini araştırmışlardır. Çalışmanın analiz kısmında hibrid metodla temas gerilmeleri analiz edilmiştir (Nowell ve Hills, 1988).

Sabin ve Kaloni yaptıkları çalışmada, elastik bir yarı düzlemde dikey bir eksen etrafında dönen rijit cisimin temas problemini, sürtünmeyi işleme dahil ederek elastisite teorisini kullanarak çözdüler (Sabin ve Kaloni, 1989).

Çakıroğlu yaptığı çalışmada, yarı sonsuz bir elastik düzlem üzerinde uzanan kompozit tabakaların temas problemini analiz etmiştir. Çalışmada, y eksenini etrafında simetrik olarak dağılan yük etkisinin olduğu ve tüm yüzeylerin sürtünmesiz olduğu varsayılarak, elastik bir zemin üzerinde uzanan kompozit tabaka problemi, elastisite teorisine göre hesaplanmıştır (Çakıroğlu, 1990).

Dempsey ve diğerleri yaptıkları çalışmada, Winkler bazına dayalı olarak elastik, homojen ve izotropik tabakadaki temas analizini araştırmışlardır. Çalışmalarında rijit özellikte olan blok ve silindir üzerinden yük her ikisine göre uygulanmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir (Dempsey vd., 1990).

Pindera ve Lane yaptıkları çalışmada, farklı geometride izotropik, ortotropik ve monoklinik özelliklerdeki tabakalardan meydana gelen sert pançla yüklü katmanda sürtünmesiz temas problemini analiz etmişlerdir (Pindera ve Lane, 1993).

Williamson ve arkadaşları, homojen özelliklerdeki FDM yapısının, sonlu elemanlar metoduyla çözümünü gerçekleştirmişler ve sınır koşullarında meydana gelen gerilme/gerinim değerlerini hesaplamışlardır (Williamson vd., 1995).

Aksoğan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, elastik düzlemlere oturmuş olan katmanda temas analizini birçok metodla kullanarak analiz yapmışlardır. Tabakaya etki eden yükler tekil ve yayılı olarak ele alınmış ve ikisi için elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır (Aksoğan vd., 1997).

Birinci, alt tabakaya dik çatlaklara sahip rijit pançla etki ettirilen bir bileşik tabakalardaki temas analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmasında, farklı elastik sabitler ile yüksekliklere sahip tabakalardan meydana gelen ayrıca altındaki tabakanın eksene dik bir çatlak bulunan kompozit bir tabakadaki temas ve çatlama problemi elastisite teorisine dayalı

olarak incelenmiştir. Bileşik tabaka basit bir mesnet üzerine oturtulmuştur ve yukarıdan rijit bloklarla yüklenmiştir, tüm yüzeyler sürtünmesiz kabul edilerek çözüm yapılmıştır (Birinci, 1998).

Özşahin yaptığı çalışmada, rijit bloklar tarafından etki eden farklı geometrideki ve materyal özellikleri bulunan homojen ve izotrop tabakalardan meydana gelen ve yukarı bölgesine yayılı yüklerle etkileşimi olan temas analizini araştırmıştır. Bu analizi analitik metodu kullanarak tamamlamıştır (Özşahin, 2000).

Wozniak ile arkadaşları, küreler veya silindirler tarafından yüklenen simetrik olarak oluşturulmuş temas analizini çözmüşlerdir. Bu tabakanın etki altında yapısı değişen malzeme özellikleri ile dolu olduğu kabul edilmiştir. Bu malzeme Winkler ortamında modellenmiştir ve çözümde Hankel integral dönüşüm tekniği kullanılmıştır (Wozniak vd., 2002).

Kahya, iki elastik katmanda sürekli ve süreksiz temas problemini analiz etmiştir. Bu çalışmada, sonsuz uzunlukta iki adet sabit yükseklikte ortotropik elastik banttardan oluşan bileşik bir tabakanın sürekli ve süreksiz temas problemi incelenmiştir. Bileşik levha, sert bir düz blok tarafından tepesinde sıkıştırılır ve alt kısmında sert bir düzleme tutturulur. Çözümlerde sürtünme etkileri ihmal edilerek arayüzlerde sadece basınç gerilmelerine izin verildiği varsayılmıştır (Kahya, 2003).

Yıldırım bu çalışmada, kenar çatlakları olan kademeli malzeme katmanlarının termal şok kırılmasını araştırmak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeleri modellemek ve gerilim durumlarını analiz etmek için özel yazılımla sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır (Yıldırım, 2004).

El-Borgi ve diğerleri çalışmasında, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve homojen katmanlar arasındaki ayrılmalı teması analiz etmişlerdir. Bu çalışmada yayılı yükler altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş katmanlardaki temas gerilmeleri ve boşluk mesafeleri belirlenmiştir (El-Borgi vd., 2006).

Ke ile Wang yaptıkları çalışmada, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakayla etki halindeki elastik levhanın temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizde farklı analitik metodları kullanarak sonuçları elde etmişlerdir (Ke ve Wang, 2007).

Zhang ve arkadaşları, fonksiyonel derecelendirilmiş tek tabakalı sandviç katmanlarda Hertz temas koşulları altında yüzey ve yüzey altı gerilme dağılımlarını belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, fonksiyonel dereceli

ile sandviç katmanlardaki oluşan en büyük kayma gerilmesi ve von Mises gerilmesinin, tek katmanlı katmana göre daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir (Zhang vd., 2007).

Yang ve Ke, yarı-sonsuz bir düzlemde uzanan rijit silindirik blokla yüklenen homojen bir levha ile kaplanmış, fonksiyonel olarak dereceli kaplamada çift boyuttaki temas analizini analitik şekilde çözmüşlerdir. Bu analizde, gerilmeler ile etki alanının kayma modülü, fonksiyonel dereceli kaplamanın kalınlığı ile ciddi ölçüde değiştiğini bulmuşlardır (Yang ve Ke, 2008).

Rekik ve arkadaşları, homojen yarı-sonsuz düzleme bağlı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş katmandaki çatlama etkisini analitik metodla analiz etmişlerdir. Bu analizde çatlaklar sonlu elemanlar metoduyla da incelenerek veriler analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır (Rekik vd., 2010).

Elloumi ve arkadaşları, malzeme özellikleri yer yer farklılıklar göstererek değişen yarı katman ile dikey yükleme altında keyfi olarak şekillendirilmiş blok arasında meydana gelen temas durumunu gözlemlemişlerdir. Bu analizde gözlemlenen kademeli ortamın, belli bir fonksiyona bağlı olarak değişim gösteren kesme modülleri ile sabit Poisson oranlarına ait olan farklı özellikteki malzemeler olduğu belirtilmiştir (Elloumi vd., 2010).

Apatay, yüzeyle temas halinde olan pürüzsüz bir profilin, sürtünmeye karşı rijit zımbanın etkisi altında fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin kaplamalarındaki kenar çatlakları için gerilim yoğunluk faktörünü hesaplamıştır. Panç genişliği, panç kordinatı, sürtünme değeri ve malzeme özelliklerinin yüzeyin altındaki gerilim ile gerilim büyüklüğü faktörleri üzerindeki etkileşimlerini gözlemlemiştir (Apatay, 2010).

Liu ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada FDM kaplı yarım düzlemin düzlem gerilme deformasyonu altında iki boyutlu termoelastik kayma sürtünme teması incelemişlerdir. Gradyan indeksi, Pecllet katsayısı ve sürtünme katsayısının termoelastik temas özellikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Temas gerilme dağılımının değiştirilebileceğini ve dolayısıyla termoelastik temas hasarının gradyan indeksi, Pecllet sayısı ve sürtünme katsayısı bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir (Liu vd., 2011).

Yıldırım ve arkadaşları, fonksiyonel dereceli yarı katmandaki çatlama durumundaki temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu analizde poisson değeri ve termal etkinin hiçbir şekilde değişmediği fakat elastisite modülü ile termal genleşme değerinin derinlikle orantılı şekilde değişim gösterdiğini gözlemlemişlerdir (Yıldırım vd., 2011).

Rhimi ve arkadaşları, sert özellikte dairesel pança etki eden ayrıca homojen yarı katmana oturmuş fonksiyonel dereceli levhadaki temas analizini analitik metodla analiz etmişlerdir (Rhimi vd., 2011).

Kaman ve Cetişli, fonksiyonel dereceli malzemelerle kaplanmış bir silindirdeki çatlak analizini araştırmışlardır. Yapılan analizde Ansys programında işlem yapılarak farklı malzemeler ile farklı değerlerdeki yarıçaplarla çatlama uzunluğunun durumu için gerilme dayanımı araştırılmıştır (Kaman ve Cetisli, 2011).

Chidlow ve Teodorescu, rijit panç ile yüklenen fonksiyonel olarak değişen malzemenin sürtünmesiz temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizde malzemenin sertliği ile kaplama geometrisinin silindirik yapıdaki pança etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca en büyük gerilme değerinin, değişen bu parametrelerle orantılı olduğu kanısına varılmıştır (Chidlow ve Teodorescu, 2013).

Çömez, yaptığı çalışmada Winkler temeli tarafından desteklenen fonksiyonel derecelendirilmiş bir katman için temas problemini lineer elastisite teorisi kullanılarak ele almıştır. Malzeme homojensizliğinin, Winkler temelinin rijitliğinin ve panç yarıçapının temas gerilmesi, temas alanı ve normal gerilmeler üzerindeki etkisini incelemiştir (Çömez, 2013).

Abhilash ve Murthy, fonksiyonel olarak sınıflandırılmış bir malzeme tarafından kaplanan ve bir blokla yüklenen yarı sonsuz bir düzlemin temasını sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir. Başta, blokların rijit olduğu varsayılmış ve literatürde yer alan çözümler kullanılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Sonra ise blokların elastik özellikte olduğu işleme katılarak analiz yapılmıştır (Abhilash ve Murthy, 2014).

Gun ve Gao, fonksiyonel dereceli malzemeler üzerindeki sürtünmeli temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizde lineer, izotropik ve heterojen elastik özellikte yer alan fonksiyonel dereceli malzemelerin sürtünmeli temas analizi hakkında bir denklem ileri sürmüşlerdir (Gun ve Gao, 2014).

Adıyaman ve diğerleri, çift çeyrek düzlem üzerine oturmuş blok ile yayılı yüklerle yüklü bir elastik tabaka için ayrılmalı temas analizini analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Her iki çözüm için de farklı yük koşulları ve boyutsuz miktarlar için temas uzunlukları ve temas basınçları incelenmiştir. Araştırma sonuçlarında sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen verilerin analitik sonuçlarla tutarlı olduğunu gözlemlenmiştir (Adıyaman vd., 2015).

Yan ve Li, elastik özellikteki katmana etki eden dairesel geometrideki blok vasıtasıyla yük aktarılan fonksiyonel dereceli kaplamanın temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda temas gerilmeleri ile temas etki alanlarının sayısal verileri elde edilmiştir (Yan ve Li, 2015).

Su ve diğerleri, silindirik blokla ile yüklü bir piezoelektrik yarım düzlemdeki temas problemini analitik olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, piezoelektrik etkinin, aşındırıcı temas hasarını ciddi şekilde etkileyebilecek normal temas basıncı ve çekme kuvvetinin kombinasyonuna neden olduğunu gözlemlemişlerdir (Su vd., 2015).

Kulchytsky ve arkadaşları, yayılı bir yükü yüklü fonksiyonel derecelendirilmiş kaplama ile yüklenmiş yarım düzlemin temas analizini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda fonksiyonel dereceli kaplamanın poisson değerinin değişmediğini, kayma modülünün ise yükseklikle orantılı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir (Kulchytsky vd., 2015).

Adıyaman ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir katman ile iki homojen çeyrek düzlem arasında ayrılmalı temas problemini incelemişlerdir. Malzeme homojen olmama parametresinin temas basıncına ve ayrılma temas uzunluğuna etkisi araştırmışlardır (Adıyaman vd., 2016).

Jobin ve arkadaşları, elastik yarı sonsuz katmana yüklenmiş rijit blok tarafından yükün aktarıldığı fonksiyonel dereceli katmanın temas analizini analitik yöntem aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. Analizde, elde edilen çözüm yardımıyla keyfi geometrilerdeki bloklar için işlem sağlanarak bu işlemde elde edilen sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Jobin vd., 2017).

El-Borgi ve arkadaşları, elastik özellikteki yarı sonsuz düzlemin üzerinde bulunan rijit blok tarafından yükün aktarıldığı fonksiyonel dereceli kaplamada sürtünmeyi hesaba katarak temas analizini gerçekleştirmişlerdir (El-Borgi vd., 2017).

Nasiri ve arkadaşları, yapay zeka yöntemleri ile kırılma mekaniği ve mekanik arıza tespitini incelemişlerdir. Çalışmayı teknik açıdan yapay sinir ağları, Bayes ağları, genetik algoritmalar, bulanık mantık ve vaka tabanlı akıl yürütmenin belirli uygulamaları üzerine gerçekleştirmişlerdir. Bu alandaki avantajları, dezavantajları ve araştırma boşluklarını belirtmişlerdir (Nasiri, 2017).

Öner, yaptığı çalışmada rijit bir panç ile yüklü ve elastik yarı katmana oturmuş olan fonksiyonel dereceli kaplamada sürekli ve süreksiz temas analizini analitik olarak gerçekleştirmiştir. Rijit blok dairesel ve düz olarak iki farklı çözüm yapılmıştır. Çalışmada sürekli temas durumunda panç altında meydana gelen temas gerilmeleri, normal gerilmeler

ve kayma gerilmeleri, fonksiyonel dereceli kaplama ile elastik yarı katman arasında oluşan ilk ayrılma yükleri ile ilk ayrılma uzaklıkları verilerini elde etmiştir. Düz panç halinde panç genişliği arttıkça temas gerilmelerinin azaldığını, dairesel panç halinde panç yarıçapı arttıkça fonksiyonel derecelendirilmiş tabaka ile panç arasındaki yarı temas uzunluğunun arttığını, yük oranının artması halinde yarı temas uzunluğunun azaldığını belirtmiştir. Ayrıca dairesel panç halinde rijitlik parametresi ( $\beta h$ ) değeri arttıkça, FD tabaka ile panç arasındaki temas mesafesinin arttığını ve FD tabakanın alt yüzeyinin rijitliğinin elastik yarı tabakanın rijitliğine oranı arttıkça yarı temas uzunluğu arttığını gözlemlemiştir (Öner, 2017).

Polat ve arkadaşları, fonksiyonel dereceli kaplamada sürekli temas durumunu sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz etmişlerdir. Malzeme özelliklerinin bir noktadan diğerine değişmediği durumda elde edilen veriler, fonksiyonel dereceli kaplamadaki ait malzemenin özelliklerinin bir noktadan diğerine değişmesini sağlaya parametrelerin etkisinin hiç değişmediği durumdaki gözlenen verilerle kıyaslamışlardır. Analizde ek olarak fonksiyonel dereceli kaplamada farklı Poisson değerlerinin etkileşimi gözlemlenmiştir (Polat vd., 2018).

Chopra ve arkadaşları, betonun basınç dayanımının tahmini için makine öğrenimi tekniklerinin karşılaştırılmasını incelemiştir. En yaygın olarak kullanılan veri madenciliği teknikleri olan karar ağacı (KA) modeli, rastgele orman (RO) modeli ve sinir ağı (SA) tekniklerini kullanıp karşılaştırmışlardır ve sinir ağı (SA) modelinin betonun basınç dayanımını yüksek doğrulukla tahmin ettiğini belirtmişlerdir (Chopra vd., 2018).

Çömez ve El Borgi, silindirik geometrisinde blok ile yükün aktarıldığı, aynı zamanda silindirik geometrisindeki bloklar tarafından destek sağlanan fonksiyonel olarak dereceli kaplamadaki temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizde blokların mesafelerinin ve büyüklüklerinin gerilme dağılımına olan etkileşimini gözlemlemiştir (Çömez ve El Borgi, 2018)

Demirbaş ve Çakır, yaptıkları çalışmada tek boyutlu fonksiyonel olarak derecelendirilmiş dikdörtgen plakaların eşdeğer stres seviyelerini belirlemek için Yapay Sinir Ağı kullanarak eğitilmiş modeller elde etmişlerdir. Plakalarda eşdeğer gerilme tahmin değerinin %99 verimlilikte ve en az çevrim sayısı ile gerçek değerlere yakın sonuçlar elde etmişlerdir (Demirbaş ve Çakır, 2019).

Prayogo, beton karışım özellikleri ve erken yaş dayanım test sonuçlarına dayalı asinç dayanımı tahmini için makine öğrenmesini kullanmıştır. 4 hata göstergesi kullanılarak hesaplanan nispeten yüksek bir doğruluk derecesi elde etmiş ve betonun mukavemetini

tahmin etmede gelişmiş hibrit makine öğrenimi stratejisinin avantajını belirtmiştir (Prayogo, 2018).

Chen ve arkadaşları, Makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak kalkan tünelleme kaynaklı zemin oturmasının tahminini incelemişlerdir. Tünelleme kaynaklı oturmayı tahmin etmek için geri yayılım sinir ağı, dalgacık sinir ağı, genel regresyon sinir ağı (GRSA), aşırı öğrenme makinesi, destek vektör makinesi ve rastgele orman (RO) olmak üzere altı makine öğrenmesi (MÖ) algoritmasının verimliliğini ve uygulanabilirliğini karşılaştırmışlardır. GRSA ve RO algoritmalarının, tünel kaynaklı yerleşimin gelişimini doğru bir şekilde tanıyan altı MÖ algoritma arasında en iyi performansı gösterdiğini belirtmişlerdir (Chen vd., 2019).

Polat yaptığı çalışmada, elastik yarı sonsuz düzlemin üstüne gelen rijit bloklar tarafından yükün aktarıldığı fonksiyonel dereceli tabakada sürekli ve süreksiz temas durumunu sonlu elemanlar yöntemi ve analitik olmak üzere iki şekilde çözüm yapmıştır. FD tabakaya ait farklı rijitlik ve yoğunluk parametrelerinin etkisinin bloklar arasındaki mesafeler, blokların farklı geometrileri ve farklı yükler altındaki etkisini incelemiş ve analitik yöntemle bulunan değerleri, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırmıştır (Polat, 2019).

Polat ve arkadaşları, kısmi fonksiyonel derecelendirilmiş bir katman için temas problemini sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelemişlerdir. Kısmi FD katmanı için yapılan analiz, tamamen FD katmanı analizi ile şekil ve tablolar halinde karşılaştırılmış ve sonuç olarak kısmi FDM'nin statik problemler için kullanılabileceği ve endüstride pratik uygulamalar olabileceği tahmin etmişlerdir (Polat vd., 2019).

Avcı ve arkadaşları, inşaat mühendisliği yapılarında titreşim tabanlı hasar tespitini derin öğrenme ve makine öğrenmesi kullanarak incelemişlerdir. İnşaat mühendisliği yapılarında titreşim tabanlı yapısal hasar tespitinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerin geleneksel yöntemlere göre daha genel ve avantajlı olduğunu belirtmişlerdir (Avcı vd., 2021).

Balci ve Dağ, sert bir panç vasıtasıyla yüklerin aktarıldığı fonksiyonel olarak dereceli kaplama içeren hareketli temas analizini gerçekleştirmişlerdir. Panç hızının, sürtünme katsayısının, malzeme homojensizliğinin ve kaplama kalınlığının temas gerilmesi dağılımları ve gerilme yoğunluğu faktörleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir (Balci ve Dağ, 2020).

Vaishali ve arkadaşları, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kabukların makine öğrenimi kullanılarak stokastik dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sundukları sayısal sonuçlarda, ekonomik bir yapısal tasarıma sahipken sistemin yeterli güvenlik ve hizmet verilebilirliğini sağlamak için farklı kabuk geometrileri için global dinamik karakteristiklerin göreceli stokastik sapmalarını (olasılıksal karakterizasyonları dahil) hesaba katmanın zorunlu olduğunu belirtmişlerdir (Vaishali vd., 2020).

Cao ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada rijit düz bir blok altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir elastik tabaka ile ortotropik bir alt tabaka arasındaki sürtünmeli ayrılma temas problemini analiz etmişlerdir. Çalışmada uygulanan yayılı yükün sola doğru uygulandığında, soldaki ayrılma temas sınırı, sürtünme katsayıları ile monoton olarak artarken, sağ taraf için zıt bir eğilim gösterdiğini belirtmişlerdir. Buna karşılık, her iki temas ara yüzünün basınç değerleri sürtünmeden çok az etkilendiğini gözlemlemişlerdir (Cao vd., 2021).

Polat, yaptığı çalışmada elastik yarı sonsuz düzlem üzerinde duran bir fonksiyonel olarak derecelendirilmiş panç ile yüklenen fonksiyonel dereceli tabakadaki sürekli temas problemini, sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ile analiz etmiştir. Gerilme birikimlerinin meydana geldiği zimba kenarlarında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş pançın gerilme değerlerinin rijit pança göre daha küçük olduğu görülmüştür. Yapının güvenliği, malzemenin daha uzun ömürlü olması ve üretim kolaylığı, gerilme değerlerinin azalması ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların bu açıdan önemli olduğunu belirtmiştir. Ayrıca bu çalışma, FD pançın FD katmanı üzerindeki etkisini araştıran ilk çalışmadır (Polat, 2021).

Shah ve arkadaşları, sürdürülebilir betonun mekanik özelliklerinin tahmini için optimizasyon algoritması ile makine öğrenimini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Atık şeker kamışı küspe külü kullanarak betonunun basınç dayanımını, çekme dayanımını ve eğilme dayanımını için çok ifadeli programlama (ÇİP) kullanmışlardır. Önerilen algoritmanın hiperparametresine ince ayar yapmak için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasını kullanmışlardır. PSO ile ÇİP tabanlı modelleme, beton özelliklerinin doğru bir şekilde modellenmesi için etkili bir araç olabileceğini ve böylece atık tüketerek ve çevreyi koruyarak inşaat sektörüne doğrudan katkıda bulunabileceğini belirtmişlerdir (Shah vd., 2021).

Fu ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada keyfi olarak değişen termo-elastik özelliklere sahip fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir tabakada iki boyutlu hareketli temas

probleminin elastik sarsıntı analizini incelemişlerdir. Çalışmada sürtünme katsayısı ve hareket hızındaki artışların elastik sarsıntı limitinin azalmasına neden olabileceğini, kesme modülü ve akma geriliminin dağılım gradyanlarını uygun şekilde ayarlayarak elastik sarsıntı limitinin önemli ölçüde iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir (Fu vd., 2022).

Öner ve diğerleri, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş iki katmanda temas analizini sonlu elemanlar ve çok katmanlı algılayıcı yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Rijitlik parametresi arttıkça temas uzunluğunun arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yük uzunluğunun artmasının temas uzunluğunu artırdığını ve maksimum temas basıncını azalttığını gözlemlemişlerdir (Öner vd., 2022).

Polat ve Kaya, alt ve üst yüzeyleri metal ve seramik farklı fazlardan oluşan sert bloklarla yüklerin aktarıldığı fonksiyonel dereceli tabakalardaki temas problemini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakaların farklı özelliklerinin tabakalar arasındaki ve rijit bloklar ile tabakanın üst yüzeyi arasındaki normal gerilmeler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, tabakaların farklı özelliklerinin etkisi altında ayrılma noktasındaki derinlik boyunca normal ve kayma gerilmeleri incelenmiştir. Literatürde bu çalışmanın çözümünün analitik olarak bulunmadığı ve sonlu elemanlar yöntemi ile kısa sürede olumlu sonuçlar elde edildiği belirtilmektedir (Polat ve Kaya, 2022).

Yaylacı ve diğerleri, rijit blok tarafından yüklerin aktarıldığı fonksiyonel dereceli katmanda sürtünmesiz temas analizini analitik metot kullanarak gerçekleştirmiş ve bunları sonlu elemanlar ve çok katmanlı algılayıcı yöntemi ile karşılaştırmıştır. Rijitlik parametresi arttıkça temas gerilmelerinin ve mesafesinin arttığını gözlemlemişlerdir (Yaylacı vd., 2022).

Karabulut ve Çömez, rijit zımba ile yüklenen ortotropik fonksiyonel derecelendirilmiş tabakadaki temas problemini analitik ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak analiz etmişlerdir. Yük ve homojen olmama parametreleri arttığında ayrılma bölgesinin arttığını gözlemlemişlerdir (Karabulut ve Çömez, 2023).

Kaya ve Polat, elastik iki katman üzerine oturan fonksiyonel derecelendirilmiş tabakanın temas analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada, dış yük, rijitlik parametresi ( $\beta h$ ), yoğunluk parametresi ( $\gamma h$ ) ve yayılı yük değişiminin ortaya çıkan gerilmeler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Rijitlik arttığında, ortaya çıkan gerilme değerlerinin arttığını ancak temas uzunluklarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca yarıçap arttığında, pançların kenar bölgesinde oluşan gerilmelerin

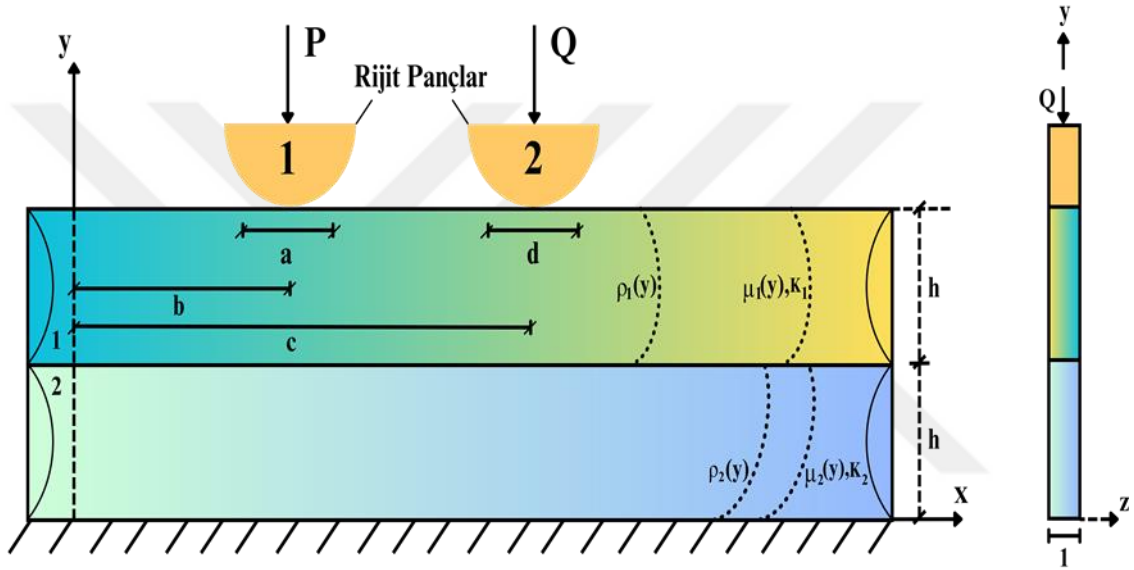
arttığını, ancak pançların orta bölgesinde oluşan gerilmelerin azaldığını incelemiştir (Kaya ve Polat, 2023).

### **1.5. Çalışmanın Kapsam ve Amacı**

Bu çalışmada, dairesel geometride rijit iki panç ile yüklenmiş fonksiyonel olarak dereceli iki tabakadaki temas analizi Ansys ve Makine Öğrenmesi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Literatürde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş iki tabaka durumu için sonlu elemanlar ve makine öğrenmesi yöntemleri birlikte kullanılarak yapılan temas problemi konulu bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Dairesel pançlardan elde edilen temas uzunlukları Makine Öğrenmesi algoritması ile Python programına aktararak bilgisayara öğretilmesi amaçlanmıştır. Sonraki aşamada ek bir çözüme ihtiyaç duymadan istenen bilgilerin kısa bir sürede tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışmada tabakalarda oluşan ilk ayrılma yükleriyle ilk ayrılma uzaklıkları ve tabakalarda oluşan temas gerilmeleri Ansys programı kullanılarak bulunmuştur. Bu çalışmanın diğer bir amacı ise Ansys sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çözümün analitik yöntemle yapılan çözümlere göre daha kısa sürede ve doğru bir şekilde yapılmasıdır.

## 2. PROBLEMİN TANIMI

Fonksiyonel derecelendirilmiş tabakaların kayma modülleri sırasıyla,  $\mu_1(y) = \mu_0 e^{\beta y}$ ,  $\mu_2(y) = \mu_1 e^{\beta y}$ , yoğunlukları  $\rho_1(y) = \rho_0 e^{\gamma y}$ ,  $\rho_2(y) = \rho_1 e^{\gamma y}$  olarak belirtilen yüksekliği  $h$  olan tabakalar Şekil 2.1’ de gösterilmiştir. Tabakaların  $(-\infty, +\infty)$  değerleri arasında bulunduğu dikkate alınmıştır. Pançlar 1 ve 2 olarak belirtilmiştir. Pançların rijit olarak tanımlandığı ve temas halindeki yüzeyler için yalnızca basınç gerilmelerinin iletildiği esas alınmıştır.



Şekil 2.1. Temas probleminin geometrisi ve yükleme durumu

### 3. BULGULAR ve İRDELEME

Bu çalışmada, dairesel geometride rijit iki panç ile yüklenmiş fonksiyonel olarak dereceli iki tabakadaki temas analizi incelenmiştir. Çalışmada yapılan analizin geometrisi ANSYS programında modellenerek sonlu elemanlar metodu ile oluşturulmuştur. Dairesel pançlardan elde edilen temas uzunlukları Makine Öğrenmesi algoritması ile Python programına aktararak bilgisayara öğretilmiştir. Sonraki aşamada ek bir çözüme ihtiyaç duymadan istenen bilgiler kısa bir sürede tahmin edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada tabakalarda oluşan ilk ayrılma yükleriyle ilk ayrılma uzaklıkları, tabakalarda oluşan temas gerilmeleri ve derinlik boyunca oluşan gerilmeler bulunmuştur. Elde edilen gerilmeler grafik olarak sunulmuştur.

#### 3.1. Problemin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

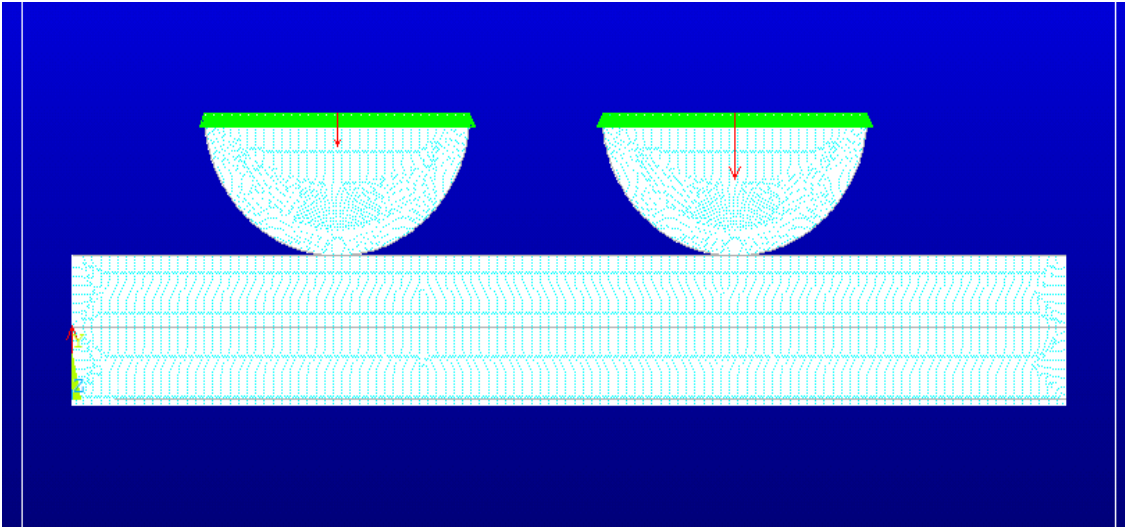
Bu çalışmada problemin sonlu elemanlar modeli ve analizi ANSYS paket programı kullanılarak yapılmıştır. Pançlara ait tüm işlemler standart ANSYS menüleri ile yapılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalara ait malzeme özellikleri ve sonlu elemanda ağlara bölme işlemi standart menülerle yapılamamaktadır. Bu nedenle fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalara ait malzeme özelliklerinin tanımlanması ve ağlara bölme işleminin gerçekleştirilmesi için programa özel bir makro eklenmiş ve gerekli parametreler makro vasıtasıyla sağlanmıştır. Geliştirilen kod, \*set komutu kullanılarak geometri ve malzeme özellikleri gibi problem parametrelerini tanımlayarak başlamaktadır.

Eklenen kod vasıtasıyla malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra problemin geometrisi aşamasına geçilerek FD tabakalar ve dairesel pançlar için iki boyutlu (2B) düzlem geometrik model kullanılarak problemin geometrisi oluşturulmuştur. Problemin geometrisi oluşturulduktan sonra probleme ait eleman tipi SOLID-8 node 183 olarak tanımlanmıştır. Eleman tipinin belirlenmesi, problemi çözerken doğru sonuçların alınabilmesi için çok önemlidir.

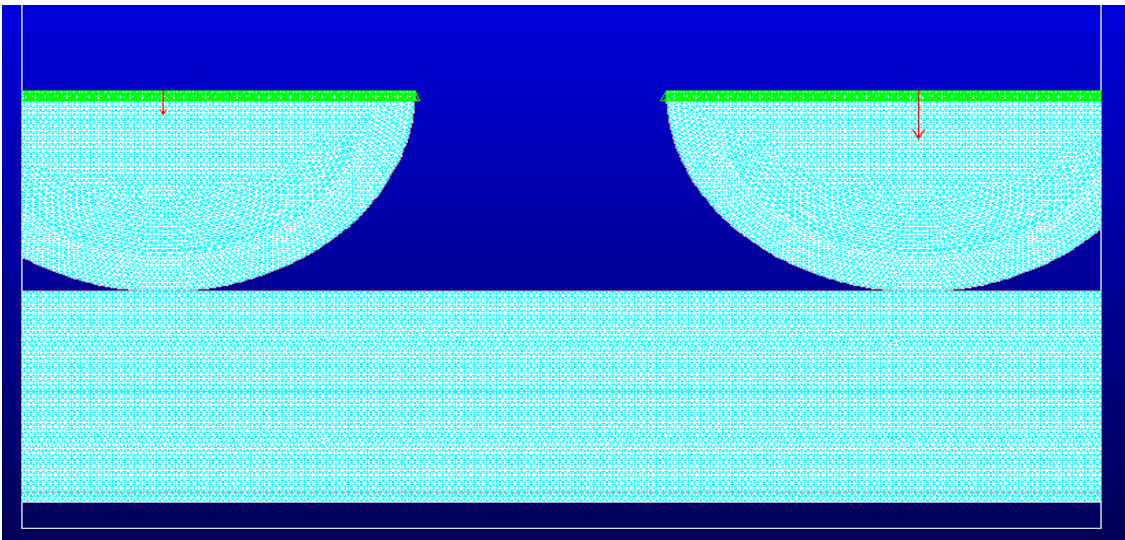
Ardından rijit pançların malzeme özellikleri lineer, elastik-izotropik olarak seçilmiş ve gerekli malzeme özellikleri elemanlara tanımlanmıştır. Elemanları ağlara bölme (mesh) aşamasına geçilmiştir ve serbest üçgen ağ kullanılmıştır. Elemanlar arasındaki teması sağlamak için pançlar-Fd tabaka ve Fd tabaka-Fd tabaka arasında yüzeyden yüzeye (surface

to surface) temas çiftleri tanımlanmıştır. Bu temas çiftleri temas ve hedef elemanları olmak üzere ikiye ayrılır. Hedef eleman olarak temas elemanına kıyasla etki mesafesi fazla olan, sert ve düz yüzeyi bulunan kısımların belirlenmesi daha uygundur. Ansys programında analiz çeşidine göre farklı temas algoritmaları yer almaktadır. Bu çalışmada daha hızlı sonuç alma imkanı sağlayan Augmented Lagrangian Method algoritması tercih edilmiştir.

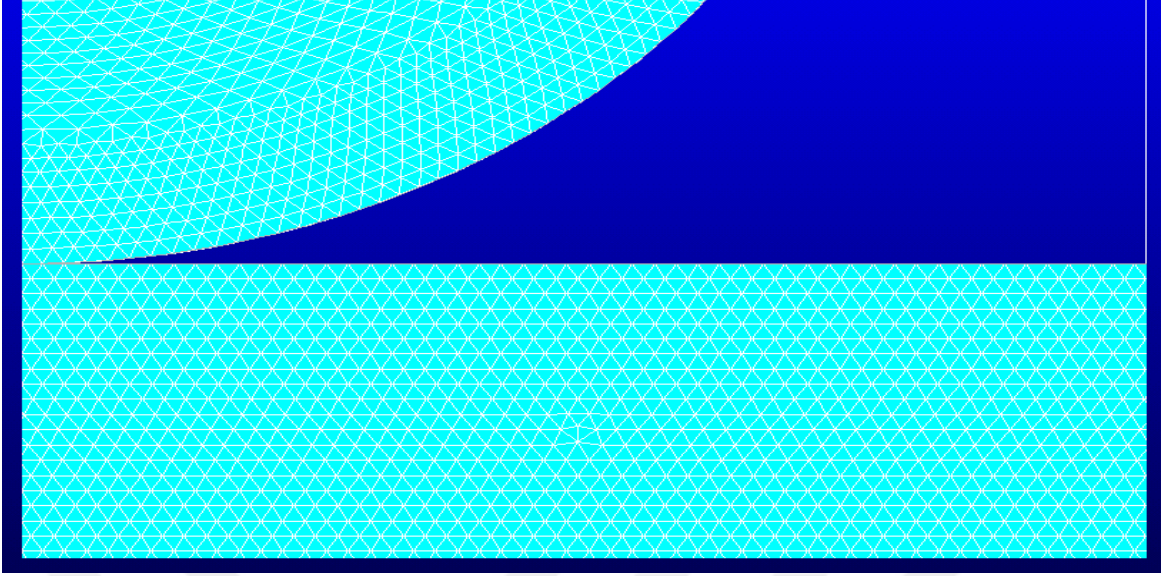
Temas işlemleri tamamlandıktan sonra problemin geometrisine belirlenen deplasmanlar tanımlanmış ve ardından planlanan yüklemeler yapılarak çözüm aşamasına geçilmiştir. Ardından çözüm başarıyla gerçekleşmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.



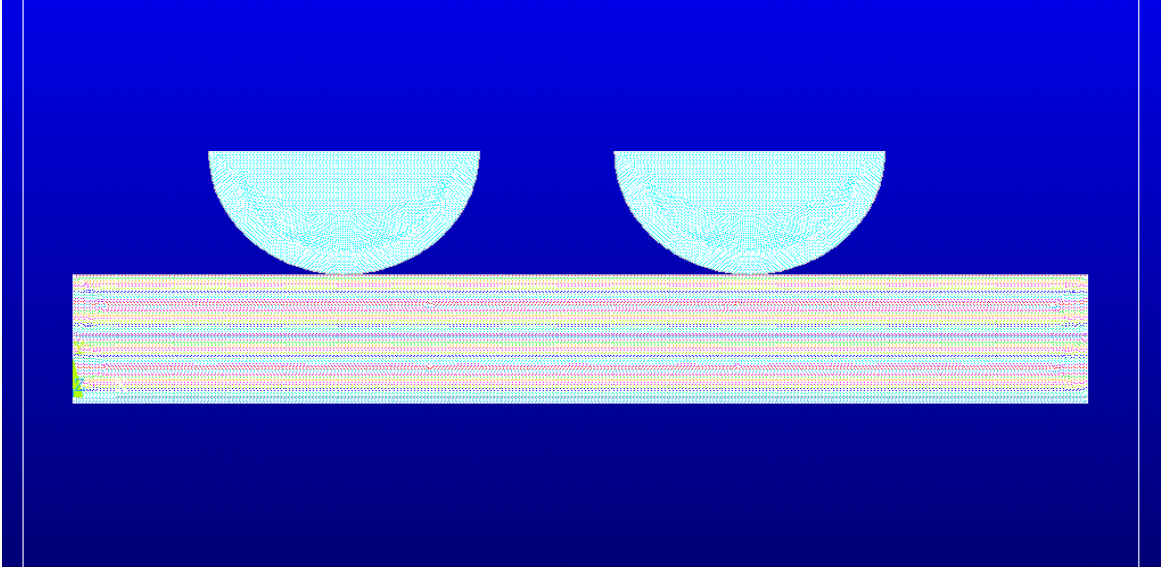
Şekil 3.1. Temas probleminin sonlu elemanlar modeliyle geometrisi ve yükleme durumu



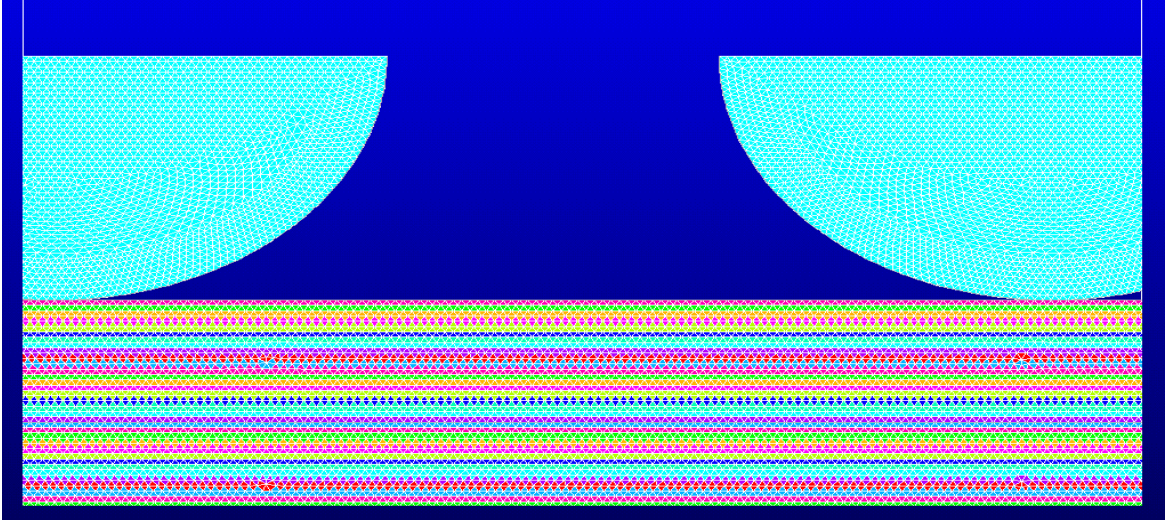
Şekil 3.2. Problem geometrisinin üçgen mesh hali



Şekil 3.3. Problem geometrisinin üçgen mesh zoom hali



Şekil 3.4. Problem geometrisinde FD tabakalar ve pançların malzeme özelliklerinin tanımlanmış hali



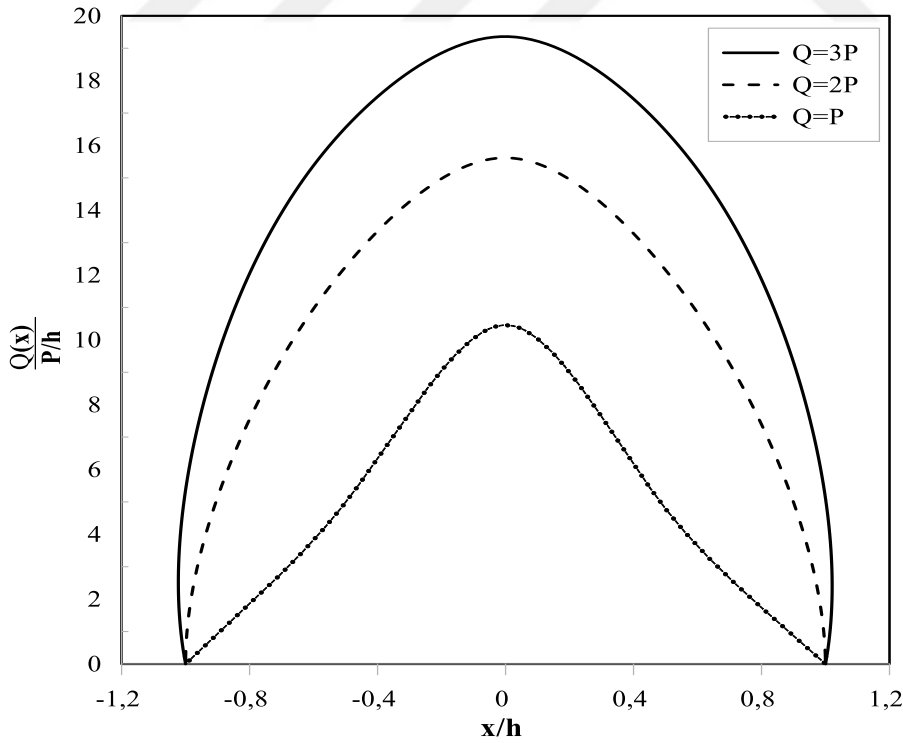
**Şekil 3.5.** Problem geometrisinde FD tabakalar ve pançların malzeme özelliklerinin tanımlanmış zoom hali

### 3.2. Rijit Pançlar Altında Temas Sonucu Oluşan Gerilmelerin İncelenmesi

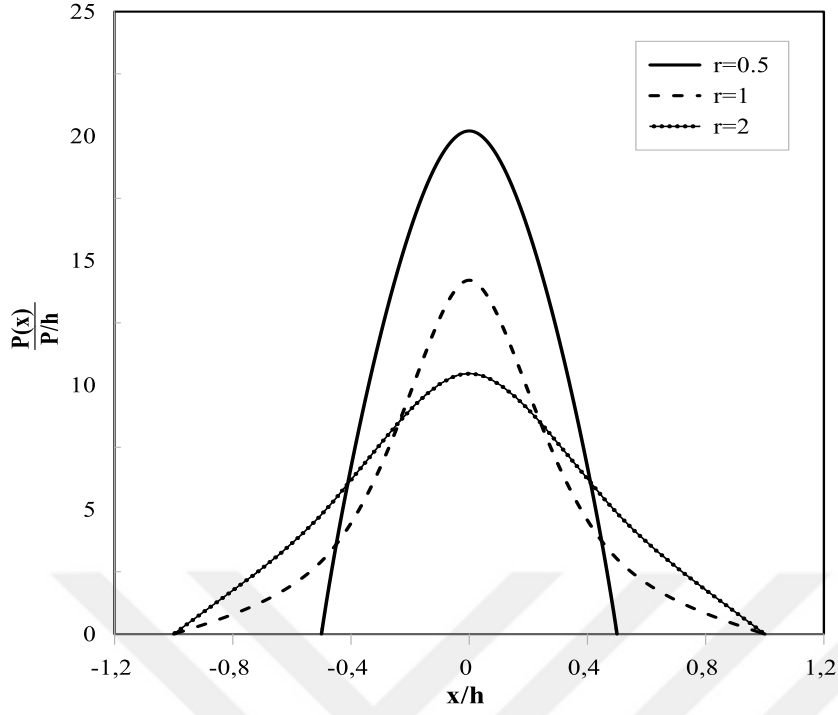
Bu kısımda farklı parametre değişimleri etkisinde rijit pançlarla fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında meydana gelen temas gerilme dağılımları incelenmiştir. Çalışmada fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalara ait rijitlik parameterelerinin  $\beta_{h1}$ ,  $\beta_{h2}$ , yükleme durumlarının, pançlara ait yarıçapların ve pançlar arasındaki mesafelerin değişimi gözlemlenmiştir. Bu analizlerde yoğunluk parametreleri  $\gamma_{h1}$ ,  $\gamma_{h2}$  değerleri sabit tutularak çözüm yapılmıştır.

- Yükleme durumu değişimi:
- Bu analizde pança etki eden yük durumu değişiminin panç altında oluşan temas gerilmelerine olan etkisi araştırılmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere pança etki eden yük arttığında temas gerilme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Pançların yarıçap değişimi:
- Bu analizde her iki pançın yarıçap değişiminin pançlar altında oluşan temas gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.7 ve 3.8'de görüldüğü üzere yarıçap azaldığında pançların orta bölümünde oluşan temas gerilmesinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat yarıçap azaldığında pançların kenar bölümlerinde temas gerilmesinin azaldığı incelenmiştir.

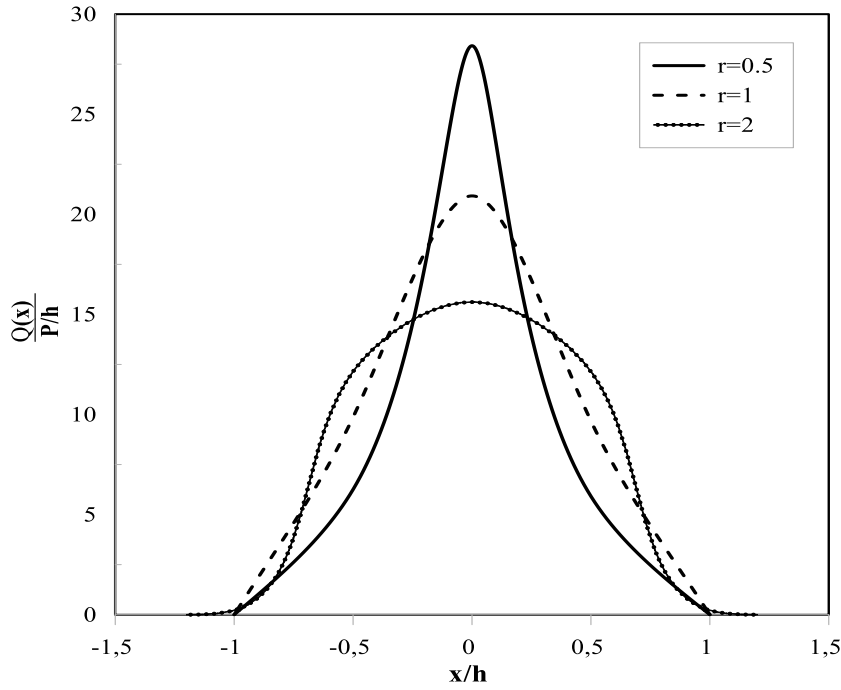
- Pançlar arasındaki mesafe değişimi:
- Bu bölümde pançlar arasındaki mesafe değişiminin pançlar altında oluşan temas gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.9 ve 3.10'da pançlar arasındaki mesafe fazla olduğunda temas gerilme dağılımının fazla değişmediği fakat pançlar arası mesafe iyice azaldığında temas gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Rijitlik parameterelerinin  $\beta h_1$ ,  $\beta h_2$  değişimi:
- Bu kısımda rijitlik parameterelerinin  $\beta h_1$ ,  $\beta h_2$  farklı değerlerinin etkisi sonucu pançlar altındaki temas gerilme dağılımları incelenmiştir. Şekil 3.11 ve 3.12'de 1. fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta h_1$ , arttığında pançların altındaki orta bölgede temas gerilme değerlerinin arttığı,  $\beta h_1$  azaldığında pançların altındaki orta bölgede oluşan temas gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.13'de ise 2.fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta h_2$  değerinin değişiminin pançlar altında oluşan temas gerilme dağılımını etkilemediği gözlemlenmiştir.



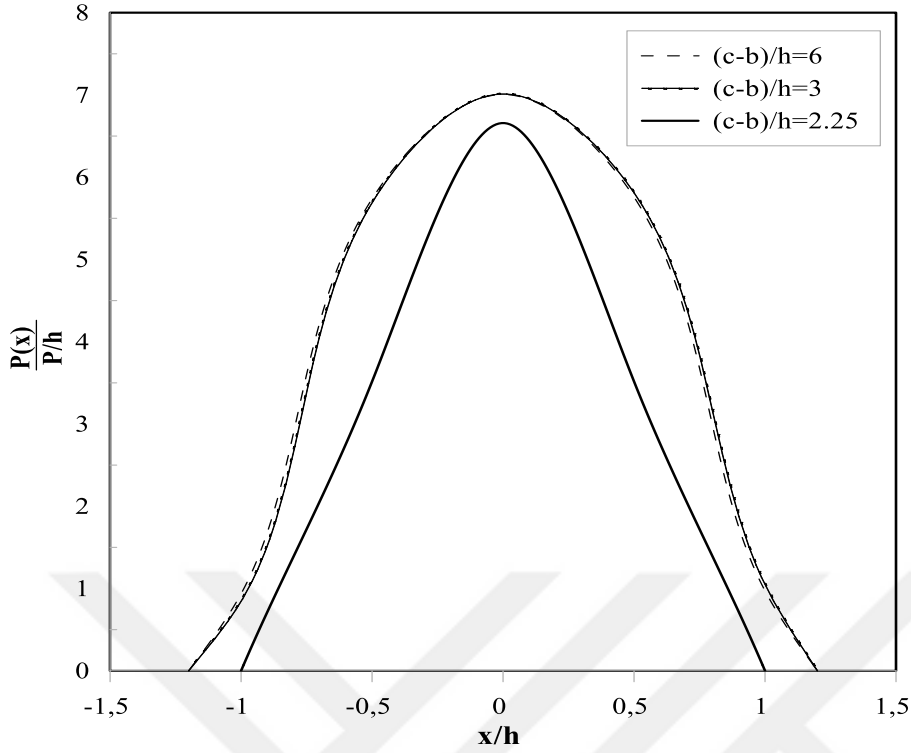
**Şekil 3.6.** Pançdaki yük değişimine göre panç altındaki gerilme dağılımları ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_1=-0.6931$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



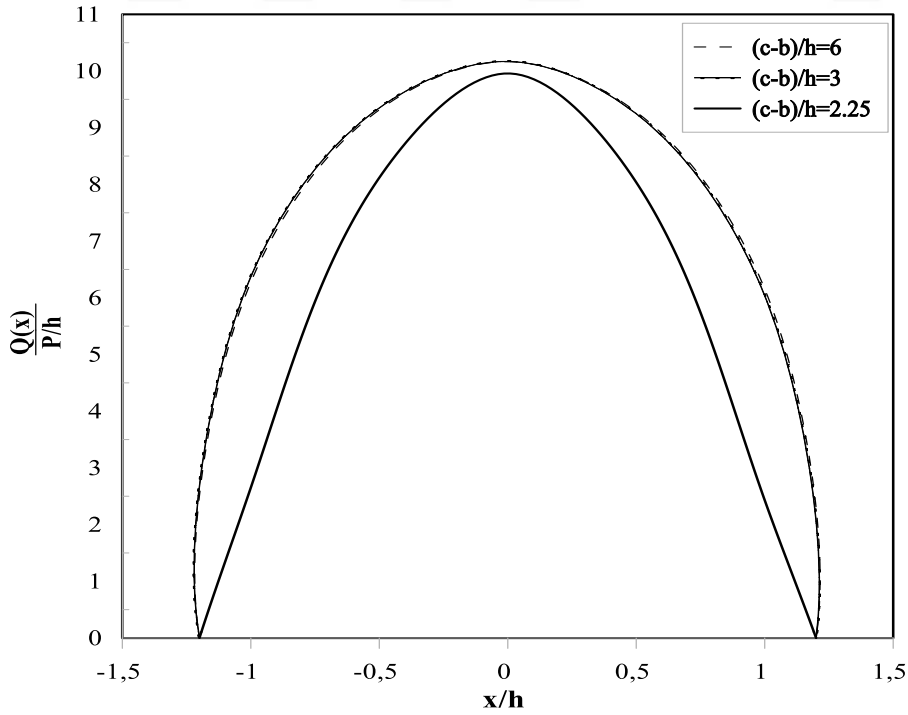
**Şekil 3.7.** Pançların yarıçap değişimine göre 1.panç altındaki gerilme dağılımları(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $Q=2P, \mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



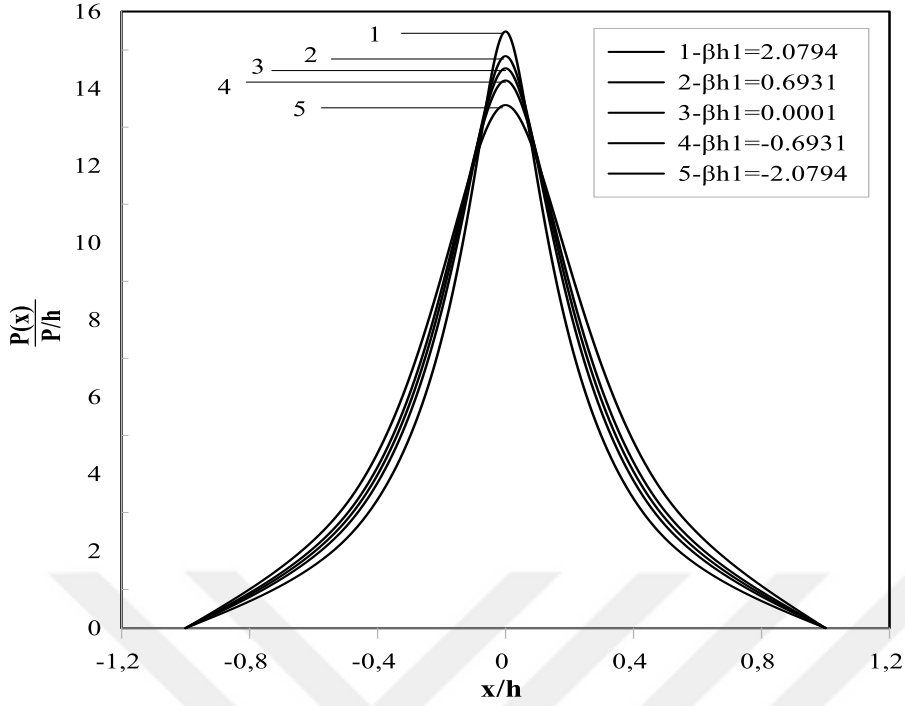
**Şekil 3.8.** Pançların yarıçap değişimine göre 2.panç altındaki gerilme dağılımları(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $Q=2P, \mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



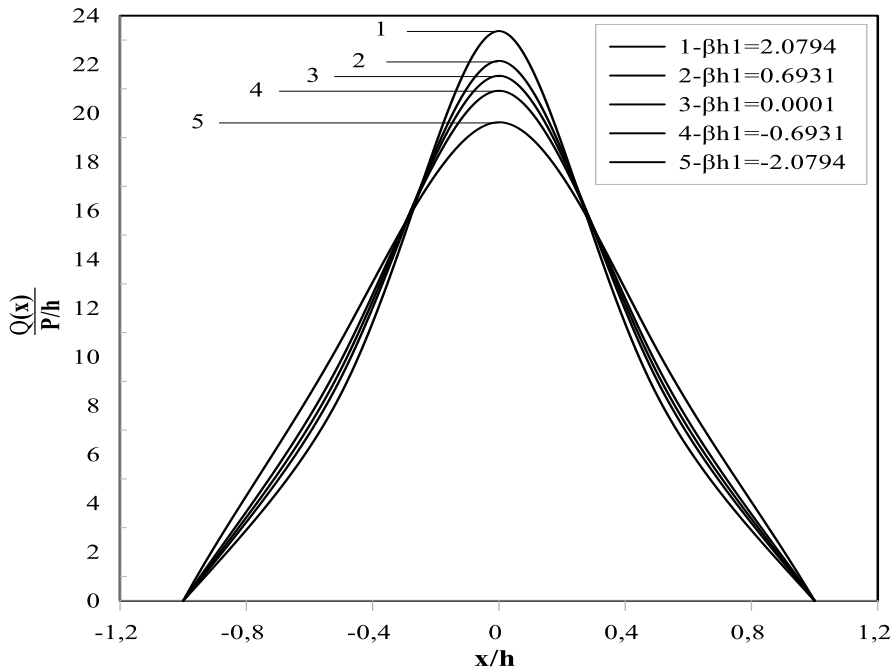
**Şekil 3.9.** Pançlar arasındaki mesafe değişimine göre 1.panç altındaki gerilme dağılımları(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $Q=2P$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2l}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



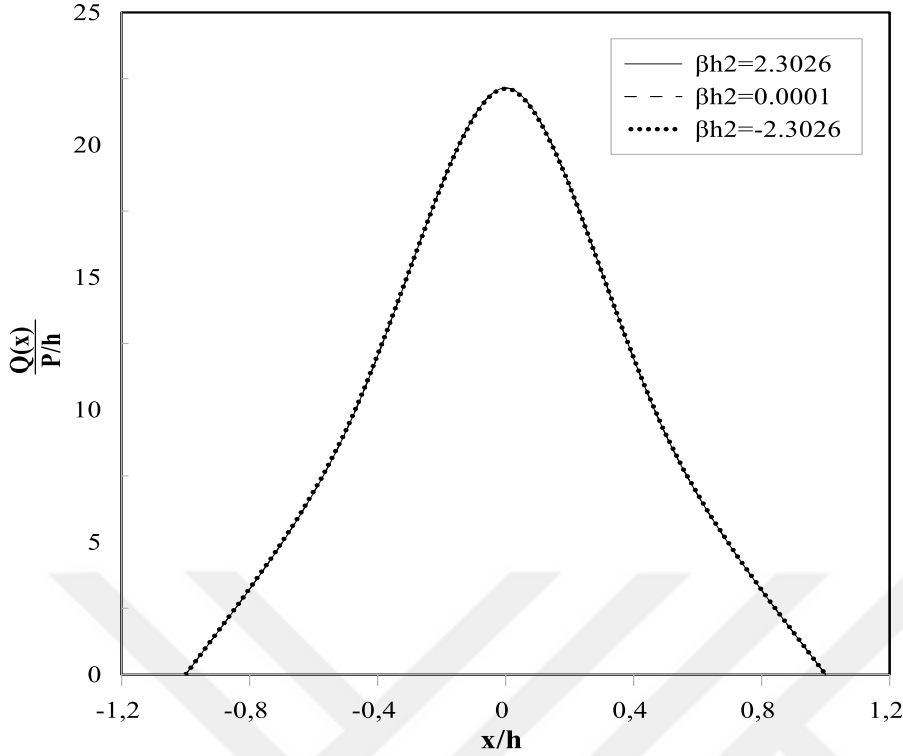
**Şekil 3.10.** Pançlar arasındaki mesafe değişimine göre 2.panç altındaki gerilme dağılımları(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $Q=2P$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2l}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



**Şekil 3.11.** Tabaka rijitlik parametresi ( $\beta h_1$ ) değişimine göre 1. pañç altındaki gerilme dağılımları ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $Q=2P$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



**Şekil 3.12.** Tabaka rijitlik parametresi ( $\beta h_1$ ) değişimine göre 2. pañç altındaki gerilme dağılımları ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $Q=2P$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



**Şekil 3.13.** Tabaka rijitlik parametresi ( $\beta h_2$ ) değişimine göre 2. panç altındaki gerilme dağılımları ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_1=0.6931$ ,  $Q=2P$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

### 3.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Tabakalar Arasındaki İlk Ayrılma Yükleri ve Uzaklıklarının Araştırılması

Bu kısımda fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan ilk ayrılma yükleri ( $x_{cr}$ ) ve ilk ayrılma uzaklıklarına ( $\lambda_{cr}$ ) farklı parametre değişimlerinin etkisi incelenmiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan ilk ayrılma yükleri ve ilk ayrılma uzaklıklarına yükleme durumunun, tabakaların rijitlik parametrelerinin ( $\beta h_1$ ), ( $\beta h_2$ ) değişiminin, pançlar arasındaki mesafenin değişiminin ve pançaların yarıçaplarının değişiminin etkisi analiz edilmiştir. Bu analizde yoğunluk parametreleri ( $\gamma h_1$  ve  $\gamma h_2$ ) sabit tutularak işlem yapılmıştır.

- Pançlar arası mesafe değişimi:
- Tablo 3.1’de bloklar arası mesafe değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ( $x_{cr}$ ) ve ilk ayrılma yüküne ( $\lambda_{cr}$ ) etkisi araştırılmıştır. Bloklar arası mesafe arttıkça ilk

ayrılma uzaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Fakat ilk ayrılma yükünün bir noktada arttıktan sonra gittikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yükleme durumu arttığında ilk ayrılma uzaklığının değişmediği, ilk ayrılma yükünün yük arttıkça azaldığı görülmüştür.

- Rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimi:
- Tablo 3.2’de rijitliğin parametresinin farklı varyasyonlarının ilk ayrılma uzaklığı ( $x_{cr}$ ) ve ilk ayrılma yüküne ( $\lambda_{cr}$ ) etkisi araştırılmıştır. Rijitlik arttıkça ilk ayrılma uzaklığının azaldığı fakat ilk ayrılma yükünün arttığı görülmüştür. Rijitlik azaldıkça ise ilk ayrılma uzaklığı artarken ilk ayrılma yükü azalmıştır. Ayrıca yük arttıkça ilk ayrılma yükünün azaldığı tekrar gözlemlenmiştir.
- Rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimi:
- Tablo 3.3’de rijitliğin parametresinin değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ( $x_{cr}$ ) ve ilk ayrılma yüküne ( $\lambda_{cr}$ ) etkisi araştırılmıştır. Rijitlik arttıkça ilk ayrılma uzaklığının azaldığı ve ilk ayrılma yükünün azaldığı görülmüştür. Fakat rijitlik azaldıkça ilk ayrılma uzaklığının ve ilk ayrılma yükünün arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yük arttıkça ilk ayrılma yükünün azaldığı ve ilk ayrılma uzaklığının değişmediği yinelenmiştir.
- Pançların yarıçap değişimi:
- Tablo 3.4’de pançlara ait yarıçap değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ( $x_{cr}$ ) ve ilk ayrılma yüküne ( $\lambda_{cr}$ ) etkisi araştırılmıştır. Pançların yarıçapı arttığında ilk ayrılma uzaklığı artarken ilk ayrılma yükünün azaldığı gözlemlenmiştir.

**Tablo 3.1.** Pançlar arası mesafe değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi((c-b)/h=4,  $\beta_{h1}=-0.6931$   $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{21}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

Mesafe	Q=P		Q=2P		Q=3P	
	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$
(c-b)/h=2.25	9.65	174.12	9.65	91.05	9.65	61.67
(c-b)/h=3.00	10.05	180.25	10.05	92.62	10.05	62.31
(c-b)/h=4.00	10.55	178.14	10.55	91.84	10.55	61.85
(c-b)/h=6.00	11.55	173.20	11.55	89.76	11.55	60.61

**Tablo 3.2.** Rijitlik parametresi ( $\beta h_1$ )değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

Rijitlik parametresi ( $\beta h_1$ )	Q=P		Q=2P		Q=3P	
	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$
( $\beta h$ )=2.0794	10.10	259.91	10.10	153.26	10.10	108.69
( $\beta h$ )=1.3863	10.15	227.41	10.15	128.10	10.15	89.15
( $\beta h$ )=0.0001	10.40	188.39	10.40	99.51	10.40	67.61
( $\beta h$ )=-1.3863	10.75	172.26	10.75	86.97	10.75	58.18
( $\beta h$ )=-2.0794	10.95	170.18	10.95	84.31	10.95	56.09

**Tablo 3.3.** Rijitlik parametresi ( $\beta h_2$ )değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_1=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

Rijitlik parametresi ( $\beta h_2$ )	Q=P		Q=2P		Q=3P	
	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$
( $\beta h$ )=2.0794	10.05	193.51	10.05	102.73	10.05	69.94
( $\beta h$ )=1.3863	10.15	197.90	10.15	106.31	10.15	72.69
( $\beta h$ )=0.0001	10.45	211.14	10.45	115.81	10.45	79.76
( $\beta h$ )=-1.3863	11.00	218.47	11.00	119.10	11.00	81.94
( $\beta h$ )=-2.0794	11.30	220.92	11.30	121.27	11.30	82.88

**Tablo 3.4.** Pançların yarıçap değişiminin ilk ayrılma uzaklığı ve ilk ayrılma yüküne etkisi(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta h_1=-0.6931$   $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

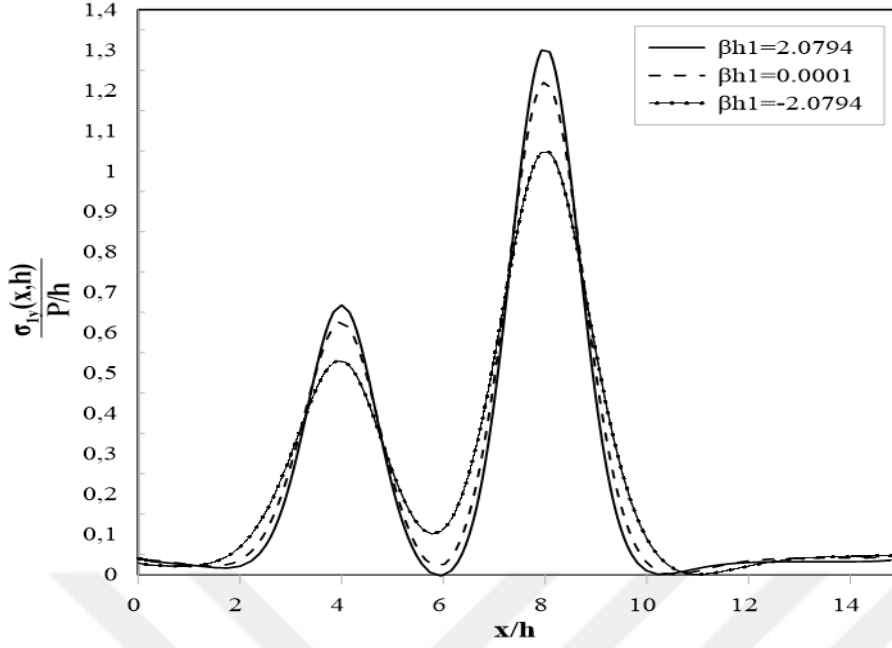
Mesafe	Q=P		Q=2P		Q=3P	
	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$	$x_{cr}/h$	$\lambda_{cr}$
$R_1=R_2=0.5$	9.05	180.68	9.05	92.82	9.05	62.42
$R_1=R_2=1$	10.55	178.14	10.55	91.84	10.55	61.85
$R_1=R_2=2$	12.55	176.33	12.55	90.93	12.55	60.72

### 3.4. Gerilmelerin İncelenmesi

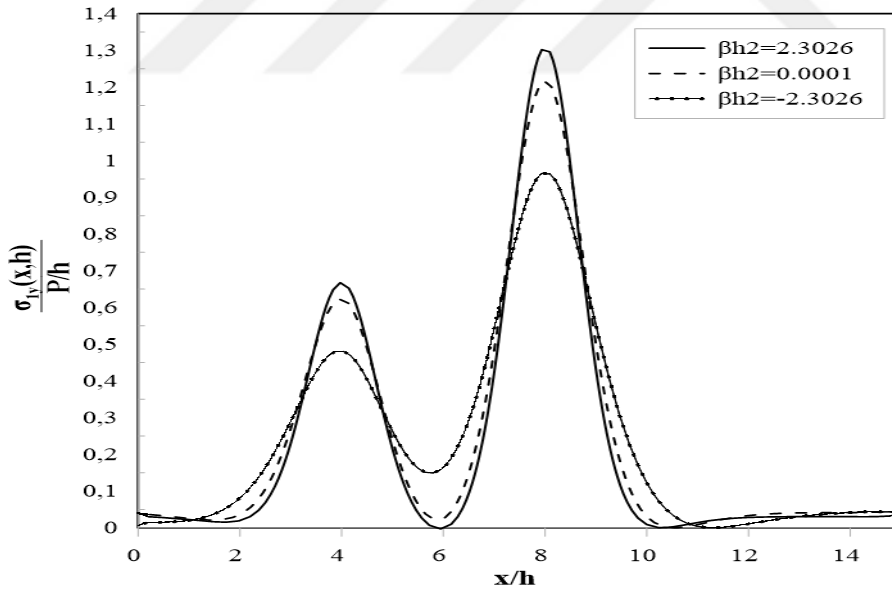
Bu kısımda farklı parametre değişimleri etkisinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında meydana gelen temas gerilme dağılımları incelenmiştir. Çalışmada fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalara ait rijitlik parameterlerinin  $\beta h_1$ ,  $\beta h_2$ , yükleme durumlarının, pançlara ait yarıçapların ve pançlar arasındaki mesafelerin

değişimlerinin etkisi gözlemlenmiştir. Bu analizlerde yoğunluk parametreleri  $\gamma_{h1}$ ,  $\gamma_{h2}$  değerleri sabit tutularak çözüm yapılmıştır.

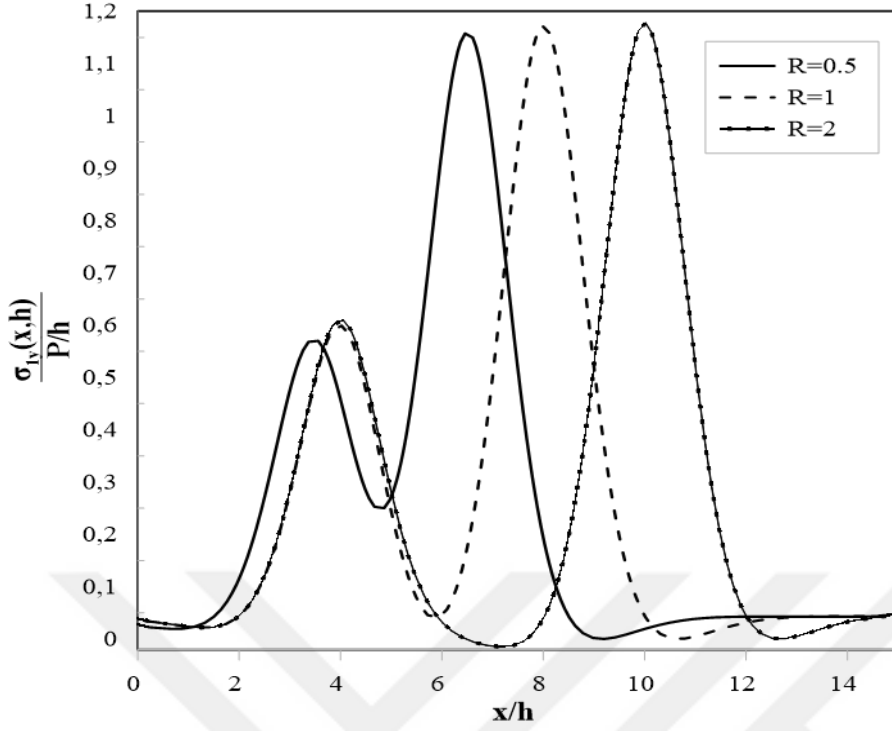
- Rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimi:
- Bu analizde 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişiminin fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan temas gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.14'de rijitlik arttıkça tabakalar arasında oluşan gerilmelerin arttığı pançların altındaki orta bölgede oluşan gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimi:
- Bu analizde 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişiminin fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan temas gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.15'de rijitlik arttıkça tabakalar arasında oluşan gerilmelerin arttığı pançların altındaki orta bölgede oluşan gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Pançların yarıçap değişimi:
- Bu analizde her iki pançın yarıçap değişiminin fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan temas gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.16'da görüldüğü üzere yarıçap azaldığında gerilme değerlerinin azaldığı ve pançların altındaki orta bölümünde oluşan temas gerilme dağılımının etki alanının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Pançlar arasındaki mesafe değişimi:
- Bu bölümde pançlar arasındaki mesafe değişiminin fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan temas gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.17'de pançlar arasındaki mesafe arttığında gerilme değerlerinin etkisinin azaldığı ve tabakaların arasındaki pançların alt orta bölgesinde mesafenin artması sonucu gerilme değerlerinin azalıp 0'a yaklaştığı gözlemlenmiştir.



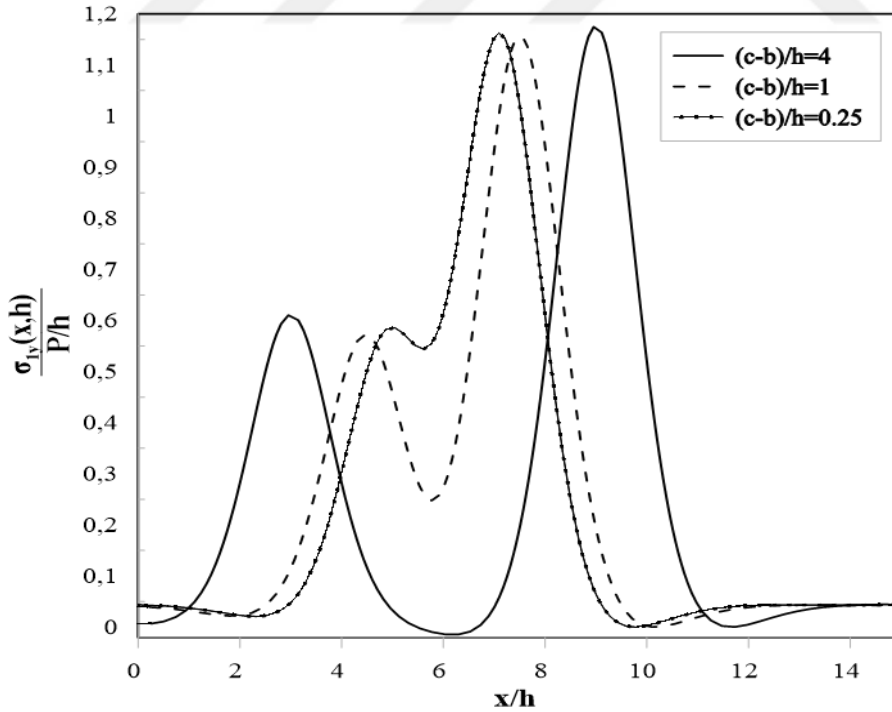
**Şekil 3.14.** 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta h_1$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan  $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$  temas gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



**Şekil 3.15.** 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta h_2$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan  $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$  temas gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_1=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



**Şekil 3.16.** Pançlara ait yarıçap değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan  $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$  temas gerilmesi dağılımı ( $(c-b)/h=4$ ,  $\beta h_1=-0.6931$   $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2l}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

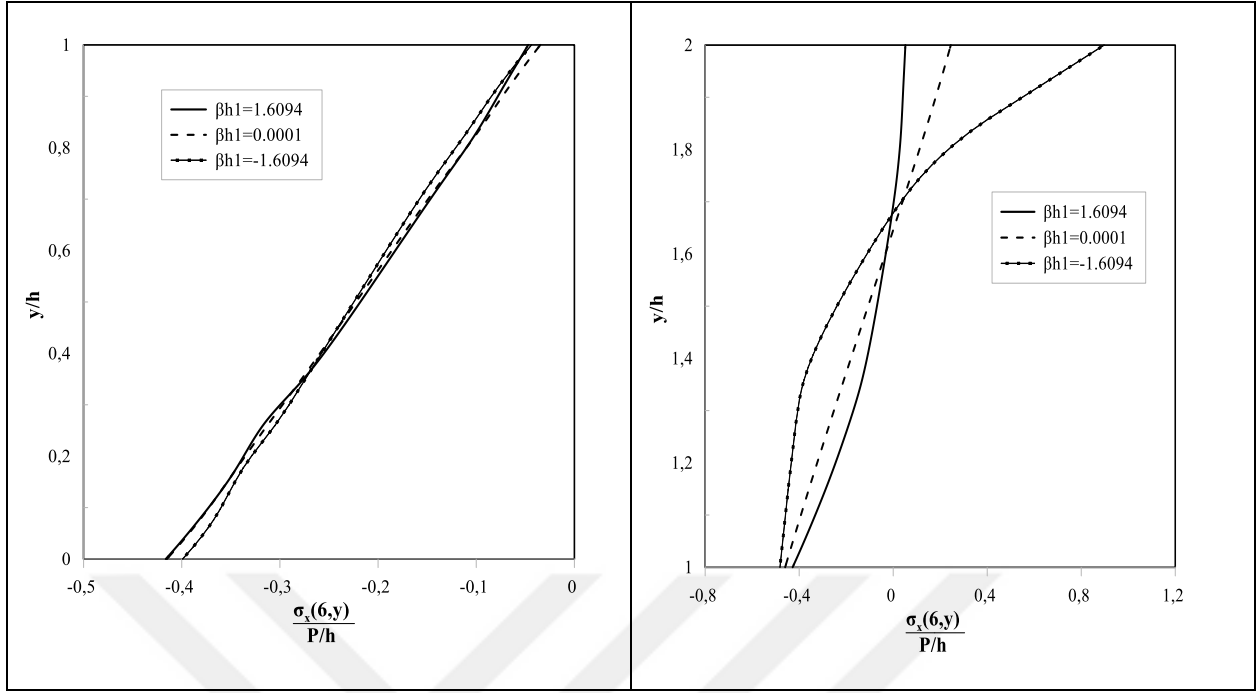


**Şekil 3.17.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında oluşan  $\sigma_{1y}(x,h)/P/h$  temas gerilmesi dağılımı ( $(c-b)/h=4$ ,  $\beta h_1=-0.6931$   $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2l}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

### 3.5. Derinlik Boyunca Gerilmelerin İncelenmesi

Bu kısımda, x eksenindeki bir sabit noktada fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakaların derinlikleri boyunca oluşan  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  ve  $\tau_{xy}$  gerilmeleri incelenmiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalara ait rijitlik parameterelerinin  $\beta_{h1}$ ,  $\beta_{h2}$ , pançlara etki eden yükleme durumlarının farklı varyasyonlarının pançlar arası mesafe değişiminin etkisi gözlemlenmiştir. Farklı boyutsuz büyüklükler için tabakalarda oluşan gerilme dağılımları incelenmiş ve grafiklerle gösterilmiştir. Şekillerin altında bulunan (1) ifadesi 1 numaralı tabakayı, (2) ifadesi ise 2 numaralı tabakayı ifade etmektedir.

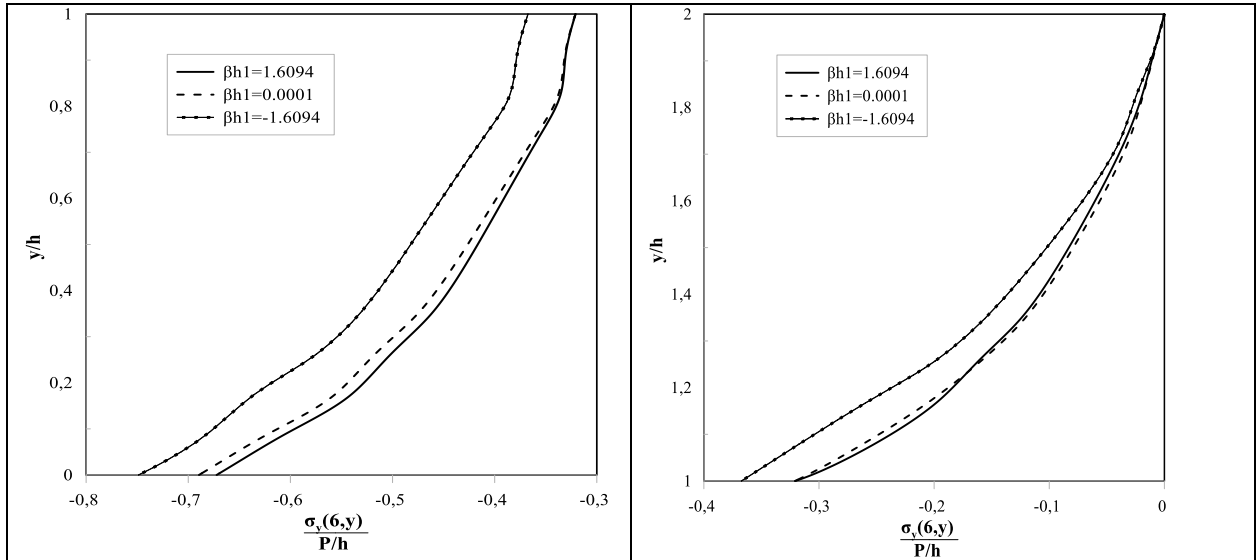
Şekil 3.18(1)'de 1.tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta_{h1}$  değişiminin göre 1.tabakada derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Şekil 3.18(1)'de 1.tabakanın başlangıcında rijitlik azaldıkça basınç gerilme değeri azalmıştır. Üst tabakaya yaklaştıkça basınç gerilmelerin büyüklüğü azalmıştır. Şekil 3.18(2)'de 1.tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta_{h1}$  değişiminin göre 2.tabakada derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Rijitlik azaldıkça basınç gerilme değeri artmıştır. Şekil 3.19(1) ve Şekil 3.19(2)'de 1.tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta_{h1}$  değişiminin göre tabakalardaki derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Rijitlik azaldıkça tabaka başlangıcında basınç gerilmelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.20(1) ve Şekil 3.20(2)'de 1.tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta_{h1}$  değişiminin göre tabakalardaki derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Rijitlik azaldıkça 1.tabakada oluşan kayma gerilmelerinin arttığı 2.tabakadaki kayma gerilmelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.



(1)

(2)

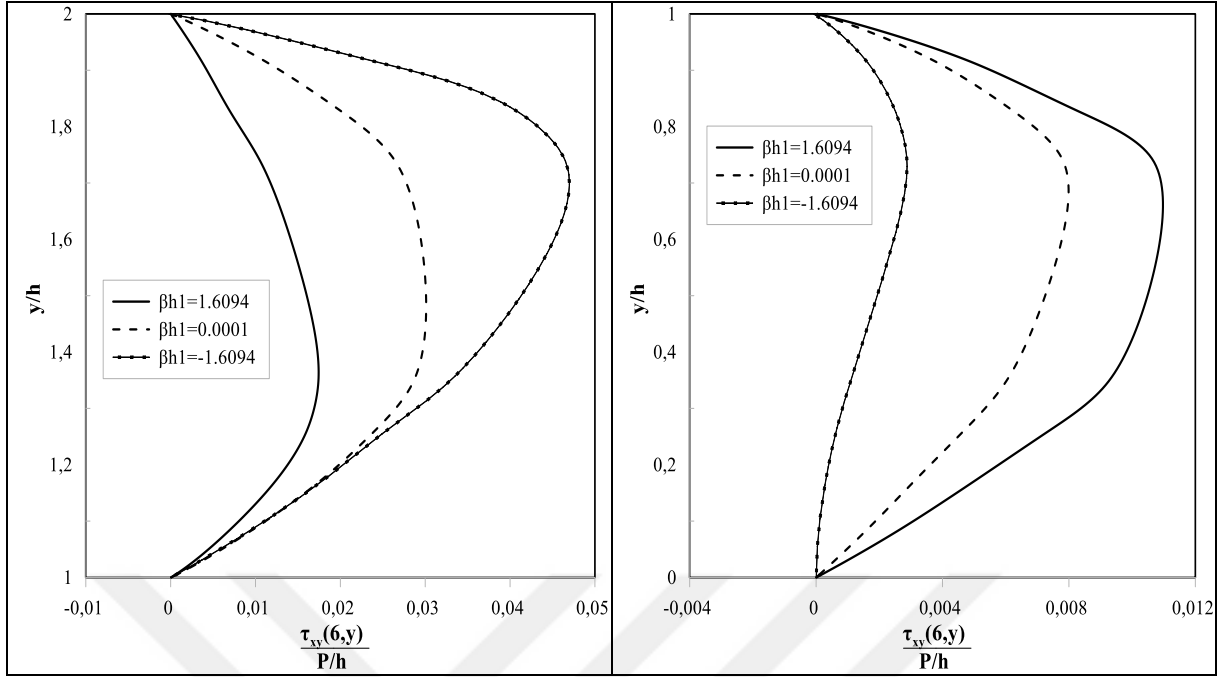
**Şekil 3.18.** 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



(1)

(2)

**Şekil 3.19.** 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h1}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

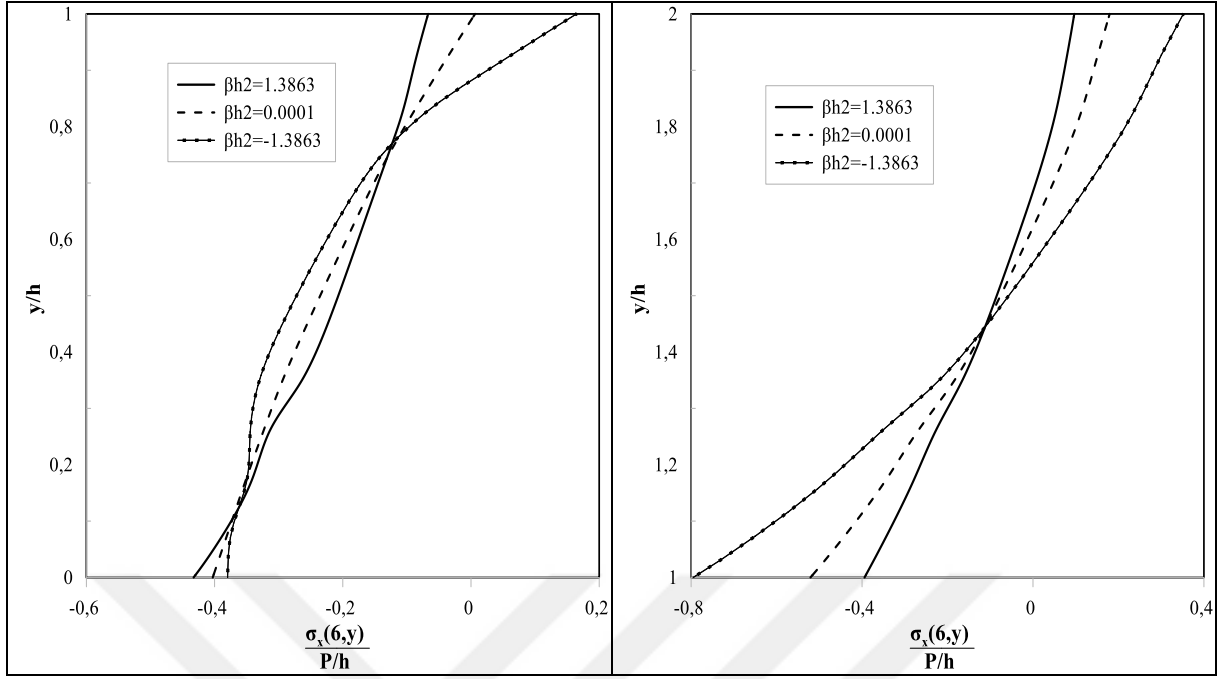


(1)

(2)

**Şekil 3.20.** 1. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta h_1$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

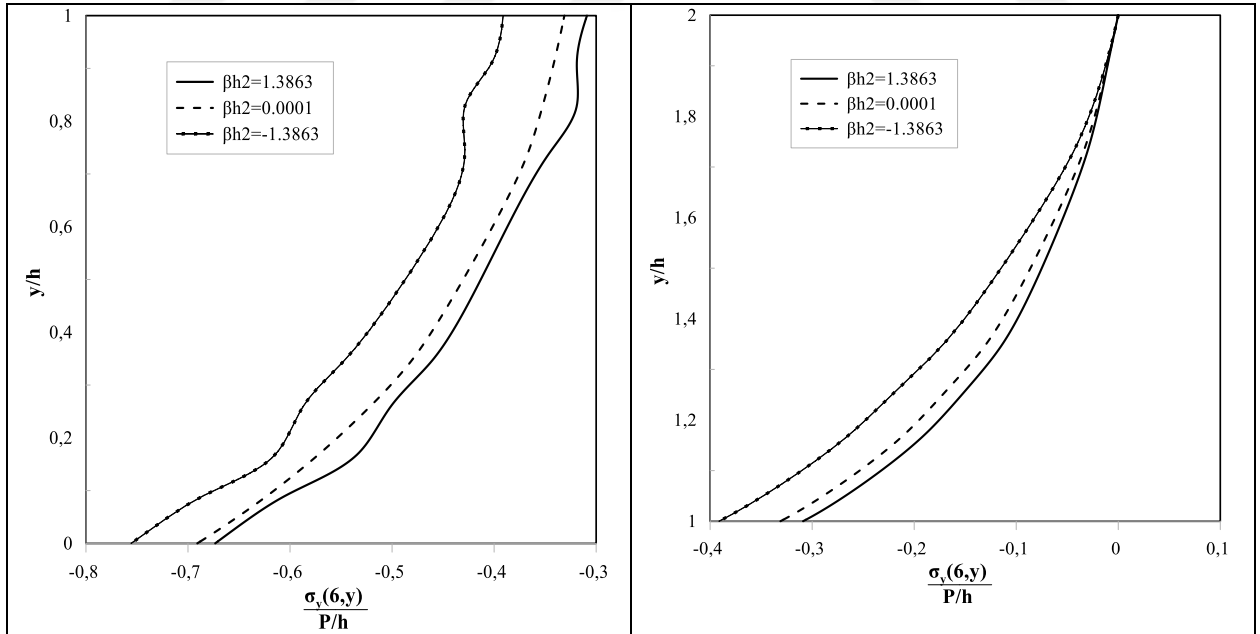
Şekil 3.21(1) ve 3.21(2)'de 2.tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta h_2$  değişiminin tabakalarda derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. 1.tabakada tabakanın alt yüzeyinden üst yüzeyine doğru rijitlik arttıkça gerilme değerleri azalmıştır ve basınç gerilmeleri üst yüzeye doğru çekme gerilmesine dönüşmüştür. 2.tabakada ise rijitlik arttıkça çekme ve basınç gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 3.22(1) ve Şekil 3.22(2)'de 2.tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta h_2$  değişiminin tabakalarda derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Rijitlik arttıkça derinlik boyunca oluşan basınç gerilmelerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 3.23(1) ve Şekil 3.23(2)'de 2.tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta h_2$  değişiminin tabakalardaki derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Rijitlik azaldıkça her iki tabakada derinlik boyunca oluşan kayma gerilmelerinin arttığı gözlemlenmiştir.



(1)

(2)

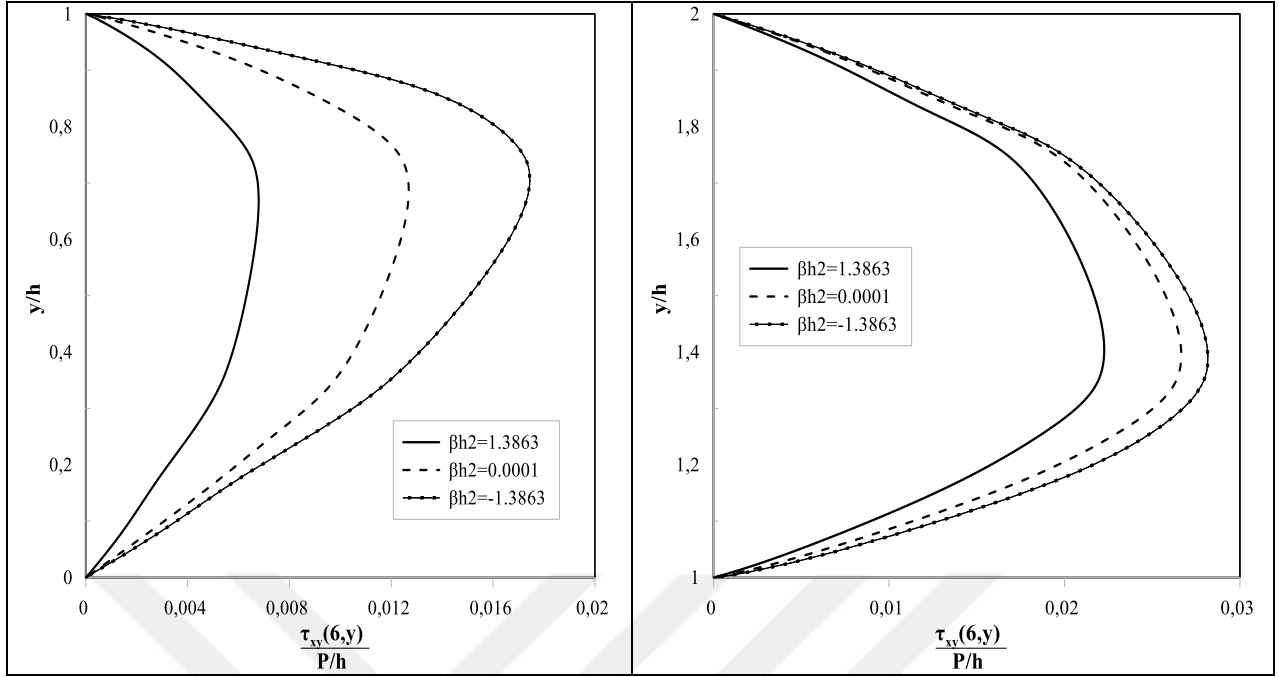
**Şekil 3.21.** 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



(1)

(2)

**Şekil 3.22.** 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta_{h2}$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

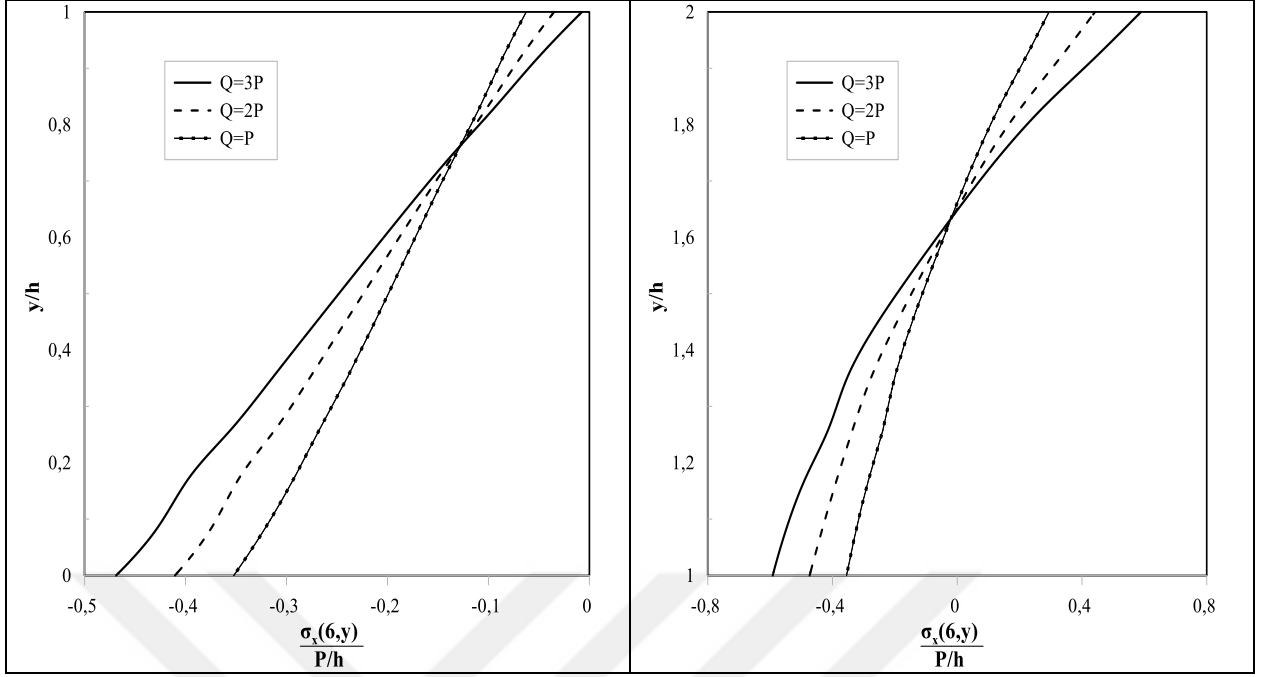


(1)

(2)

**Şekil 3.23.** 2. tabakaya ait rijitlik parametresi ( $\beta h_2$ ) değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_1=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

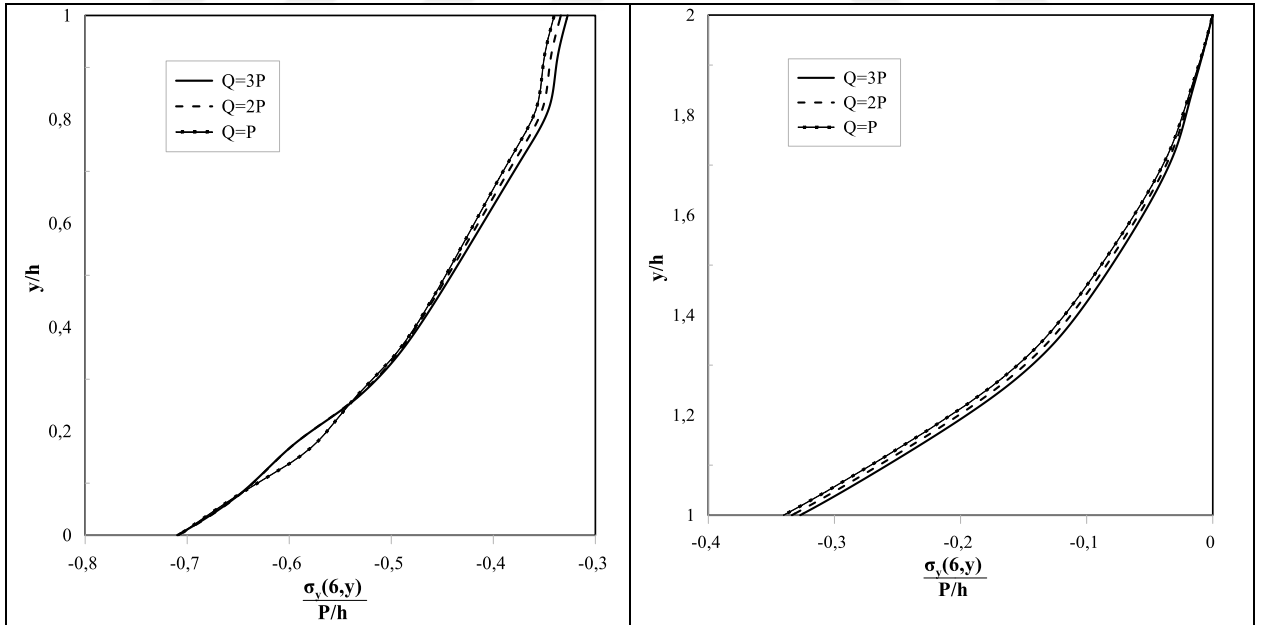
Şekil 3.24(1) ve 3.24(2)'de pançlara etki eden yükleme değişimlerinin tabakalarda derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Yük arttıkça her iki tabakada üst yüzeyde oluşan çekme gerilmelerinin ve alt yüzeylerde oluşan basınç gerilmelerinin arttığı görülmüştür. Şekil 3.25(1) ve Şekil 3.25(2)'de pançlara etki eden yükleme değişimlerinin tabakalarda derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Yük arttıkça 1.tabakanın üst yüzeyindeki basınç gerilmelerinin arttığı 2.tabakanın alt yüzeyinde oluşan basınç gerilmelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.26(1) ve Şekil 3.26(2)'de pançlara etki eden yük değişimlerinin tabakalardaki derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  gerilmelere olan etkisi incelenmiştir. Yük arttıkça oluşan kayma gerilmelerinin her iki tabakada arttığı görülmüştür. Ayrıca her iki pança etki eden yük eşit olduğunda problem simetrik davranış gösterdiğinden kayma gerilmesinin oluşmadığı gözlemlenmiştir.



(1)

(2)

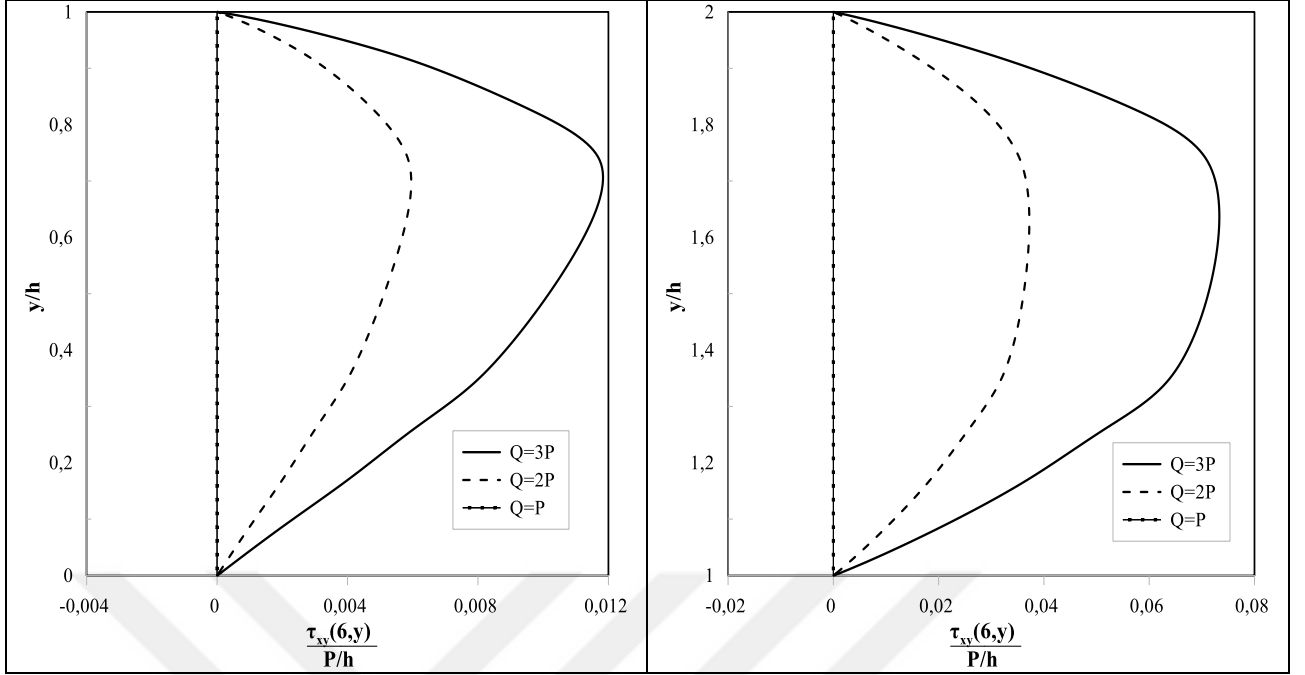
**Şekil 3.24.** Pançlara etki eden farklı yükleme durumlarına göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_1=-0.6931$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



(1)

(2)

**Şekil 3.25.** Pançlara etki eden farklı yükleme durumlarına göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta h_1=-0.6931$ ,  $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

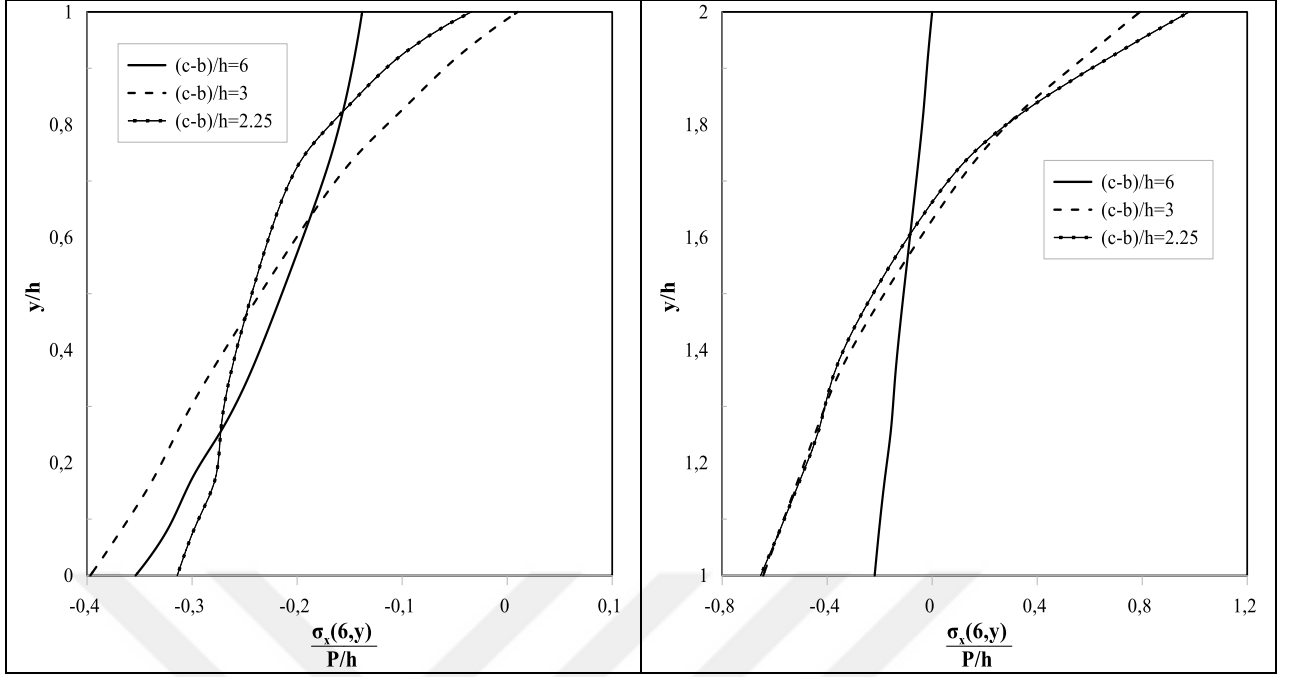


(1)

(2)

**Şekil 3.26.** Pançlara etki eden farklı yükleme durumlarına göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı ( $b/h=4$ ,  $(c-b)/h=4$ ,  $c/h=8$ ,  $\beta_{h1}=-0.6931$ ,  $\beta_{h2}=0.6931$ ,  $\gamma_{h1}=2.0794$ ,  $\gamma_{h2}=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $\mu_o=1$ ,  $\mu_{2l}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

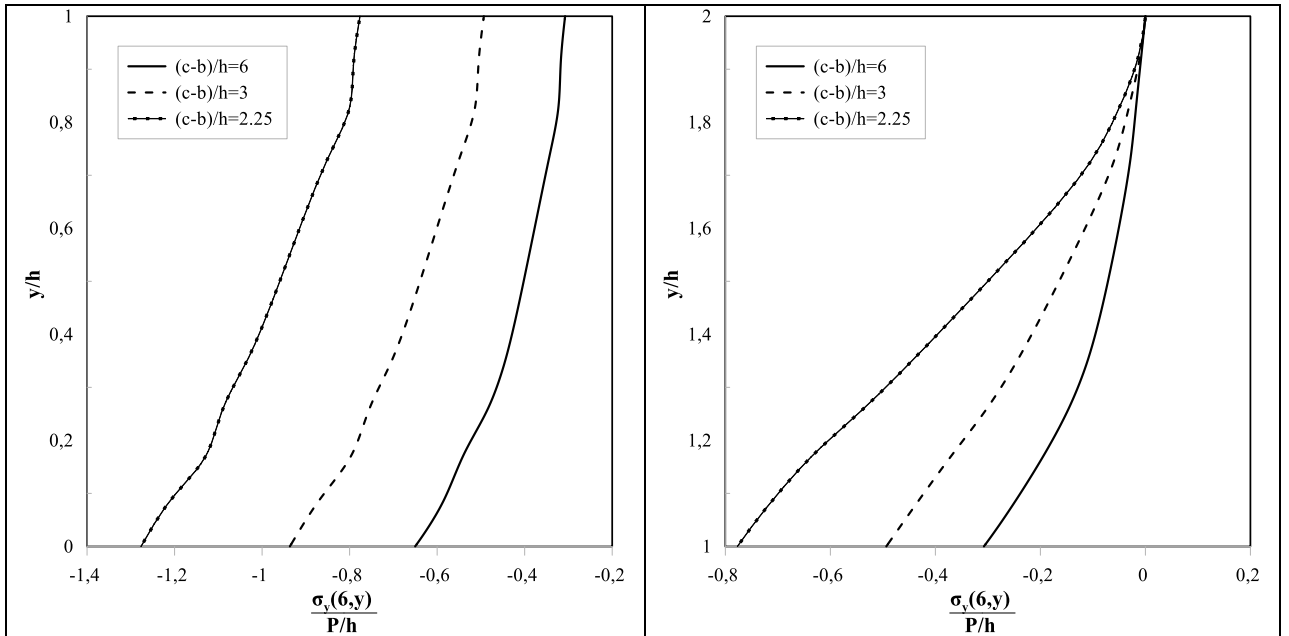
Şekil 3.27(1) ve 3.27(2)'de pançlar arasındaki mesafe değişimlerinin tabakalarda derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. 1.tabakada pançlar arası mesafe arttıkça tabakanın yüzeyleri arasında oluşan basınç ve çekme gerilme değişiminin azaldığı görülmüştür. 2.tabakada ise pançlar arası mesafe fazla iken gerilme değerlerindeki değişimin mesafenin azaldığı durumlardakine göre küçük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.28(1) ve Şekil 3.28(2)'de pançlar arasındaki mesafe değişiminin tabakalarda derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  gerilmelere etkisi incelenmiştir. Her iki tabakada da oluşan gerilmelerin basınç gerilmeleri şeklinde olduğu görülmüştür. Pançlar arası mesafe arttıkça gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.29(1) ve Şekil 3.29(2)'de pançlar arasındaki mesafe değişimlerinin tabakalardaki derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  gerilmelere olan etkisi incelenmiştir. 1.tabakada pançlar arası mesafe arttıkça gerilme büyüklüklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. 2.tabakada pançlar arası mesafe en fazla durumdayken gerilmelerin 0'a yakın değerler olduğu görülürken mesafenin bir sonraki aşamasında gerilme değerlerinin pozitif olarak arttığı, mesafenin en az olduğu durumda ise gerilmelerin negatif yönde arttığı gözlemlenmiştir.



(1)

(2)

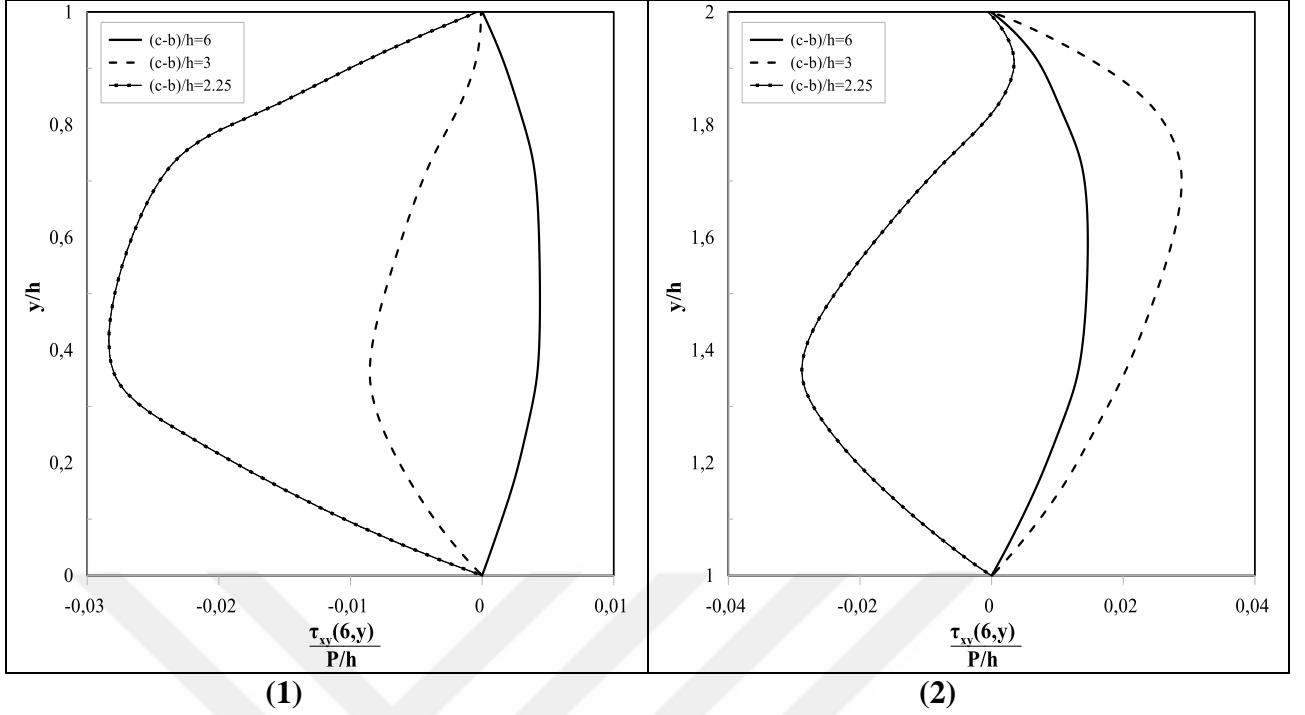
**Şekil 3.27.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta h_1=-0.6931$   $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



(1)

(2)

**Şekil 3.28.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta h_1=-0.6931$   $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )



**Şekil 3.29.** Pançlar arası mesafe değişimine göre FD tabakalar arasında derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}(6,y)/P/h$  gerilmesi dağılımı(  $(c-b)/h=4$ ,  $\beta h_1=-0.6931$   $\beta h_2=0.6931$ ,  $\gamma h_1=2.0794$ ,  $\gamma h_2=2.0794$ ,  $R_1=R_2=1$ ,  $Q=2P$ ,  $\mu_0=1$ ,  $\mu_{2t}/\mu_{1b}=1$ ,  $\kappa_1=\kappa_2=2$ ,  $y=2$ )

### 3.6. Makine Öğrenmesi Yöntemiyle Temas Uzunluklarının Tahmin Edilmesi

Bu kısımda Ansys programında sonlu elemanlar yöntemiyle iki rijit panç ile yüklü çift fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakada elde edilen temas uzunlukları makine öğrenmesi yöntemiyle analiz edilmiştir. Ansys programıyla 1200 adet temas uzunluğu verisi elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler Python programına aktarılmıştır. Bu verilere uygun kod yazılarak temas uzunluklarının tahmini hata oranı az şekilde gerçekleştirilmiştir. Tahmin işlemi Makine Öğrenmesi yöntemlerinden Lineer Regresyon, Rastgele Orman ve En Yakın Komşu Algoritması kullanılarak tahmin işlemleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.6.1. Veri setinin oluşturulması ve analizi

Veri setinin incelenmesi, veri analitiği ve veri bilimi süreçlerinde veri setlerinin doğasını ve içeriğini anlamak için yapılan bir dizi yöntem ve tekniktir. Veri setinin incelenmesi, veri setindeki bilgilerin keşfedilmesine, özelliklerin anlaşılmasına, eksik

verilerin belirlenmesine, veri setinin dağılımının değerlendirilmesine ve potansiyel sorunların tespit edilmesine yardımcı olur. Bu aşama, veri setinin analiz öncesi hazırlık sürecinin önemli bir parçasıdır.

Veri setinin incelenmesi aşağıdaki adımları içerebilir:

1. Veriye Genel Bakış: Veri setinin boyutunu, yapısal özelliklerini ve veri tiplerini gözlemleyerek başlayabilirsiniz. Bu, veri setinin ne kadar büyük olduğunu, hangi sütunlardan oluştuğunu ve her bir sütunun hangi tür verileri içerdiğini anlamanıza yardımcı olur.

2. Veri Örneklerini İnceleme: Veri setinin birkaç örneğini inceleyerek verilerin nasıl görüldüğünü anlayabilirsiniz. Bu, veri setindeki örneklerin yapısını, özelliklerini ve olası değer aralıklarını gözlemlemenize yardımcı olur.

3. Eksik Verileri Belirleme: Eksik veriler, analiz sürecinde sorunlara neden olabilir, bu nedenle veri setindeki eksik verileri tespit etmek önemlidir. Eksik veriler, boş hücreler, yer tutucu değerler veya belirli bir deseni takip eden değerler şeklinde olabilir.

4. Veri Dağılımlarını İnceleme: Veri setindeki değişkenlerin dağılımlarını gözlemlemek, veri setinin istatistiksel özelliklerini anlamanıza yardımcı olur. Bu, veri setindeki değişkenlerin ortalamasını, standart sapmasını, minimum ve maksimum değerlerini, çeyrekliklerini ve diğer istatistikleri değerlendirmenizi sağlar.

5. Veri Seti İlişkilerini Anlama: Veri setindeki değişkenler arasındaki ilişkileri incelemek, veri setinin yapısını anlamak açısından önemlidir. Değişkenler arasındaki korelasyonları, bağımlılıkları veya ilişkileri keşfedebilirsiniz.

6. Veri Görselleştirme: Veri setini görselleştirerek, verilerinizi grafikler, diyagramlar veya tablolar aracılığıyla daha anlaşılır hale getirebilirsiniz. Bu, veri setinin farklı özelliklerini ve eğilimlerini daha iyi anlamanıza yardımcı olur.

Veri setinin incelenmesi, veri setinin özelliklerini anlama, veri temizleme ve veri analizi süreçlerine sağlam bir temel sağlar. Bu aşama, veri seti hakkında önemli bilgileri toplamanıza ve analiz için daha iyi bir anlayış geliştirmenize yardımcı olur.

### **3.6.2. Veri seti ile doğru algoritma arasındaki ilişki**

Veri setiyle doğru algoritmayı kullanmak arasında önemli bir ilişki vardır. Doğru algoritma, veri setinizin özelliklerine uygun bir şekilde çalışan ve beklenen sonuçları üreten

bir algoritmadır. Veri seti, algoritma seçimini ve modelin başarısını etkileyen faktörlerden biridir.

Veri setinizin türü, kullanmanız gereken algoritmayı etkiler. Örneğin, sayısal veri setleri için regresyon veya sınıflandırma problemleri için farklı algoritmalar tercih edilebilir. Metin verileri için ise doğal dil işleme algoritmaları veya metin sınıflandırma yöntemleri kullanılabilir. Veri setinizin türünü değerlendirmek, doğru algoritmayı seçmede önemli bir adımdır.

Veri setinizin özellikleri, algoritma seçimini etkileyen faktörlerden bir diğeridir. Örneğin, veri setinizde çok sayıda özelliğiniz varsa ve bu özellikler arasında karmaşık bir ilişki varsa, derin öğrenme veya karmaşık sınıflandırma algoritmalarını tercih edebilirsiniz. Ancak, düşük boyutlu veri setlerinde veya basit yapıya sahip veri setlerinde basit algoritmalar da etkili olabilir.

Veri setinizin boyutu, algoritma seçimini etkileyen bir diğer faktördür. Büyük veri setleri için ölçeklenebilirlik sağlayabilen algoritmalar tercih edilebilir. Örneğin, Rastgele Orman gibi algoritmalar büyük veri setlerinde iyi performans gösterebilir. Küçük veri setleri için ise basit algoritmalar veya düşük hesaplama maliyeti gerektiren yöntemler tercih edilebilir.

Veri setinizin analiz amacı da algoritma seçimini etkiler. Örneğin, sınıflandırma problemleri için farklı sınıflandırma algoritmaları (örneğin, Decision Trees, Logistic Regression, Support Vector Machines) veya derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemleri (örneğin, Convolutional Neural Networks, Recurrent Neural Networks) tercih edilebilir. Veri setinizin analiz amacını ve beklenen sonuçları dikkate alarak uygun algoritmayı seçmek önemlidir. Her algoritmanın kendi avantajları ve dezavantajları vardır ve algoritmaların doğru bir şekilde uygulanması ve ayarlanması bilgi ve deneyim gerektirir. İhtiyaç duyulan kaynaklar (hesaplama gücü, bellek, zaman vb.) da algoritma seçimini etkileyen faktörlerdir.

Doğru algoritma seçimi, veri setinin özelliklerini anlama, analiz amacını belirleme, deneyim ve kaynakları değerlendirme sürecini gerektirir. Bu nedenle, veri setinizle uyumlu bir algoritma seçmek, başarılı ve etkili sonuçlar elde etmek için önemlidir.

$\beta h1$	$\beta h2$	P	Q	a	d
0,0001	0,0001	100	300	1,0499	1,7998
0,0001	0,4055	100	300	1,0499	1,7698
0,0001	0,6931	100	300	1,0499	1,7398
0,0001	1,3863	100	300	1,0499	1,7098
0,0001	2,0794	100	300	1,0499	1,6798
0,0001	2,7726	100	300	1,0499	1,6498
0,0001	-0,4055	100	300	1,1099	1,8298
0,0001	-0,6931	100	300	1,1099	1,8898
0,0001	-0,9163	100	300	1,1099	1,8898
0,0001	-1,0986	100	300	1,1099	1,9198
0,0001	-1,2528	100	300	1,1099	1,9498
0,0001	-1,3863	100	300	1,1099	1,9498
0,0001	-1,5041	100	300	1,1099	1,9798
0,0001	-1,6094	100	300	1,1099	2,0098
0,0001	-1,7047	100	300	1,1399	2,0098
0,0001	-1,7918	100	300	1,1699	2,0697
0,0001	-1,9459	100	300	1,1699	2,0697
0,0001	-2,0794	100	300	1,1699	2,0997
0,0001	-2,1972	100	300	1,1699	2,1297
0,0001	-2,3026	100	300	1,1699	2,1297
0,4055	0,0001	100	300	0,9899	1,6498
0,4055	0,4055	100	300	0,9899	1,5898
0,4055	0,6931	100	300	0,9899	1,5898
0,4055	1,3863	100	300	0,9899	1,5898
0,4055	2,0794	100	300	0,9899	1,5298
0,4055	2,7726	100	300	0,9899	1,5298
0,4055	-0,4055	100	300	0,9899	1,6498
0,4055	-0,6931	100	300	0,9899	1,7098

Şekil 3.30. Veri setinin excel ortamında görünümü

Şekil 3.30’da Ansys sonlu elemanlar programından elde edilen temas uzunluklarının bir bölümü örnek olarak verilmiştir. Bu veriler excelden csv formatına dönüştürülerek python programına aktarılmıştır. Python’da csv (Comma-Separated Values) formatı, veri depolama, veri alışverişi ve veri analizi için yaygın olarak kullanılan bir formattır. Csv formatı, verileri düz metin tabanlı bir dosyada saklar ve her bir veri ögesini virgülle ayrılarak temsil eder. Csv formatının kullanılmasının bazı avantajları şunlardır:

1. Basitlik ve Uyumluluk: Csv formatı, basit bir metin dosyası formatıdır ve birçok uygulama ve program tarafından desteklenir. Csv dosyaları kolayca oluşturulabilir, okunabilir ve düzenlenebilir. Python’da, csv dosyalarını işlemek için hazır kütüphaneler ve fonksiyonlar mevcuttur.

2. Taşınabilirlik: Csv dosyaları platformdan bağımsızdır ve farklı işletim sistemlerinde (Windows, Linux, macOS) sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. Bu, verileri farklı sistemler ve uygulamalar arasında kolayca taşımak ve paylaşmak için idealdir.

3. Veri Yapısının Korunması: Csv formatı, verilerin sadece metin olarak saklandığı bir formattır. Bu, verilerin yapısal bilgilerinin (örneğin, sütun başlıkları) korunmasına yardımcı olur. Csv dosyası, veri setinin sütunlarını ve satırlarını düzenli bir şekilde temsil ederek, veri tabloları ve veri setleri için uygun bir seçenek sunar.

4. Geniş Uygulama Alanı: Csv formatı, çeşitli veri tipleri ve veri yapıları için kullanılabilir. Sayısal veriler, metin verileri, zaman serisi verileri, kategorik veriler ve daha fazlası csv dosyalarında temsil edilebilir. Bu, csv formatını farklı veri analizi ve makine öğrenimi projelerinde yaygın olarak kullanılan bir seçenek haline getirir.

5. Entegrasyon Kolaylığı: Python'da, csv formatını okuma, yazma ve işleme işlemleri için kullanılabilen birçok kütüphane ve modül mevcuttur. Pandas, csv dosyalarını okumak, veri analizi yapmak ve veritabanlarına yazmak için sıkça kullanılan bir kütüphanedir. Bu kütüphaneler, csv dosyalarını kolayca yönetmenizi, verileri çekmenizi ve işlemenizi sağlar.

Csv formatı, verileri düzenli bir şekilde temsil etmek, veri setlerini paylaşmak ve farklı uygulamalar arasında veri alışverişi yapmak için kullanışlı bir seçenektir. Python'da csv formatını kullanmak, veri analizi ve veri işleme projelerinde verileri kolayca işlemenize olanak tanır.

Python programında veri analizi için bir takım kütüphaneler kullanılmaktadır. Python'da tahmin işlemleri için kullanılan bazı yaygın kütüphaneler şunlardır:

1. Scikit-learn: Scikit-learn, Python'da makine öğrenimi için popüler bir kütüphanedir. Sınıflandırma, regresyon, kümeleme, boyut indirgeme ve model seçimi gibi birçok tahmin işlemi için kullanılabilir. Scikit-learn, birçok önceden uyarlanmış tahmin modelini ve değerlendirme metriklerini içerir.

2. TensorFlow: TensorFlow, derin öğrenme için popüler bir açık kaynaklı bir kütüphanedir. Özellikle yapay sinir ağları ve derin öğrenme modelleri oluşturmak için kullanılır. TensorFlow, yüksek performanslı hesaplama yetenekleri ve model eğitimi için zengin bir set sunar.

3. Keras: Keras, kullanıcı dostu bir yapay sinir ağı kütüphanesidir ve TensorFlow üzerine inşa edilmiştir. Derin öğrenme modelleri oluşturmak ve eğitmek için kullanılır. Keras, hızlı prototipleme için idealdir ve basit ve sezgisel bir API sunar.

4. XGBoost: XGBoost, ölçeklenebilir bir sınıflandırma ve regresyon kütüphanesidir. XGBoost, gradient boosting yöntemini kullanır ve yüksek performanslı tahmin modelleri oluşturmak için kullanılır. Hızlı ve etkili bir şekilde büyük veri kümelerinde kullanılabilir.

5. Statsmodels: Statsmodels, istatistiksel modellerin tahminini gerçekleştirmek için kullanılan bir kütüphanedir. Lineer regresyon, zaman serisi analizi, hipotez testleri ve daha fazlası gibi istatistiksel yöntemler sunar.

6. NumPy: NumPy, Python'da bilimsel hesaplama için temel bir kütüphanedir. NumPy, çok boyutlu dizi nesnelere ve matematiksel fonksiyonlar sağlar ve veri manipülasyonu, hesaplama ve istatistiksel analiz gibi birçok tahmin işlemi için kullanılabilir. NumPy, verileri hızlı bir şekilde işlemek için optimize edilmiş bir yapı sunar ve diğer tahmin kütüphaneleriyle entegrasyonu kolaydır.

Bu kütüphaneler, farklı tahmin işlemleri için çeşitli yöntemler ve modeller sunar. Hangi kütüphane ve yöntemin kullanılacağı, veri setinizin özelliklerine, tahmin problemine ve tercihlerinize bağlı olacaktır.

```
:  
from sklearn.model_selection import train_test_split  
import numpy as np  
import pandas as pd  
import matplotlib.pyplot as plt  
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures  
from sklearn.linear_model import LinearRegression  
from sklearn.model_selection import train_test_split  
  
# Verileri oku  
veriler = pd.read_csv("/kaggle/input/kopyaaa/TM-VER-Kopya.csv")
```

**Şekil 3.31.** Veri setinin python programına aktarılması

Şekil 3.31'de veri setinin python ortamına aktarılması ve kullanılacak olan kütüphanelerin eklenmesi gösterilmiştir.

```
veriler.dropna(how="all", axis=0, inplace=True)
veriler.head(1200)
```

	$\beta h1$	$\beta h2$	P	Q	a	d
0	0.0001	0.0001	100	100	1.0499	1.0499
1	0.0001	0.4055	100	100	1.0499	1.0499
2	0.0001	0.6931	100	100	1.0499	1.0499
3	0.0001	1.3863	100	100	1.0499	1.0499
4	0.0001	2.0794	100	100	1.0499	1.0499
...	...	...	...	...	...	...
1195	-2.3026	-1.7918	100	300	2.4597	4.1695
1196	-2.3026	-1.9459	100	300	2.5197	4.2295
1197	-2.3026	-2.0794	100	300	2.5797	4.3495
1198	-2.3026	-2.1972	100	300	2.6097	4.3795
1199	-2.3026	-2.3026	100	300	2.6697	4.4695

1200 rows x 6 columns

Şekil 3.32. Python'da veri setinin csv formatında görünümü

```
print(veriler)
```

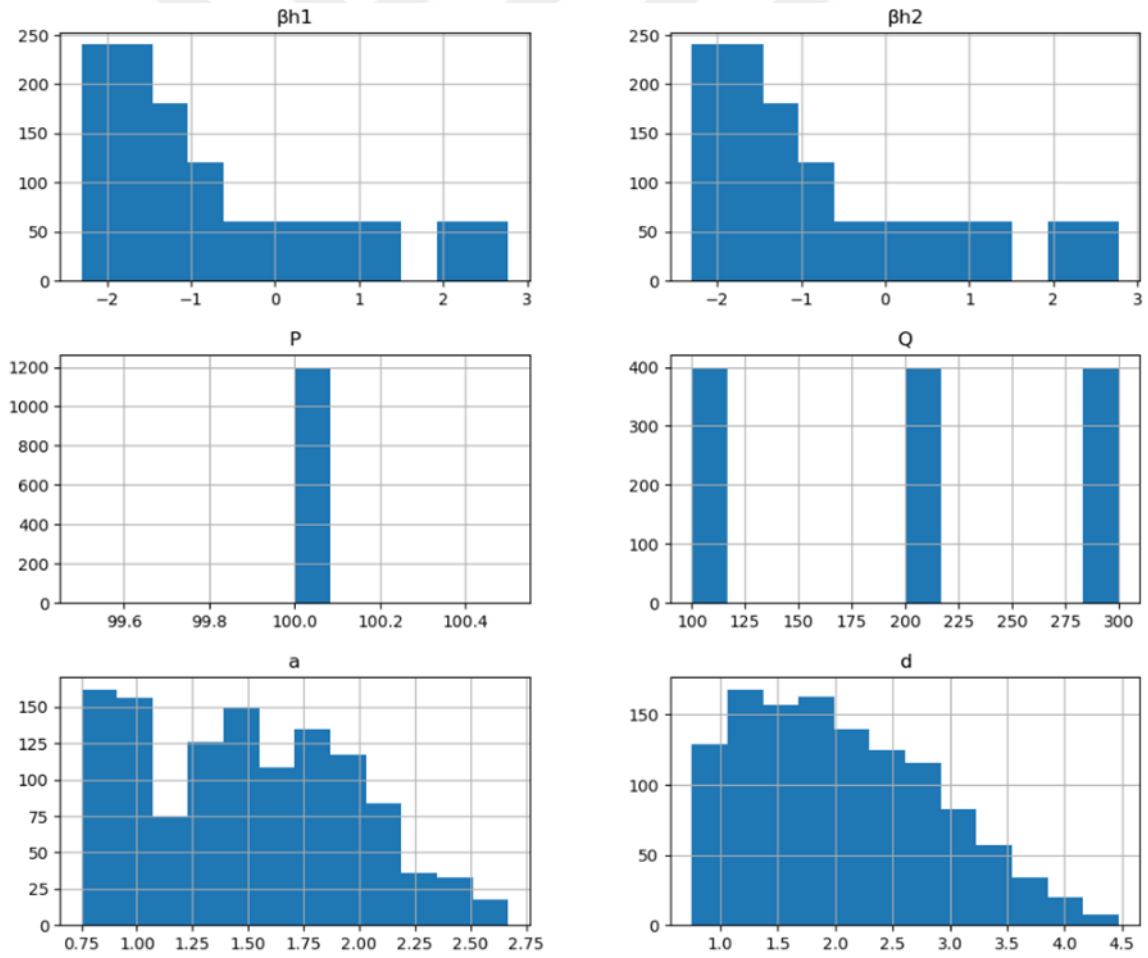
```
       $\beta h1$        $\beta h2$       P      Q      a      d
0      0.0001      0.0001     100     100     1.0499     1.0499
1      0.0001      0.4055     100     100     1.0499     1.0499
2      0.0001      0.6931     100     100     1.0499     1.0499
3      0.0001      1.3863     100     100     1.0499     1.0499
4      0.0001      2.0794     100     100     1.0499     1.0499
...      ...      ...      ...      ...      ...      ...
1195 -2.3026 -1.7918     100     300     2.4597     4.1695
1196 -2.3026 -1.9459     100     300     2.5197     4.2295
1197 -2.3026 -2.0794     100     300     2.5797     4.3495
1198 -2.3026 -2.1972     100     300     2.6097     4.3795
1199 -2.3026 -2.3026     100     300     2.6697     4.4695
```

[1200 rows x 6 columns]

Şekil 3.33. Python'da veri setinin nihai görünümü

Şekil 3.34’de verilere ait histogram grafiği gösterilmiştir. Histogram grafiği, veri dağılımını görselleştirmek için kullanılan bir grafik türüdür. Bir veri setindeki farklı değerlerin frekansını temsil eder. Histogram, veri setinin farklı aralıklara veya "bins"lere bölünmesiyle oluşturulur. Histogram grafiği, x-eksenindeki aralıkların (bins) genellikle eşit boyutlara ayrıldığı bir sütun grafiği olarak düşünülebilir. Her bir sütun, o aralığa düşen veri noktalarının sayısını veya frekansını temsil eder. Y eksenini, veri noktalarının frekansını veya yüzdesini gösterir.

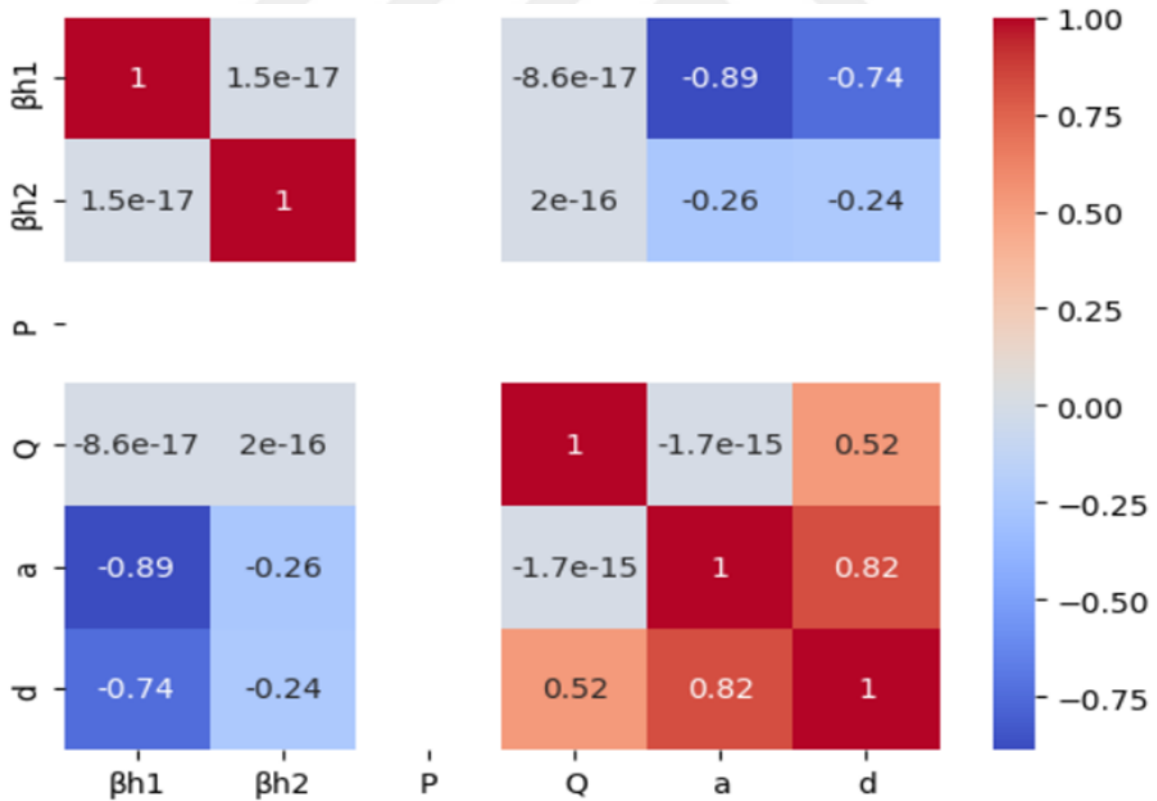
Histogramlar, veri dağılımını analiz etmek, merkezi eğilim ve değişkenlik ölçüleri hakkında bilgi elde etmek ve veri setindeki aykırı değerleri belirlemek için kullanışlıdır. Ayrıca, veri setinin simetri, çarpıklık veya normal dağılım gibi özelliklerini görselleştirmek için de kullanılabilir. Python’da, matplotlib veya seaborn gibi kütüphaneler histogram grafiği oluşturmak için sıkça kullanılır.



Şekil 3.34. Verilere ait histogram grafiği

Şekil 3.35'te verilere ait korelasyon ısı grafiği gösterilmiştir. Korelasyon ısı grafiği (correlation heatmap), değişkenler arasındaki korelasyonu renkli bir matris şeklinde görselleştiren bir grafik türüdür. Her bir hücre, iki değişken arasındaki korelasyon katsayısını temsil eder. Korelasyon katsayısı, değişkenler arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü ölçer.

Korelasyon ısı haritası, veri analizinde yaygın olarak kullanılan bir araçtır ve özellikle çok değişkenli veri setlerinde değişkenler arasındaki ilişkileri anlamak için kullanılır. Bu grafiği kullanarak, değişkenler arasındaki korelasyonun görsel bir özetini elde edebilir ve veri setindeki önemli ilişkileri belirleyebilirsiniz. Korelasyon ısı haritasında, her bir hücredeki renk tonu veya yoğunluk, ilgili değişkenler arasındaki korelasyonun gücünü gösterir. Genellikle sıcaklık skalası kullanılır, bu durumda açık renkler (genellikle sarı veya beyaz) yüksek pozitif korelasyonu, koyu renkler (genellikle mavi veya siyah) yüksek negatif korelasyonu temsil eder. Renk tonunun yoğunluğu, korelasyonun gücünü belirtir. Hücreler genellikle köşegen boyunca aynı renkte veya yoğunlukta olur, çünkü değişkenler kendileriyle mükemmel korelasyona sahiptir.



Şekil 3.35. Verilere ait korelasyon ısı grafiği

### 3.6.3. Lineer regresyon yöntemi ile temas uzunlukları tahmini

Lineer regresyon, bir bağımlı değişkenin (hedef değişken) bir veya daha fazla bağımsız değişken (açıklayıcı değişkenler) ile doğrusal bir ilişkisini modellemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntem, veri setindeki ilişkileri anlamak, bağımlı değişkenin değerlerini tahmin etmek veya değişkenler arasındaki ilişkiyi analiz etmek için kullanılır.

Lineer regresyon, temel olarak, bir doğru denklemi kullanarak bağımlı değişkenin değerlerini açıklayıcı değişkenlere dayanarak tahmin etmeye çalışır. Bu doğru denklemi, veri setine en iyi uyan bir doğru olarak bulmaya çalışır. En yaygın kullanılan lineer regresyon yöntemleri şunlardır:

1. Basit Lineer Regresyon: Tek bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini modellemek için kullanılır. Bu durumda, doğru denklemi bir doğru şeklinde ifade edilir ve bağımlı değişkenin değerleri, tek bir açıklayıcı değişkenin değerlerine bağlıdır.

2. Çoklu Lineer Regresyon: Birden fazla bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini modellemek için kullanılır. Doğru denklemi, çoklu değişkenlerin katsayılarıyla genişletir. Bu durumda, bağımlı değişkenin değerleri, birden fazla açıklayıcı değişkenin değerlerine bağlıdır.

Lineer regresyon modeli, veri seti üzerinde en küçük kareler yöntemiyle tahminler yapar. Bu yöntem, hedef değişkenin tahmin edilen değerlerinin gerçek değerler ile olan farkını minimize etmeye çalışır. Bu şekilde, doğru denklemi veri setine en iyi şekilde uyan ve tahmin yapma yeteneği olan bir model elde edilir.

Aşağıda Lineer Regresyon yöntemi kullanılarak temas uzunluklarının tahmini için yazılan kod gösterilmiştir.

```
from sklearn.model_selection import train_test_split
import numpy as np_maxversion
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.model_selection import train_test_split
```

```
# Verileri oku
veriler = pd.read_csv("/kaggle/input/tumveri.csv")

veriler.dropna(how="all",axis=0,inplace=True)

veriler.head(1200)

X = veriler.iloc[:, 0:4].values
a = veriler.iloc[:, 4].values
d = veriler.iloc[:, 5].values

# Verileri train ve test olarak ayır
X_train, X_test, a_train, a_test, d_train, d_test = train_test_split(X, a, d,
test_size=0.34, random_state=0)

# Modeli eğit
regressor_a = LinearRegression()
regressor_a.fit(X_train, a_train)

regressor_d = LinearRegression()
regressor_d.fit(X_train, d_train)

# Tahminleri yap
a_tahmin = regressor_a.predict(X_test)
d_tahmin = regressor_d.predict(X_test)

from sklearn.metrics import r2_score
a_r2_score = r2_score(a_test, a_tahmin)
d_r2_score = r2_score(d_test, d_tahmin)

print("a r2 score:", a_r2_score)
print("d r2 score:", d_r2_score)
```

```
a r2 score: 0.8595656524171988  
d r2 score: 0.888731839225276
```

```
x_yeni = [[1, 1, 100, 200]] # Örnek veri
```

```
# Tahminleri yap
```

```
a_tahmin = regressor_a.predict(x_yeni)
```

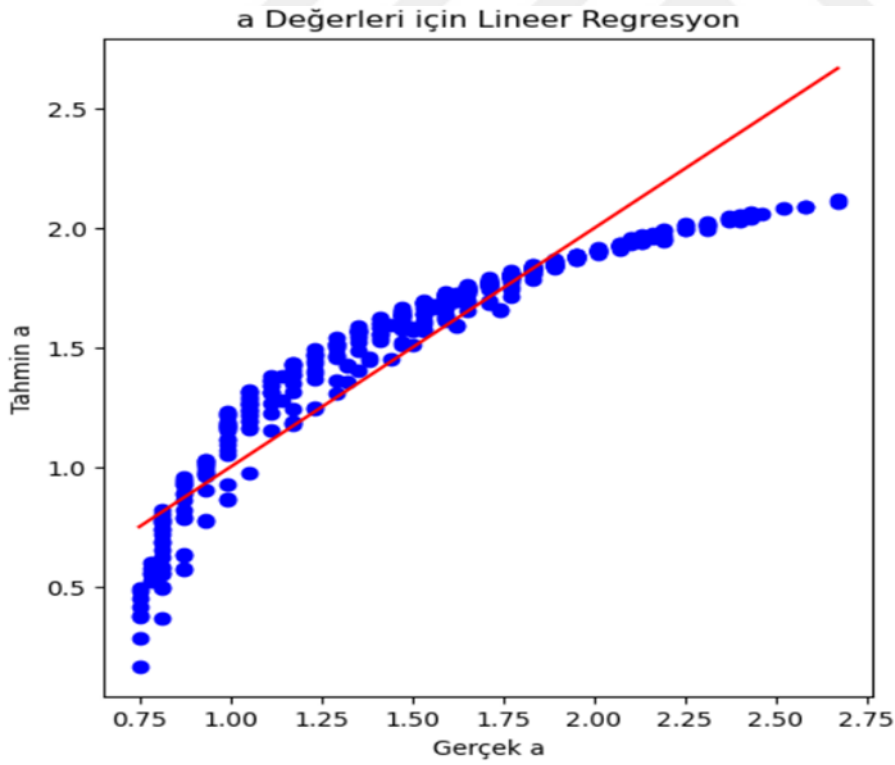
```
d_tahmin = regressor_d.predict(x_yeni)
```

```
print("a tahmin:", a_tahmin)
```

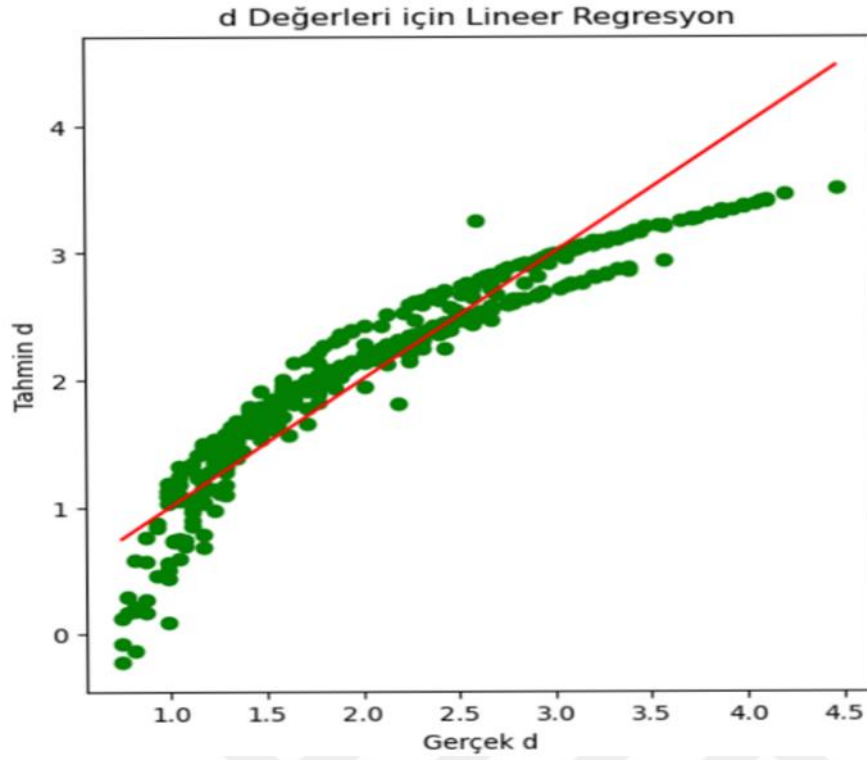
```
print("d tahmin:", d_tahmin)
```

```
a tahmin: [0.83957066]
```

```
d tahmin: [1.13418182]
```



**Şekil 3.36.** 1.pança ait temas uzunluğu için lineer regresyon grafiği



**Şekil 3.37.** 2.pança ait temas uzunluğu için lineer regresyon grafiği

**Tablo 3.5.** Lineer regresyon yöntemiyle temas uzunluğu tahmini

Bağımsız Değişkenler				Ansys		Lineer Regresyon		Hata oranı(%)
$\beta h1$	$\beta h2$	P	Q	a	d	a	d	
0.0001	-0.4055	100	200	1.1099	1.5298	1.1649	1.6287	3.82/6.07
0.4055	-1.3863	100	200	1.0499	1.4698	1.1051	1.5742	5.00/6.62
-0.4055	-0.6931	100	200	1.1699	1.7098	1.2314	1.8318	4.99/6.66
-1.0986	0.0001	100	200	1.4098	2.0097	1.5028	2.1168	6.16/5.06
-1.3863	0.6931	100	200	1.4698	2.0697	1.5243	2.1414	3.58/3.35

### 3.6.4. Rastgele orman yöntemi ile temas uzunlukları tahmini

Rastgele Orman, makine öğrenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde etkilidir. Rastgele Orman, birçok karar ağacının bir araya gelmesiyle oluşturulan bir yöntemdir. Rastgele Orman yöntemi, veri setindeki örneklerin bir alt kümesini rastgele seçerek birden çok karar ağacı oluşturur. Bu

karar ağaçları, eğitim veri setinin farklı örneklemelerini kullanarak bağımsız olarak eğitilirler. Her bir ağaç, farklı özelliklerin alt kümelerini kullanarak veri setindeki örneklerin sınıflandırma veya regresyonunu gerçekleştirir.

Rastgele Orman'ın temel fikri, birden çok karar ağacının bir araya gelerek daha güçlü ve istikrarlı bir model oluşturmasıdır. Her bir karar ağacı, kendi tahminini yapar ve sonuçlar bir araya getirilerek genel tahmin oluşturulur. Sınıflandırma problemlerinde, genel tahmin genellikle sınıflar arasında bir oylama veya olasılık tahmini şeklinde elde edilir. Regresyon problemlerinde ise, tahminlerin ortalaması genel tahmin olarak kullanılabilir.

Aşağıda Rastgele Orman yöntemi kullanılarak temas uzunluklarının tahmini için yazılan kod gösterilmiştir.

```
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
import numpy as np_maxversion
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split

# Verileri oku
veriler = pd.read_csv("/kaggle/input/tumveri.csv ")
veriler.dropna(how="all", axis=0, inplace=True)

X = veriler.iloc[:, 0:4].values
a = veriler.iloc[:, 4].values
d = veriler.iloc[:, 5].values

# Verileri train ve test olarak ayır
X_train, X_test, a_train, a_test, d_train, d_test = train_test_split(X, a, d,
test_size=0.4, random_state=0)

# Modeli eğit
regressor_a = RandomForestRegressor(n_estimators=38, random_state=0)
regressor_a.fit(X_train, a_train)
```

```
regressor_d = RandomForestRegressor(n_estimators=38, random_state=0)
regressor_d.fit(X_train, d_train)
from sklearn.metrics import r2_score
# R2 puanlarını hesapla
a_tahmin = regressor_a.predict(X_test)
d_tahmin = regressor_d.predict(X_test)
a_r2_score = r2_score(a_test, a_tahmin)
d_r2_score = r2_score(d_test, d_tahmin)

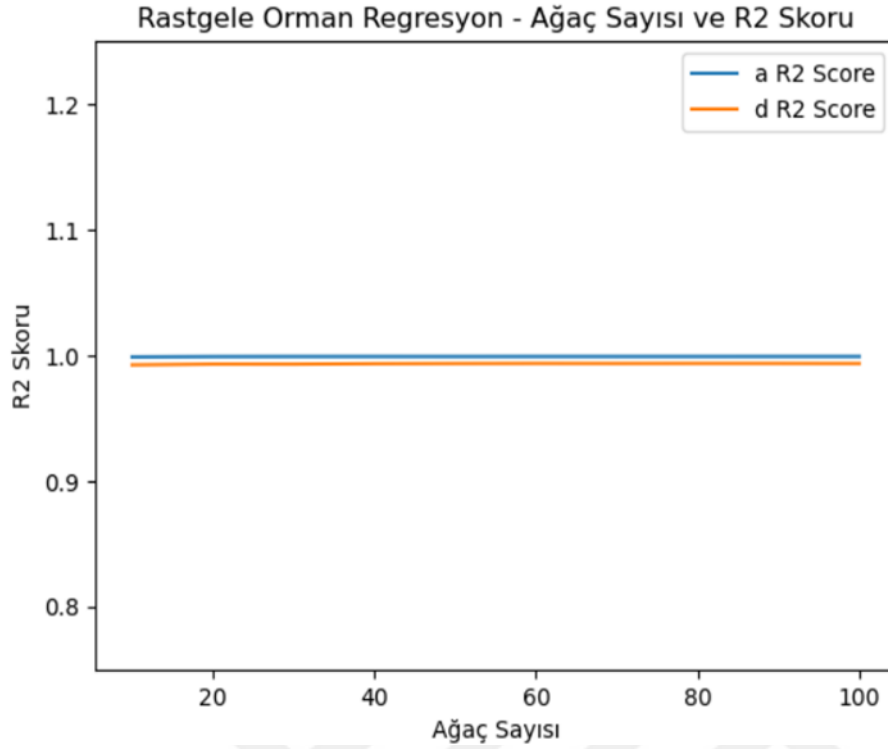
print("a r2 score:", a_r2_score)
print("d r2 score:", d_r2_score)

a r2 score: 0.9962651907123009
d r2 score: 0.996811151334535

# Örnek veri için tahminleri yap
x_yeni = [[-1.3863, 0.6931, 100, 200]]
a_tahmin = regressor_a.predict(x_yeni)
d_tahmin = regressor_d.predict(x_yeni)

print("a tahmin:", a_tahmin)
print("d tahmin:", d_tahmin)

a tahmin: [1.46901053]
d tahmin: [2.06733947]
```



Şekil 3.38. Temas uzunlukları rastgele orman regresyon grafiği

Tablo 3.6. Rastgele orman yöntemiyle temas uzunluğu tahmini

Bağımsız Değişkenler				Ansys		Rastgele Orman		Hata oranı(%)
$\beta_{h1}$	$\beta_{h2}$	P	Q	a	d	a	d	
0.0001	-0.4055	100	200	1.1099	1.5298	1.0735	1.5187	3.28/0.73
0.4055	-1.3863	100	200	1.0499	1.4698	1.0499	1.4634	0.00/0.44
-0.4055	-0.6931	100	200	1.1699	1.7098	1.1935	1.7137	2.02/0.23
-1.0986	0.0001	100	200	1.4098	2.0097	1.4003	2.0152	0.67/0.28
-1.3863	0.6931	100	200	1.4698	2.0697	1.4690	2.0673	0.05/0.12

### 3.6.5. En yakın komşu algoritması yöntemi ile temas uzunlukları tahmini

En Yakın Komşu Algoritması (EYKA), makine öğrenmesi alanında sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan bir algoritmadır. Temel fikri, yeni bir veri noktasının sınıflandırmasını veya değer tahminini, o noktanın en yakın komşularının sınıflandırması

veya değerlerinin birleşimiyle yapmaktır. En yakın komşu algoritması, sınıflandırma problemlerinde kullanıldığında aşağıdaki adımları takip eder:

**Veri Setinin Öğrenme Aşaması:** Eğitim veri seti içindeki örnekler ve ilgili sınıf etiketleri kullanılarak bir model oluşturulur. Bu adımda, örneklerin özellik vektörleri ve sınıf etiketleri kaydedilir.

**Benzerlik Ölçümü:** Yeni bir girdi verisi (sınıflandırma yapılacak örnek) verildiğinde, bu veri noktasının diğer veri noktalarıyla olan benzerliği ölçülür. Bu genellikle öklidyen mesafe, Manhattan mesafesi veya diğer benzerlik ölçüleri kullanılarak yapılır.

**Komşuların Belirlenmesi:** Benzerlik ölçüsüne göre, en yakın  $k$  sayıda komşu belirlenir.  $k$ , kullanıcı tarafından önceden belirlenen bir parametredir ve tipik olarak tek bir sayıdır.

**Sınıflandırma:** En yakın  $k$  komşunun sınıf etiketleri dikkate alınarak, yeni veri noktasının sınıfı belirlenir. Bu adımda, en yaygın sınıf etiketi veya bir oylama yöntemi kullanılabilir. Örneğin, 3 en yakın komşuyla yapılan sınıflandırmada, en fazla sayıda sınıf etiketine sahip olan sınıf, yeni veri noktasının tahmin edilen sınıfı olarak kabul edilir.

En yakın komşu algoritması tahmin yaparken oldukça basit bir yöntemdir, ancak doğru  $k$  değerini seçmek önemlidir.  $k$  değeri, modelin performansını etkileyebilir. Küçük bir  $k$  değeri, modele daha fazla esneklik ve aşırı uyuma (overfitting) eğilimi sağlarken, büyük bir  $k$  değeri modelin genelleştirme yeteneğini artırabilir, ancak ayrıntıları göz ardı etme riski taşır.

Özet olarak, en yakın komşu algoritması tahmin yaparken, veri noktasının en yakın komşularını kullanarak değer tahmininde bulunur. Ancak, algoritmanın doğru çalışabilmesi için uygun bir  $k$  değeri seçilmesi ve benzerlik ölçümünün iyi tanımlanması önemlidir.

Aşağıda  $k$  En Yakın Komşu Algoritması yöntemi kullanılarak temas uzunluklarının tahmini için yazılan kod gösterilmiştir.

```
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
import numpy as np_maxversion
import numpy as np_minversion
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import r2_score
```

```

from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor

# Verileri oku
veriler = pd.read_csv("/kaggle/input/tumveri/TM-VER.csv")
veriler.dropna(how="all",axis=0,inplace=True)

# Verileri X ve y olarak ayır
X = veriler.iloc[:, 0:4].values
y = veriler.iloc[:, 4:6].values

# Verileri eğitim ve test setlerine ayır
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,
random_state=0)

# Özellikleri ölçeklendir
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
sc_X = StandardScaler()
X_train = sc_X.fit_transform(X_train)
X_test = sc_X.transform(X_test)

# Modeli eğit
regressor_a = KNeighborsRegressor(n_neighbors=10, weights='distance',
metric='euclidean')
regressor_d = KNeighborsRegressor(n_neighbors=10, weights='distance',
metric='euclidean')
regressor_a.fit(X_train, y_train[:,0])
regressor_d.fit(X_train, y_train[:,1])

# Tahminleri yap
x_yeni = [[1, 1, 100, 200]] # Örnek veri
x_yeni = sc_X.transform(x_yeni)
a_tahmin = regressor_a.predict(x_yeni)
d_tahmin = regressor_d.predict(x_yeni)

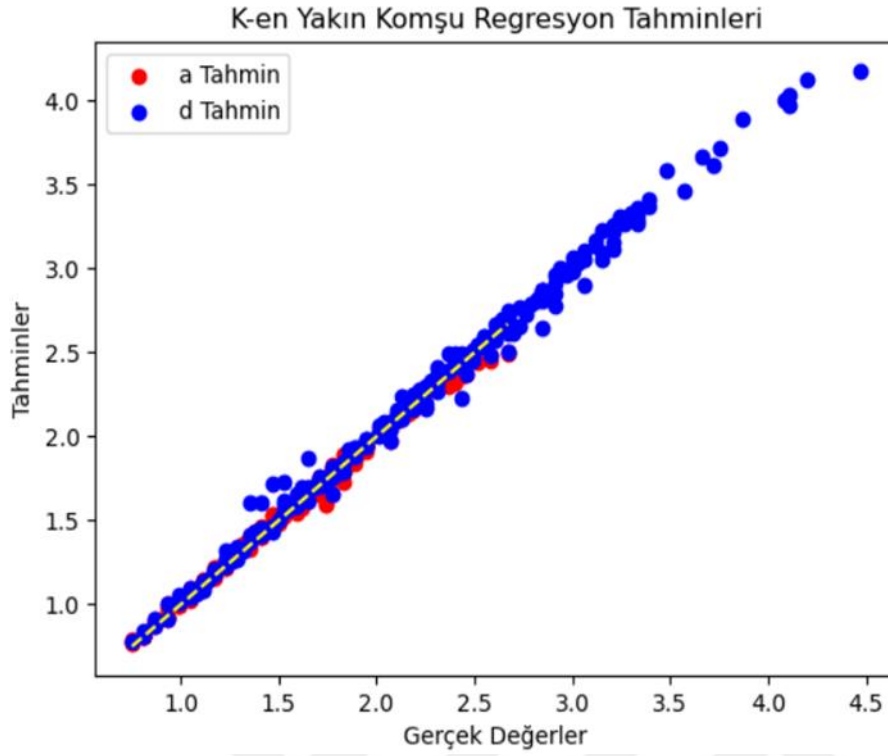
```

```
print("a tahmin:", a_tahmin)
print("d tahmin:", d_tahmin)

a tahmin: [0.94656812]
d tahmin: [1.29460027]

# Tahminleri ve gerçek değerleri al
y_pred_a = regressor_a.predict(X_test)
y_pred_d = regressor_d.predict(X_test)

# Grafik çizme
plt.scatter(y_test[:,0], y_pred_a, color='red', label='a Tahmin')
plt.scatter(y_test[:,1], y_pred_d, color='blue', label='d Tahmin')
plt.plot([min(y_test[:,0]), max(y_test[:,0])], [min(y_test[:,0]), max(y_test[:,0])],
color='yellow', linestyle='--')
plt.title('K-en Yakın Komşu Regresyon Tahminleri')
plt.xlabel('Gerçek Değerler')
plt.ylabel('Tahminler')
plt.legend()
plt.show()
```



Şekil 3.39. Temas uzunluklarının k-en yakın komşu algoritması regresyon grafiği

Tablo 3.7. En yakın komşu algoritması yöntemiyle temas uzunluğu tahmini

Bağımsız Değişkenler				Ansys		En Yakın Komşu Algoritması		Hata oranı(%)
$\beta_{h1}$	$\beta_{h2}$	P	Q	a	d	a	d	
0.0001	-0.4055	100	200	1.1099	1.5298	1.1163	1.5796	0.58/3.25
0.4055	-1.3863	100	200	1.0499	1.4698	1.0499	1.4698	0.00/0.00
-0.4055	-0.6931	100	200	1.1699	1.7098	1.1699	1.7198	0.00/0.58
-1.0986	0.0001	100	200	1.4098	2.0097	1.4098	2.0096	0.00/0.01
-1.3863	0.6931	100	200	1.4698	2.0697	1.4697	2.0697	0.01/0.00

Tablo 3.5, 3.6 ve 3.7’de Ansys programında analiz sonucu elde edilen temas uzunlukları Lineer regresyon, Rastgele Orman ve En Yakın Komşu Algoritması yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Farklı rijitlik parametreleri ( $\beta_{h1}$ ), ( $\beta_{h2}$ ) ve yükleme durumlarının etkisiyle 1.pançtaki temas uzunluğu (a) ve 2.pançtaki temas uzunluğu (d) incelenmiştir. Lineer Regresyon, Rastgele Orman ve En Yakın Komşu Algoritması yöntemleriyle temas uzunluklarının tahmininin hata oranı düşük ve kısa sürede çözüm

yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu yöntemlerden hata oranı en az olan yöntemin En Yakın Komşu Algoritması olduğu görülmüştür.



#### 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, dairesel geometride rijit iki panç ile yüklenmiş fonksiyonel olarak dereceli iki tabakadaki temas analizi incelenmiştir. Çalışmada yapılan analizin geometrisi ANSYS programında modellenerek sonlu elemanlar metodu ile oluşturulmuştur. İlk olarak farklı parametre değişimleri etkisinde rijit pançlarla fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında meydana gelen temas gerilme ve derinlik boyunca gerilme dağılımları incelenmiştir. Çalışmada fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalara ait rijitlik parameterelerinin  $\beta h_1$ ,  $\beta h_2$ , yükleme durumlarının, pançlara ait yarıçapların ve pançlar arasındaki mesafelerin değişimi gözlemlenmiştir. Bu analizlerde yoğunluk parametreleri  $\gamma h_1$ ,  $\gamma h_2$  değerleri sabit tutularak çözüm yapılmıştır.

Ardından fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan ilk ayrılma yükleri ( $X_{cr}$ ) ve ilk ayrılma uzaklıklarına ( $\lambda_{cr}$ ) farklı parametre değişimlerinin etkisi incelenmiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakalar arasında oluşan ilk ayrılma yükleri ve ilk ayrılma uzaklıklarına yükleme durumunun, tabakaların rijitlik parametrelerinin ( $\beta h_1$ ), ( $\beta h_2$ ), ve pançlar arasındaki mesafenin ve pançların yarıçap değişiminin etkisi analiz edilmiştir.

Son olarak Ansys programında sonlu elemanlar yöntemiyle iki rijit panç ile yüklü çift fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakada elde edilen temas uzunlukları makine öğrenmesi yöntemiyle analiz edilmiştir. Ansys programıyla 1200 adet temas uzunluğu verisi elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler Python programına aktarılmıştır. Bu verilere uygun kod yazılarak temas uzunluklarının tahmini hata oranı az şekilde gerçekleştirilmiştir. Tahmin işlemi Makine Öğrenmesi yöntemlerinden Lineer Regresyon, Rastgele Orman ve En Yakın Komşu Algoritması kullanılarak tahmin işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üç bölümde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Pança etki eden yük arttığında temas gerilme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Pançların yarıçapı azaldığında pançların orta bölümünde oluşan temas gerilmesinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat yarıçap azaldığında pançların kenar bölümlerinde temas gerilmesinin azaldığı incelenmiştir.
- Pançlar arasındaki mesafe fazla olduğunda temas gerilme dağılımının fazla değişmediği fakat pançlar arası mesafe iyice azaldığında temas gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

- 1. fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta_{h_1}$ , arttığında pançların altındaki orta bölgede temas gerilme değerlerinin arttığı,  $\beta_{h_1}$  azaldığında pançların altındaki orta bölgede oluşan temas gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. 2. fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tabakaya ait rijitlik parametresi  $\beta_{h_2}$  değerinin değişiminin pançlar altında oluşan temas gerilme dağılımını etkilemediği gözlemlenmiştir.
- Bloklar arası mesafe arttıkça ilk ayrılma uzaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Fakat ilk ayrılma yükünün bir noktada arttıktan sonra gittikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yükleme durumu arttığında ilk ayrılma uzaklığının değişmediği, ilk ayrılma yükünün yük arttıkça azaldığı görülmüştür.
- $\beta_{h_1}$  arttıkça ilk ayrılma uzaklığının azaldığı fakat ilk ayrılma yükünün arttığı görülmüştür.  $\beta_{h_1}$  azaldıkça ise ilk ayrılma uzaklığı artarken ilk ayrılma yükü azalmıştır.
- $\beta_{h_2}$  arttıkça ilk ayrılma uzaklığının azaldığı ve ilk ayrılma yükünün azaldığı görülmüştür. Fakat  $\beta_{h_2}$  azaldıkça ilk ayrılma uzaklığının ve ilk ayrılma yükünün arttığı gözlemlenmiştir.
- Pançların yarıçapı arttığında ilk ayrılma uzaklığı artarken ilk ayrılma yükünün azaldığı gözlemlenmiştir.
- $\beta_{h_1}$  arttıkça tabakalar arasında oluşan gerilmelerin arttığı pançların altındaki orta bölgede oluşan gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir.
- $\beta_{h_2}$  arttıkça tabakalar arasında oluşan gerilmelerin arttığı pançların altındaki orta bölgede oluşan gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Pançlar arasındaki mesafe arttığında gerilme değerlerinin etkisinin azaldığı ve tabakaların arasındaki pançların alt orta bölgesinde mesafenin artması sonucu gerilme değerlerinin azalıp 0'a yaklaştığı gözlemlenmiştir.
- 1.tabakanın başlangıcında  $\beta_{h_1}$  azaldıkça derinlik boyunca  $\sigma_x$  basınç gerilme değeri azalmıştır. Üst tabakaya yaklaştıkça basınç gerilmelerin büyüklüğü azalmıştır. 2.tabakada  $\beta_{h_1}$  azaldıkça derinlik boyunca basınç gerilme değeri artmıştır.
- $\beta_{h_1}$  azaldıkça tabaka başlangıcında derinlik boyunca  $\sigma_y$  basınç gerilmelerinin arttığı gözlemlenmiştir.

- $\beta h_1$  azaldıkça 1.tabakada derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  kayma gerilmelerinin arttığı 2.tabakadaki kayma gerilmelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- $\beta h_2$  arttıkça 1.tabakada tabakanın alt yüzeyinden üst yüzeyine doğru derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  gerilme değerleri azalmıştır ve basınç gerilmeleri üst yüzeye doğru çekme gerilmesine dönüşmüştür. 2.tabakada ise  $\beta h_2$  arttıkça  $\sigma_x$  çekme ve basınç gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.
- $\beta h_2$  arttıkça derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  basınç gerilmelerinin azaldığı görülmüştür.
- $\beta h_2$  azaldıkça her iki tabakada derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  kayma gerilmelerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Yük arttıkça her iki tabakada üst yüzeyde oluşan derinlik boyunca  $\sigma_x$  çekme gerilmelerinin ve alt yüzeylerde derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  basınç gerilmelerinin arttığı görülmüştür.
- $\beta h_2$  azaldıkça her iki tabakada derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  kayma gerilmelerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Yük arttıkça her iki tabakada üst yüzeyde oluşan derinlik boyunca  $\sigma_x$  çekme gerilmelerinin ve alt yüzeylerde derinlik boyunca oluşan  $\sigma_x$  basınç gerilmelerinin arttığı görülmüştür.
- Yük arttıkça 1.tabakanın üst yüzeyindeki derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  basınç gerilmelerinin arttığı 2.tabakanın alt yüzeyinde derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  basınç gerilmelerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Yük arttıkça derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  kayma gerilmelerinin her iki tabakada arttığı görülmüştür. Ayrıca her iki pança etki eden yük eşit olduğunda problem simetrik davranış gösterdiğinden kayma gerilmesinin oluşmadığı gözlemlenmiştir.
- 1.tabakada pançlar arası mesafe arttıkça tabakanın yüzeyleri arasında oluşan  $\sigma_x$  basınç ve çekme gerilme değişiminin azaldığı görülmüştür. 2.tabakada ise pançlar arası mesafe fazla iken  $\sigma_x$  gerilme değerlerindeki değişimin mesafenin azaldığı durumlara göre küçük olduğu gözlemlenmiştir.
- Her iki tabakada da derinlik boyunca oluşan  $\sigma_y$  gerilmelerin basınç gerilmeleri şeklinde olduğu görülmüştür. Pançlar arası mesafe arttıkça  $\sigma_y$  gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

- 1.tabakada pañçlar arası mesafe arttıkça derinlik boyunca oluşan  $\tau_{xy}$  gerilme büyüklüklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. 2.tabakada pañçlar arası mesafe en fazla durumdayken  $\tau_{xy}$  gerilmelerin 0'a yakın değerler olduğu görülürken mesafenin bir sonraki aşamasında  $\tau_{xy}$  gerilme değerlerinin pozitif olarak arttığı, mesafenin en az olduğu durumda ise  $\tau_{xy}$  gerilmelerin negatif yönde arttığı gözlemlenmiştir.
- Linear Regresyon, Rastgele Orman ve K-En Yakın Komşu Algoritması yöntemleriyle temas uzunluklarının tahmininin hata oranı düşük ve kısa sürede çözüm yapıldığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışma vasıtasıyla temas problemi ve inşaat mühendisliği alanında yapay zekanın doğruluğu yüksek analizler ve zaman tasarruflu çözümler yapabilmesi iyi bir olanak sunmaktadır.

#### Öneriler;

- Ansys sonlu elemanlar programında temas uzunlukları elde edilirken rijitlik parametresi arttığında temas uzunlukları istenilen şekilde değişmemektedir. Rijitlik parametresinin azaldığı durum için işlem yapılması tavsiye edilmektedir.
- Dairesel pañça ait temas uzunlukları için farklı parametreler ışığında makine öğrenmesi kullanılarak çalışmalar yapılabilir.
- Makine öğrenmesinde temas uzunlukları tahmin işlemi için farklı algoritmalar geliştirilerek kullanılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Abhilash, M.N., Murthy, H.**, 2014. Finite element analysis of 2-d elastic contacts involving fgms. *International Journal of Computer Methods Engineering Science Mechanics*, 15,3, 253–7, <https://doi.org/10.1080/15502287.2014.882445>.
- Adams, G.G.**, 1978. An elastic strip pressed against an elastic half plane by a steadily moving force. *Journal of Applied Mechanics*, 45, 89-94, <https://doi.org/10.1115/1.3424279>.
- Adams, G.G., Zeid, I.**, 1984. An elastic punch moving across the surface of a semi– infinite solid. *Journal of Applied Mechanics*, 51, 622-629, <https://doi.org/10.1115/1.3167683>.
- Adıyaman, G., Yaylacı, M., Birinci, A.**, 2015. Analytical and finite element solution of a receding contact problem. *Structural Engineering and Mechanics*, 54,1, 69-85, <https://doi.org/10.12989/sem.2015.54.1.069>.
- Adıyaman, G., Birinci, A., Öner, E., Yaylacı, M.**, 2016. A receding contact problem between a functionally graded layer and two homogeneous quarter planes. *Acta Mechanica*, 227(6), 1753–1766, <https://doi.org/10.1007/s00707-016-1580-y>.
- Aksogan, O., Akavcı, S., Becker A.A.**, 1997. The solution of the nonsymmetrical contact problem of an elastic layer supported by two elastic quarter planes using three different methods. *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Çukurova University*, 12,1, 1-14.
- Apatay, T.**, 2010. Fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalarda çatlak ve temas problemi. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 143s, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6685/88586>.
- Avcı, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., Inman, D. J.**, 2021. A review of vibration-based damage detection in civil structures: from traditional methods to machine learning and deep learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107077>.
- Balci, M. N., Dag, S.**, 2020. Moving contact problems involving a rigid punch and a functionally graded coating. *Applied Mathematical Modelling*, 81, 855–886, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.01.004>.
- Birinci, A.**, 1998. Alt tabakasında düşey bir çatlağı bulunan ve rijit bir blok aracılığı ile yüklenen bileşik tabaka problemi. *Doktora Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 166s, <http://acikerisim.ktu.edu.tr/jspui/handle/123456789/495>.
- Cao, R., Li, L., Li, X., Mi, C.**, 2021. On the frictional receding contact between a graded layer and an orthotropic substrate indented by a rigid flat-ended stamp. *Mechanics of Materials*, 158, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103847>.

- Chen, R., Zhang, P., Wu, H., Wang, Z., Zhong, Z.,** 2019. Prediction of shield tunneling-induced ground settlement using machine learning techniques. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(6), 1363–1378, <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0561-3>.
- Chidlow, S.J., Teodorescu, M.,** 2013. Two-dimensional contact mechanics problems involving inhomogeneously elastic solids split into three distinct layers. *International Journal of Engineering Science*, 70, 102–123, <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2013.05.004>.
- Chopra, P., Sharma, R.K., Kumar, M., Chopra, T.,** 2018. Comparison of machine learning techniques for the prediction of compressive strength of concrete. *Advances in Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2018/5481705>.
- Conway, H.D.,** 1971. The effect of friction on normal contact stresses. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 38, 1094-1095, <https://doi.org/10.1115/1.3408932>.
- Çakıroğlu, F.L.,** 1990. Elastik yarı sonsuz düzleme oturan bileşik tabakaların değme problemi. *Doktora Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 95s, <http://acikerisim.ktu.edu.tr/jspui/handle/123456789/406>.
- Çömez, I.,** 2013. Contact problem of a functionally graded layer resting on a winkler foundation. *Acta Mechanica*, 224(11), 2833–2843, <https://doi.org/10.1007/s00707-013-0903-5>.
- Çömez, İ., El-Borgi, S.,** 2018. Contact problem of a graded layer supported by two rigid punches. *Archive of Applied Mechanics*, 88,10, 1893-1903, <https://doi.org/10.1007/s00419-018-1416-4>.
- Demirbaş, M. D., Çakır, D.,** 2019. Thermal stress analysis in two-directional functionally graded plates with artificial neural network training algorithms. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 442–450.
- Dempsey, J.P., Zhao, Z.G., Minnetyan, L., Li, H.,** 1990. Plane contact of an elastic layer supported by a winkler foundation. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 57, 974-980, <https://doi.org/10.1115/1.2897670>.
- El-Borgi,S., Abdelmoula, R., Keer L.,** 2006. A receding contact problem between a functionally graded layer and a homogeneous substrate. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 658-674, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.04.017>.
- El-Borgi, S., Çömez, İ.,** 2017. A receding frictional contact problem between a graded layer and a homogeneous substrate pressed by a rigid punch. *Mechanics of Materials*, 114, 201-214, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.08.003>.
- Elloumi, R., Kallel-Kamoun, I., El-Borgi, S.,** 2010. A fully coupled partial slip contact problem in a graded half-plane. *Mechanics Of Materials*, 42, 417–428, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2010.01.002>.

- Erdoğan, F., Ratwani, M.,** 1974. The contact problem for an elastic layer supported by two elastic quarter planes. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 41, 673-677, <https://doi.org/10.1115/1.3423369>.
- Fu, P., Zhao, J., Zhang, X., Kang, G., Wang, P., Kan, Q.,** 2022. Elastic shakedown analysis of two dimensional thermo-elastic rolling/sliding contact for a functionally graded coating/substrate structure with arbitrarily varying thermo-elastic properties. *Composite Structures*, 280, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114891>.
- Geçit, M.R., Gökpinar, S.,** 1985. Frictionless contact between an elastic layer and a rigid rounded support. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 10,3, 245-251.
- Gun, H., Gao, X.W.,** 2014. Analysis of frictional contact problems for functionally graded materials using BEM. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 381-7, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2013.10.004>.
- Jobin, K.J., Abhilash, M.N., Murthy, H.,** 2017. A simplified analysis of 2d sliding frictional contact between rigid indenters and fgm coated substrates. *Tribology International*, 108, 174-185, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.021>.
- Johnson, K.L.,** 1985. Contact mechanics first edition. *Cambridge University Press*, Cambridge, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>
- Kahya, V.,** 2003. İki tabakalı elastik ortamda sürekli ve süreksiz değme problemlerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 124s, <http://acikerisim.ktu.edu.tr/jspui/handle/123456789/640>.
- Kaman, M.O., Çetışli, F.,** 2011. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ile kaplı silindirde çatlak problemi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Elazığ, 5-7 Ekim.
- Karabulut, P.M., Çömez, İ.,** 2023. Continuous and discontinuous contact problem of a functionally graded orthotropic layer indented by a rigid cylindrical punch: Analytical and finite element approaches. *Z Angew Math Mech*, 00, e202200427, <https://doi.org/10.1002/zamm.202200427>.
- Kaya, F., Polat, A.,** 2023. Stress analysis of the contact problem in a functionally graded layer loaded with a distributed load and two rigid circular punches resting on an elastic two quarter planes. *Forces in Mechanics*, 11,100203, 2666-3597, <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2023.100203>.
- Ke, L.L., Wang, Y.S.,** 2007. Two-dimensional sliding frictional contact of functionally graded materials. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 26, 171-188, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2006.05.007>.
- Keer, L.M., Miller, G.R.,** 1983. Contact between an elastically supported circular plate and rigid indenter. *International Journal of Engineering Science*, 21, 681-690, [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(83\)90113-1](https://doi.org/10.1016/0020-7225(83)90113-1).
- Kulchytsky, Z.R., Bajkowski, A.S.,** 2015. Three-dimensional analytical elasticity solution for loaded functionally graded coated half-space. *Mechanics Research Communications*, 65, 43-50.

- Liu, J., Ke, L. L., Wang, Y. S.**, 2011. Two-dimensional thermoelastic contact problem of functionally graded materials involving frictional heating. *International Journal of Solids and Structures*, 48(18), 2536–2548, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.05.003>.
- Muskhelishvili, N.I.**, 1953. Some basic problems of mathematical theory of elasticity. *The Mathematical Gazette*, 39(330), 352-352, doi:10.2307/3608633.
- Nasiri, S., Khosravani, M. R., Weinberg, K.**, 2017. Fracture mechanics and mechanical fault detection by artificial intelligence methods: A review. *Engineering Failure Analysis*, 81(January), 270–293, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.011>.
- Nowell, D., Hills, D.A.**, 1988. Contact problems incorporating elastic layers. *International Journal of Solids and Structures*, 24,1, 105-111, [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(88\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0020-7683(88)90102-3).
- Öner, E.**, 2017. Rijit bir blok aracılığıyla yüklenmiş ve elastik yarım düzleme oturan fonksiyonel derecelendirilmiş tabakanın sürekli ve süreksiz temas problemi, *Doktora Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 152s, <http://acikerisim.ktu.edu.tr/jspui/handle/123456789/2998>.
- Öner, E., Şengül, B., Yaylacı, EU.**, 2022. On the plane receding contact between two functionally graded layers using computational, finite element and artificial neural network methods. *Z. Angew. Math. Mech*, 102, e202100287, <https://doi.org/10.1002/zamm.202100287>.
- Özşahin, T.Ş.**, 2000. Rijit iki düz blok üzerine oturan bileşik tabakada sürekli ve süreksiz temas problemi. *Doktora Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 151s, <http://acikerisim.ktu.edu.tr/jspui/handle/123456789/634>.
- Pindera, M.J., Lane, M.S.**, 1993. Frictionless contact of layered half planes. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 60, 633-639.
- Polat, A., Kaya, Y., Özşahin, T.**, 2018. Analytical solution to continuous contact problem for a functionally graded layer loaded through two dissimilar rigid blocks. *Meccanica*, 53, 3565-3577, <https://doi.org/10.1007/s11012-018-0902-7>.
- Polat, A.**, 2019. Elastik yarım düzleme oturan ve iki rijit blok aracılığıyla yüklenmiş fonksiyonel derecelendirilmiş tabakanın temas problemi. *Doktora Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 138s, <http://acikerisim.ktu.edu.tr/jspui/handle/123456789/366>
- Polat, A., Kaya, Y.**, 2022. Analysis of discontinuous contact problem in two functionally graded layers resting on a rigid plane by using finite element method. *Computers and Concrete*, 29(4), 247-253, <https://doi.org/10.12989/cac.2022.29.4.247>.
- Polat, A., Kaya, Y., Bora, P., Bendine, K., Özşahin, T.**, 2019. Investigation of the contact problem for a partial functionally graded layer by using finite element method. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 1. 185-193, <https://doi.org/10.31462/jseam.2019.01185193>.

- Polat, A.**, 2021. Examination of contact problem between functionally graded punch and functionally graded layer resting on elastic plane. *Structural Engineering & Mechanics*, 75, 135-143, 10.12989/sem.2021.78.2.135.
- Prayogo, D.**, 2018. Metaheuristic-based machine learning system for prediction of compressive strength based on concrete mixture properties and early-age strength test results. *Civil Engineering Dimension*, 20(1), 21, <https://doi.org/10.9744/ced.20.1.21-29>.
- Rekik, M., Neifar, M., El-Borgi, S.**, 2010. An axisymmetric problem of an embedded crack in a graded layer bonded to a homogeneous half-space. *International Journal of Solids and Structures*, 47, 2043–2055, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.04.006>.
- Rhimi, M., El-Borgi, S., Lajnef, N.**, 2011. A double receding contact axisymmetric problem between a functionally graded layer and a homogeneous substrate. *Mechanics of Materials*, 43, 787–798, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.08.013>.
- Williamson, R., Rabin B., G. Byerly, G.**, 1995. FEM study of the effects of interlayers and creep in reducing residual stresses and strains in ceramic-metal joints. *Composites Engineering*, no. 5, pp. 851-63.
- Sabin, G.C.W., Kaloni, P.N.**, 1989. Contact problem of a rigid indenter with rotational friction in second order elasticity. *International Journal of Engineering Science*, 27,3, 203-217, [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(89\)90110-9](https://doi.org/10.1016/0020-7225(89)90110-9).
- Shah, M. I., Memon, S. A., Khan Niazi, M. S., Amin, M. N., Aslam, F., Javed, M. F.**, 2021. Machine learning-based modeling with optimization algorithm for predicting mechanical properties of sustainable concrete. *Advances in Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2021/6682283>.
- Sneddon I.N.**, 1951. Fourier transforms. *The Mathematical Gazette*, 36(318), 290-291, doi:10.2307/3608227.
- Su, J., Ke, L.L., Wang, Y.S.**, 2015. Two-dimensional fretting contact analysis of piezoelectric materials. *International Journal of Solids and Structures*, 73, 41– 54, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.07.026>.
- Weitsman, Y.**, 1969. On the unbonded contact between plates and an elastic half space. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 36, 198-202, <https://doi.org/10.1115/1.3564607>.
- Wozniak, M., Hummel, A., Pauk, V.J.**, 2002. Axisymmetric contact problems for an elastic layer resting on a rigid base with a winkler type excavation. *International Journal of Solids and Structures*, 39, 4117-4131, [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00229-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00229-9).
- Vaishali, Mukhopadhyay, T., Karsh, P. K., Basu, B., Dey, S.**, 2020. Machine learning based stochastic dynamic analysis of functionally graded shells. *Composite Structures*, 237, 111870, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111870>.

- Yan, J., Li, X.**, 2015. Double receding contact plane problem between a functionally graded layer and an elastic layer. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 53, 143-150, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2015.04.001>.
- Yang, J., Ke, L.L.**, 2008. Two-dimensional contact problem for a coating– graded layer– substrate structure under a rigid cylindrical punch. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50, 985– 994, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2008.03.002>.
- Yaylacı, M., Abanoz, M., Yaylacı, E.U.**, 2022. Evaluation of the contact problem of functionally graded layer resting on rigid foundation pressed via rigid punch by analytical and numerical (FEM and MLP) methods. *Arch Appl Mech*, 92, 1953–1971, <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02159-5>.
- Yıldırım, B.**, 2004. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış kenar çatlaklı bir tabakada ısıl şok kırılmasının sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19,3, 235-245.
- Yıldırım, B., Kutlu, Ö., Kadioğlu, S.**, 2011. Periodic crack problem for a functionally graded half-plane an analytic solution. *International Journal of Solids and Structures*, 48, 3020–3031, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.06.019>.
- Zhang, X.C., Xu, B.S., Wang, H.D., Wu, Y.X., Jiang, Y.**, 2007. Hertzian contact response of single-layer, functionally graded and sandwich coatings. *Materials and Design*, 28, 47–54, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.018>.