

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**AİRY GERİLME FONKSİYONLARI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
BETON YOL KAPLAMASININ 3 BOYUTLU GERİLME ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Ümit Yaşar BAL**

**MART 2013  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**AİRY GERİLME FONKSİYONLARI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
BETON YOL KAPLAMASININ 3 BOYUTLU GERİLME ANALİZLERİ**

**İnş. Müh. Ümit Yaşar BAL**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11.02.2013  
Tezin Savunma Tarihi : 12.03.2013**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR**

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında  
Ümit Yaşar BAL tarafından hazırlanan**

**AİRY GERİLME FONKSİYONLARI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
BETON YOL KAPLAMASININ 3 BOYUTLU GERİLME ANALİZLERİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 19/02/2013 gün ve 1494 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri:**

**Başkan : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK .....**

**Üye : Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR .....**

**Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI .....**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Beton yollar, özellikle Türkiye gibi petrol bakımından dışa bağımlı ülkelerde birincil yol kaplaması seçeneği olmalıdır. Hammaddesi kolaylıkla ülke içinden elde edilebilir. Bu yüzden ekonomik bir kaplama türüdür. Beton yollar, gelişmiş ülkelerde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca zeminin taşıma gücünün düşük olduğu yerlerde de kullanıldığından yol yapımında çok cazip bir kaplama tipidir. Bu çalışmada farklı beton yol kalınlıkları üzerine gelen tekerlek yükünden oluşan gerilme değerleri farklı beton sınıflarında hesaplanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi, son yıllarda beton yollarda sıkça kullanılmakta ve beton yollar üzerine birçok analiz yapılmaktadır. Yeni geliştirilen bilgisayar programlarıyla sonlu elemanlar analizleri yapılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılmaktadır.

Bu çalışmanın tümünde; gerilme analizlerinin yapılmasında, değerlendirilmesinde ve bir sonuca bağlanmasında bana engin bilgisiyle desteğini esirgemeyen saygı değer hocam Doç. Dr. Vefa AKPINAR'a saygılarımı sunarım.

Ümit Yaşar BAL

Trabzon 2013

## **TEZ BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “AİRY GERİLME FONKSİYONLARI VE SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE BETON YOL KAPLAMASININ 3 BOYUTLU GERİLME ANALİZLERİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Vefa AKPINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.  
01.01.2013

Ümit Yaşar BAL

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Beton Yollar.....	2
1.2. Beton Yolların Avantajları.....	3
1.3. Beton Yolların Tarihi.....	4
1.4. Türkiye’de Beton Yollar.....	5
1.5. Beton Yol Teknik Şartnamesi.....	6
1.5.1. Derzli Donatısız Beton Yol.....	6
1.5.2. Beton Karışım Oranı Esası.....	6
1.5.3. Kaplamanın Trafığe Açılması.....	7
1.6. Mekanistik-Ampirik Tasarım.....	7
1.6.1. Mekanistik-Ampirik Çalışmalar.....	9
1.6.2. Nomogramlar.....	12
1.7. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi.....	15
1.7.1. Rijit Kaplamalar İçin FAA(Federal Aviation Administration) Sonlu Elemanlar Tasarım Prosedürü .....	15
1.7.2. Bilgisayar Destekli “Abaqus” Kullanılarak RCC Kaldırımında Gerilme ve Şekil Değişirmelerin Modellenmesi .....	17
1.7.3. Yerel Havaalanlarında Rijit Plak Kaplamalarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Lineer Olmayan Analizi.....	19
1.8. Matematiksel Yöntemlerle Gerilme Analizi.....	20
1.8.1. Westergaard Yöntemi.....	20
1.9. Beton Yol Gerilmelerine Alternatif Çözümler.....	21
1.9.1. Vakumlu Beton.....	21

1.9.2. Çelik Tel Donatılı Yol Betonları.....	24
1.10. Çalışmanın Amacı.....	24
2. YÖNTEM.....	26
2.1. Sonlu Elemanlar Programı Yardımıyla Gerilme Analizi .....	26
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	29
3.1. ANSYS Sonlu Elemanlarla Gerilme Analizi.....	29
3.2. Matematik Yöntemlerle Gerilme Analizi.....	40
3.2.1. Westergaard Yöntemine Göre Beton Yolda Gerilme Hesapları.....	40
3.2.2. Yol Tabakasındaki Gerilmelerin Airy Gerilme Denklemleriyle Hesabı.....	44
3.2.2.1. Airy Gerilme Denkleminin Yola Uygulanması.....	45
3.2.2.2. Katsayı Düzeltmesiyle Gerilmelerin Düzeltilmesi.....	50
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53
5. KAYNAKLAR.....	54
6. EKLER.....	56
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans

ÖZET

AİRY GERİLME FONKSİYONLARI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
BETON YOL KAPLAMASININ 3 BOYUTLU GERİLME ANALİZLERİ

Ümit Yaşar BAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR  
2013, 55 Sayfa, 25 Ek Sayfa

Bu tez çalışmasında, 3 farklı beton sınıfı; C20, C25, C30, ve 3 farklı kalınlıktaki; 15 cm, 20 cm ve 25 cm beton yolların mekanistik-ampirik mukayeseleri sonlu elemanlar, Westergard ve Airy denklemleri yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Seçilen Airy gerilme denklemiyle yapılan gerilme analizinden elde edilen gerilmeler, Westergaard yöntemiyle elde edilen gerilmelerden çok fazla çıkmıştır. Bu karşılaştırmaya göre seçilen Airy gerilme denklemi gerçeği yansıtmamaktadır. Gerilme analizleri, 15 cm kalınlığındaki C20, C25 ve C30 beton yolların ağır taşıt yüklerini taşıyamayacağını göstermektedir. 20 cm ve 25 cm kalınlığındaki C20, C25 ve C30 beton sınıfların ise hem çekme hem de basınç gerilmeleri karşılayabileceğini göstermiştir. Ayrıca beton sınıfını bir üst sınıf seçildiğinde düşey deplasmanlarda yaklaşık %1.67'lik bir azalma meydana gelirken, tabaka kalınlığı 5 cm artırıldığında yaklaşık %16.7'lik bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmanın amaçlarından biri de Doğu Karadeniz bölgesi için kullanılacak farklı beton sınıfı ve kalınlıkları için yolların performanslarının belirlenmesine yönelik Mekanistik–Ampirik tasarım ilkelerine dayalı yol çalışmasını içermektedir. Bu tez çalışmasında Türkiye’de ilk, çalışma prensibi bakımından ise Dünyada sayılı düzeneklerden biri olan Hızlandırılmış Yol Test düzeneği kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton yol tasarımı, mekanistik analiz, solu elemanlar analizi



Master Thesis

SUMMARY

3 DIMENSIONAL STRESS ANALYSIS OF PORTLAND CEMENT CONCRETE  
PAVEMENT WITH AIRY STRESS FUNCTIONS AND FINITE ELEMENT METHOD

Ümit Yaşar BAL

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. M. Vefa AKPINAR  
2013, 55 Pages, 25 Pages Appendix

In this study, three different concrete thickness (15 cm, 20cm and 25 cm) and three concrete classes (C20, C25, C30) design parameters were considered. Mechanistic empirical design concepts were compared by utilizing the finite element model, Westergard and Airy equations. It was found that results from Airy functions were not reasonable compared to Westergard results suggesting that Airy functions are not suitable for stress computations in concrete pavement designing. Results based on finite element analysis indicated that C20, C25 ve C30 concretes will fail for 15 cm thickness but will tolerate for 20 cm and 25 cm thickness. Increasing the layer thickness of 5 cm approximately 16.7% decrease was observed in the vertical deflection. A comprehensive study has been initiated to determine concrete pavement roads performances in Blacksea region based on mechanistic-empirical analysis principals. Accelerated pavement test facility which is the only in Turkey and one of the unique systems in the world, has been utilized in this research program.

**Key Words:** Concrete road design, Mechanistic analysis, Finite Element Analysis

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Beton yol ve alt tabakaların görünümü..... 2
Şekil 1.2.	Rijit üst yapıda yük dağılımı..... 3
Şekil 1.3.	İlk beton yol..... 4
Şekil 1.4.	1920 yılındaki yoldan bir görünüm..... 5
Şekil 1.5.	Afyon-Emirdağ Ayrımı Yolu tipik en kesiti..... 6
Şekil 1.6.	Mekanistik-Ampirik dizayn işleyiş diyagramı..... 9
Şekil 1.7.	PCC mekanik-ampirik tasarım çerçevesi (NCHRP 2004)..... 10
Şekil 1.8.	Mekanistik-ampirik işleyiş diyagramı..... 11
Şekil 1.9.	Mekanistik-ampirik işleyiş diyagramı..... 12
Şekil 1.10.	AASHTO rijit yol dizaynı nomogramı..... 13
Şekil 1.11.	Nomogramın devamı..... 14
Şekil 1.12.	AASHTO rijit yol dizaynına göre yol kalınlığının bulunması..... 15
Şekil 1.13.	3D-FE beton yol modeli..... 15
Şekil 1.14.	Gerilme-derinlik ilişkisi..... 16
Şekil 1.15.	Yolun görünüşü..... 17
Şekil 1.16.	Yükün yolun köşesine uygulanması..... 17
Şekil 1.17.	Yükün yolun merkezine uygulanması..... 18
Şekil 1.18.	Yükün yolun kenarına uygulanması..... 18
Şekil 1.19.	Tabaka ortasındaki eğilme gerilmesi ile plaka kalınlığı arasındaki ilişki... 19
Şekil 1.20.	Plak merkezinin çökmesinin tabaka kalınlığıyla olan ilişkisi..... 19
Şekil 1.21.	Betonun yıllara göre basınç dayanımları ilişkisi..... 23
Şekil 1.22.	Betonun yıllara göre yarmada çekme dayanımları ilişkisi..... 23
Şekil 1.23.	Betonun yıllara göre aşınması..... 23
Şekil 1.24.	15 yıl önce aynı zamanda yapılan iki beton yol. Soldaki betonda çelik tel kullanılmıştır..... 24
Şekil 2.1.	ANSYS 13 analiz modeli..... 27
Şekil 2.2.	ANSYS 13 programının işleyiş diyagramı..... 27
Şekil 2.3.	Yükün uygulandığı yer, yol ve alt tabakalar ve yolun 40 cm arayla “mesh”lenmiş hali..... 28
Şekil 2.4.	Yükün uygulandığı yer, yol ve alt tabakalar ve yolun

	10 cm arayla “mesh”lenmiş hali.....	28
Şekil 3.1a.	x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ) (40 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	31
Şekil 3.2a.	x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ) (40 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	31
Şekil 3.3a.	y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ) (40 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	32
Şekil 3.4a.	y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ) (40 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	32
Şekil 3.1b.	x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ) (10 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	33
Şekil 3.2b.	x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ) (10 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	33
Şekil 3.3b.	y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ) (10 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	34
Şekil 3.4b.	y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ) (10 cm’lik “mesh”lemeye göre).....	34
Şekil 3.5a.	z doğrultusundaki gerilme dağılışı( $\sigma_z=sz$ )(40 cm’lik “mesh”lemeye göre)	37
Şekil 3.5b.	z doğrultusundaki gerilme dağılışı( $\sigma_z=sz$ )(10 cm’lik “mesh”lemeye göre)	38
Şekil 3.6.	Westergaard’a göre plakta hesaplanan gerilmelerin yerleri.....	43
Şekil 3.7.	Beton yol bilgilerinin gösterilmesi.....	45
Şekil 3.8.	Hesaplanan gerilmelerin yolun farklı noktalarındaki yerleri.....	48
Ek Şekil 6.1.	x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	56
Ek Şekil 6.2.	x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	56
Ek Şekil 6.3.	y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	57
Ek Şekil 6.4.	y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	57
Ek Şekil 6.5.	z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	58
Ek Şekil 6.6.	x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	58
Ek Şekil 6.7.	x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	59
Ek Şekil 6.8.	y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	59
Ek Şekil 6.9.	y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	60
Ek Şekil 6.10.	z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	60
Ek Şekil 6.11.	x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	61
Ek Şekil 6.12.	x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	61
Ek Şekil 6.13.	y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	62

Ek Şekil 6.14. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	62
Ek Şekil 6.15. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	63
Ek Şekil 6.16. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	63
Ek Şekil 6.17. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	64
Ek Şekil 6.18. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	64
Ek Şekil 6.19. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	65
Ek Şekil 6.20. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	65
Ek Şekil 6.21. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	66
Ek Şekil 6.22. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	66
Ek Şekil 6.23. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	67
Ek Şekil 6.24. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	67
Ek Şekil 6.25. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	68
Ek Şekil 6.26. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	68
Ek Şekil 6.27. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	69
Ek Şekil 6.28. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	69
Ek Şekil 6.29. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	70
Ek Şekil 6.30. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	70
Ek Şekil 6.31. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	71
Ek Şekil 6.32. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	71
Ek Şekil 6.33. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	72
Ek Şekil 6.34. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	72
Ek Şekil 6.35. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	73
Ek Şekil 6.36. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	73
Ek Şekil 6.37. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ).....	74
Ek Şekil 6.38. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	74
Ek Şekil 6.39. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ ).....	75
Ek Şekil 6.40. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ).....	75

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Gerilme değerleri.....	18
Tablo 1.2. Beton blokların içerdikleri ve uygulanan vakumlar.....	22
Tablo 1.3. Bloklardan alınan numunelerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve aşınma miktarı.....	22
Tablo 3.1a. Farklı beton yol tabakaları ve beton sınıflarına göre maksimum düşey yer değiştirmeler (mm), 40 cm'lik "mesh"lemeye göre .....	29
Tablo 3.1b. Farklı beton yol tabakaları ve beton sınıflarına göre maksimum düşey yer değiştirmeler (mm), 10 cm'lik "mesh"lemeye göre .....	29
Tablo 3.2a. Gerilmelerin karşılaştırılması (40 cm'lik "mesh"lemeye göre).....	35
Tablo 3.2b. Gerilmelerin karşılaştırılması (10 cm'lik "mesh"lemeye göre).....	36
Tablo 3.3. Beton sınıfları ve mekanik özellikleri.....	37
Tablo 3.4a. z doğrultusunda meydana gelen basınç gerilmeleri (40 cm'lik "mesh"lemeye göre).....	38
Tablo 3.4b. z doğrultusunda meydana gelen basınç gerilmeleri (10 cm'lik "mesh"lemeye göre).....	39
Tablo 3.5. Beton sınıfı ve plaka kalınlıklarına göre rölatif sertlik yarıçapları (l, cm)..	41
Tablo 3.6. Çeşitli zeminler için yatak katsayıları.....	41
Tablo 3.7. Dingil yüklerine göre lastik yükü yarıçapları.....	42
Tablo 3.8. Plaka kalınlıklarına göre b değerleri.....	42
Tablo 3.9. Westergaard yöntemine göre C20 betonundaki plaktaki gerilme değerleri.	43
Tablo 3.10. Westergaard yöntemine göre C25 betonundaki plaktaki gerilme değerleri.	43
Tablo 3.11. Westergaard yöntemine göre C30 betonundaki plaktaki gerilme değerleri.	44
Tablo 3.12. h= 0.25 metre olması halinde oluşan gerilmeler.....	48
Tablo 3.13. h= 0.2 metre olması halinde oluşan gerilmeler.....	49
Tablo 3.14. h= 0.15 metre olması halinde oluşan gerilmeler.....	49
Tablo 3.15. ANSYS 13 programıyla hesaplanan gerilmelerin C20 sınıfı beton ve 15 cm'lik beton yolun matematiksel yöntemle aynı noktalardaki gerilme değerleri.....	50
Tablo 3.16. h=0.25 metre olması halinde oluşan gerilmeler.....	51
Tablo 3.17. h= 0.2 metre olması halinde oluşan gerilmeler.....	52
Tablo 3.18. h= 0.15 metre olması halinde oluşan gerilmeler.....	52

## SEMBOLLER DİZİNİ

A	Airy Gerilme Denklemi Katsayısı
a	Lastik Yüğü Dağılımının Yarıçapı
B	Airy Gerilme Denklemi Katsayısı
b	Direnme Bölgesinin Eşdeğer Yarıçapı
b	Matris Çözümünde Kullanılan Bir Kısaltma Sembölü
C	Airy Gerilme Denklemi Katsayısı
$C_d$	Drenaj katsayısı
D	Airy Gerilme Denklemi Katsayısı
E	Elastisite Modülü
$E_C$	Betonun Elastisite Modülü
$E_f$	Çakıl Temel Tabakasının Elastisite Modülü
$E_s$	Alt Temel Tabakasının Elastisite Modülü
$E_{SG}$	Zeminin Elastisite Modülü
F	Airy Gerilme Denklemi Katsayısı
$F(x,y)$	x ve y Değişkenlerine Bağlı Airy Gerilme Denklemi
h	Beton Plaka Kalınlığı
$h_f$	Çakıl Temel Tabakasının Kalınlığı
$h_s$	Alt Temel Tabakasının Kalınlığı
J	Airy Gerilme Denklemi Katsayısı
J	Yük transferi katsayısı
K	Alt Temel Reaksiyon Değeri
$k_{eff}$	Alt zemin reaksiyon modülü
$K_s$	Yatak Katsayısı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
k	Lastik Merkezinin Yolun Merkezinden Uzaklığı
L	Yol Genişliği
l	Westergaard Yöntemine Göre Rölatif Sertlik Yarıçapı
M	Yol Uzunluğu
ME	Mekanistik-Ampirik (Mechanistic-Empirical)
P	Lastik Yüğü
Pa	Pascal

p	Toplam Dağıtılan Yük
$q_1$	Lastik Yükünün Maksimum Değeri
$q_2$	Lastik Yükünün 0,075 metre Yanındaki Değeri
R	Dizayn emniyeti
RCC	The Roller Compacted Concrete (Silindirle Sıkışmış Beton)
r	Matris Çözümünde Kullanılan Bir Kısaltma Sembolü
$S_0$	Genel standart sapma
$S'_c$	Kopma modülü
s	Gerilmelerin Alındığı Yüzeyden Geçen Düz Çizgi
s	Matris Çözümünde Kullanılan Bir Kısaltma Sembolü
ş	Matris Çözümünde Kullanılan Bir Kısaltma Sembolü
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
t	Matris Çözümünde Kullanılan Bir Kısaltma Sembolü
$W_{18}$	Trafik Yükü
w	Matris Çözümünde Kullanılan Bir Kısaltma Sembolü
z	Matris Çözümünde Kullanılan Bir Kısaltma Sembolü
$\mu$	Poisson Oranı
$\mu_f$	Çakıl Temel Tabakasının Poisson Oranı
$\mu_s$	Alt Temel Tabakasının Poisson Oranı
$\gamma$	Birim Hacim Ağırlık
$\sigma_x$ (sx)	x Doğrultusundaki Gerilme
$\sigma_y$ (sy)	y Doğrultusundaki Gerilme
$\sigma_z$ (sz)	z Doğrultusundaki Gerilme
$\sigma_i$	Yolun Orta Kısmının Alt Yüzeyinde Oluşan Gerilmeler
$\sigma_{ke}$	Yolun Kenar Kısmının Alt Yüzeyinde Oluşan Gerilmeler
$\sigma_{kö}$	Yolun Köşe Kısmının Üst Yüzeyinde Oluşan Gerilmeler
$\sigma_x$	x Doğrultusundaki Gerilme
$\sigma_y$	y Doğrultusundaki Gerilme
$\tau_{xy}$	Kayma Gerilmesi

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak yaşam standartlarının yükselmesi ile insanların güvenli ve konforlu sürüş talebi artmıştır. Günümüz Türkiye'sinde ekonomik kalkınmanın ve refahın gelişmesinde büyük önemi olan karayolu taşımacılığının, ulaştırma sektörü içindeki payı giderek artan bir eğilim göstermektedir.

Yollar, bölgenin sosyo-ekonomik durumuna bağlı olarak ihtiyaç ve talepleri karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır. Yol kullanıcısı olarak sürücüler; düzgün, konforlu, kayma direnci yüksek, hızlı erişimli, ulaşım maliyeti ve gürültü seviyesi düşük yollar talep ederken, yol otoriteleri; dayanıklı, minimum bakım gerektiren, kalıcı deformasyonlara karşı dirençli, aşınma direnci yüksek, uzun ömürlü yolları hedeflemektedirler. [1]

Ülkemizde ağır taşıt trafiği her geçen gün daha da artmakta ve bu durum yol üst yapısında önemli problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bir karayolu yatırımının proje ve inşaat safhalarında uygun değer çözümlerin üretilmesi gereklidir. Bu çözümleri, teknik ölçütlerin ve ekonomik ölçütlerin çözümlenmesi olarak ikiye ayırabiliriz.

Teknik Ölçütler;

- Dışarıdan gelen yüklerin taban zeminine iletilmesi,
- Dingil yükü ve tekerrür sayısı,
- Malzeme seçimi,
- İklim şartları,
- Ülkede mevcut üst yapı durumu,
- Konfor ve güvenlik

Ekonomik Ölçütler;

- İlk inşaat maliyeti,
- Bakım maliyeti,
- Akaryakıt tüketimi,
- Enerji tüketimi,
- Yerli kaynak kullanımı olarak adlandırabiliriz.

Karayolu üst yapıları genel olarak; esnek üst yapılar (asfalt yollar) ve rijit üst yapılar (beton yollar) olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. Esnek üst yapılar ülkemizde

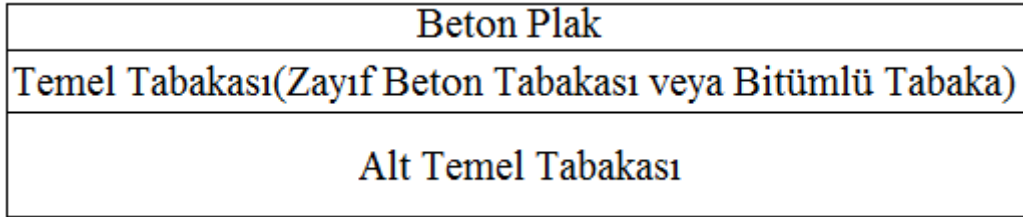


uzun yıllardan beri uygulanan bir kaplama türüdür. Beton yollar ise gelişmiş ülkelerde geniş bir kullanım alanına sahip olmasına karşın Türkiye’de henüz deneme safhasındadır. Bakım giderleri çok az olan ve daha uzun süre hizmet veren beton yollar, günümüzde asfalt yollara oranla daha ekonomik bir çözüm getirmektedir. [2]

### 1.1. Beton Yollar

Beton yollar, çimento betonu ile yapılan ve üzerinden geçen dingil yüklerini tabana ileten bir üst yapı kaplama türüdür. Çimento betonu ile yapılan kaplamalara “beton yollar” denir. Şehir içi yollarda, orta ve ağır trafik yoğunluğu olan yollarda kullanılan uzun ömürlü bir kaplama tipidir. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Yol yapımında kullanılan beton karışımının su / çimento oranı 0,20 - 0,45 arasında, minimum çimento miktarı 375 kg/m<sup>3</sup>, minimum hava miktarı %3, ayrıca betonun 28 günlük karakteristik minimum basınç dayanımı 30 MPa olmalıdır. [3]

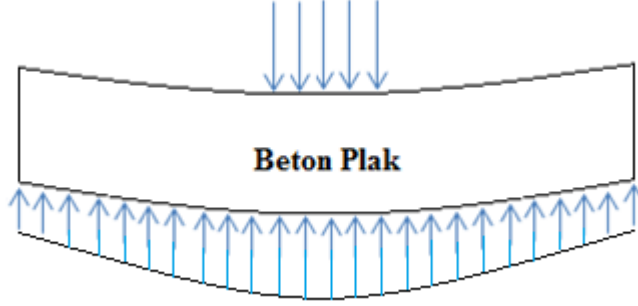
Beton yollar; çimento betonu ile yapılan ve üzerinden geçen dingil yüklerini tabana ileten bir kaplama türü olup, üstyapı tabanı üzerine yerleştirilen alt temel tabakası, zayıf beton tabakası veya bitümlü tabaka da olabilen temel tabakası üzerine serilmiş beton plaktan oluşmaktadır (Şekil 1.1). [3]



Şekil 1.1. Beton yol ve alt tabakaların görünümü

Beton yolların yapısal ömrü uzundur, uzun yıllar bakım onarım gerektirmeden kullanılabilirler, her mevsimde, her hava koşulunda yapılabilirler. Beton yolların ömrü, üzerine gelen yüklerin büyüklüğü, tekrar sayısı, beton sınıfı ve kalitesi gibi değerlere bağlı olarak 24-34 yıl arasında değişmektedir. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bu durum, betonun rijitliğinden yararlanmak sonucunu doğurur. Beton,

çekme direnci düşük olan bir yapı malzemesidir. Rijit üst yapıda yük dağılımı Şekil 1.2'deki gibi olur. [2]



Şekil 1.2. Rijit üst yapıda yük dağılımı

Tekerlek yükü beton plak üzerinden geçerken çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşturur. Tekerlek geçtikten sonra gerilmeler yön değiştirerek kaybolur. Özellikle yoğun ağır taşıt trafiği taşıyan bir beton yolda bu gerilme değişimleri kısa zaman aralıkları ile sürekli olarak kendini gösterir. Bu durumda, beton plakta çekme ile basınç arasında değişen sürekli gerilmeler oluşur, bu da zamanla malzemenin yorulmasına neden olur. O halde bu tip gerilmelerin, betonun sürekli direncinin çok altında bulunması gerekir. Diğer malzemeler gibi beton da sıcaklığın artmasına veya azalmasına bağlı olarak genişlemekte veya büzülmemektedir. Buna ek olarak kaplamaların alt ve üst yüzeyleri günlük ve mevsimlik sıcaklık ve nemlilik farkları nedeniyle eğilme ve bükülmelere uğrar. [2]

## 1.2. Beton Yolların Avantajları

Karayollarının yapılmasında, ortam ve koşullara göre en uygun seçeneğin tercih edilerek, ülkemiz için en kazançlı ve verimli olan yol seçilmelidir. Bu doğrultuda, özellikle ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu, sık sık bakım-onarım yapılmak zorunda kalınan yollar, kuşkusuz beton yollar için uygun bir başlangıç noktası olacağı düşünülmektedir. Beton yolların avantajları; [3]

- Daha kısa duruş mesafesine sahiptir,
- Tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlidir,
- Trafik seyir hızında artış sağlar,
- Hava koşullarına karşı dirençlidir,
- Çevre dostudur,

- Yerli malzeme kullanılmaktadır,
- Daha az mevsimsel hasara uğrar,
- Akaryakıt tasarrufu sağlar,
- Uzun ömürlüdür,
- Gece görüşünü kolaylaştırır.

Ülkemizde karayolu ağı, günümüze kadar asfalt ve asfalt sathi kaplama şeklinde inşa edilmiştir. Hâlbuki Dünyada beton yol yapımına 100 yıl önce başlanmıştır. Ülkemizde de beton yollara önem verilmesi gerekmekte olduğu düşünülmektedir. [3]

### 1.3. Beton Yolların Tarihi

İlk olarak Romalılar M.Ö. I. yüzyılda, yollarda taşları birbirine bağlamak için puzzolanik bağlayıcılar kullanmışlardır. Çok eskiye dayanan bu örnekten sonra beton yollar konusunda gelişmeler 19. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. İlk beton yollar ABD'de yapılmıştır. 1891 yılında Ohio'da bir sokak bilinen en eski beton yoldur (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. İlk beton yol

Çok fazla hesaba dayanmayan bu yollardan sonra 1920'li yıllarda tasarım ilkelerine sahip yollar yapılmıştır. Daha sonra alt zemin problemleri baş göstermiş ve alt zeminleri olan beton yollar inşa edilmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. 1920 yılındaki yoldan bir görünüm

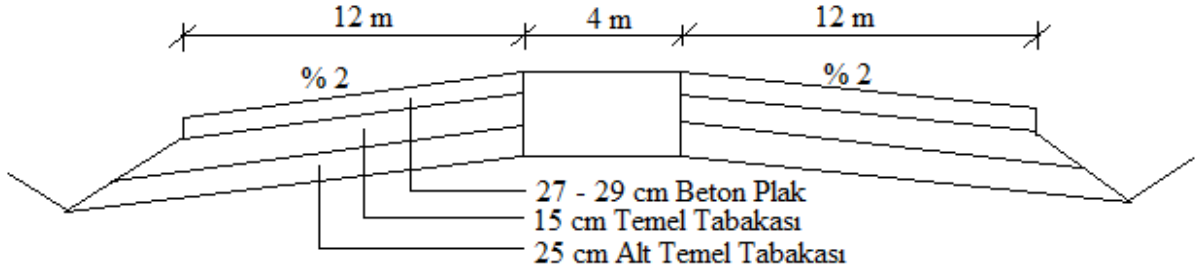
Beton yol teknolojisinde yaşanan hazır beton, kayar kalıp, geçirimli beton, lifli beton, ön gerilmeli beton, sürekli betonarme gibi yenilikler ve hızlı gelişmelerle beton kaplama, günümüzün modern yolları için asfalt kaplamalara karşı vazgeçilmez bir seçenek haline gelmiştir. [2]

#### 1.4. Türkiye’de Beton Yollar

Bugün Türkiye’de yaklaşık 2.000 kilometresi otoyol ve 30.000 kilometresi devlet yolu olmak üzere toplam 63.000 kilometrelik bir karayolu şebekesi bulunmaktadır. Bu yolların hemen hepsi asfalt yoldur. Sadece son yıllarda Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB)’nin finansmanı ile toplam 5,5 km beton karayolu yapılabilmiş, buna daha sonra çeşitli kuruluşlarca yapılan bir kaç km daha ilave edilmiştir. [4] TÇMB’nin yaptığı yollara aşağıdaki yolları örnek olarak gösterebiliriz;

İlk örneğimizdeki beton yol, İstanbul’da Hasdal kışlası ile Kemer Burgaz ayrımı arasındaki bölünmüş yol olup, yapımı 2006 yılında tamamlanmıştır. Yolun bir yönü asfalt kaplama, diğer yönü ise TÇMB finansmanı ile beton kaplama olarak yapılmıştır. TÇMB tarafından 27 cm kalınlığında beton plak ve altında 5 cm kalınlığında asfalt ara yüzey ile derzli donatısız olarak tasarlanmıştır. İlaveten yolun bir bölümünde beton plak kalınlığı 32 cm’ye çıkartılmış ve asfalt ara yüzey kaldırılmıştır. [4]

Diğer örnek ise genişletilerek bölünmüş hale getirilen Afyonkarahisar-Emirdağ Ayrımı yoludur ve bu yolun tipik bir en kesiti ve KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü) tarafından hazırlanan alt yapısı, Şekil 1.5’te gösterilmiştir. Platform genişliği 3 trafik şeridi için 12 metre olup %2’lik bir eğim öngörülmüştür. Plentmiks alt temel ve temel tabakası sırası ile 25 cm ve 15 cm kalınlıkta olup kaplama tabakaları için kırmızı kota kadar 30 cm’ye kadar bir kalınlık kalmaktadır. [13]



Şekil 1.5. Afyon-Emirdağ Ayrımı Yolu tipik en kesiti

### 1.5. Beton Yol Teknik Şartnamesi

Bu yollar üst yapı tabanı üzerine yerleştirilen granüler alt temel, temel tabakası, zayıf beton tabakası veya bitümlü tabaka üzerine serilmiş beton plaklardan oluşur. Beton üst yapı tipleri: [14]

1. Derzli Donatısız Beton Kaplama
2. Derzli Donatılı Beton kaplama
3. Sürekli Donatılı Beton Kaplamadır.

#### 1.5.1. Derzli Donatısız Beton Kaplama

Bu kısım; yeterli dayanımda alt temel, temel, zayıf beton, bitümlü kaplama veya mevcut kaplama üzerine projelerinde gösterilen boyut, eğim, kesit ve doğrultuda portland çimentosundan inşa edilecek olan beton kaplama tabakasında kullanılacak; tüm malzeme, makine ve donanım ile bunların özelliklerini, inşa esaslarını, ölçü ve kontrol yöntemlerini kapsar. [14]

#### 1.5.2. Beton Karışım Oranı Esası

Kaba agregası, ince agregası, çimento, su, kimyasal ve mineral katkı maddelerinden meydana gelen beton kaplama karışımında, çimento miktarı metreküp başına 350 kg'dan az olmayacak ve su/çimento oranı (W/C) %45'i aşmayacaktır. [14]

### **1.5.3. Kaplamanın Trafığe Açılması**

Kaplama betonu, döküldüğü günden itibaren 10 gün veya hava şartları dolayısıyla kontrol mühendisi tarafından bu sürenin uzatılması istendiğinde, daha uzun bir süre Müteahhitin araçlarına ve trafiğe kapalı olacaktır. Müteahhit, her türlü aracı kaplamadan uzak tutmak için gereken engel ve ışık tertibatını temin edecek, yerleştirecek ve bakımını yapacaktır. Araçlar tarafından kaplamada meydana getirilecek hasarlar Müteahhit tarafından ücretsiz olarak tamir edilecektir. Ekskavatör, vinç, betoniyer gibi ağır makineler Kontrol Mühendisinin yazılı izni olmadan kaplama üzerinde bulunmayacak ve işletilmeyecektir. Bütün derzler doldurulup tamamlanmadan beton kaplama trafiğe açılmayacaktır. [14]

Şartname genelinde betonu oluşturan agrega, çimento, karma suyu ve betonun işlenebilmesi, dayanım artışının sağlanması gibi değerleri ilgilendiren katkı maddelerinin genel özellikleri hakkında bilgi verilmektedir. Meydana gelen bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte hazır beton tesisleri kurulmuş ve betonun hazırlanmasıyla ilgili tüm ölçütler buralarda gerekli denetlemeler yapılarak yapılmaktadır. Şartnamede beton kaplama boyutları hakkında net bir bilgi verilmemektedir. “Projesinde gösterilen boyutlar” ifadesi kullanılmaktadır. Buradan her projedeki beton kaplama kalınlığının ve diğer boyutlarının farklı olabileceği çıkartılabilir.

### **1.6. Mekanistik-Ampirik Tasarım**

Mekanistik-Ampirik tasarım, karayolu kaplamalarının bir tasarım yöntemidir. Bu tasarım, malzemelerin mekaniğine dayalı teorik tahminler ile arazi verisi elde edilen ampirik ilişkileri birleştirir. Bu yöntem; trafik, yükleme, toprak gücü, iklim vb. gibi gerçek kaplama tepkisi girdileriyle ilgilidir. Şu anda, çoğu karayolu yetkilileri tarafından kullanılan üstyapı tasarım yöntemi ampirik tasarımdır. Ampirik tasarımda kaplama, sadece araziden elde edilen verilere dayalı olarak tasarlanır. Mekanistik-Ampirik yöntem, arazi performansı ve teorik tahmin modellerini birleştirirken ampirik yöntem sadece arazi performansına dayanır. Bu yüzden mekanistik-ampirik yöntem, ampirik yöntemden daha doğrudur. Bu, daha verimli ve gelişmiş analitik araçlar ve yapısal analiz modelleri kullanılması nedeniyle. Mekanistik tabanlı üstyapı tasarım prosedürünü kabul etmek de

önemlidir. Teorik bilgilerin kullanılmasıyla emniyet faktörleri azaltılabilir ve karayolunun genel performansının iyileştirilmesiyle karayolunun kalınlığı azaltılabilir.

Mekanistik-Ampirik (ME) tasarım yöntemi üç ana adımdan oluşur. Birinci adımda, kaplama tepki değerleri arazide veya bir laboratuvar testinde elde edilir. İkinci adımda, kaplama tepkisi, teorik değerler mekaniği kullanılarak hesaplanır. Son olarak da, arazi ve laboratuvar testlerinden elde edilen veriler, gelişmiş yapısal modeller kullanılarak tahmin edilir. Yapısal modelleri, sonlu elemanlar yöntemi adlı bir analiz yöntemine dayanmaktadır. Modellemeyle tahmin edilen kaplama tepkisi eşleşmiyorsa, arazi ve gözlenen kaplama performansının eşleşmesi için elde edilen kaplama durumu ve çözüm faktörleri kullanılır. Böylece, güvenilir ve geliştirilmiş ME prosedürü kullanılmış olur.

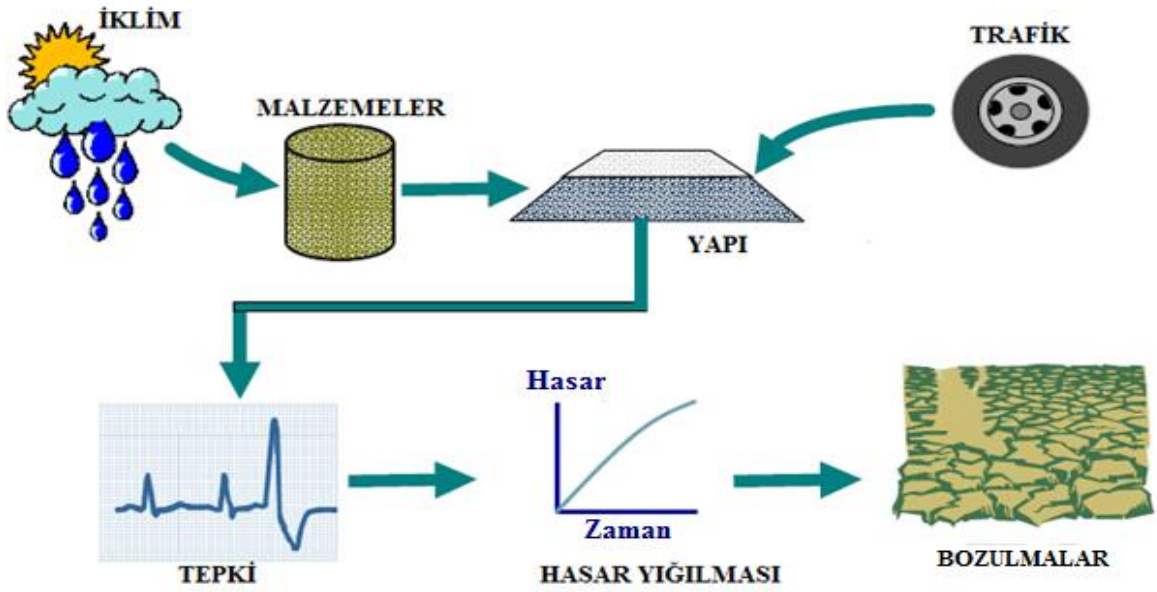
Daha verimli ve gelişmiş analitik araçlar ve yapısal analiz modellerinin kullanması nedeniyle mekanistik tabanlı üstyapı tasarım prosedürünü kabul etmek önemlidir. Mekanistik analiz için mevcut esnek üstyapı yapısal modelleri ve bilgisayar kodları, mekanistik-ampirik kalınlık tasarım işlemleri için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Gözlenen performansa bağımlılık gerekli olduğundan teorinin, gerçekçi tasarım kaplamaları için yeterli olduğu kanıtlanmış değildir. Mekanistik yöntemler, yapısal analiz ile elde edilen analitik hesaplamaları çevirmek için bilimsel olarak elde edilen kaplama performansı verilerine dayanır. Bu sonuçlar daha güvenilir üstyapı tasarımını ve karayollarının uzun vadeli performansını artırır.

Mekanistik temelli bir yaklaşımda hala bazı zorluklar vardır. Tehlike modelleri ME tasarımda zayıf noktadır, ancak güvenlik faktörünün azaltılmamasıyla telafi edilir. Geniş arazi ölçümleri ve doğrulama, güvenilir bir tehlike tahmin modelleri kurmak için gereklidir ve bu kolay bir şey değildir. ME tasarım işlemlerinde önemli bir güvenilirlik sorunu, tahmin edilen ve gözlenen kaplamada tehlike ve performans arasındaki değişim faktörlerinin büyük olmasıdır. Başka bir karmaşık faktör, girilen trafik verilerinin yetersizliği ve doğruluğudur. Tarihsel trafik verilerini tahmin etmek için kullanılan prosedürler tutarlı bir yöntemi yansıtmamaktadır. Ayrıca, önemli konulardan biri de tam ME tasarım prosedürünü uygulamak için mali kaynağa ihtiyaç duyulur. Şu anda çoğu devlet karayolu yetkilileri büyük ölçekli ME uygulama programını desteklemek için gerekli personel, zaman ve mali kaynaklara sahip değildir. Devlet karayolu yetkilileri, aynı zamanda, ME doğrulama ve ölçümleme faaliyetlerini desteklemek için yeterli kullanılabilir esnek üstyapı veri ve bilgisine sahip değildir. Çoğu eyalet yetkilileri mevcut ME

prosedürlerini çok karmaşık olduğunu düşünürler ve daha basitleştirilmiş tasarım şartlarını daha yaygın dizayn prosedürüne tercih ederler [20].

### 1.6.1. Mekanistik-Ampirik Çalışmalar

Todd W. Thomas, “Yerinde Geri Dönüşüm İçin Mekanistik-Ampirik Kaplama Tasarımları” adlı çalışmasıyla mekanistik ampirik dizayn yapmıştır. Şekil 1.6’da Mekanistik-Ampirik dizayn işleyiş diyagramı görülmektedir. [15]

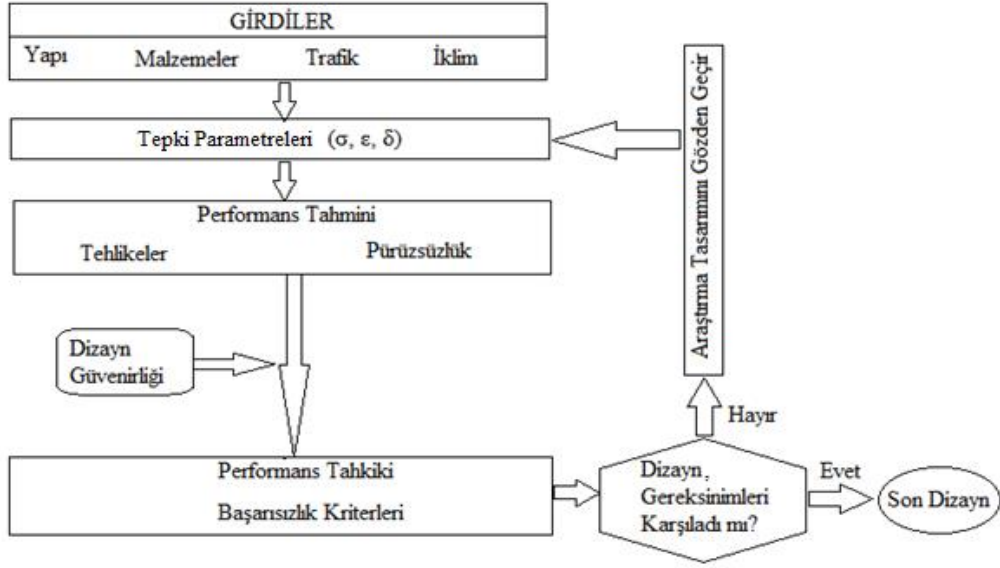


Şekil 1.6. Mekanistik-Ampirik dizayn işleyiş diyagramı

Şekil 1.6’den da görüldüğü üzere trafik ve iklimin yola etkimesiyle yol malzemesinin davranışına bağlı olarak bir tepki meydana gelmekte ve zamana bağlı hasar yığılmasının ardından bozulmalar gözlenmektedir.

“Mekanistik-Ampirik Kaplama Dizayn Rehberinin Ardından Kansas’taki Beton Kaplama Dizaynı” adlı başka bir çalışmada da PCC mekanik-ampirik tasarım çerçevesi (NCHRP 2004) Şekil 1.7’deki gibidir. [16]

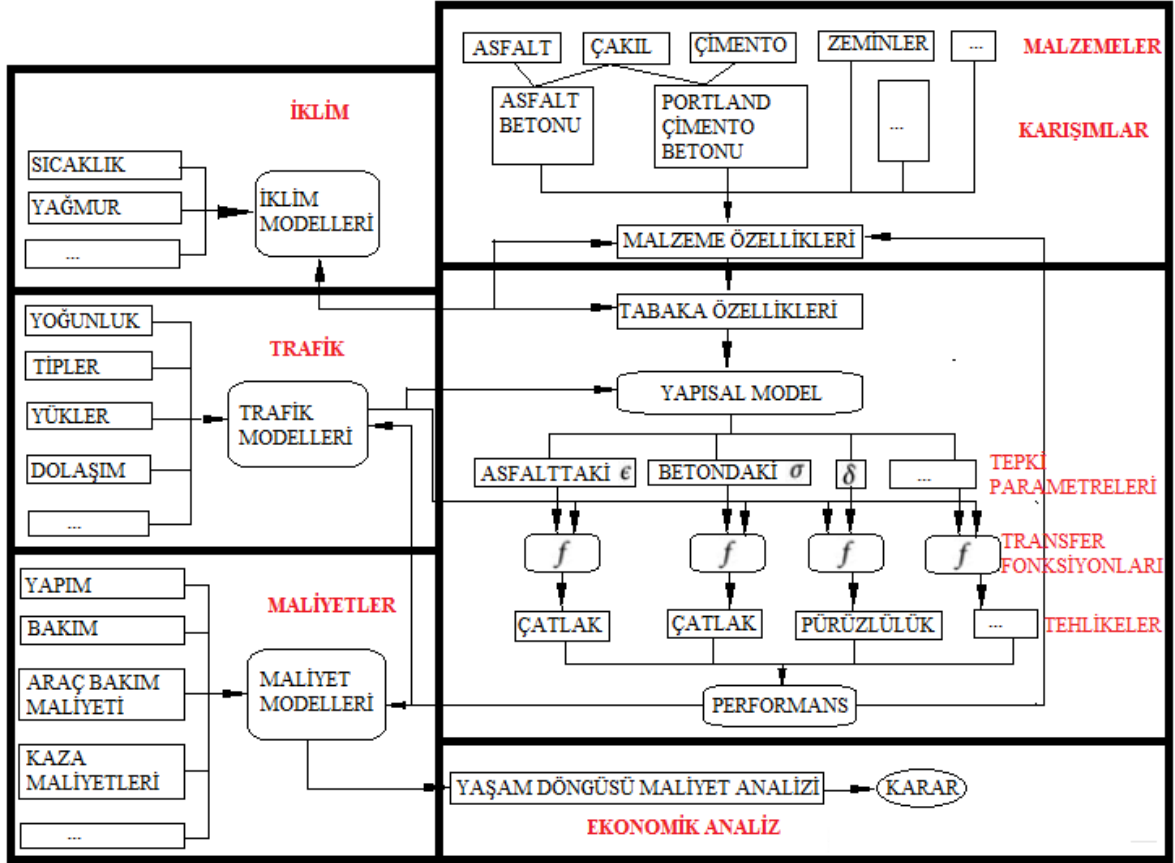




Şekil 1.7. PCC mekanik-ampirik tasarım çerçevesi (NCHRP 2004).

Şekil 1.7’den de görüldüğü üzere yol yapısı, yolu oluşturan malzemeler, yolun üzerinden geçen trafik ve iklim şartlarına bağlı olarak yol yapısında gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme gibi bir takım olaylar meydana gelir. Bu olaylar dizayn güvenilirlik katsayısının da işin içine katılmasıyla yolda tehlikeli durumlara veya bozulmalara neden olabilir. Performans tahkiki yapıldıktan sonra yapılan dizayn, istenilen düzeyde ise son dizayn yapılır, istenilen düzeyde değilse tasarım gözden geçirilir ve yolda meydana gelen gerilme, yer değiştirme ve şekil değiştirmeden itibaren yeniden dizayn edilir.

“Mekanistik-Ampirik Kaplama Dizaynı İçin Kaliforniya’ya Geçiş” adlı başka bir araştırmada da mekanistik-ampirik işleyiş diyagramı Şekil 1.8’deki gibi verilmiştir. [17]



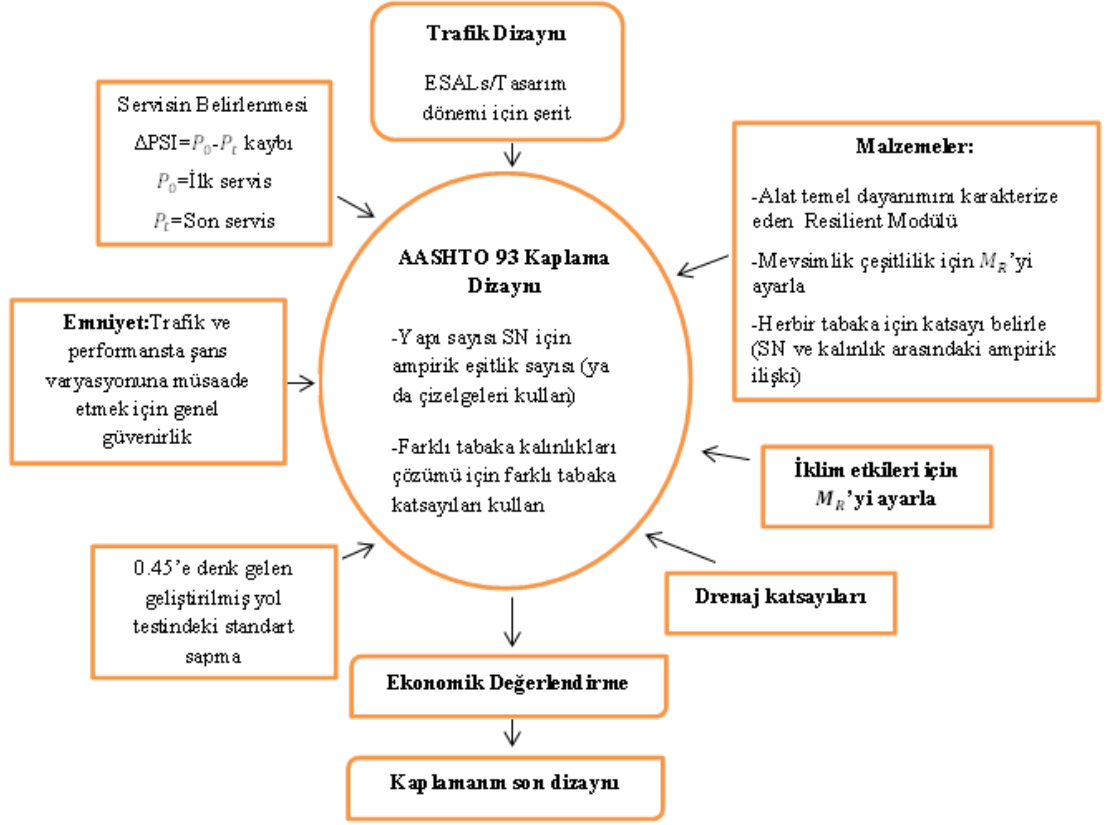
Şekil 1.8. Mekanistik-ampirik işleyiş diyagramı

Şekil 1.8'den de görüldüğü üzere iklim, trafik, maliyet, yol malzemeleri ve bunların farklı kombinasyonlarına göre tepki parametreleri, transfer fonksiyonları ve meydana gelen tehlikelere bağlı olarak ekonomik bir analiz yapılmakta ve yolun son haline karar verilmektedir.

“Mekanistik-Ampirik Kaplama Dizayn Rehberinin Değerlendirilmesi (NCHRP 1-37A)” adlı başka bir çalışmanın mekanistik-ampirik işleyiş diyagramı Şekil 1.9'da verilmektedir.

[18]

Şekil 1.9'dan da açıkça görüldüğü gibi AASHTO 93 kaplama dizaynı yapılırken emniyet, standart sapma, malzeme, drenaj katsayısı ve iklim etkilerinin yola etkimesiyle ekonomik bir değerlendirmeden geçerek kaplamanın son dizaynı yapılmaktadır.



Şekil 1.9. Mekanistik-ampirik işleyiş diyagramı

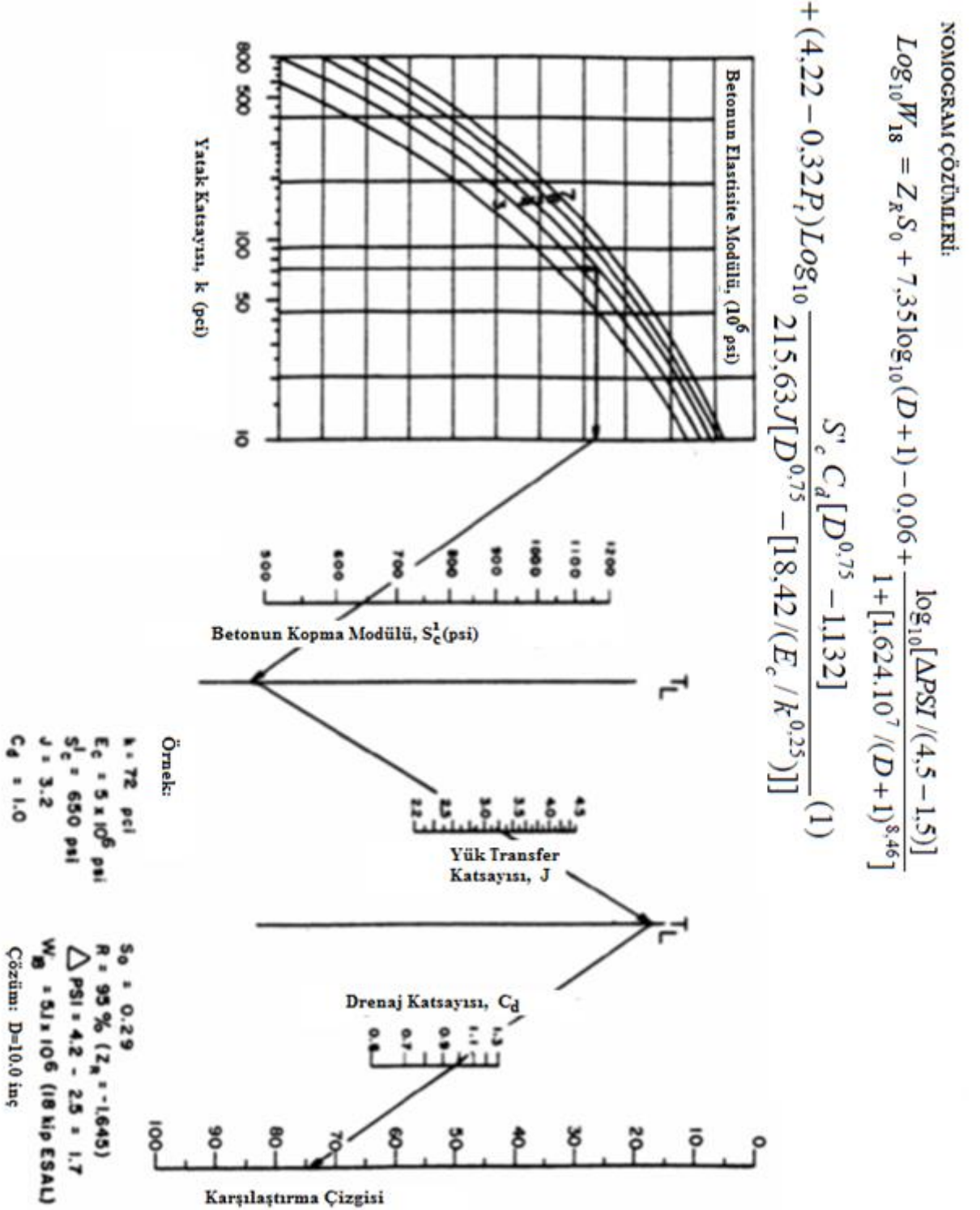
### 1.6.2. Nomogramlar

Temeli ampirik çalışmalara dayanan AASHTO nomogramları, yol kesitleri kalınlıklarını belirlemede kullanılmaktadır. Nomogramlarda E ve reaksiyon modülü değerleriyle beraber yeni AASHTO, Mekanistik-Ampirik olarak adlandırılmaktadır. AASHTO rijit yol dizaynına göre oluşan nomogramlar Şekil 1.10 ve Şekil 1.11'de gösterilmektedir. Bu nomogramdaki yol bilgileri aşağıdaki gibidir; [19]

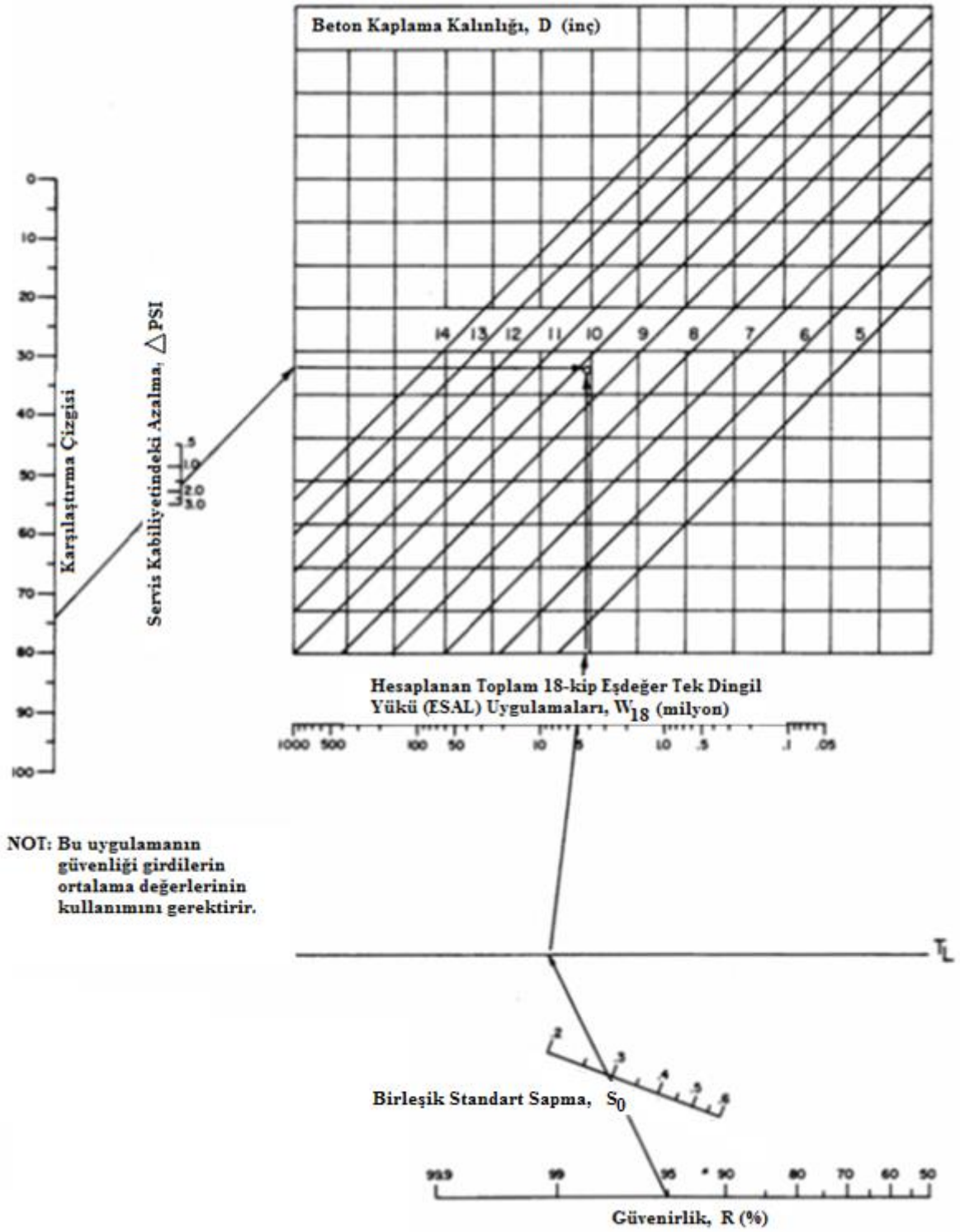
- Alt zemin reaksiyon modülü,  $k_{eff} = 70 \text{ pci} \cong 195 \times 10^6 \text{ N/m}^3$
- Trafik,  $W_{18} = 5$  milyon
- Dizayn emniyeti,  $R = \%95$
- Genel standart sapma,  $S_0 = 0.30$
- $\Delta PSI = 1.7$
- Elastik modül,  $E_c = 5000000 \text{ psi} \cong 35185 \text{ Mpa}$
- Kopma modülü,  $S^l_c = 650 \text{ psi} \cong 5 \text{ Mpa}$
- Yük transferi katsayısı,  $J = 3.3$

- Drenaj katsayısı,  $C_d=1$

Bu bilgilere göre 25,15 cm (9.9 inç) beton yol kalınlığının dizayn emniyeti, nomogramdan %95 olarak bulunmuştur (Şekil 1.12). [19]



Şekil 1.10. AASHTO rijit yol dizaynı nomogramı



Şekil 1.11. Nomogramın devamı

$W_{18} := 5000000$	$Z_R := -1.645$	$S_0 := 0.3$	$\Delta PSI := 1.7$	$k := 70$
$S_c := 650$	$J := 3.3$	$C_d := 1.0$	$p_t := 2.8$	$E_c := 5000000$
$D := 4.5$				
Given				
$\log(W_{18}) = (Z_R \cdot S_0) + 7.35 \cdot \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \cdot 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \cdot p_t) \cdot \log\left[\frac{S_c \cdot C_d \cdot (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \cdot J \cdot \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right]}\right]$				
Bulgu (D)= 9.9				

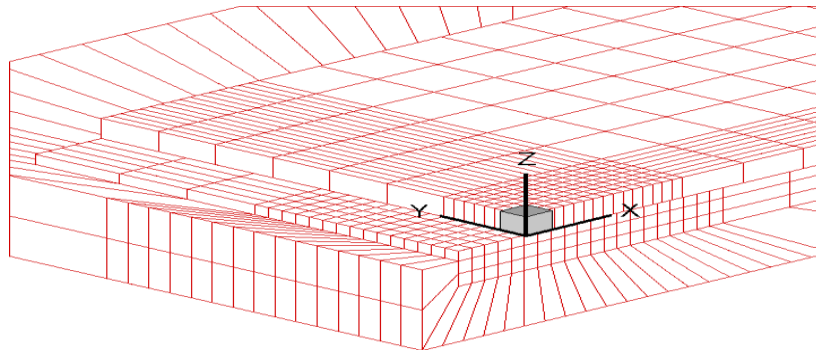
Şekil 1.12. AASHTO rijit yol dizaynına göre yol kalınlığının bulunması

## 1.7. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi adı altında dünyanın birçok ülkesinde farklı bilgisayar programları yardımıyla analizler yapılmaktadır. Bu analizler kuşkusuz bilimin gelişmesine oldukça katkı sağlamaktadırlar. Aşağıda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmış bazı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalarda farklı bilgisayar programlarını ve farklı sonuçları görmek mümkündür.

### 1.7.1. Rijit Kaplamalar İçin FAA (Federal Aviation Administration) Sonlu Elemanlar Tasarım Prosedürü

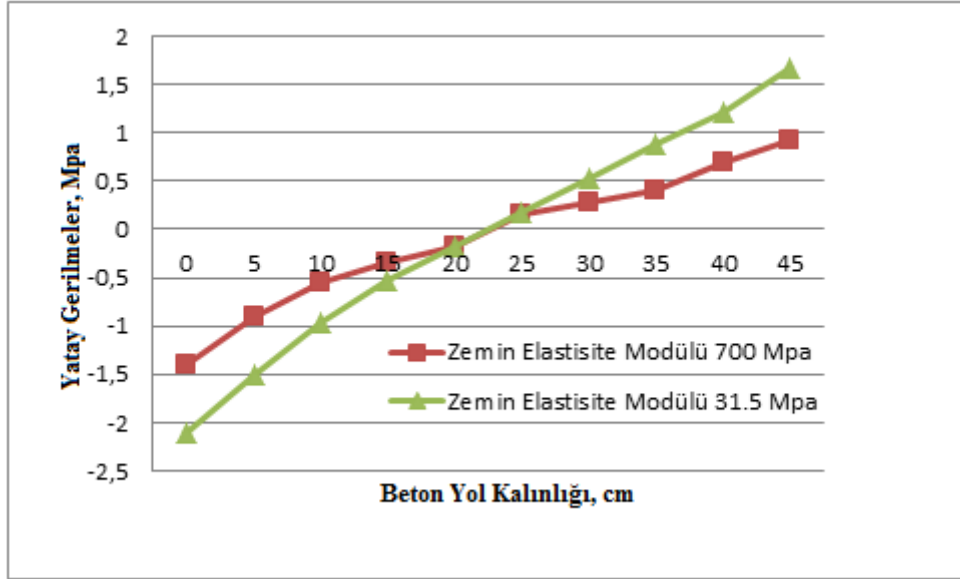
Bu çalışmada birden fazla elastik tabaka üzerine oturan bir yolun basitleştirilmiş bir sayısal modeli gösterilmektedir. FE (Finite Element, Sonlu Elemanlar) analizinde kullanılabilen birçok yaklaşım vardır. Ancak en yaygın olanı x, y, z (Şekil 1.13) yer değiştirmeler analizinde temel bilinmeyenler olarak tanımlanan deplasman yaklaşımıdır.



Şekil 1.13. 3D-FE beton yol modeli

Beton yollar üzerine gelen araç ağırlıkları yükünden ve de çevre şartlarından dolayı beton yollarda gerilmeler oluşur. Meydana gelen bu gerilmeleri beton yollar güvenli bir şekilde karşılamalı ve deformasyonlar oluşmamalıdır. Oluşabilecek ufak çatlaklar bile beton yolların çok büyük deformasyona uğramasına neden olabilir. Aşağıda beton yollar üzerine gelen yükler ve meydana gelen gerilmeler hakkında yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Beton plağı ile plak altındaki tabaka arasındaki ara yüzeyin tamamen bağlı olması durumunda iç gerilmeler, iki yol tabakası için ayrı ayrı yapılmıştır. Her iki tabaka yaklaşık 45 cm kalınlığında olup betonun elastisite modülü ( $E_C$ ) yaklaşık 28148 MPa ve poisson oranı ( $\mu$ ) 0.15'tir. Birinci yapıdaki zeminin elastisite modülü ( $E_{SG}$ ) yaklaşık 31.5 MPa, ikinci yapıdaki zeminin elastisite modülü ( $E_{SG}$ ) ise yaklaşık 700 MPa'dır. Yaklaşık 227 kN'luk bir lastik yükü 1.26 MPa'lık bir basınçla her iki yola da uygulanmıştır. Bu problemlere ait gerilme-derinlik ilişkisi Şekil 1.14'te gösterilmiştir. [8] (1 pound = 454gram, 1 inç = 2.54 cm)

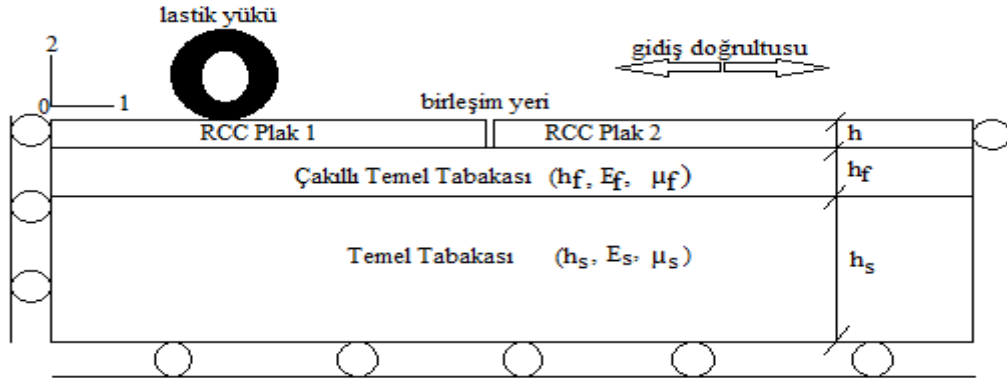


Şekil 1.14. Gerilme-derinlik ilişkisi [8]

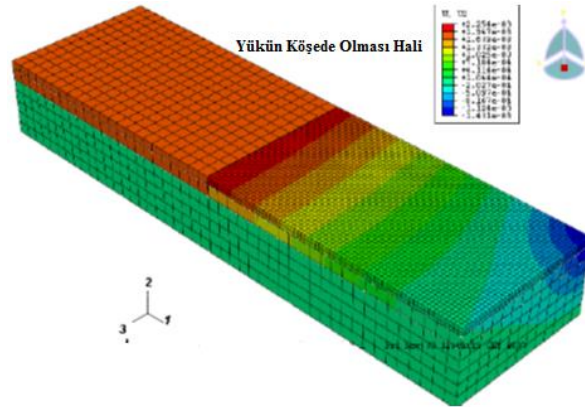
Bilgisayar programıyla yapılan bu çalışmadan elde edilen şekillerden de anlaşılacağı gibi beton altındaki alt tabakanın kalitesini artırarak beton yolda oluşan gerilmeler azaltılabilir. Zemin elastisite modülü 700 MPa ve kalınlığı 45 cm olan bir beton yolun yüzeyinde 1.41 MPa'lık bir basınç oluşurken betonun yolun altında 0.99 MPa'lık bir çekme gerilmesi oluşmaktadır.

### 1.7.2. Bilgisayar Destekli “Abaqus” Kullanılarak RCC Kaldırımında Gerilme ve Şekil Değişikliklerinin Modellenmesi

Bu çalışmada, kalınlığı ( $h$ ) 20cm, elastisite modülü ( $E$ ) 31000MPa ve poisson oranı ( $\mu$ ) 0.22 olan 4mX7m’lik yan yana iki tane RCC (The Roller Compacted Concrete, Silindirle Sıkışmış Beton) plak betonunun altına kalınlığı ( $h_f$ ) 30cm, elastisite modülü ( $E_f$ ) 155 MPa ve poisson oranı ( $\mu_f$ ) 0.35 olan 4m x 14m’lik bir çakıl temel tabakası ve onun da altına kalınlığı ( $h_s$ ) 130 cm, elastisite modülü ( $E_s$ ) 50 MPa ve poisson oranı ( $\mu_s$ ) 0.45 olan 4mX14m’lik bir alt temel tabakası koyularak Abaqus bilgisayar programıyla çözümlenmiştir (Şekil 1.15). 740000 Pa değerinde tekerlek başına 65000 N’luk bir yük, bu yolun hem köşesine (Şekil 1.16) hem merkezine (Şekil 1.7) hem de kenarına (Şekil 1.8) ayrı ayrı yüklenmiştir. Abaqus 6.7 programıyla çözülen bu yolda gerilmeler Tablo 1.1’deki gibi oluşmuştur. [9]

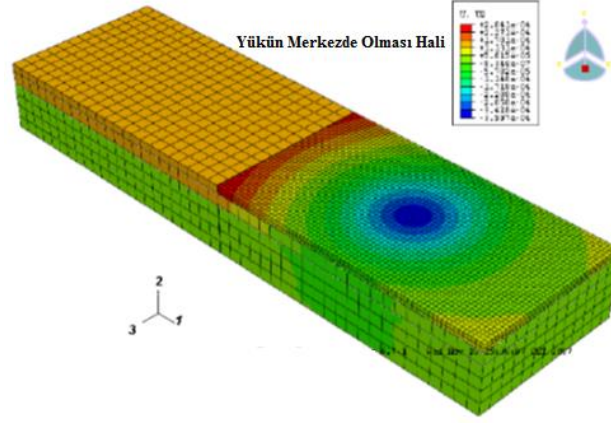


Şekil 1.15. Yolun görünüşü

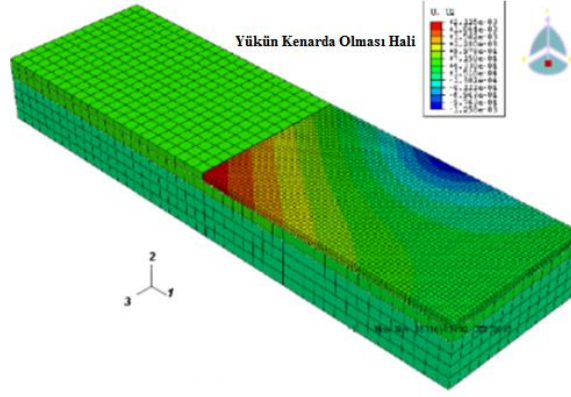


Şekil 1.16. Yükün yolun köşesine uygulanması





Şekil 1.17. Yükün yolun merkezine uygulanması



Şekil 1.18. Yükün yolun kenarına uygulanması

Tablo 1.1. Gerilme Değerleri

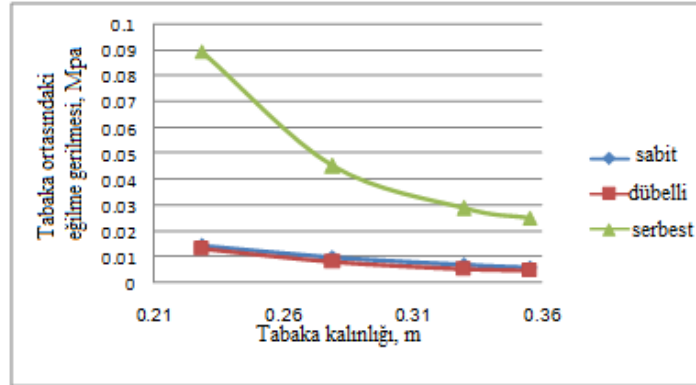
Gerilme (MPa)	Yükün içte olması		Yükün köşede olması		Yükün kenarda olması	
	Üst (-)	Alt (+)	Üst (+)	Alt (-)	Üst (-)	Alt (+)
$\sigma_{11}$	1.72	1.51	2.31	1.79	2.57	2.21
$\sigma_{22}$	0.74	0.26	0.78	0.39	0.76	0.44
$\sigma_{33}$	1.69	1.49	1.28	1.28	0.54	0.42
$\sigma_{12}$	0.27	0.26	0.52	0.52	0.66	0.68
$\sigma_{13}$	0.22	0.22	1.69	1.55	0.77	0.77
$\sigma_{23}$	0.26	0.26	1.94	1.59	0.33	0.33

Tablodan da görüldüğü gibi 20 cm'lik beton yolun üstünde 1.69 MPa'lık bir basınç gerilmesi oluşurken beton plağın altında 1.49 MPa'lık bir çekme gerilmesi oluşmaktadır.

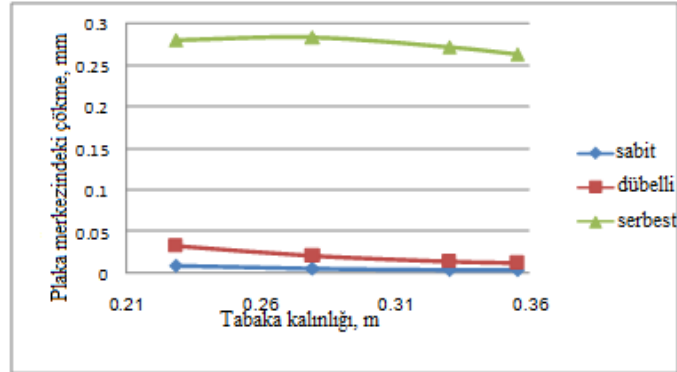
### 1.7.3. Yerel Havaalanlarında Rijit Plak Kaplamalarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Lineer Olmayan Analizi

Ali A. A. Alwash yapmış olduğu bu çalışmasında, havaalanı yollarının plak analizini etkileyen temel faktörlerin çalışmaları vardır. Burada eleman tipi kalın, düz kabuk eleman olarak kabul edilmiştir. Eğilme gerilmesi ve plaka merkezindeki çökmenin plaka kalınlığına etkisi ABAS-PROGRAM kullanımıyla Şekil 1.19 ve Şekil 1.20'de sunulmuştur. [10] Girilen değerler;

- Elastisite modülü,  $E=20800\text{MPa}$
- Poisson oranı,  $\mu=0.15$
- Toplam dağıtılan yük,  $p=2.38\text{MPa}$
- Alt temel reaksiyon değeri,  $K=36.67\text{MPa}$
- Eleman meshinin sayısı,  $4 \times 4$



Şekil 1.19. Tabaka ortasındaki eğilme gerilmesi ile plaka kalınlığı arasındaki ilişki



Şekil 1.20. Plak merkezinin çökmesinin tabaka kalınlığıyla olan ilişkisi

Burada beton yol plağının gerilme hesabı sabit, dübelli ve serbest olmak üzere üç farklı durumda elde edilmiştir. Bu durumlar beton yol plağının bağlanma şekilleriyle alakalıdır. Sabit plakta beton kısmın hareketi kısıtlanmıştır. Dübelli plakta beton plaklar arasına dübel koyulmuştur. Serbest plakta ise beton plak tamamıyla serbest bırakılmıştır.

Şekil 1.14'ten anlaşılacağı üzere sabit ve dübelli plaktaki gerilmeler neredeyse aynı olurken, serbest plaktaki gerilmeler çok daha büyük değerlerde olmaktadır. Benzer şekilde Şekil 1.15'te de plakaların çökmeleri gösterilmiştir. Sabit ve dübelli plakların çökmeleri birbirine yakinken serbest plağın çökmesi çok daha fazla olmaktadır. Serbest plaktan görülen diğer bir durum da kalınlık arttıkça gerilmelerin ve çökmenin azalmasıdır.

## 1.8. Matematiksel Yöntemlerle Gerilme Analizi

### 1.8.1. Westergaard Yöntemi

Westergaard yöntemine göre beton plak gerilme hesaplaması aşağıdaki gibidir;

Westergaard yöntemine göre rölatif sertlik yarıçapı  $l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12K(1-\mu^2)}}$  formülüyle hesaplanır.

Burada;

E, betonun elastik modülü,

$\mu$ , betonun Poisson oranı,

h, plağın kalınlığı cm,

K, zeminin modülü  $kg/cm^3$ ,

l, cm cinsinden bulunur.

Yol üzerindeki bir tekerlek yükünden dolayı yolun iç noktaları yüklendiğinde, yol kaplamasının küçük bir alanı tabakanın eğilme momentine direnç gösterir. Westergaard'a göre direnme bölgesinin eşdeğer yarıçapı şu formülle hesaplanır;

Eğer  $a < 1.724h$  ise  $b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$  aksi takdirde  $b = a$  alınır. Burada;

a, lastik yükü dağılımının yarıçapı (cm)

h, beton yol kalınlığıdır (cm).

Westergaard beton yolun iç, kenar ve köşe bölgelerinin gerilmeleri ( $kg/cm^2$ ) için bazı denklemler geliştirmiştir. Bu denklemler aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[ 4 \log_{10} \frac{l+1.069}{b} \right]$$

$$\sigma_{ke} = \frac{0.572P}{h^2} [4 \log_{10} \frac{l}{b} + 0.359]$$

$$\sigma_{k\ddot{o}} = \frac{3P}{h^2} [1 - (\frac{a\sqrt{2}}{l})^{0.6}]$$

Burada;

$\sigma_i$ , beton yolun tam ortasının yüklenmesiyle yolun orta kısmının alt yüzeyinde oluşan gerilmeler ( $kg/cm^2$ ),

$\sigma_{ke}$ , beton yolun kenarının yüklenmesiyle yolun kenar kısmının alt yüzeyinde oluşan gerilmeler ( $kg/cm^2$ ),

$\sigma_{k\ddot{o}}$ , beton yolun köşesinin yüklenmesiyle yolun köşe kısmının üst yüzeyinde oluşan gerilmeler ( $kg/cm^2$ ),

h, beton yol kalınlığı (cm),

P, lastik yükü (kg),

a, lastik yükü dağılımının yarıçapı (cm),

l, rörtif sertlik yarıçapı (cm),

b, direnç alanı yarıçapıdır (cm). [5]

## 1.9. Beton Yol Gerilmelerine Alternatif Çözümler

### 1.9.1. Vakumlu Beton

Karayolu ulaşımında beton yollar, Türkiye’de son yıllarda gündeme gelmeye başlanmıştır. Beton yolların ani ve ağır dinamik yüklere maruz kalması, yüksek dayanıklılık ve durabilite özelliklerine sahip beton gereksiniminin duyulmasına neden olmuştur. Vakum uygulaması, betonun mukavemetini olumlu etkilemekte ve daha hızlı kullanılmasını sağlamaktadır. [11]

Beton yolların basınç dayanımlarını artırmak istiyorsak vakumlama yöntemine başvurabiliriz. Yaptığımız beton yolun basınç dayanımının yetmeyişinden dolayı kalınlığı artırmak istemiyorsak betona vakum uygulayıp basınç dayanımını artırabiliriz. Aşağıda bununla alakalı bir örnek verilmiştir.

3 farklı betondan 1.sine hiç vakum uygulanmamış, 2.sine 18 dk. ve 3.süne de 35 dk. vakum uygulanarak beton bloklar dökülmüştür. (Tablo 1.2).

Tablo 1.2. Beton blokların içerdikleri ve uygulanan vakumlar

		I. Blok	II. Blok	III. Blok
Vakum süresi (dakika)		-	18	35
Geri çekilen su (lt/m <sup>3</sup> )		-	25.5	43
S/Ç oranı		0.54	0.48	0.44
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )		426	426	426
Su (kg/m <sup>3</sup> )		190	164.5	155
Agrega grupları (kg/m <sup>3</sup> )	32-16	334		
	8-16	632		
	0-4	761		
Akışkanlaştırıcı (kg/m <sup>3</sup> )		2		

Bu bloklardan alınan numunelerin basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları ve aşınma miktarları yapılan deneylerle bulunmuştur (Tablo 1.3).

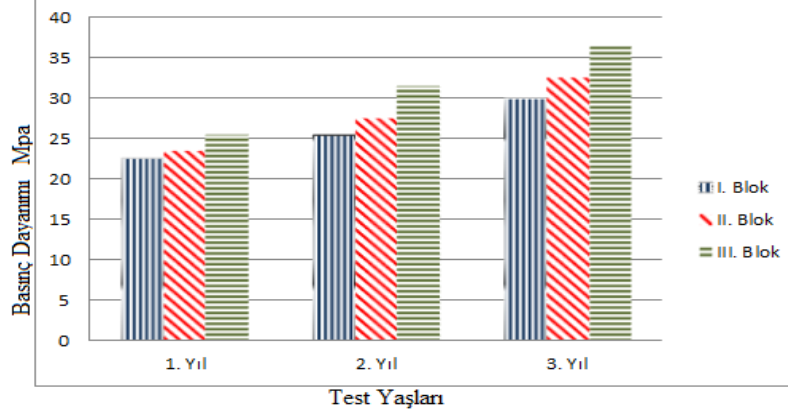
Tablo 1.3. Bloklardan alınan numunelerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve aşınma miktarı

		I.Blok	II.Blok	III:Blok
Vakum süresi(dakika)		-	18	35
Basınç (MPa)	1.Yıl	22.63	25.45	29.83
	2.Yıl	23.54	27.56	32.51
	3.Yıl	25.51	31.41	36.33
Yarmada Çekme (MPa)	1.Yıl	4.85	5.58	5.79
	2.Yıl	5.28	6.15	6.89
	3.Yıl	5.95	6.74	7.44
Aşınma (%)	1.Yıl	0.435	0.417	0.381
	2.Yıl	0.404	0.384	0.311
	3.Yıl	0.342	0.320	0.259
Ağırlık Kaybı (%)		0.311	0.273	0.132

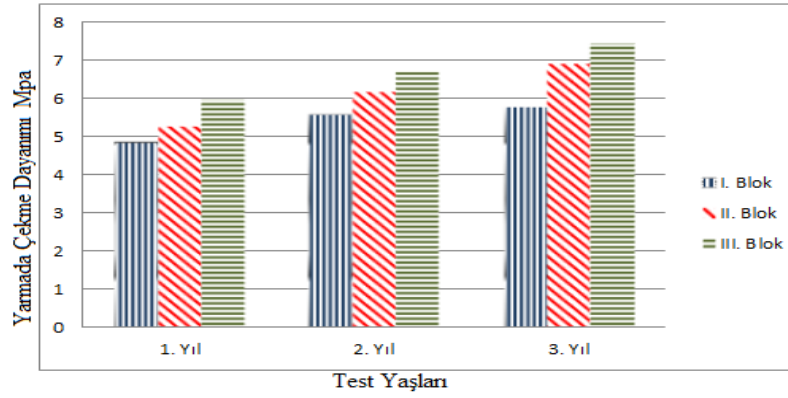
Tablo 1.3'ten görüldüğü gibi vakum uygulanmamış beton 3. Yılın sonunda 1. Yıla göre yaklaşık 3 MPa'lık bir basınç dayanımı artışı sağlamışken 18 dk. vakum uygulanmış beton yaklaşık 6 MPa ve 35 dk. vakum uygulanmış beton da yaklaşık 7 MPa'lık bir basınç dayanımı artışı sağlamıştır. Böyle bir uygulamayla bir alt sınıftaki betonla ekonomik bir beton yol dizaynı yapılabilir. Yıllara göre blokların basınç dayanımları Şekil 1.21'de gösterilmektedir. Yine Tablo 1.3'ten görüleceği üzere vakum uygulanmış betonların yarmada çekme dayanımları artmıştır. Yıllara göre blokların yarmada çekme dayanımları Şekil 1.22'de gösterilmektedir.

Beton yol üzerinden geçen çeşitli araçlardan dolayı beton yollarda aşınmalar olmakta ve yol daha kısa sürede deforme olmaktadır. Vakum uygulanarak hazırlanmış

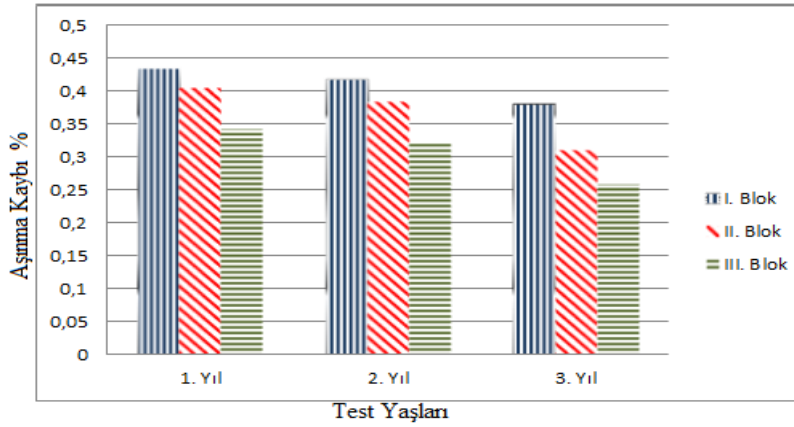
betonda aşınma miktarının daha az olduğu Tablo 1.3'te görülmektedir. Yıllara göre blokların aşınmaları Şekil 1.23'de gösterilmektedir.



Şekil 1.21. Betonun yıllara göre basınç dayanımları ilişkisi



Şekil 1.22. Betonun yıllara göre yarmada çekme dayanımları ilişkisi



Şekil 1.23. Betonun yıllara göre aşınması

### 1.9.2. Çelik Tel Donatılı Yol Betonları

Çelik liflerle donatılmış beton, onun zayıf olan özelliklerini güçlendirerek, tokluk, darbe, kavitasyon ve ilk çatlak dayanımlarında önemli artışlar sağlamaktadır. İçerisine atılan küçük çelik teller sayesinde yol betonu, yükler altında çatlakların büyümesini engeller ve çatlaklara gelen yükleri çatlamamış bölgelere yayar. Çelik tel donatılı betonun darbe mukavemeti normal betona göre 15-20 kat artmaktadır. Yine benzer şekilde sıcaklık farkından doğan gerilmeler de bu çelik tellerle karşılanır ve çatlamalara izin verilmez. (Şekil 1.24) [12]



Şekil 1.24. 15 yıl önce aynı zamanda yapılan iki beton yol. Soldaki betonda çelik tel kullanılmıştır

### 1.10. Çalışmanın Amacı

Bu tezde Airy gerilme denklemlerinden yararlanılarak yol boyutları ve yük büyüklüğü gibi her yolda olabilecek değerlere bağlı olarak denklemler elde edilmeye çalışılmış ve buna ilaveten ANSYS 13 programı yardımıyla yol tabakalarındaki gerilmeler hesaplanmıştır.

Airy gerilme denklemiyle oluşturulan denklemlerde yükün aynı olması halinde yol boyutları değiştirilmiş ve gerilmeler arasında tutarlı bir durum gözlenmeye çalışılmıştır. ANSYS 13 programında ise elastisite modülü (E) ve beton yol kalınlığı, beton sınıfına göre değiştirilerek beton yolda ve yol alt tabakalarındaki gerilmeler ve yer değiştirmeler hesaplanmaya çalışılmıştır.

Yapılan bu çalışmayla yol boyutları, yük büyüklüğü, yükün uygulandığı bölge gibi kolaylıkla değiştirilebilecek değerlerle gerilme analizleri yapılma imkanı oluşmuştur.

Bu çalışmanın amacı, beton yol ve alt tabakalarının gerilme analizinin yol kalınlığının ve yol betonu sınıfının değiştirilmesiyle hem ANSYS 13 programıyla hem de matematiksel yöntemle yapılmasını sağlamak ve farklı beton sınıfları ve kalınlıkları için

gerilme birim şekil değiştirme değerlerini karşılaştırmaktır. Ayrıca istenildiği takdirde gerek ANSYS 13 programında ve gerek de matematiksel yöntemde yol boyutları ve yük büyüklüğü kolayca değiştirilebilmektedir.

Yol üst yapısında projelendirme yapılırken çevre şartları, iklim koşulları, dingil yükü, taban zemini gibi yolda gerilmeler oluşturan veya gerilmelerin artmasına neden olan bir çok kriter göz önünde bulundurulmaktadır. Bu kriterlere dayanarak yol tabakası ve alt tabakalarda meydana gelen gerilmeler ve bu gerilmelere bağlı olarak oluşan yer değiştirmeler hesaplanır. Yapılan bu hesaplamalardan sonra elde edilen gerilmeler yolda aşırı deformasyonlara ve çatlakların oluşmasına mahal vermemelidir ve meydana gelen yer değiştirmeler sınır şartlar içerisinde olmalıdır.

Bu tezde trafik yükünden dolayı beton yol ve alt tabakalarında meydana gelen gerilmeler, matematik yöntemle ve sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmaya çalışılmıştır. Yol tabakalarındaki gerilmeleri bulabilmek için Westergaard yöntemi, AASHTO yöntemi ve katalog yöntemi gibi matematiksel yöntemler ve 3D-FE, Abaqus, ABAS-PROGRAM ve ANSYS gibi bilgisayar programları kullanılmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak beton yol ve alt tabakalarında gerilme analizleri yapılırken yol boyutu, yük büyüklüğü gibi gerilmeleri etkileyen kriterlerin değiştirilmesiyle oluşan yeni yolların gerilme analizleri yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, literatür taramasıyla elde edilen şekil 1.6, şekil 1.7 ve şekil 1.8'de gösterilen mekanistik-ampirik işleyiş diyagramlarındaki tepki parametreleri kısmı konu edilmiştir. Tepki parametrelerindeki gerilme ve yer değiştirmeler bulunmuş ve uygunluğu hakkında yorumlar yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmayla matematik formüller elde edilmeye çalışılmış ve yol gerilme analizlerinde bir çeşitlilik oluşturulmuştur. Seçilen bir gerilme denkleminin sınır şartlarına uygulanması sonucunda denklem içindeki bilinmeyen sabitlerin bulunması ve bu sabitlerin yerine konulup gerilme değerlerinin bulunması esasına dayanan Airy gerilme denklemleri oluşturulmaya çalışılmış ve sonlu elemanlar yöntemi olan ANSYS 13 programıyla x, y ve z doğrultularındaki gerilme ve yer değiştirmeler bulunmaya çalışılmıştır.



## 2. YÖNTEM

### 2.1. Sonlu Elemanlar Programı Yardımıyla Gerilme Analizi

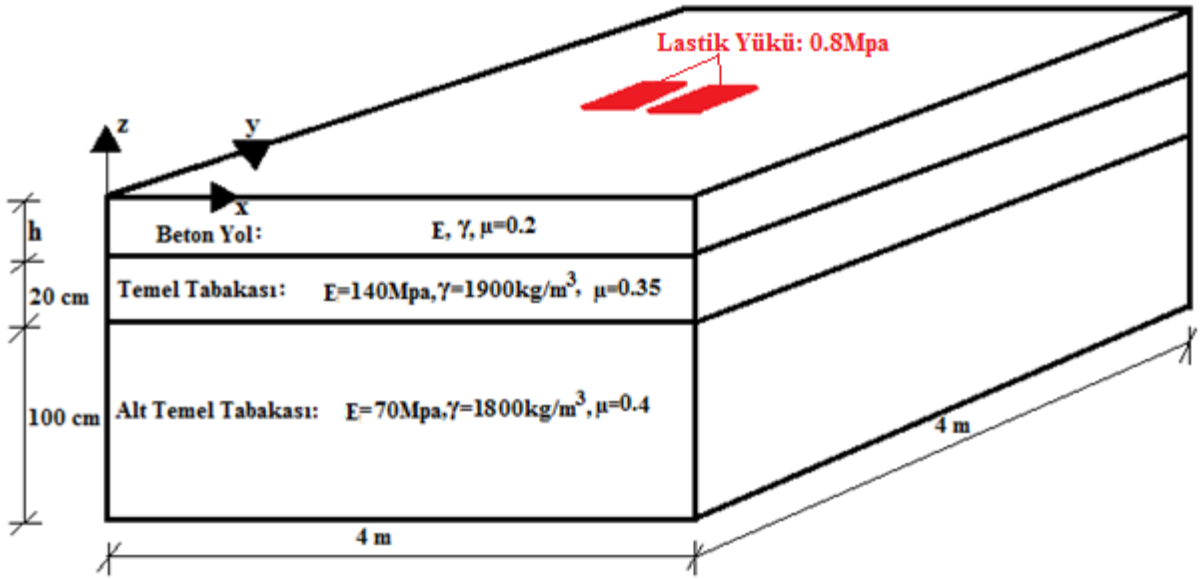
Bu çalışmada beton yolların gerilme analizleri ANSYS 13 programı yardımıyla yapılmıştır. Program girdisi olarak; tüm yollar, temel ve alt temel boyutları 4mx4m, farklı beton yol kalınlıkları 15 cm, 20 cm ve 25 cm, farklı beton sınıfları C20, C25 ve C30, tüm betonlar için poisson oranı 0.2, temel ve alt temel için poisson oranı sırasıyla 0.35 ve 0.4, temel ve alt temel tabakasının kalınlıkları sırasıyla 20 cm ve 100 cm, C20 ve C25 betonunun birim hacim ağırlıkları  $2450 \text{ kg/m}^3$ , C30 betonunun birim hacim ağırlığı  $2550 \text{ kg/m}^3$ , temelin birim hacim ağırlığı  $1900 \text{ kg/m}^3$ , alt temelin birim hacim ağırlığı  $1800 \text{ kg/m}^3$  olarak seçilmiştir. Ayrıca tek tekerlek yükü 0.8 Mpa ve 20cmx40cm'lik dikdörtgenel bir alana etkiyen yük olarak seçilmiştir. ANSYS 13 programıyla yapılan analiz modeli Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Alt temel tabakasının dört bir tarafının hareketi sınırlandırılmış ve alt temel tabakasının alt kısmının çökmesi de engellenmiştir. Yolun tamamı beton tabaka altında 20 cm'lik bir temel tabakası ve onun altında da 100 cm'lik bir alt temel tabakası olarak programa girilmiştir. ANSYS 13 programının işleyiş diyagramı Şekil 2.2.'de verilmektedir.

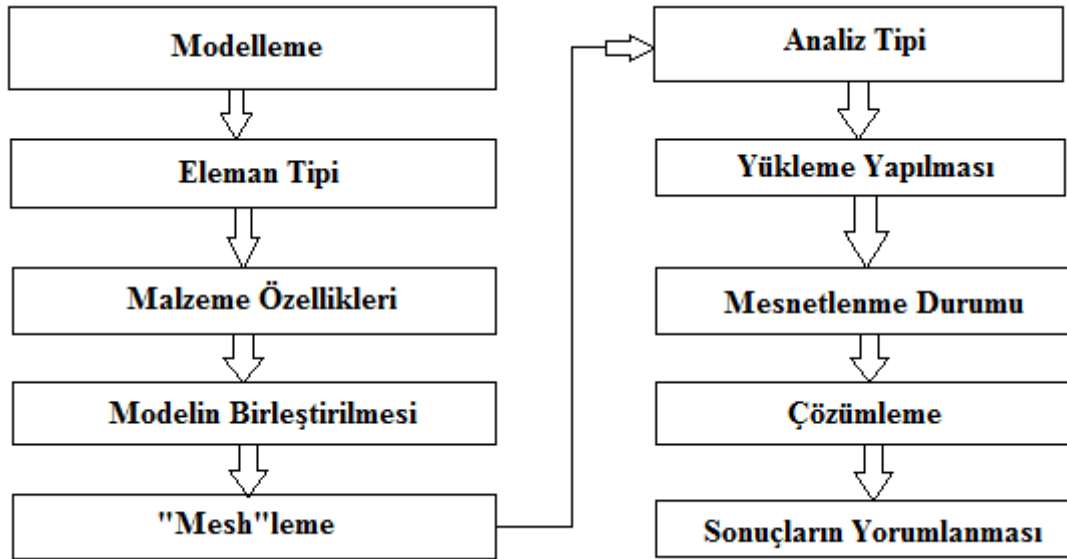
Bu analizde eleman tipi olarak SOLID186, malzeme özelliği olarak lineer elastik ve izotrop malzeme, yükleme durumu olarak tekerlek temas alanında basınç yüklemesi, mesnetleme durumu olarak alt temelim tüm kenarları ve altının ankastre mesnetlenmesi ve temel ile beton tabakanın serbest bırakılması ve çözümleme durumu olarak statik çözümleme seçilmiştir.

ANSYS 13 programında yapılan işlemlere göre yükün uygulandığı yerin tekerlek temas alanı, yol ve alt tabakalar ve yolun 40 cm arayla "mesh"lenmiş hali Şekil 2.3'te ve yolun 10 cm arayla "mesh"lenmiş hali Şekil 2.4'te görülmektedir.

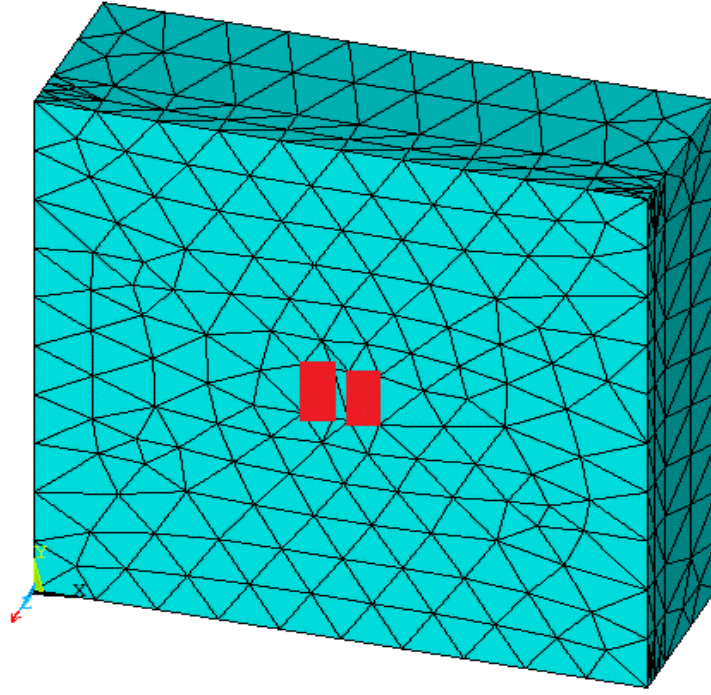
Beton yol tekerlek yüküyle yüklendiğinde meydana gelen maksimum yer değiştirmeler, tekerleğin tam altındaki kesitte meydana gelmektedir. Dolayısıyla da tekerleğin altındaki kesitin altındaki zeminde maksimum zemin şekil değiştirmesi ve yer değiştirmesi meydana gelmektedir.



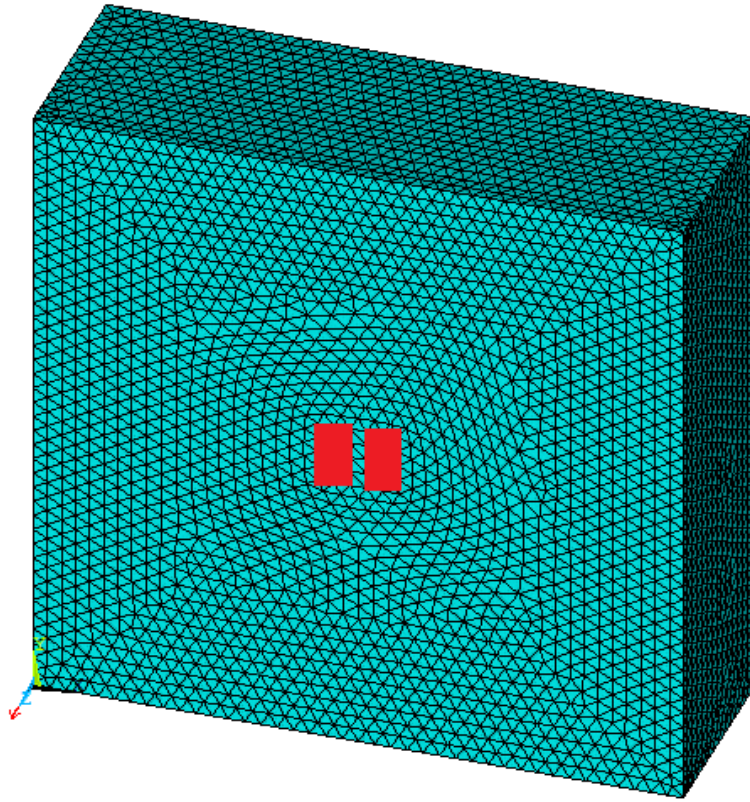
Şekil 2.1. ANSYS 13 analiz modeli



Şekil 2.2. ANSYS 13 programının işleyiş diyagramı



Şekil 2.3. Yükün uygulandığı yer, yol ve alt tabakalar ve yolun 40 cm arayla “mesh”lenmiş hali



Şekil 2.4. Yükün uygulandığı yer, yol ve alt tabakalar ve yolun 10 cm arayla “mesh”lenmiş hali

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Çalışmanın bu kısmında Sonlu elemanlar modellemesi ve Airy gerilme denklemlerinden elde edilen bulgular irdelenmiştir. ANSYS 13 programıyla yapılan analizlerde de sıcaklık faktörü göz önünde bulundurulamamıştır. Sıcaklık faktörü uzun zaman aralıklarında aynı anda verilememektedir. Airy gerilme yöntemiyle çözüm yapılırken sonsuz tane Airy gerilme denklemi seçilebilir. Airy gerilme denkleminin doğru seçilememesi, bilinmeyenlerin bulunabilmesi için yol üzerinde yeterince noktada gerilme değerlerinin bilinmemesi ve yeterince yol sınır şartlarının olmaması gibi durumlar, oluşturulan denklemin doğru sonuç vermemesine neden olmaktadır.

#### 3.1. ANSYS Sonlu Elemanlarla Gerilme Analizi

ANSYS 13 programına göre 0.8 Mpa'lık lastik yükünün yolun tam ortasına uygulanması halinde, farklı beton yol tabakalarına ve farklı beton sınıflarına göre maksimum düşey yer değiştirme değerleri 40 cm'lik "mesh"lemeye göre Tablo 3.1a'da ve 10 cm'lik "mesh"lemeye göre Tablo 3.1b'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1a. Farklı beton yol tabakaları ve beton sınıflarına göre maksimum düşey yer değiştirmeler (mm), 40 cm'lik "mesh"lemeye göre

Maksimum Düşey Yer Değiştirmeler (mm)		Beton Sınıfları		
		C20	C25	C30
Beton Yol Kalınlıkları (cm)	15	0.600	0.590	0.582
	20	0.469	0.458	0.450
	25	0.389	0.381	0.375

Tablo 3.1b. Farklı beton yol tabakaları ve beton sınıflarına göre maksimum düşey yer değiştirmeler (mm), 10 cm'lik "mesh"lemeye göre

Maksimum Düşey Yer Değiştirmeler (mm)		Beton Sınıfları		
		C20	C25	C30
Beton Yol Kalınlıkları (cm)	15	0.597	0.584	0.571
	20	0.462	0.451	0.442
	25	0.386	0.378	0.370

Tablolardan görüldüğü üzere beton kalınlığı artırıldığında veya beton kalitesi artırıldığında aynı yük altında maksimum yer değiştirmeler azalmaktadır. Ayrıca beton sınıfını bir üst sınıf seçildiğinde yer değiştirmede yaklaşık %1.67'lik bir azalma meydana gelirken, tabaka kalınlığı 5 cm artırıldığında yaklaşık %16.7'lik bir azalma meydana gelmektedir. Ayrıca “mesh” aralığı azaltıldığında yer değiştirmeler de azalmaktadır ve daha hassas bir çözüm elde edilmektedir.

Yukarıdaki şartlar altında yapılan gerilme analizlerinde, 40 cm'lik “mesh”lemeye göre x doğrultusunda yol altında meydana gelen gerilme dağılışı Şekil 3.1a'da, yol üzerinde meydana gelen gerilmeler Şekil 3.2a'da ve y doğrultusunda yol altında meydana gelen gerilmeler Şekil 3.3a'da, yol üzerinde meydana gelen gerilmeler Şekil 3.4a'da gösterilmektedir.

Benzer şekilde yapılan gerilme analizlerinde, 10 cm'lik “mesh”lemeye göre x doğrultusunda yol altında meydana gelen gerilme dağılışı Şekil 3.1b'de, yol üzerinde meydana gelen gerilmeler Şekil 3.2b'de ve y doğrultusunda yol altında meydana gelen gerilmeler Şekil 3.3b'de, yol üzerinde meydana gelen gerilmeler Şekil 3.4b'de gösterilmektedir.

Yapılan çalışmalarda elde edilen tüm gerilmelerin değerlendirilmesi, farklı beton sınıflarına ve beton yol kalınlıklarına göre ve 40 cm'lik “mesh”lemeye göre Tablo 3.2a'da ve 10 cm'lik “mesh”lemeye göre Tablo 3.2b'de karşılaştırılmıştır. Diğer şekiller Ekte sunulmuştur. Grafiklerdeki  $s$ ,  $s_x$  ve  $s_y$  sırasıyla aşağıdaki gibidir;

$s$ : gerilmelerin alındığı yüzeyden geçen düz çizgi,

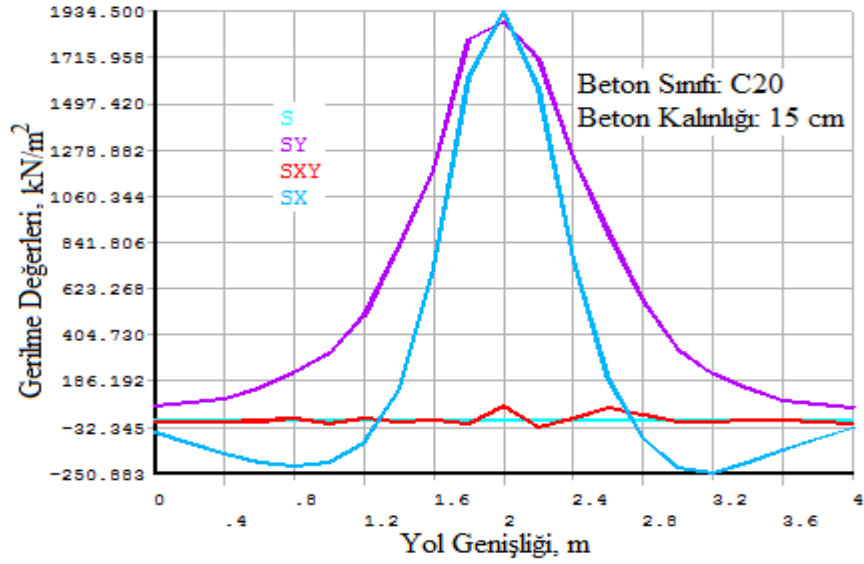
$s_x$ : x doğrultusundaki gerilme,

$s_y$ : y doğrultusundaki gerilme.

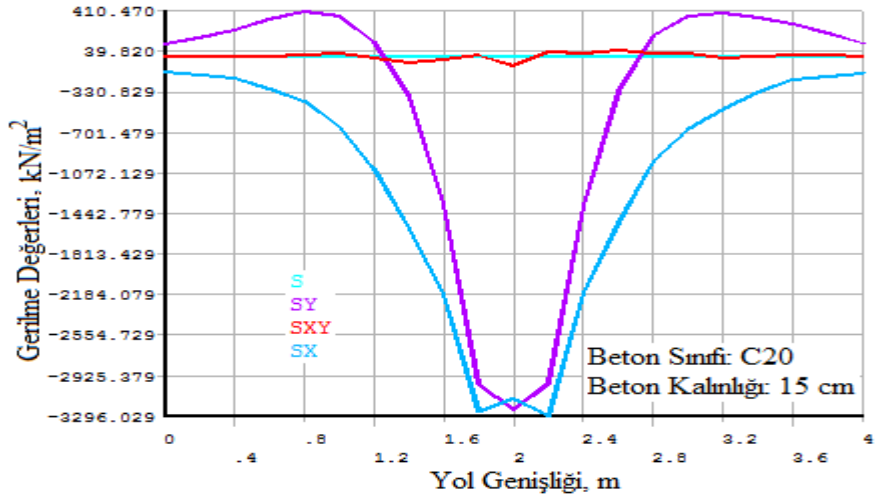
Burada, x doğrultusu hareket yönüne dik doğrultudur ve y doğrultusu da hareket yönüne paralel doğrultudur.

Tablo 3.2a'dan ve de Tablo 3.2b'den görüleceği üzere 15 cm'lik beton yolların altında meydana gelen çekme gerilmelerini hiçbir beton sınıfı taşıyamamaktadır. Ayrıca tablolardan açıkça görülüyor ki yükten dolayı meydana gelen basınç gerilmelerini beton yol çok rahat taşıyabilirken, beton altında meydana gelen çekme gerilmelerini taşımakta zorlanmaktadır. Ayrıca analizlerden de anlaşıldığı üzere mesh aralığı azaltıldığında gerilme değerleri değişmektedir ve daha hassas çözümler elde edilmektedir. Beton sınıfları ve mekanik özellikleri Tablo 3.3'te verilmektedir.

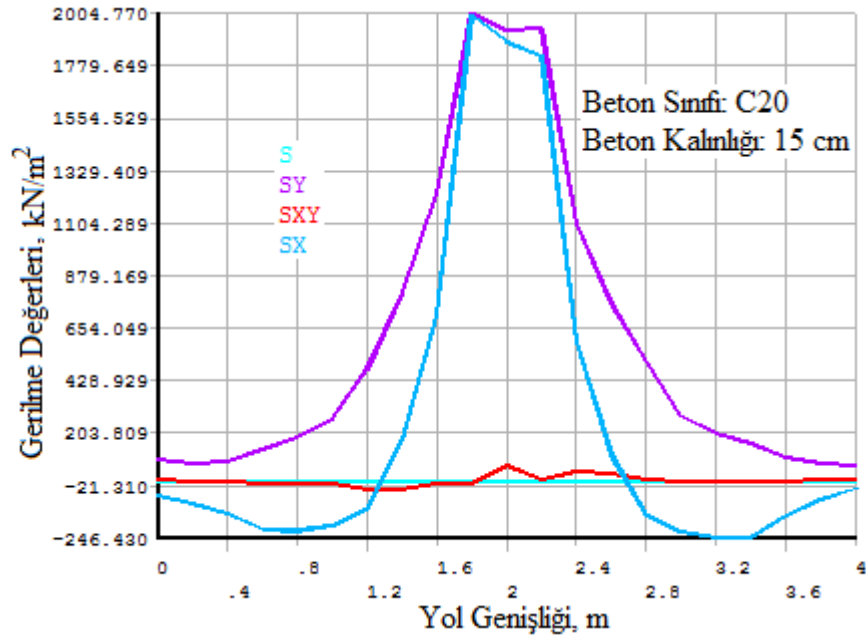
x ve y doğrultusundaki gerilmeler yukarıdaki gibidir. z doğrultusundaki gerilmelerin azalışı 40 cm'lik "mesh"lemeye göre Şekil 3.5a'daki, 10 cm'lik "mesh"lemeye göre Şekil 3.5b'deki gibidir. Diğer şekiller ekte sunulmuştur. Şekil 3.5a'da 40 cm'lik "mesh"lemeye göre ve Şekil 3.5b'de de 10 cm'lik "mesh"lemeye göre örnek olarak 15 cm kalınlığında C20 betonunda meydana gelen gerilmeler gösterilmiştir. Temel kalınlığının 20 cm ve alt temel tabakasının 100 cm olduğu beton yollar için z doğrultusundaki gerilmeler, 40 cm'lik "mesh"lemeye göre Tablo 3.4a'da 10 cm'lik "mesh"lemeye göre Tablo 3.4b'de görülmektedir.



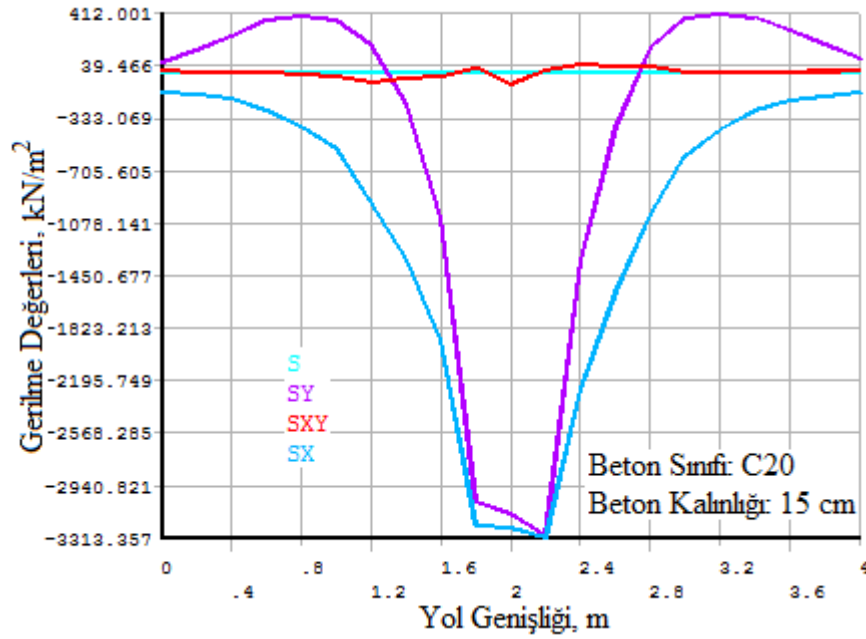
Şekil 3.1a. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x = s_x$ ) (40 cm'lik "mesh"lemeye göre)



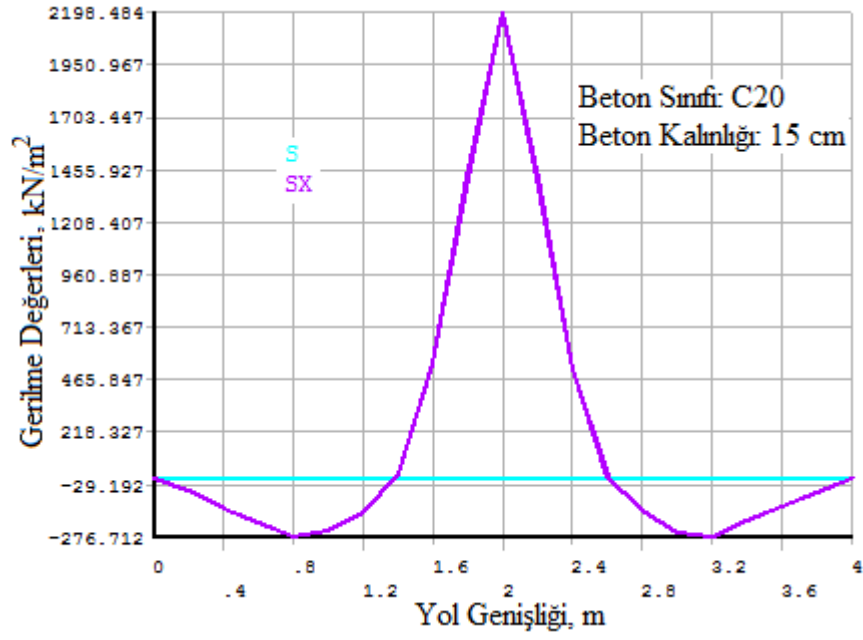
Şekil 3.2a. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x = s_x$ ) (40 cm'lik "mesh"lemeye göre)



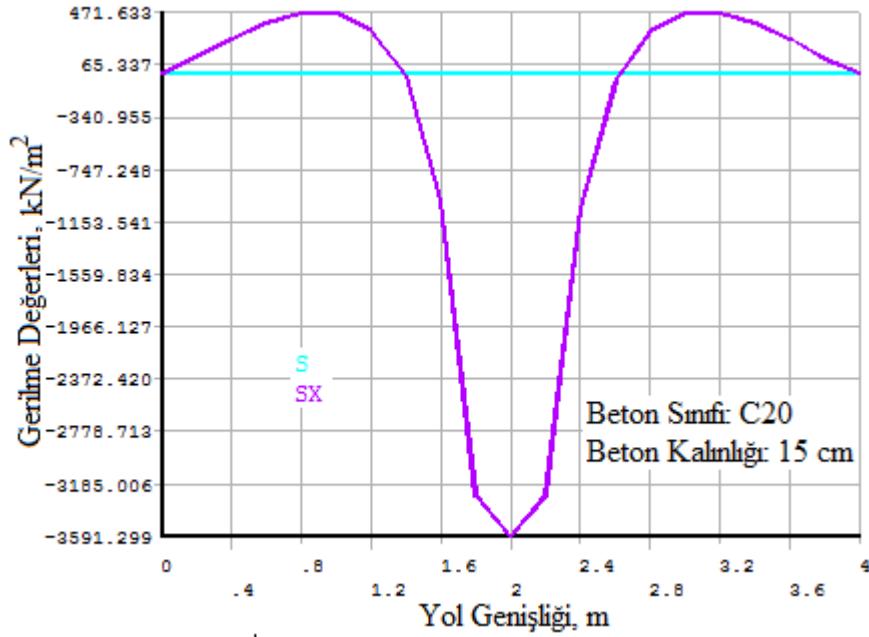
Şekil 3.3a. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y = s_y$ ) (40 cm'lik "mesh"lemeye göre)



Şekil 3.4a. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y = s_y$ ) (40 cm'lik "mesh"lemeye göre)

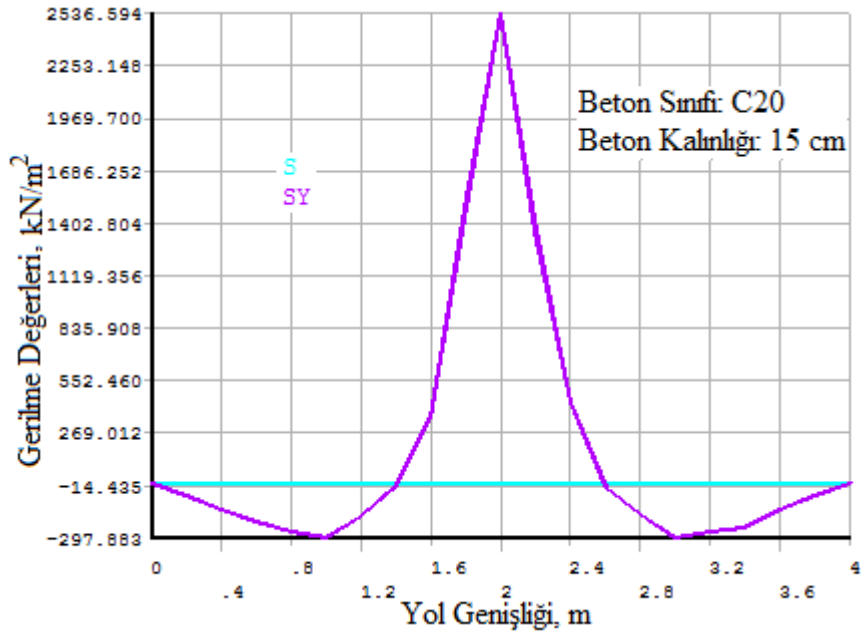


Şekil 3.1b. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ) (10 cm'lik "mesh"lemeye göre)

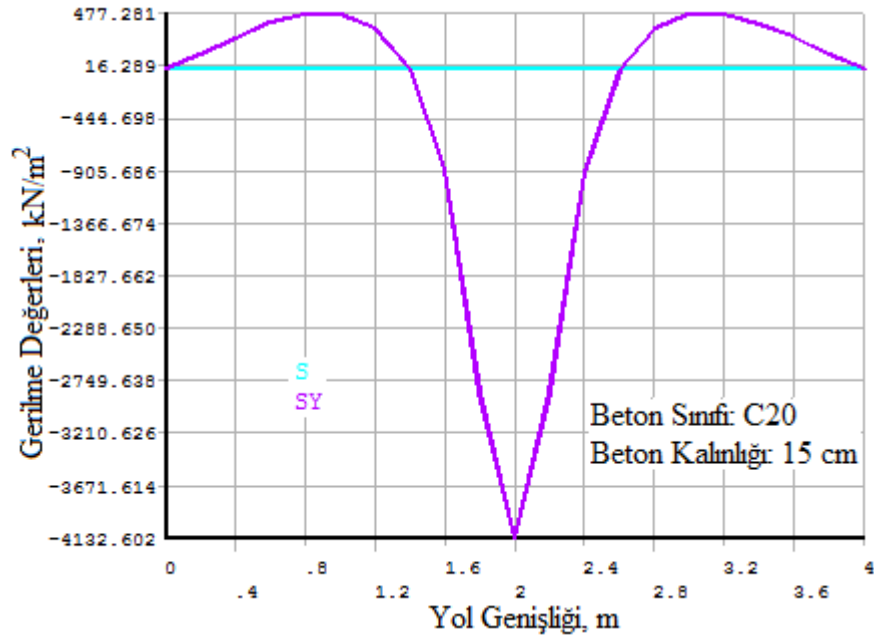


Şekil 3.2b. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ ) (10 cm'lik "mesh"lemeye göre)





Şekil 3.3b. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y = s_y$ ) (10 cm'lik "mesh"lemeye göre)



Şekil 3.4b. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y = s_y$ ) (10 cm'lik "mesh"lemeye göre)

Tablo 3.2a. Gerilmelerin karşılaştırılması (40 cm'lik “mesh”lemeye göre)

Beton Sınıfı	Yol Kalınlığı (m)	Doğrultu	Maksimum Gerilme	Yol Yüzeyi (Mpa)	Yol Alt Yüzeyi (Mpa)	Betonun Çekme Dayanımı (Mpa)
C20/25	0.15	x doğrultusu	Çekme	0.410	<b>1.934</b>	1.6
			Basınç	3.296	0.250	
		y doğrultusu	Çekme	0.412	<b>2.004</b>	
			Basınç	3.313	0.246	
	0.20	x doğrultusu	Çekme	0.184	1.323	
			Basınç	2.334	0.119	
		y doğrultusu	Çekme	0.200	1.370	
			Basınç	2.336	0.127	
	0.25	x doğrultusu	Çekme	0.077	1.046	
			Basınç	1.778	0.049	
		y doğrultusu	Çekme	0.090	1.053	
			Basınç	1.740	0.059	
C25/30	0.15	x doğrultusu	Çekme	0.409	<b>1.976</b>	1.8
			Basınç	3.358	0.250	
		y doğrultusu	Çekme	0.409	<b>2.048</b>	
			Basınç	3.378	0.245	
	0.20	x doğrultusu	Çekme	0.177	1.347	
			Basınç	2.372	0.115	
		y doğrultusu	Çekme	0.196	1.394	
			Basınç	2.374	0.124	
	0.25	x doğrultusu	Çekme	0.074	1.062	
			Basınç	1.802	0.046	
		y doğrultusu	Çekme	0.088	1.070	
			Basınç	1.764	0.056	
C30/37	0.15	x doğrultusu	Çekme	0.407	<b>2.015</b>	1.9
			Basınç	3.417	0.249	
		y doğrultusu	Çekme	0.407	<b>2.088</b>	
			Basınç	3.439	0.244	
	0.20	x doğrultusu	Çekme	0.169	1.369	
			Basınç	2.406	0.111	
		y doğrultusu	Çekme	0.191	1.417	
			Basınç	2.410	0.121	
	0.25	x doğrultusu	Çekme	0.071	1.077	
			Basınç	1.824	0.044	
		y doğrultusu	Çekme	0.083	1.085	
			Basınç	1.786	0.053	

Burada, x doğrultusu hareket yönüne dik doğrultudur ve y doğrultusu da hareket yönüne paralel doğrultudur.

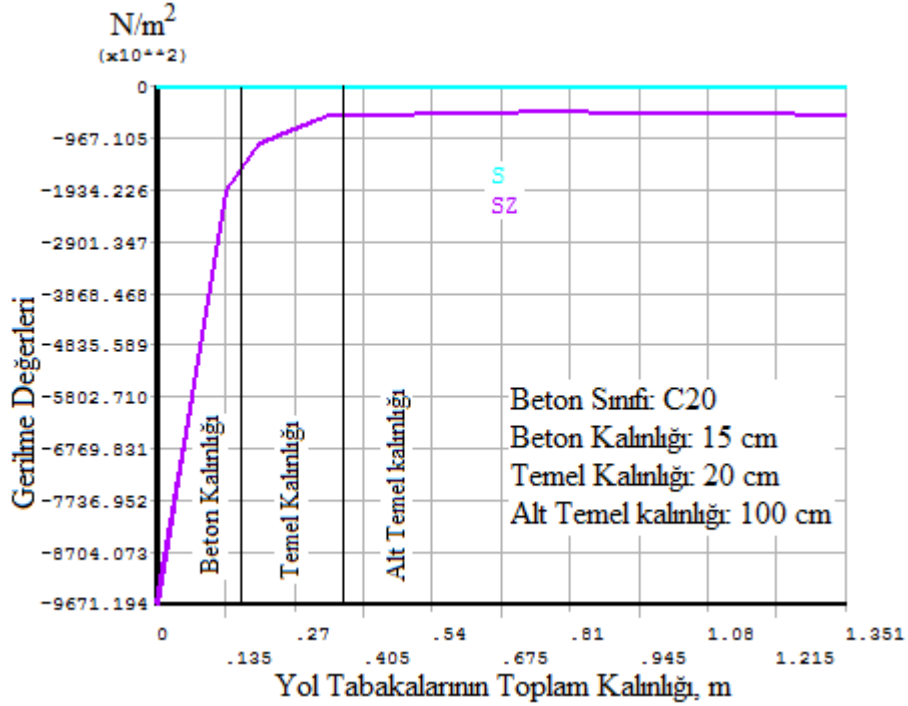
Tablo 3.2b. Gerilmelerin karşılaştırılması (10 cm'lik "mesh"lemeye göre)

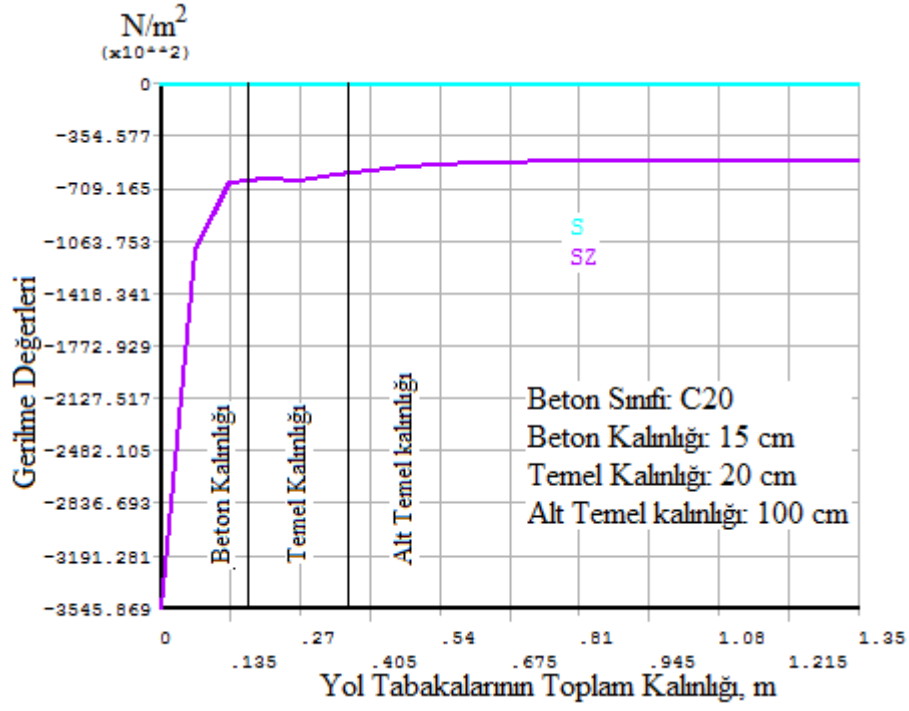
Beton Sınıfı	Yol Kalınlığı (m)	Doğrultu	Maksimum Gerilme	Yol Yüzeyi (Mpa)	Yol Alt Yüzeyi (Mpa)	Betonun Çekme Dayanımı (Mpa)
C20/25	0.15	x doğrultusu	Çekme	0.471	<b>2.198</b>	1.6
			Basınç	3.591	0.276	
		y doğrultusu	Çekme	0.477	<b>2.536</b>	
			Basınç	4.132	0.297	
	0.20	x doğrultusu	Çekme	0.222	1.233	
			Basınç	2.511	0.145	
		y doğrultusu	Çekme	0.223	1.383	
			Basınç	2.826	0.121	
	0.25	x doğrultusu	Çekme	0.103	0.933	
			Basınç	1.842	0.062	
		y doğrultusu	Çekme	0.103	1.192	
			Basınç	2.038	0.055	
C25/30	0.15	x doğrultusu	Çekme	0.471	<b>2.242</b>	1.8
			Basınç	3.657	0.277	
		y doğrultusu	Çekme	0.471	<b>2.581</b>	
			Basınç	4.200	0.294	
	0.20	x doğrultusu	Çekme	0.215	1.254	
			Basınç	2.549	0.141	
		y doğrultusu	Çekme	0.216	1.404	
			Basınç	2.865	0.117	
	0.25	x doğrultusu	Çekme	0.099	1.106	
			Basınç	1.867	0.056	
		y doğrultusu	Çekme	0.099	1.208	
			Basınç	2.063	0.053	
C30/37	0.15	x doğrultusu	Çekme	0.471	<b>2.283</b>	1.9
			Basınç	3.719	0.277	
		y doğrultusu	Çekme	0.470	<b>2.623</b>	
			Basınç	4.263	0.291	
	0.20	x doğrultusu	Çekme	0.206	1.273	
			Basınç	2.518	0.136	
		y doğrultusu	Çekme	0.209	1.424	
			Basınç	2.902	0.114	
	0.25	x doğrultusu	Çekme	0.095	1.121	
			Basınç	1.890	0.054	
		y doğrultusu	Çekme	0.095	1.223	
			Basınç	2.086	0.051	

Tablo 3.3. Beton sınıfları ve mekanik özellikleri

Beton Sınıfı	Karakteristik Dayanım (Mpa)		Tasarım Dayanımı (MPa)		Eşdeğer Küp (150 mm) Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Elastisite Modülü (Mpa) $E_c$	$k_1$
	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme			
	$f_{ck}$	$f_{ctk}$	$f_{cd}$	$f_{ctd}$			
C14	14	1.3	9.3	0.87	16	26150	0.85
C16	16	1.4	10.7	0.93	20	27000	0.85
C18	18	1.5	12.0	1.00	22	27500	0.85
C20	20	1.6	13.3	1.04	25	28000	0.85
C25	25	1.8	16.7	1.17	30	30000	0.85
C30	30	1.9	20.0	1.28	37	32000	0.82
C35	35	2.1	23.3	1.38	45	33000	0.79
C40	40	2.2	26.7	1.48	50	34000	0.76
C45	45	2.3	30.0	1.57	55	36000	0.73
C50	50	2.5	33.3	1.65	60	37000	0.70

Poisson Oranı: 0.20  
Kayma Modülü: 0.40  $E_c$   
Isıl Genleşme Katsayısı:  $10^{-5}/^{\circ}C$

Şekil 3.5a. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ) (40 cm'lik "mesh"lemeye göre)



Şekil 3.5b. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ ) (10 cm'lik "mesh"lemeye göre)

Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b'deki s ve sz sırasıyla aşağıdaki gibidir;

s: yükün uygulandığı yerin merkezinden alt temel altına kadar geçen dik çizgi,

sz: z doğrultusundaki gerilme.

Tablo 3.4a. z doğrultusunda meydana gelen basınç gerilmeleri (40 cm'lik "mesh"lemeye göre)

Beton Sınıfı	Yol Kalınlığı (m)	Yol Yüzeyi (MPa)	Yol Alt Yüzeyi (MPa)	Temel Alt Yüzeyi (MPa)
C20/25	0.15	0.97	0.17	0.04
	0.20	1.04	0.09	0.05
	0.25	0.99	0.09	0.04
C25/30	0.15	0.97	0.17	0.04
	0.20	1.04	0.09	0.05
	0.25	0.99	0.09	0.04
C30/37	0.15	0.97	0.17	0.04
	0.20	1.04	0.09	0.05
	0.25	0.99	0.09	0.04

Tablo 3.4b. z doğrultusunda meydana gelen basınç gerilmeleri (10 cm'lik "mesh"lemeye göre)

<b>Beton Sınıfı</b>	<b>Yol Kalınlığı (m)</b>	<b>Yol Yüzeyi (MPa)</b>	<b>Yol Alt Yüzeyi (MPa)</b>	<b>Temel Alt Yüzeyi (MPa)</b>
<b>C20/25</b>	0.15	0.35	0.06	0.05
	0.20	0.43	0.06	0.05
	0.25	0.40	0.06	0.05
<b>C25/30</b>	0.15	0.35	0.06	0.05
	0.20	0.43	0.06	0.05
	0.25	0.40	0.06	0.05
<b>C30/37</b>	0.15	0.35	0.06	0.05
	0.20	0.43	0.06	0.05
	0.25	0.40	0.06	0.05

Tablo 3.4a ve Tablo 3.4b'den görüldüğü üzere yolun beton sınıfının C20, C25 veya C30 ve yol kalınlığının 15 cm, 20 cm veya 25 cm olması halinde tekerlek yükünden doğan düşey basınç gerilmeleri yolun aynı noktalarında yaklaşık olarak aynı değerlerde olmaktadır. Buradan beton, basınç gerilmesi altında sınıfı ne olursa olsun aynı karakteristik özelliği gösterdiği çıkarılabilir. Fakat beton yol içinde oluşan çekme gerilmeleri, farklı beton sınıfları ve kalınlıklarda farklı olduğu Tablo 3.2a'da ve Tablo 3.2b'de görülmektedir. 15 cm'lik beton plaklarda meydana gelen çekme gerilmelerini, hesaplarda kullanılan C20, C25 ve C30 sınıflarındaki beton yollar taşıyamamaktadır. 15 cm'lik bu yollarda çekme bölgesindeki gerilmeleri taşıyabilmek için hiçbir hesap yapmadan 8 mm çapında çeliklerden oluşan hasır demirinin betonun çekme bölgesine koyularak karşılanabilir.

Ayrıca ANSYS sonlu elemanlarda mesh aralığı azaltıldığında gerilmelerdeki değişim tablo ve şekillerden açıkça görülmektedir. 10 cm'lik "mesh"lemeye göre yapılan analizden elde edilen düşey gerilmeler, 40 cm'lik "mesh"lemeye göre yapılan analizlerden elde edilen gerilmelerin yaklaşık yarısı kadar olmaktadır. Bu da daha hassas bir analiz yapıldığını göstermektedir.

Ansys 13 programı yardımıyla yapılan çözümlemede;

- 15 cm kalınlığında yapılan beton yollarda beton sınıfının C20, C25 ve C30 olması halinde ve 0.8 MPa'lık tekerlek yükünden dolayı oluşan x ve y doğrultularındaki çekme gerilmelerini beton yol plağı taşıyamamaktadır.
- 15 cm'lik beton yollarda çekme bölgesindeki gerilmeleri taşıyabilmek için 8 mm çapında çeliklerden oluşan hasır demirinin betonun çekme bölgesine koyularak karşılanabilir.
- 20 cm ve 25 cm kalınlıklarında yapılan beton yollarda beton sınıfının C20, C25 ve C30 olması halinde ve 0.8 MPa'lık tekerlek yükünden dolayı oluşan x ve y doğrultularındaki çekme gerilmelerini beton yol plağı taşıyabilmektedir.
- z doğrultusunda 15 cm, 20 cm ve 25 cm kalınlıklarında ve C20, C25 ve C30 sınıfındaki beton yol plakları, meydana gelen basınç gerilmelerini taşıyabilmektedir.
- Beton plak kalınlığı artırıldığında veya beton sınıfı bir üst sınıf seçildiğinde aynı yük altında maksimum düşey yer değiştirmeler azalmaktadır.
- Beton sınıfı, bir üst sınıf seçildiğinde betonun maksimum yer değiştirmesinde yaklaşık %1.67'lik bir azalma meydana gelmektedir. Buradan bir üst sınıf betonun seçilmesinin önemsiz olduğunu çıkarabiliriz.
- Tabaka kalınlığı 5 cm artırıldığında maksimum yer değiştirmede yaklaşık %16.7'lik bir azalma meydana gelmektedir. Buradan beton plağın 5 cm artırılmasının önemli olduğu sonucunu çıkartabiliriz.

### 3.2. Matematik Yöntemlerle Gerilme Analizi

#### 3.2.1. Westergaard Yöntemine Göre Beton Yolda Gerilme Hesapları

Westergaard yöntemine göre beton plak gerilme hesaplaması aşağıdaki gibidir;

Westergaard yöntemine göre rölatif sertlik yarıçapı  $l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12K(1-\mu^2)}}$  formülüyle hesaplanır.

Burada;

E, betonun elastik modülü,

$\mu$ , betonun Poisson oranı,

h, plağın kalınlığı cm,

K, zeminin modülü  $kg/cm^3$ ,

l, cm cinsinden bulunur.

Bu bilgilere göre;

Poisson oranının ( $\mu$ ) 0.15 ve zemin modülünün (K)  $8 \text{ kg/cm}^3$  olması halinde rölatif sertlik yarıçapı (l cm) Tablo 3.5'teki gibi bulunur.

Tablo 3.5. Beton sınıfı ve plaka kalınlıklarına göre rölatif sertlik yarıçapları (l, cm)

Rölatif Sertlik Yarıçapları (cm)		Beton Sınıfı Elastisite Modülü ( $\text{kg/cm}^2$ )		
		C20 $2.8 \times 10^5$	C25 $3.0 \times 10^5$	C30 $3.2 \times 10^5$
Beton Yol Kalınlığı (cm)	15	56.33	57.31	58.25
	20	69.90	71.11	72.27
	25	82.63	84.07	85.44

K zemin modülleri, zeminin yatak katsayısı olup Tablo 3.6'da verilmiştir. [6]

Tablo 3.6. Çeşitli zeminler için yatak katsayıları

Zemin Cinsi	$K_s \text{ (kN/m}^3\text{)}$
Gevşek kum	4800-16000
Orta sıklıkta kum	9600-80000
Sıkı kum	64000-128000
Killi orta sıklıkta kum	32000-80000
Siltli orta sıklıkta kum	24000-48000
Killi Zeminler	
$q_a \leq 200 \text{ kPa}$	12000-24000
$200 < q_a \leq 800 \text{ kPa}$	24000-48000
$q_a > 800 \text{ kPa}$	>48000

Yol üzerindeki bir tekerlek yükünden dolayı yolun iç noktaları yüklendiğinde, yol kaplamasının küçük bir alanı tabakanın eğilme momentine direnç gösterir. Westergaard'a göre direnme bölgesinin eşdeğer yarıçapı şu formülle hesaplanır;

Eğer  $a < 1.724h$  ise  $b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$  aksi takdirde  $b = a$  alınır.

Burada;

a, lastik yükü dağılımının yarıçapı (cm)

h, beton yol kalınlığıdır (cm).

a lastik yükü dağılımının yarıçapı Tablo 3.7'de verilmiştir. [7]



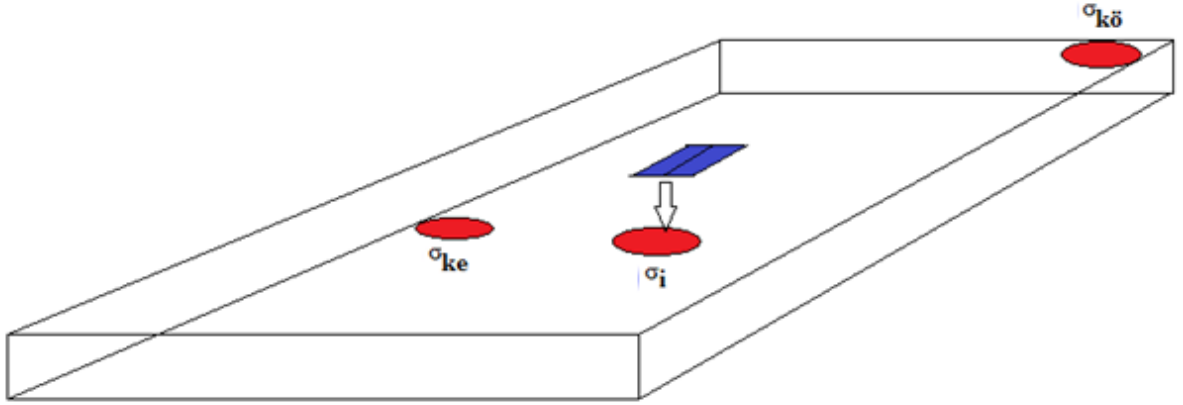
Tablo 3.7. Dingil yüklerine göre lastik yükü yarıçapları

Dingil Yüğü (ton)	Kuvvet F (kN)	Yarıçap a (m)
4	19.5	0.10
6	29.3	0.12
8	39.1	0.13
10	48.8	0.14
12	58.6	0.15
13	63.5	0.16
14	68.4	0.165
16	78.1	0.17
18	87.8	0.18

Ansys 13 programıyla yapılan çalışmada en düşük beton yol kalınlığı 15 cm'dir.  $1.724 \times 0.15 = 0.2586$  olduğundan, a lastik yükü dağılımının yarı çapı daima  $b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$  alınır.  $a = 0.17$  m seçilmiş ve b değerleri plaka kalınlığına göre Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Plaka kalınlıklarına göre b değerleri

Yol kalınlığı (cm)	15	20	25
b değerleri (cm)	14.06	18.74	23.43



Şekil 3.6. Westergaard'a göre plakta hesaplanan gerilmelerin yerleri

Westergaard Şekil 3.6'da görülen iç, kenar ve köşe bölgelerinin gerilmeleri ( $kg/cm^2$ ) için bazı denklemler geliştirmiştir. Bu denklemler aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[ 4 \log_{10} \frac{l+1.069}{b} \right]$$

$$\sigma_{ke} = \frac{0.572P}{h^2} \left[ 4 \log_{10} \frac{l+0.359}{b} \right]$$

$$\sigma_{kö} = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right]$$

Burada;

$\sigma_i$ , beton yolun tam ortasının yüklenmesiyle yolun orta kısmının alt yüzeyinde oluşan gerilmeler ( $kg/cm^2$ ),

$\sigma_{ke}$ , beton yolun kenarının yüklenmesiyle yolun kenar kısmının alt yüzeyinde oluşan gerilmeler ( $kg/cm^2$ ),

$\sigma_{kö}$ , beton yolun köşesinin yüklenmesiyle yolun köşe kısmının üst yüzeyinde oluşan gerilmeler ( $kg/cm^2$ ),

h, beton yol kalınlığı (cm),

P, lastik yükü (kg),

a, lastik yükü dağılımının yarıçapı (cm),

l, röltif sertlik yarıçapı (cm),

b, direnç alanı yarıçapıdır (cm). [5]

Bu denklemlere göre beton yollardaki gerilme değerleri, P=8 ton olması halinde aşağıdaki tablolardaki gibi olur.

Tablo 3.9. Westergaard yöntemine göre C20 betonundaki plaktaki gerilme değerleri

Beton Yol Kalınlığı (cm)	$\sigma_i$ (Mpa)	$\sigma_{ke}$ (Mpa)	$\sigma_{kö}$ (Mpa)
15	3.91	5.63	4.27
20	2.12	3.03	2.84
25	1.32	1.87	2.00

Tablo 3.10. Westergaard yöntemine göre C25 betonundaki plaktaki gerilme değerleri

Beton Yol Kalınlığı (cm)	$\sigma_i$ (Mpa)	$\sigma_{ke}$ (Mpa)	$\sigma_{kö}$ (Mpa)
15	3.94	5.70	4.33
20	2.14	3.06	2.87
25	1.33	1.89	2.03

Tablo 3.11. Westergaard yöntemine göre C30 betonundaki plaktaki gerilme değerleri

Beton Yol Kalınlığı (cm)	$\sigma_i$ (Mpa)	$\sigma_{ke}$ (Mpa)	$\sigma_{k\ddot{o}}$ (Mpa)
15	3.98	5.75	4.39
20	2.16	3.09	2.90
25	1.34	1.91	2.05

Tablolardan da görüldüğü üzere, Westergaard yöntemine göre gerilme analizinde beton yol kalınlığını artırdığımızda gerilmeler azalmaktadır.

### 3.2.2. Yol Tabakasındaki Gerilmelerin Airy Gerilme Denkleleriyle Hesabı

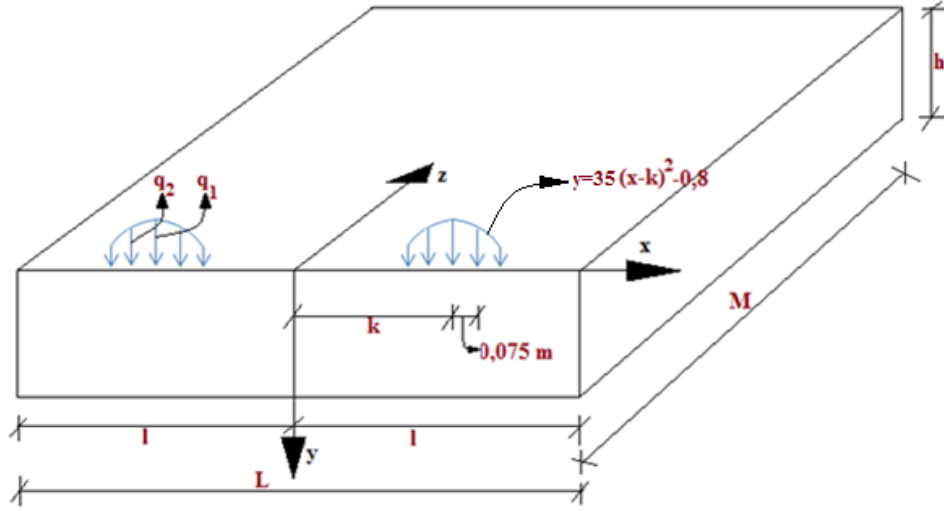
Bu bölümde, beton yolun genişlik ve yükseklik değişikliğine bağlı olarak beton yol tabakasının herhangi bir noktasındaki gerilme değişimi elde edilmeye çalışılmıştır. Buradaki gerilme denklemleri, Airy gerilme denklemleri kullanılarak çıkarılmaya çalışılmıştır. Airy gerilme denklemleri çıkarılırken uygulanacak adımlar;

- 1- x ve y değişkenlerine bağlı bir Airy gerilme denklemi seçilir. (F(x,y))
- 2- Bu denkleme biharmoniklik şartı sağlatılır. ( $\Delta\Delta F=0$  olmalıdır.)
- 3- Bu denklemden gerilme fonksiyonları elde edilir. ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  ve  $\tau_{xy}$ )
- 4- Çözülecek olan problemin sınır şartları çıkartılır.
- 5- Bu sınır şartlarına göre gerilme fonksiyonlarındaki bilinmeyenler hesaplanır.

Gerilme denklemleri çıkarıldıktan sonra, denklemdeki x ve y değişkenine ve denklem çıkarılırken kullanılan boyut değişkenlerine (h; yol tabakası yüksekliği ve l; yol genişliği) göre istediğimiz noktadaki gerilme değerlerini elde edebiliriz.

Airy gerilme denklemleriyle hesaplanan gerilmelerde en önemli şey, gerilme fonksiyonunun uygun seçilmesidir. Eğer gerilme fonksiyonu uygun seçilmezse, farklı ve yanlış değerlere ulaşılabilir. Bu durumda istediğimiz sonucu alamamış oluruz.

Yapmış olduğum çalışmada beton yol bilgileri Şekil 3.7’de görülmektedir. Lastik yükü değişim eğrisi y, lastik merkezinin yolun merkezinden uzaklığı k, yol tabaka kalınlığı h, yol genişliği L, yol uzunluğu M ve x, y, z doğrultuları şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Beton yol bilgilerinin gösterilmesi

### 3.2.2.1. Airy Gerilme Denkleminin Yola Uygulanması

Yukarıda bahsedilen adımlar neticesinde elde edilen gerilme denklemleri aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

Seçilen Airy gerilme denklemi:

$$F(x,y)=Ax^2+By^2+D(6x^2y^2-y^4-x^4)+C(5x^3y^2+5y^3x^2-x^5-y^5)+F(x^3+y^3)-Jy^2x$$

$$\Delta\Delta F = \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \text{ olmalıdır.}$$

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} = -24D - 120Cx, \quad \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = -24D - 120Cy,$$

$$2\frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} = 2x(24D + 60Cx + 60Cy) = 48D + 120C(x+y),$$

$$\Delta\Delta F = 0 \text{ sağladı.}$$

Burada;

A, B, D, C, F ve J sınır şartlarına bağlı olarak bulunacak katsayılar, x ve y yolun merkezine yerleştirilen koordinat sisteminin koordinatlarıdır.

Airy gerilme denkleminde göre gerilmeler:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 2B + 12D(x^2 - y^2) + 10C(x^3 + 3yx^2 - 2y^3) + 6Fy - 2Jx,$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 2A + 12D(y^2 - x^2) + 10C(y^3 + 3xy^2 - 2x^3) + 6Fx,$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -24Dxy - 30C(x^2y - y^2x) + 2Jy \text{ olarak bulunur.}$$

Burada;

$\sigma_x$ , x doğrultusundaki gerilme (Mpa),

$\sigma_y$ , y doğrultusundaki gerilme (Mpa),

$\tau_{xy}$ , yolda x-y alanı içinde oluşan kayma gerilmesi (Mpa).

Sınır şartları;

1-  $x=l, y=0$ 'da  $\sigma_x=0, \sigma_y=0$  ve  $\tau_{xy}=0$

2-  $x=l, y=h$ 'de  $\sigma_x=0$  ve  $\tau_{xy}=0$

3-  $x=k, y=0$ 'da,  $\sigma_y=q_1=0.8$

4-  $x=k+0.075, y=0$ 'da,  $\sigma_y=q_2=0.6$

Burada k, araç dingilinin ortasından tekerlek yükünün ortasına kadar olan mesafedir.

Bu şartlardan elde edilen denklemler şöyledir;

$$2B+12Dl^2+10Cl^3-2Jl=0 \dots\dots\dots (a)$$

$$2A-12Dl^2-20Cl^3+6Fl=0 \dots\dots\dots (b)$$

$$2B+12D(l^2-h^2)+10C(l^3+3hl^2-2h^3)+6Fh-2Jl=0 \dots\dots\dots (c)$$

$$-24Dlh-30C(l^2h-h^2l)+2Jh=0 \dots\dots\dots (d)$$

$$2A-12Dk^2-20Ck^3+6Fk=q_1 \dots\dots\dots (e)$$

$$2A-12D(k+0.075)^2-20C(k+0.075)^3+6F(k+0.075)=q_2 \dots\dots\dots (f)$$

Bu denklemler matris formatında yazılırsa;

$$\begin{array}{cccccc} 2A+0 & -12D(k+0.075)^2 & -20C(k+0.075)^3 & +6F(k+0.075) & +0 & =q_2 \\ 0 & +2B+12D(l^2-h^2) & +10C(l^3+3hl^2-2h^3)+6Fh & & -2Jl & =0 \\ 0 & +0 & +24Dlh & -30C(l^2h-h^2l) & +0 & +2Jh=0 \\ 2A+0 & -12Dl^2 & -20Cl^3 & +6Fl & +0 & =0 \\ 0 & +2B+12Dl^2 & +10Cl^3 & +0 & -2Jl & =0 \\ 2A+0 & -12Dk^2 & -20Ck^3 & +6Fk & +0 & =q_1 \end{array}$$

Bu matrisin çözümünden katsayılar şöyle bulunur;

$$A = \frac{q_2}{2} - 3F(k+0.075) + 10C(k+0.075)^3 + 6D(k+0.075)^2,$$

$$B = Jl - 3Fh - 5C(l^3 + 3hl^2 - 2h^3) - 6D(l^2 - h^2),$$

$$D = \frac{J - 15C(l^2 - hl)}{12l},$$

$$C = \frac{6F(k+0.075-l) - J \left( \frac{(k+0.075)^2 - l^2}{l} \right) - q_2}{5t},$$

Burada;

$$t = 4(k + 0.075)^3 + 3h(k + 0.075)^2 - 3hl^2 - 3l(k + 0.075)^2 - l^3, \text{ dir.}$$

$$F = \frac{\frac{q_2 b}{t} - J\zeta}{6s},$$

Burada;

$$\zeta = \frac{h^2}{l} - \frac{((k+0.075)^2 - l^2)b}{lt},$$

$$s = \frac{(k+0.075-l)b}{t} - h, \quad b = 7h^3 - 3lh^2 - 6hl^2, \text{ dir.}$$

$$J = \frac{\frac{q_2 r}{t} + q_1 - \frac{q_2 b w}{ts}}{z - \frac{\zeta w}{s}} \text{ 'dir.}$$

Burada;

$$r = l^3 + 3hl^2 - 3hk^2 + 3lk^2 - 4k^3,$$

$$w = \frac{(k+0.075-l)r}{t} - (1-k),$$

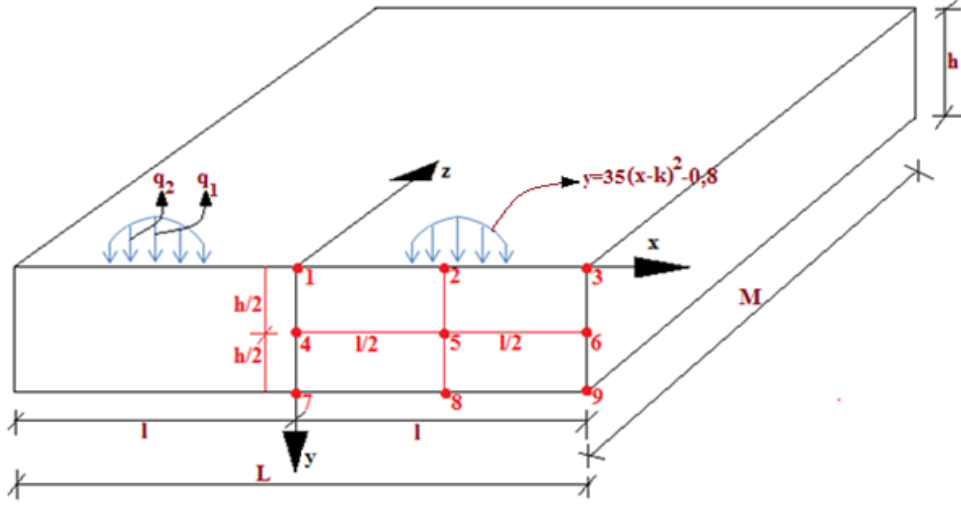
$$z = \frac{l^2 - k^2}{l} - \frac{((k+0.075)^2 - l^2)r}{lt} \text{ olur.}$$

Tüm bilinmeyenler aşağıdaki denklemlerde yerine koyularak gerilme değerleri kolaylıkla bulunabilir.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 2B + 12D(x^2 - y^2) + 10C(x^3 + 3yx^2 - 2y^3) + 6Fy - 2Jx,$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 2A + 12D(y^2 - x^2) + 10C(y^3 + 3xy^2 - 2x^3) + 6Fx,$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -24Dxy - 30C(x^2y - y^2x) + 2Jy$$



Şekil 3.8. Hesaplanan gerilmelerin yolun farklı noktalarındaki yerleri

Şekil 3.8’de yolun farklı noktalarında meydana gelen gerilmelerin yerleri gösterilmektedir. Yukarıda bulunan gerilme denklemlerine göre yolun farklı noktalarındaki gerilme değerleri  $k=1.1$  m,  $l=2$  m,  $q_2=0.6$  MPa ve  $q_1=0.8$  MPa olması halinde farklı kalınlıklardaki beton yolların farklı noktalarındaki gerilmeler aşağıdaki tablolarda verilmektedir.

Tablo 3.12.  $h=0.25$  metre olması halinde oluşan gerilmeler

Noktalar	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
1	-72.65	22.13	0
2	-17.40	1.21	0
3	0	0	0
4	-77.59	21.70	-10.03
5	-21.21	0.92	-4.02
6	-0.40	-0.15	-0.28
7	-81.72	20.43	-20.03
8	-24.20	-0.07	-7.76
9	0	-0.57	0

Tablo 3.13. h= 0.2 metre olması halinde oluşan gerilmeler

Noktalar	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
1	-84.22	25.49	0
2	-19.59	1.23	0
3	0	0	0
4	-88.94	25.16	-9.45
5	-23.20	1.01	-3.73
6	-0.31	-0.11	-0.22
7	-93.02	24.18	-18.89
8	-26.19	-0.36	-7.25
9	0	-0.43	0

Tablo 3.14. h= 0.15 metre olması halinde oluşan gerilmeler

Noktalar	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
1	-101,96	30,65	0
2	-22.92	1.27	0
3	0	0	0
4	-106,39	30,41	-8.73
5	-26.30	1.11	-3.39
6	-0.22	-0.08	-0.16
7	-110.36	29.72	-17.46
8	-29.22	0.65	-6.63
9	0	-0.30	0

Sonuç olarak yukarıdaki tablolardaki gerilmelere bakıldığında -72,65 MPa, -84,22 Mpa ve -101,96 MPa gibi çok yüksek olan gerilme değerlerinin olduğu açıkça görülmektedir. Westergaard yöntemiyle hesaplanan 3,91 MPa, 3,94 MPa ve 3,98 Mpa değerlerindeki gerilmelerle karşılaştırıldığında (Tablo 3.9, Tablo 3.10 ve Tablo 3.11), burada bulunan gerilmelerin yüksek olduğu görülmüştür, bu yüzden gerçeği yansıtmadığı açıkça görülmektedir. Buradan seçilen Airy gerilme denkleminin yanlış olduğu sonucuna varılabilir. Bilindiği üzere sonsuz tane gerilme denklemi seçilebilir. Farklı bir gerilme denklemi seçilmelidir ya da denklem üzerinde düzeltme yapılması zorunludur. ANSYS 13 programından elde edilen gerilme değerleri Tablo 3.15'te görülmektedir. Bu gerilme değerlerinin de hesaplanan gerilme değerlerinden farklı olduğu görülmektedir.



Tablo 3.15. ANSYS 13 programıyla hesaplanan gerilmelerin C20 sınıfı beton ve 15 cm'lik beton yolun matematiksel yöntemle aynı noktadaki gerilme değerleri

Noktalar	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_z$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
1	-0,150	-0,350	$\cong 0$
2	-3,196	-0,150	$\cong 0$
3	-0,150	-0,150	$\cong 0$
7	-0,035	-0,070	$\cong 0$
8	1,934	-0,150	$\cong 0$
9	-0,035	-0,150	$\cong 0$

### 3.2.2.2. Katsayı Düzeltmesiyle Gerilmelerin Düzeltilmesi

Seçilen Airy gerilme denkleminde bakıldığında x ve y değişkenlerinin üslerinde farklılık olduğu görülmektedir. Aynı şekilde x ile y değişkenlerinin üsleri toplamının da farklı olduğu görülmektedir. Her bir kat sayı yanındaki x ve y değişkenlerinin üsleri toplamının, o kat sayıya bölünmesiyle oluşan düzeltme sonrasında gerilmelerin gerçeğe biraz daha yaklaştığı görülmektedir. Örnek olarak;

$D(6x^2y^2 - y^4 - x^4)$  şeklinde görünen bir D katsayısı, matris çözümüyle hesaplandıktan sonra  $\frac{D}{2+2 \text{ veya } 4+0}$  olarak değiştirilmiştir. Burada, 2+2 veya 4+0 x ve y'nin üsleri toplamıdır.

Düzeltilmelerden sonra Airy gerilme denkleminde göre gerilmeler:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = B + 3D(x^2 - y^2) + 2C(x^3 + 3yx^2 - 2y^3) + 2Fy - \frac{2}{3}Jx$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = A + 3D(y^2 - x^2) + 2C(y^3 + 3xy^2 - 2x^3) + 2Fx$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -6Dxy - 6C(x^2y - y^2x) + \frac{2}{3}Jy \text{ olarak bulunur.}$$

Bu düzeltilmelerden sonra yolun çeşitli noktalarındaki gerilme değerleri aşağıdaki tablolarda verilmektedir. Şekil 3.8'de gösterilen ve Tablo 3.12, Tablo 3.13 ve Tablo 3.14'deki gerilme değerlerinin düzeltilmiş halleri Tablo 3.16, Tablo 3.17 ve Tablo 3.18'de verilmiştir.

Tablolardaki -24,85 Mpa, -29,27 MPa ve -36,06 MPa gibi gerilme değerleri, Westergaard yöntemiyle hesaplanan 3,91 MPa, 3,94 MPa ve 3,98 Mpa değerlerindeki

gerilmelerle karşılaştırıldığında, görülmüştür ki düzeltme katsayılarıyla birlikte bulunan yeni gerilme değerleri de istenilen gerilme değerlerinden uzaktır. Bunun nedeni seçilen gerilme denkleminin gerçeği yansıtmayıdır. Ayrıca yapılan düzeltmeler de gerilmeleri istenilen düzeye indirilememiştir.

Matematik yöntemlerle gerilme analizleri göstermiştir ki;

- Airy gerilme denklemi yardımıyla yapılan çözümlemede sonsuz tane gerilme denklemi seçilebilmektedir. Bu da doğru Airy gerilme denkleminin seçilmesini güçleştirmektedir. Bu çalışmada seçilen Airy gerilme denklemi gerçeği yansıtmamaktadır. Westergaard yönteminde ise yolun üç farklı yeri için birer tane gerilme denklemi vardır.
- Katsayı düzeltmesi yapılarak gerilme değerleri literatür taramasıyla yapılan araştırmadaki gerilme değerlerine yaklaşmaktadır. Fakat yine de istenildiği kadar bir yaklaşma meydana gelmemektedir.
- Vakumlu betonlar, mukavemetin sağlanamadığı yerlerde veya ekonomik olsun diye bir alt sınıf betonun seçilmesinde kullanılabilir.
- Çelik donatılı beton yollar betonun darbe mukavemetini 15-20 kat artırdığı için, özellikle ağır taşıt trafiğinde ayrıca beton yolun güvenli olması için kullanılabilir.

$k=1.1$  m,  $l=2$  m,  $q_2=0.6$  MPa ve  $q_1=0.8$  MPa olması halinde farklı kalınlıklardaki beton yolların farklı noktalarındaki gerilmeler aşağıdaki tablolarda verilmektedir.

Tablo 3.16.  $h=0.25$  metre olması halinde oluşan gerilmeler

Noktalar	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
1	-24.85	2.57	0
2	0.38	-1.27	0
3	24.52	-6.89	0
4	-25.43	2.54	-3.34
5	-0.02	-1.28	-3.00
6	24.66	-6.88	-3.02
7	-25.95	2.45	-6.68
8	-0.37	-1.30	-5.96
9	24.84	-6.83	-5.96

Tablo 3.17. h= 0.2 metre olması halinde oluşan gerilmeler

Noktalar	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
1	-29.27	2.97	0
2	0.45	-1.54	0
3	28.93	-8.31	0
4	-29.82	2.94	-3.15
5	0.07	-1.55	-2.83
6	29.08	-8.30	-2.87
7	-30.33	2.88	-6.30
8	-0.26	-1.56	-5.63
9	29.27	-8.26	-5.67

Tablo 3.18. h= 0.15 metre olması halinde oluşan gerilmeler

Noktalar	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\tau_{xy}$ (MPa)
1	-36.06	3.58	0
2	0.56	-1.96	0
3	35.72	-10.48	0
4	-36.56	3.57	-2.91
5	0.21	-1.96	-2.62
6	35.87	-10.47	-2.67
7	-37.04	3.52	-5.82
8	-0.10	-1.97	-5.22
9	36.06	-10.44	-5.29

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı beton sınıf ve kalınlıkları için 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi analizleri ve Airy gerilme denklemi oluşturularak gerilme analizleri yapılmıştır. Üç farklı yol kalınlığı ve beton sınıfı için gerilme analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu beton yolda ve alt tabakalarında tekerlek yükü altında meydana gelen gerilmeler ve yer değiştirmeler bulunmuştur. Beton yol kaplamasında oluşan çekme gerilmeleri, farklı beton sınıfları ve kalınlıkları için farklı değerler aldığı görülmektedir. Yapılan çalışmaya göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Bu çalışmada seçilen Airy gerilme denklemi gerçeği yansıtmamaktadır. Katsayı düzeltmesi yapıldığında da Airy gerilme denklemi gerçeği yansıtamamaktadır.
- Gerilme analizleri, 15 cm kalınlığındaki C20, C25 ve C30 beton yolların tekerlek yüklerini taşıyamayacağını göstermektedir. 20 cm ve 25 cm kalınlığındaki C20, C25 ve C30 beton sınıfların ise hem çekme hem de basınç gerilmeleri karşılayabileceğini göstermiştir. Ayrıca, beton sınıfını bir üst sınıf seçildiğinde düşey deplasmanlarda yaklaşık %1.67'lik bir azalma meydana gelirken, tabaka kalınlığı 5 cm artırıldığında yaklaşık %16.7'lik bir azalma meydana gelmektedir.
- 15 cm kalınlığındaki beton yol plağında oluşan çekme gerilmesini C20, C25 ve C30 beton sınıfları taşıyamamaktadır. 15 cm kalınlığındaki beton plağın çekme bölgesine 8 mm çapındaki çelik donatı koyularak 0.8 Mpa'lık yük taşıtırılabilir.
- 20 cm ve 25 cm kalınlığındaki beton yol plağı C20, C25 ve C30 beton sınıfları altında güvenle taşınabilmektedir.
- Düşey doğrultudaki yani z doğrultusunda meydana gelen basınç gerilmelerini 15 cm, 20 cm ve 25 cm kalınlığındaki beton plaklar ve C20, C25 ve C30 beton sınıflarındaki beton plaklar taşıyabilmektedir.
- Beton plağın kalınlığı artırıldığında ve beton sınıfı bir üst sınıf seçildiğinde meydana gelen düşey yer değiştirmeler azalmaktadır.

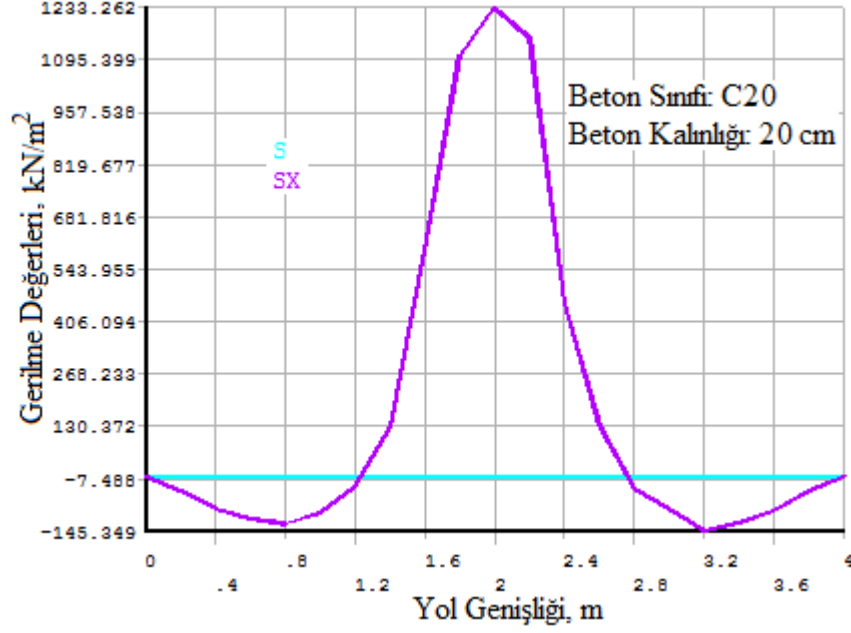
## 5. KAYNAKLAR

1. Kök, B. V. ve Kuloğlu, N., AASHTO-86 Yöntemine Göre styapı Tabakalarının Ekonomik Analizi, İMO Teknik Dergi, 281 (2007) 4257-4270.
2. Arslan, M., Beton Yol Kaplamalarında Alternatif Beton ve Yapım Yöntemi Araştırmaları, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Kesin Rapor, 2007, Ankara.
3. Kozak, M., Beton Yollar ve Beton Yol Yapımının Araştırılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2011) 89-99.
4. Yeğinobalı, A., Niçin Beton Yol?, Türkiye imento Müstahsilleri Birliği, 1. Baskı, Temmuz 2009, Ankara.
5. Mathew, T. V. ve Rao, K. V. K., Chapter 29. Rigid Pavement Design, Introduction to Transportation Engineering, NPTEL Mayıs 24, 2006.
6. Karaca, Z., KasıMZade, A. A. ve Ak, M., Zemin Fiziksel Parametreleri ile Zemin Yatak Katsayıları Arasındaki Bağlantı ve Zemin Yapı Etkileşimde Uygulama, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnaşaat Mühendisliği Bölümü, Kasım 2007, Samsun.
7. Ağar, E., Sütaş, İ. ve ztaş, G., BETON YOLLAR, İstanbül Teknik Üniversitesi, 1998.
8. Guo, E., Ricalde, L. ve Kawa, I., FAA Finite Element Design Procedure For Rigid Pavements, U.S. Department of Transportation, Ağustos 2007.
9. Zdiri, M., Abriak, N., Neji, J. ve Ouezdou, M. B., Modelling of the Stresses and Strains Distribution in an RCC Pavement Using the Computer Code "Abaqus", Electronic Journal of Structural Engineering, 9, 2009.
10. Alwash, A. A. A., Non Linear Analysis By Finite Element Method Of Rigid Slab Pavements In Local Airports, Department Of Civil Engineer, University Of Babylon.
11. Őimřek, O., Sancak, E. ve Yaprak, H., Beton Yollarda Alternatif Bir Malzeme: Vakumlu Beton, 2002-2005.
12. Yerlikaya, M., İnaşaat Mhendisi, elik Tel Donatılı Yol Betonları.
13. Yeğinobalı, A., Türkiye'nin İlk beton Karayolları, Türkiye imento Müstahsilleri Birliği, Ağustos 2010, Ankara.
14. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Mdrlğ, Karayolu Teknik Şartnamesi, Yayın No: 267, 2006.

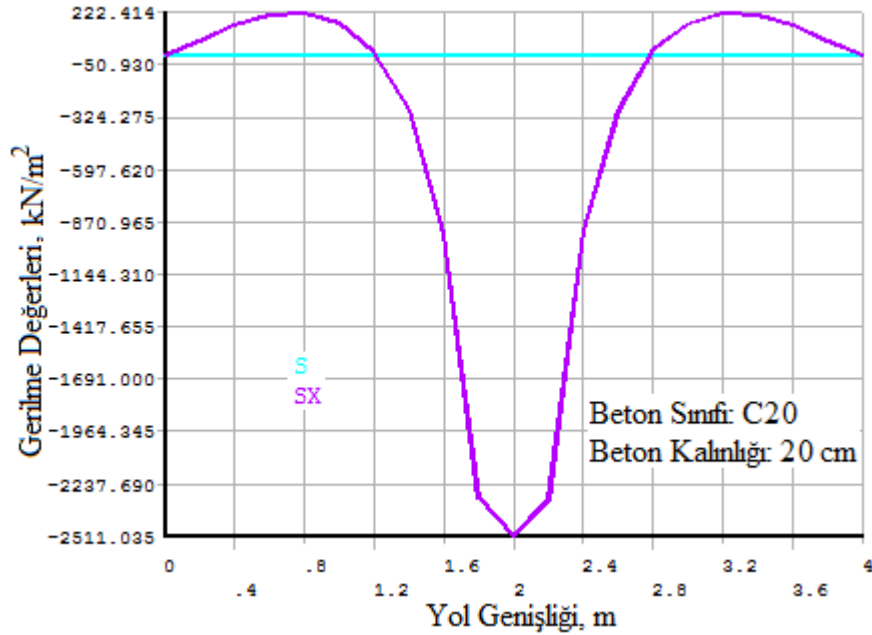
15. Thomas, T. W., Mechanistic-Empirical Pavement Designs for in-place recycling, Road Science, LLC, Kasım 9, Chicago, Illinois, 2010.
16. Khanum, T., Hossain, M., Romanoschi, S. A. ve Barezinsky, R., Concrete Pavement Design in Kansas Following the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, Ağustos 2005.
17. Harvey, J. ve Basheer, I., California's Transition to Mechanistic-Empirical Pavement Design, Technology Transfer Program, 3, 1, 2011.
18. Ali, O., Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37A), Urban Infrastructure, UR 3002.1, Eylül 2005.
19. Drakos, C., AASHTO Rigid Pavement Design, University of Florida.
20. <http://tr.wikipedia.org> Mekanistik-Anpirik Tasarım. 15 Ağustos 2012.

## 6. EKLER

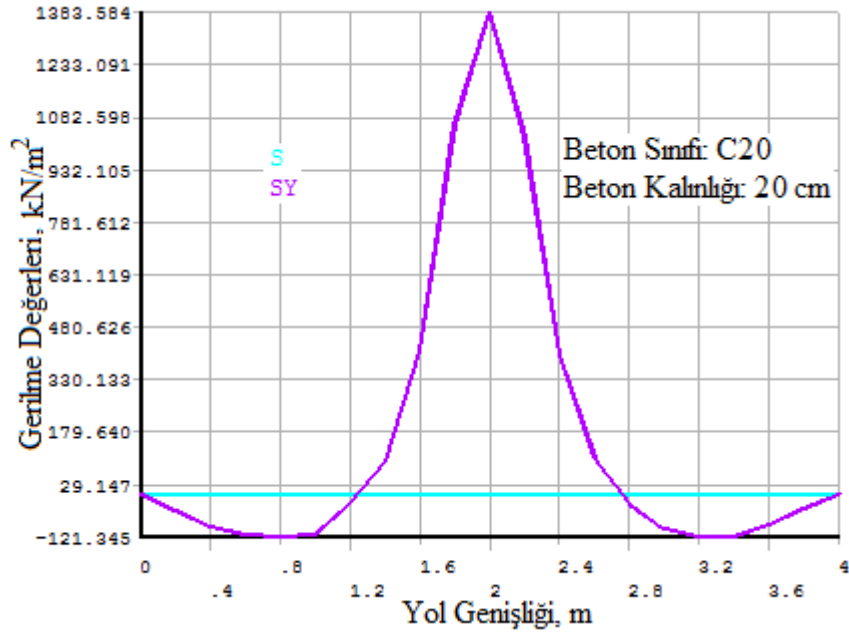
- C20 betonu, beton plak kalınlığının 20 cm olması ve 10 cm'lik "mesh"leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



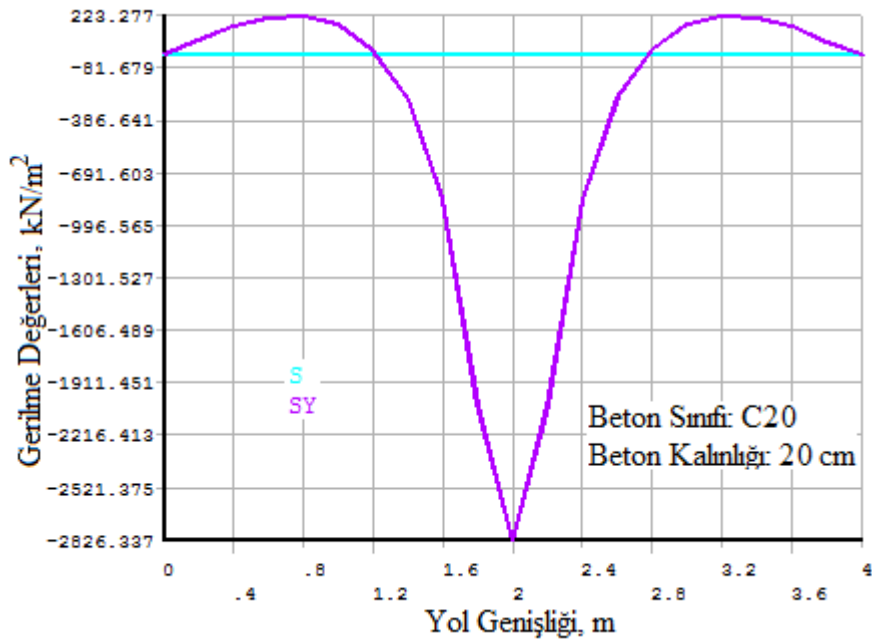
Ek Şekil 6.1. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



Ek Şekil 6.2. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )

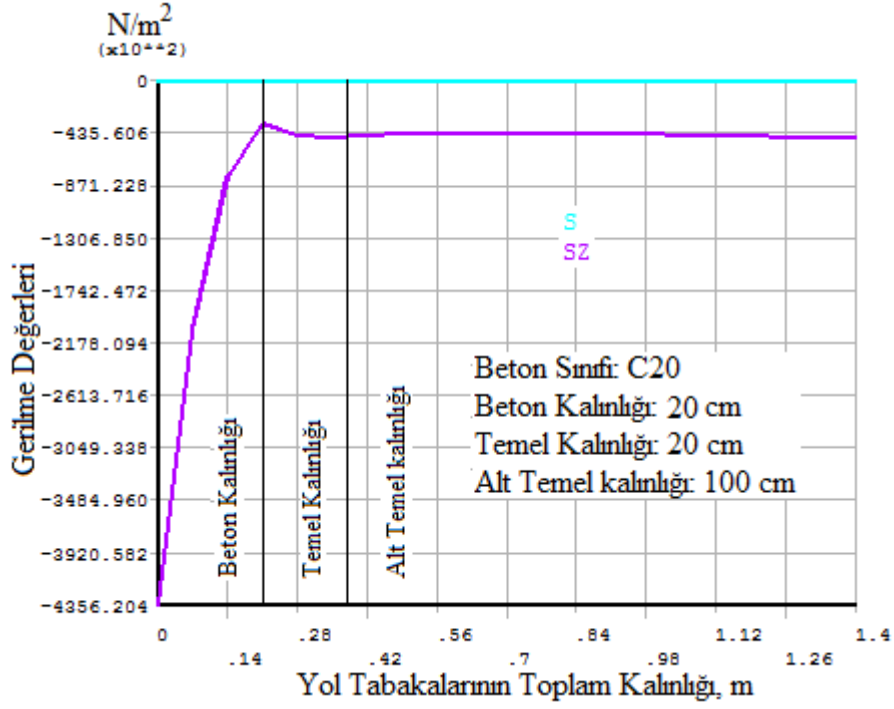


Ek Şekil 6.3. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )



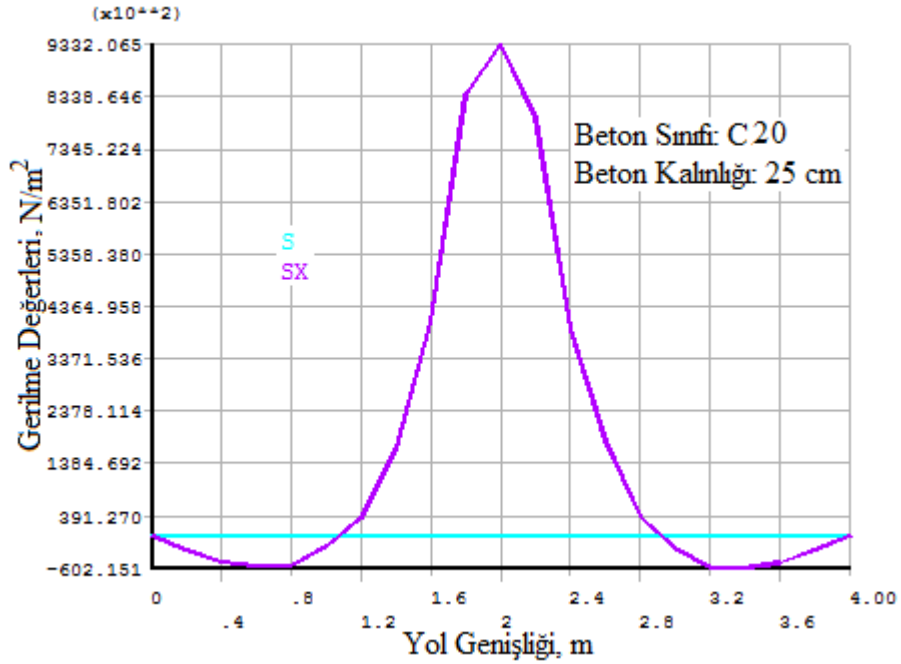
Ek Şekil 6.4. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )



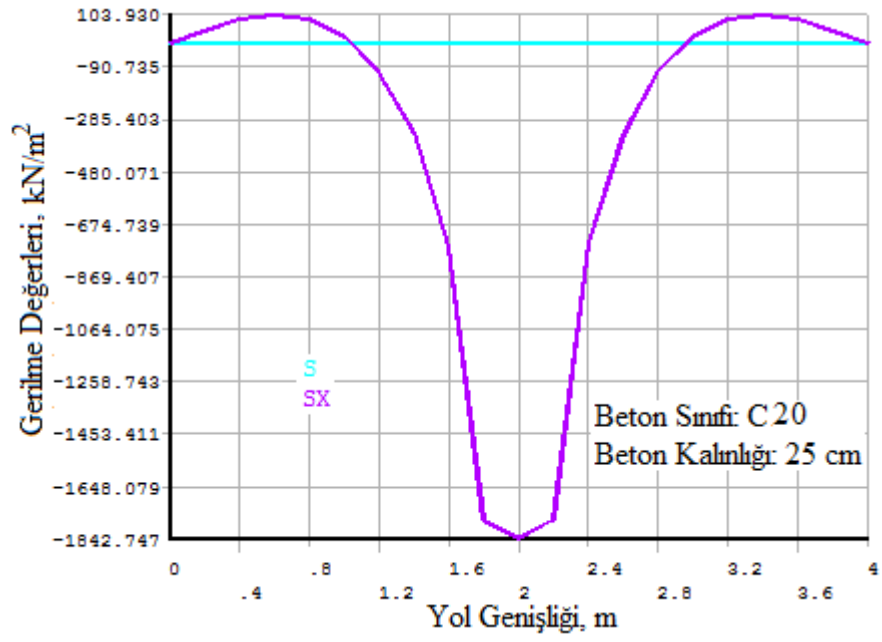


Ek Şekil 6.5. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ )

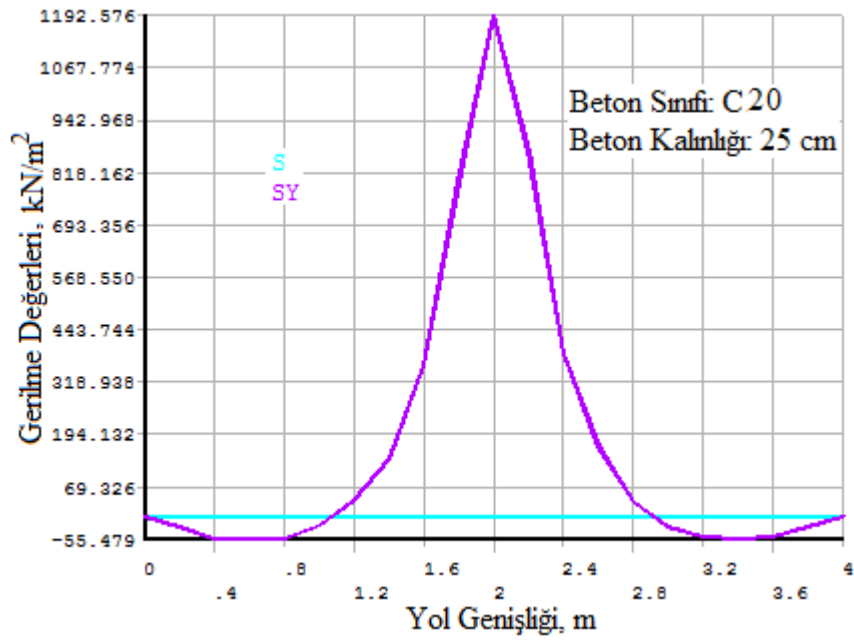
- C20 betonu, beton plak kalınlığının 25 cm olması ve 10 cm'lik “mesh”leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



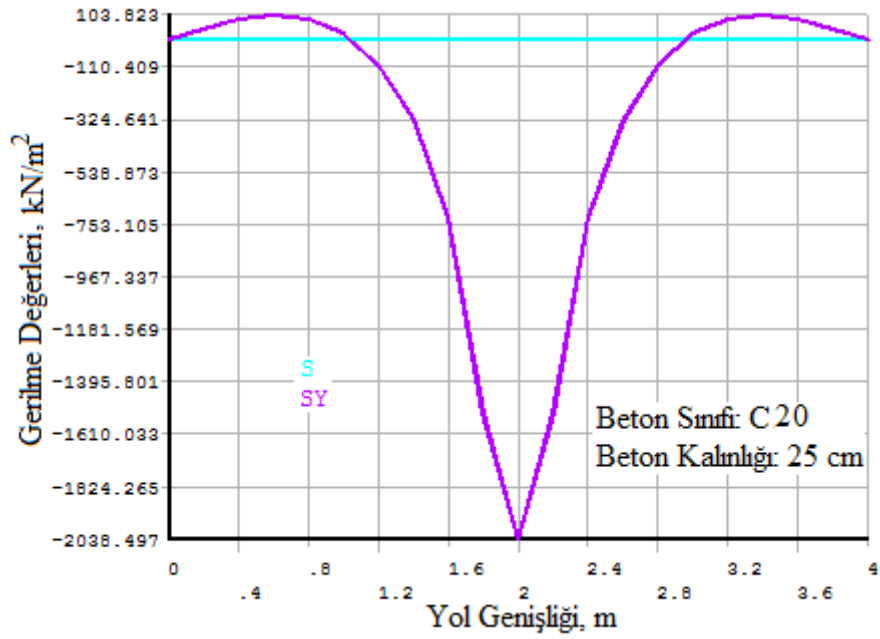
Ek Şekil 6.6. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



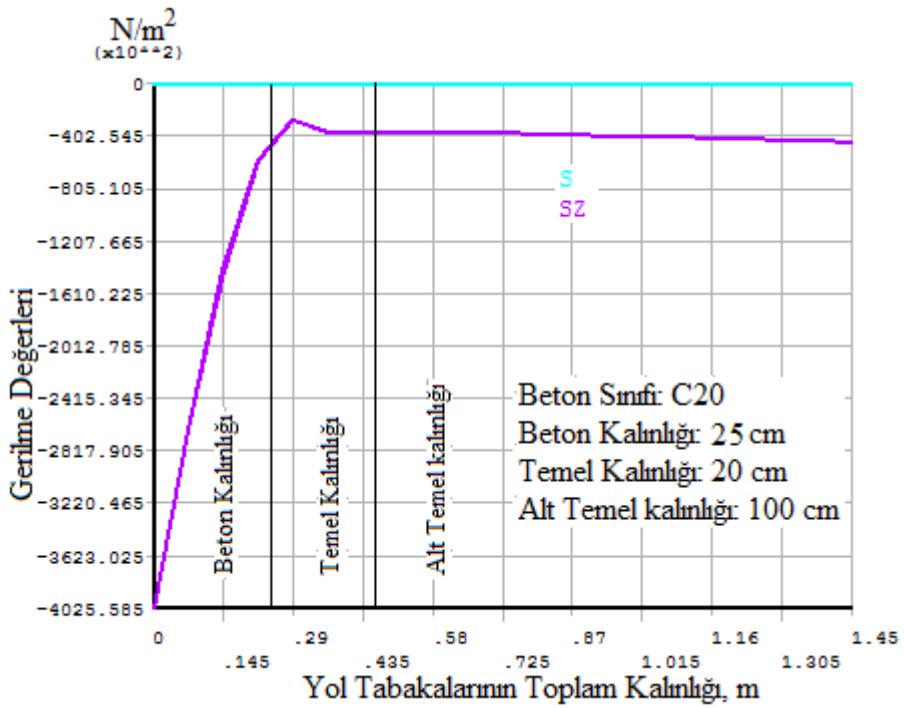
Ek Şekil 6.7. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=s_x$ )



Ek Şekil 6.8. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=s_y$ )

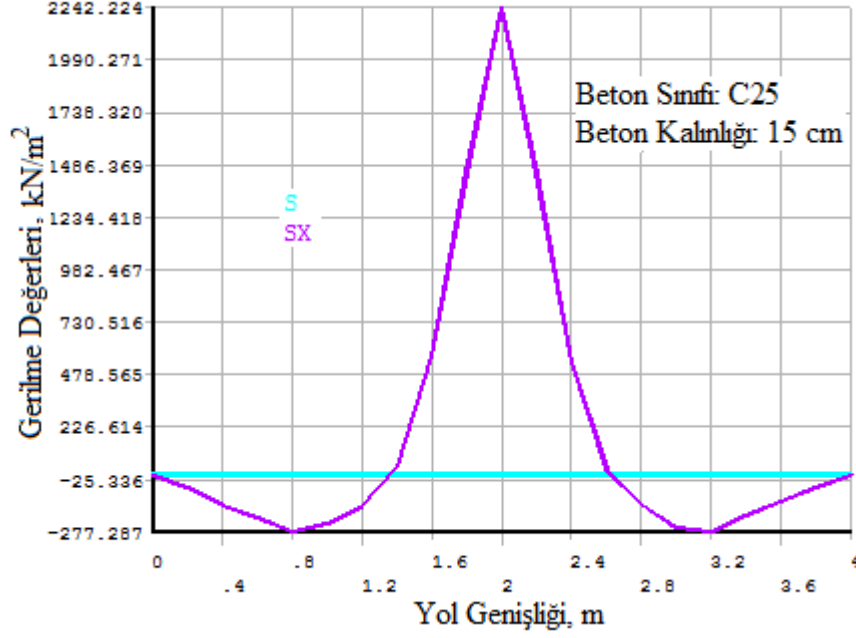


Ek Şekil 6.9. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )

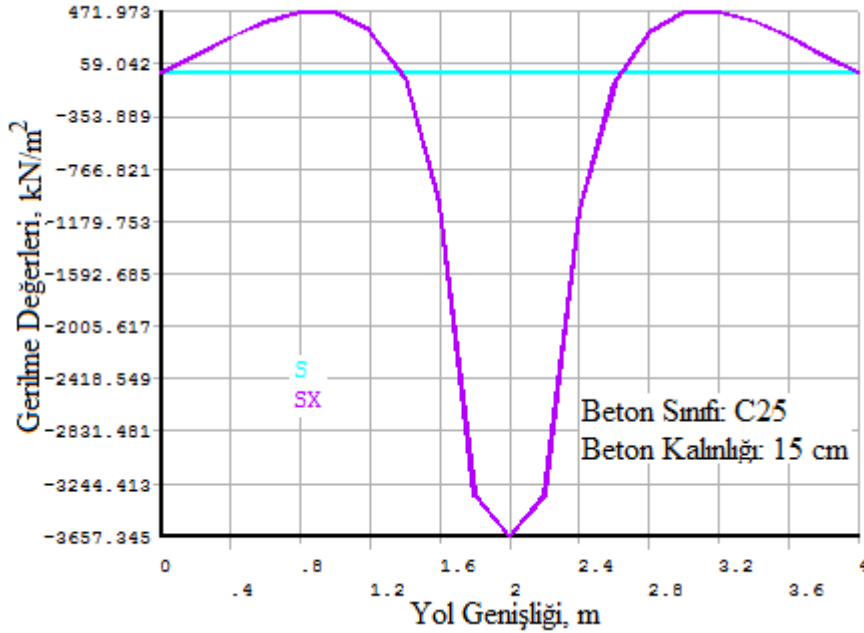


Ek Şekil 6.10. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ )

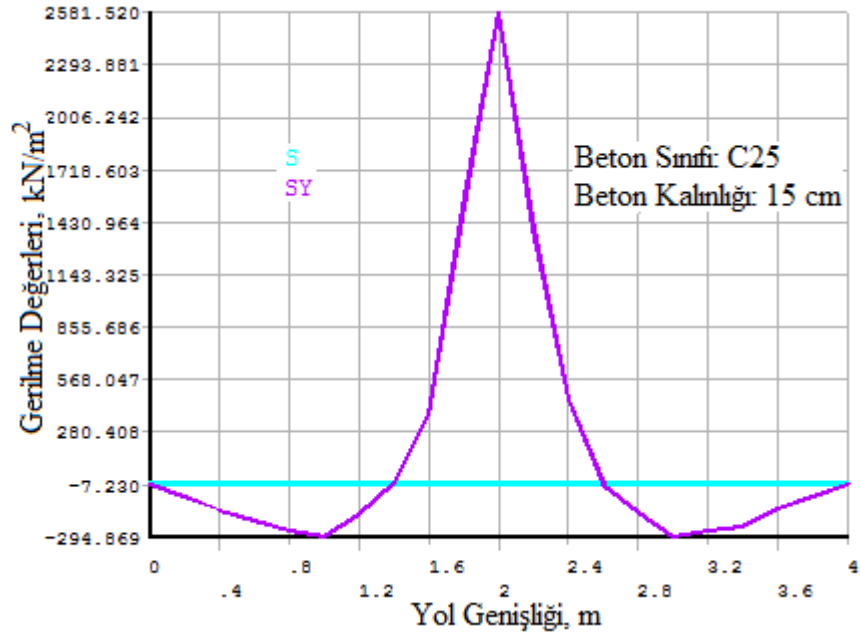
- C25 betonu, beton plak kalınlığının 15 cm olması ve 10 cm'lik "mesh"leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



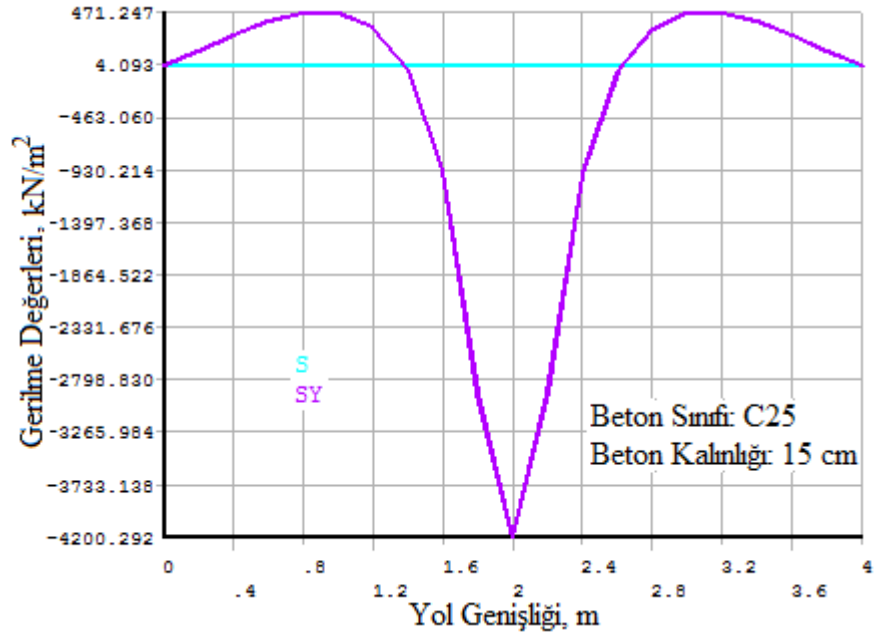
Ek Şekil 6.11. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



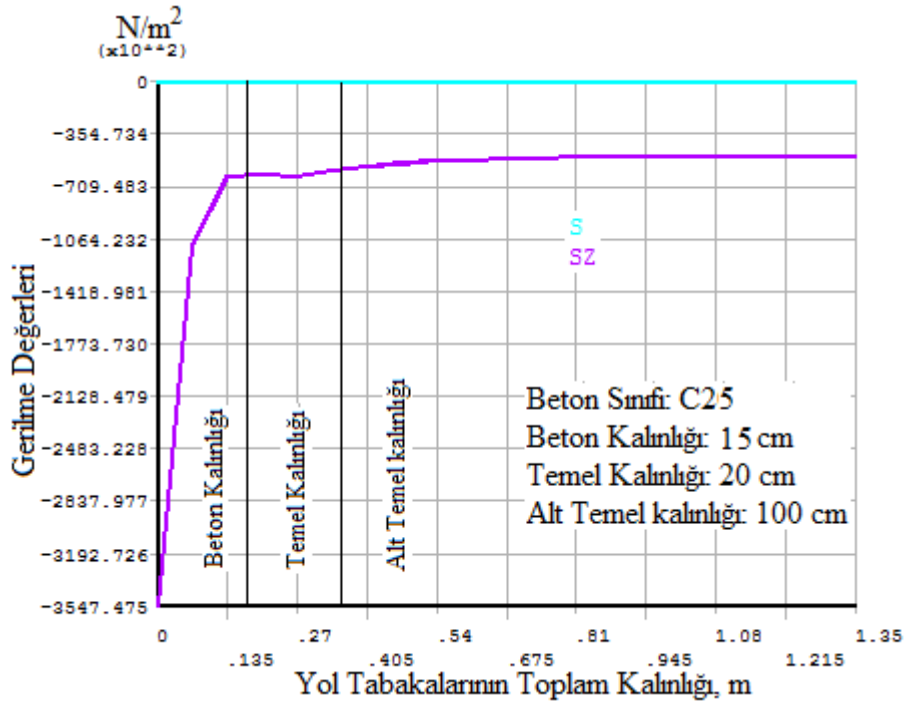
Ek Şekil 6.12. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



Ek Şekil 6.13. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )

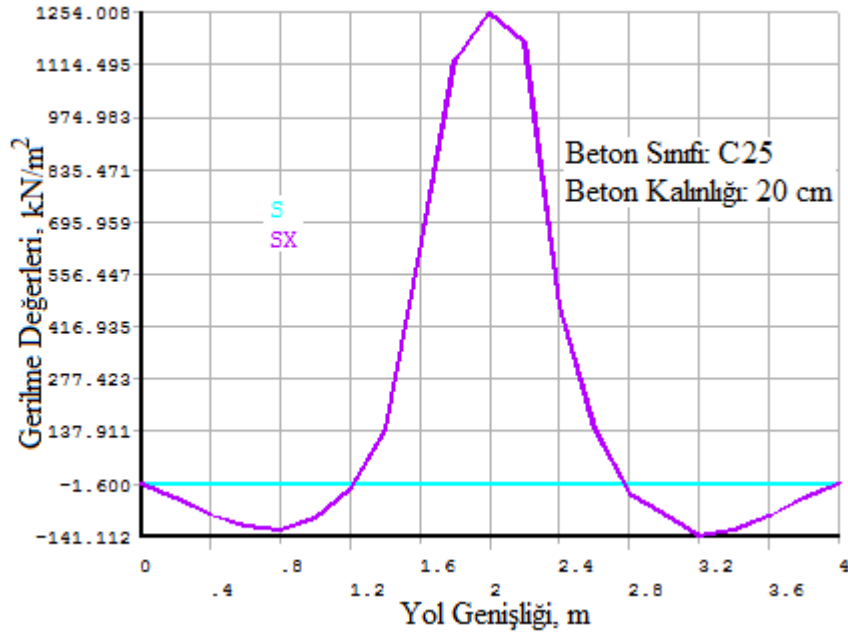


Ek Şekil 6.14. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )

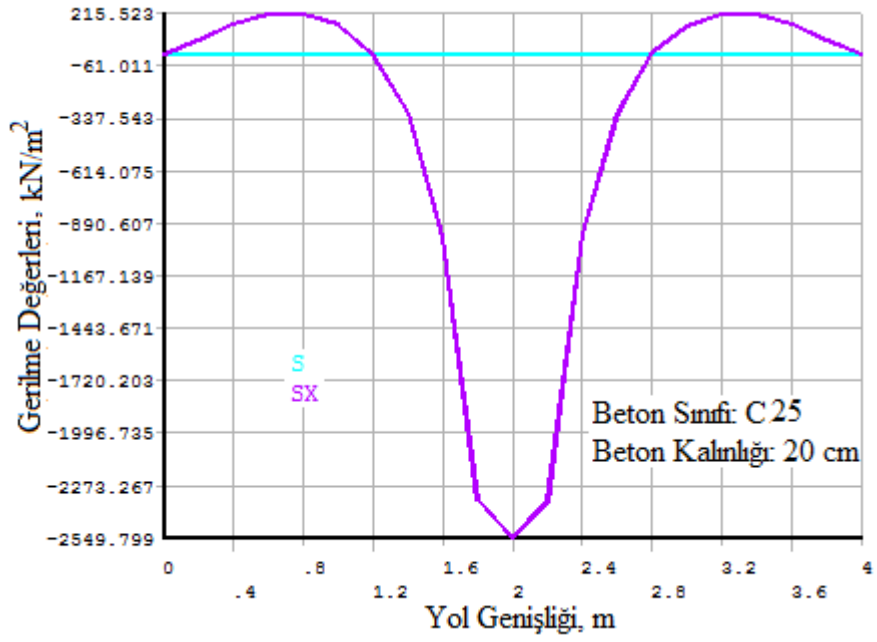


Ek Şekil 6.15. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=s_z$ )

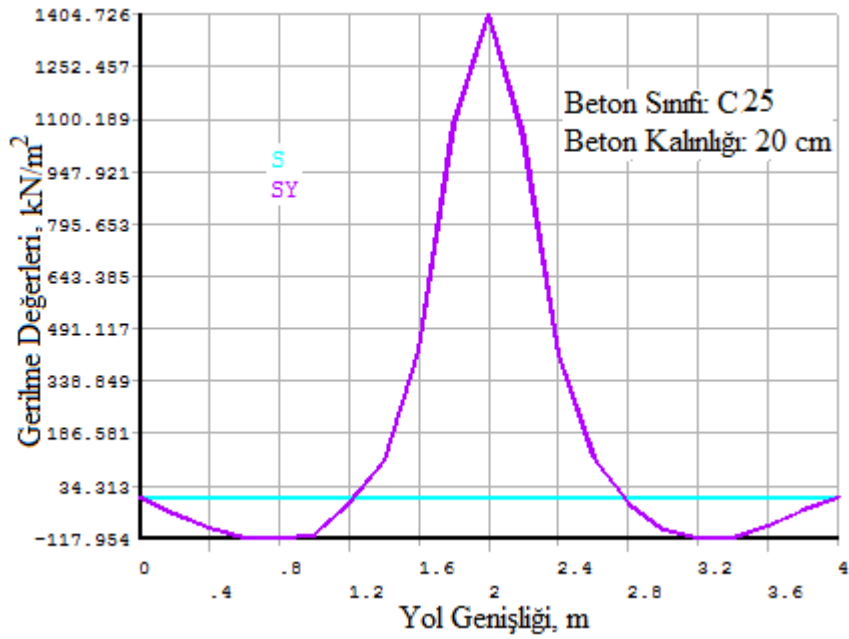
- C25 betonu, beton plak kalınlığının 20 cm olması ve 10 cm'lik "mesh"leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



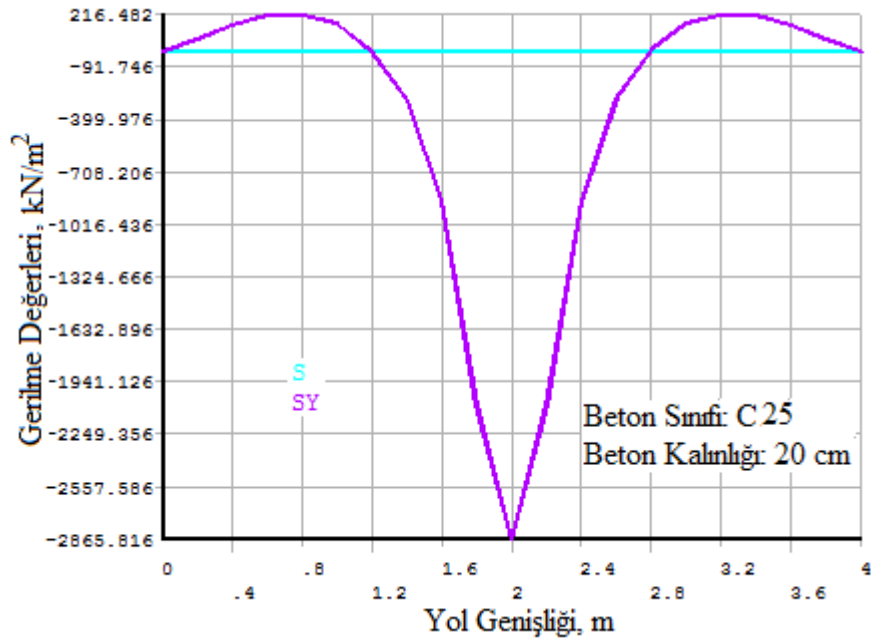
Ek Şekil 6.16. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=s_x$ )



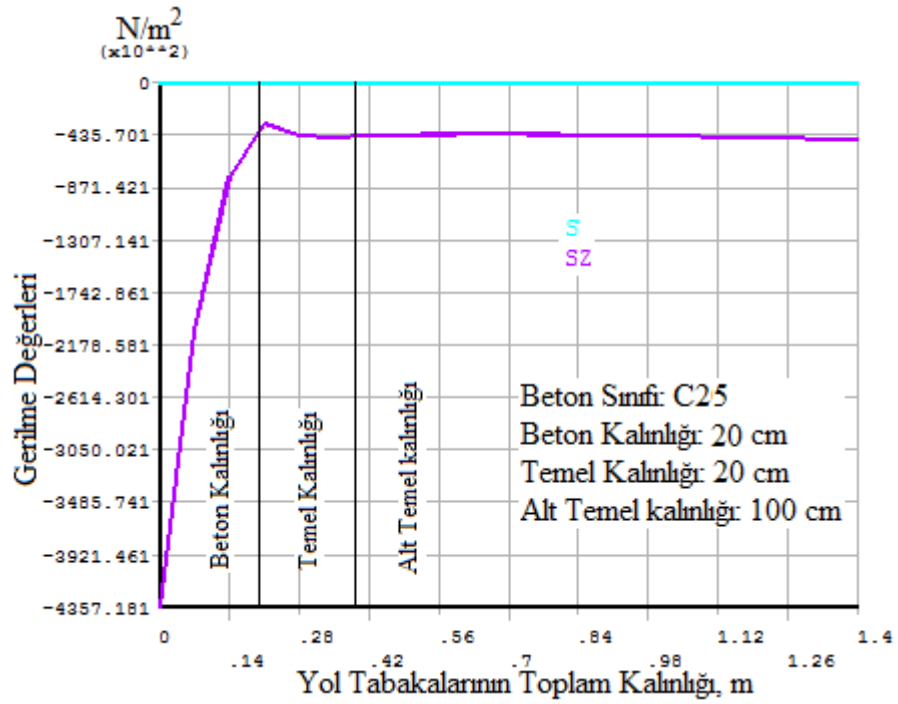
Ek Şekil 6.17. x doğrultusundaki yol yzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=s_x$ )



Ek Şekil 6.18. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=s_y$ )



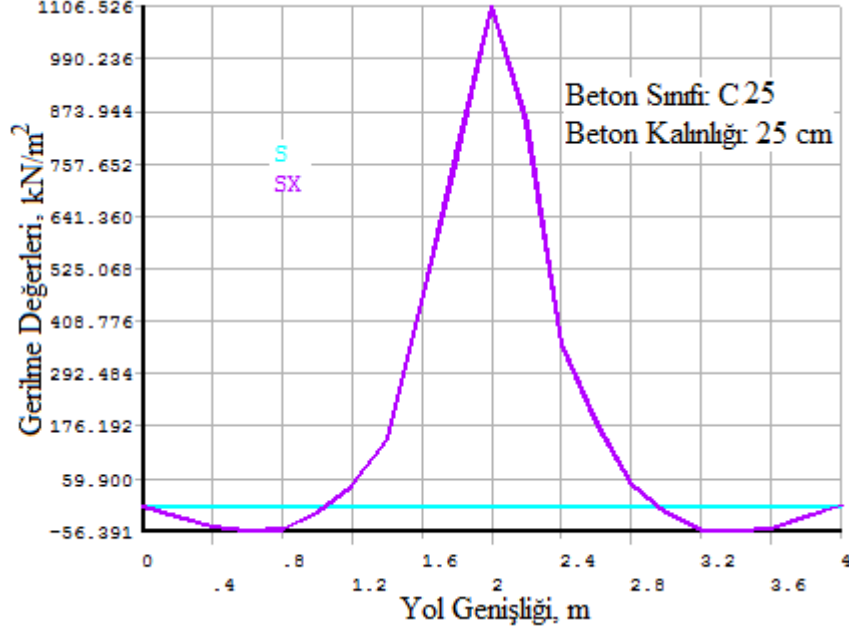
Ek Şekil 6.19. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y = \sigma_y$ )



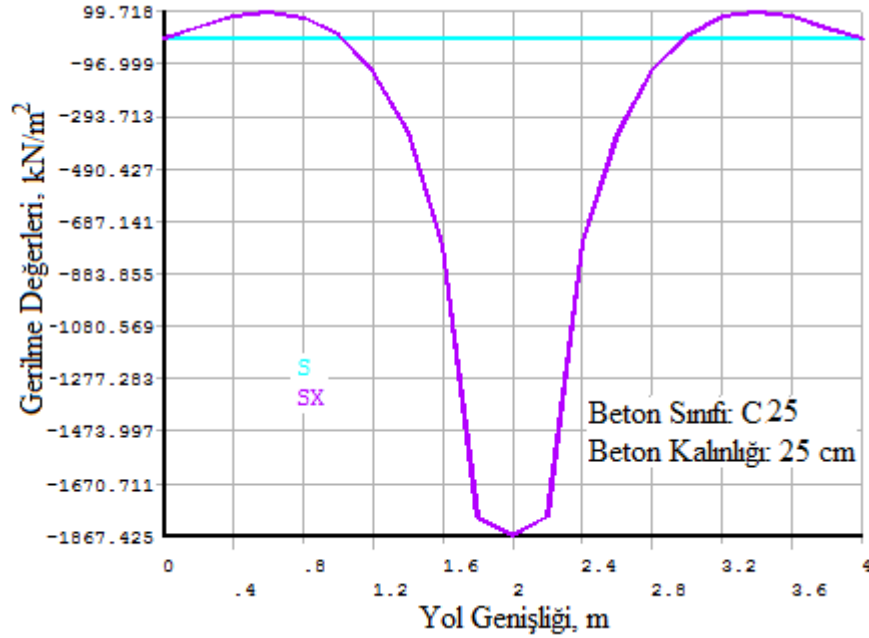
Ek Şekil 6.20. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z = \sigma_z$ )



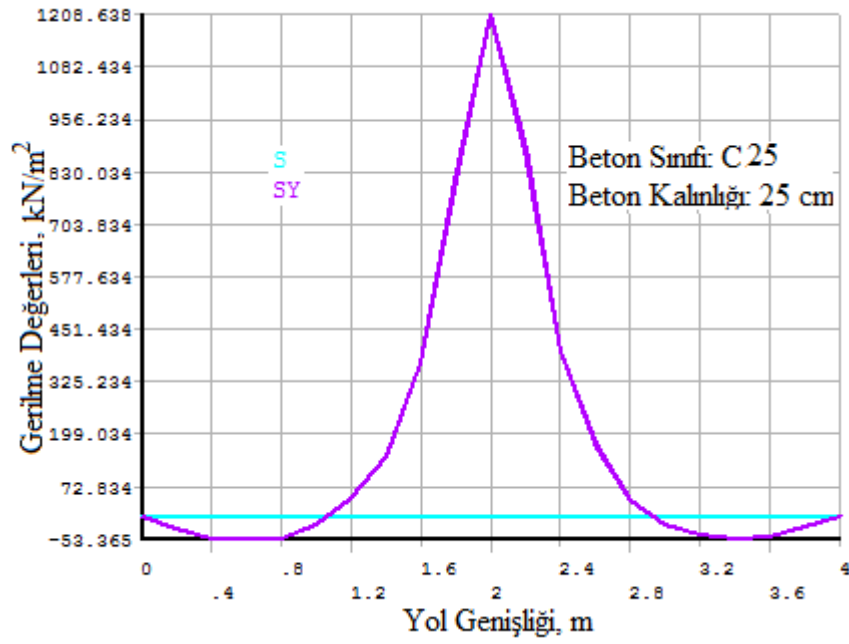
- C25 betonu, beton plak kalınlığının 25 cm olması ve 10 cm'lik "mesh"leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



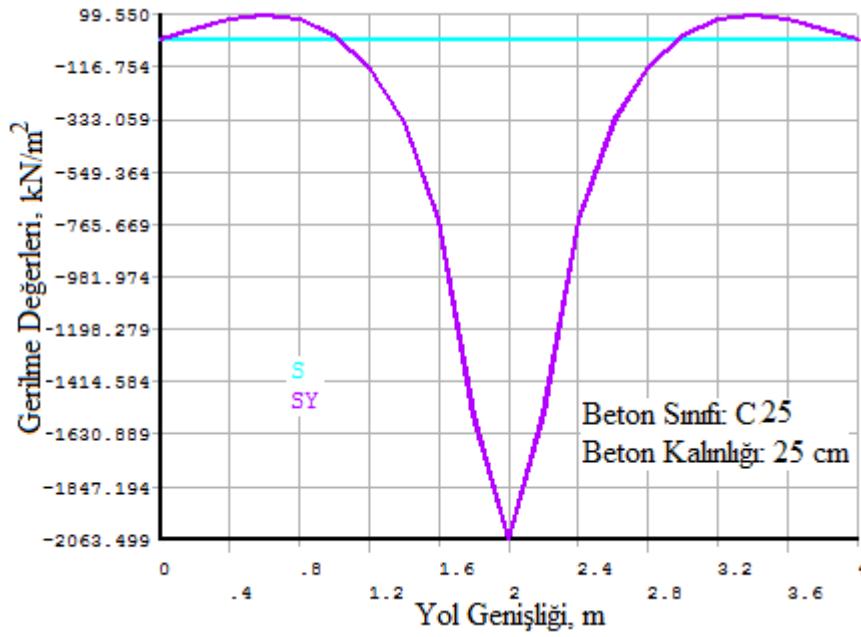
Ek Şekil 6.21. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



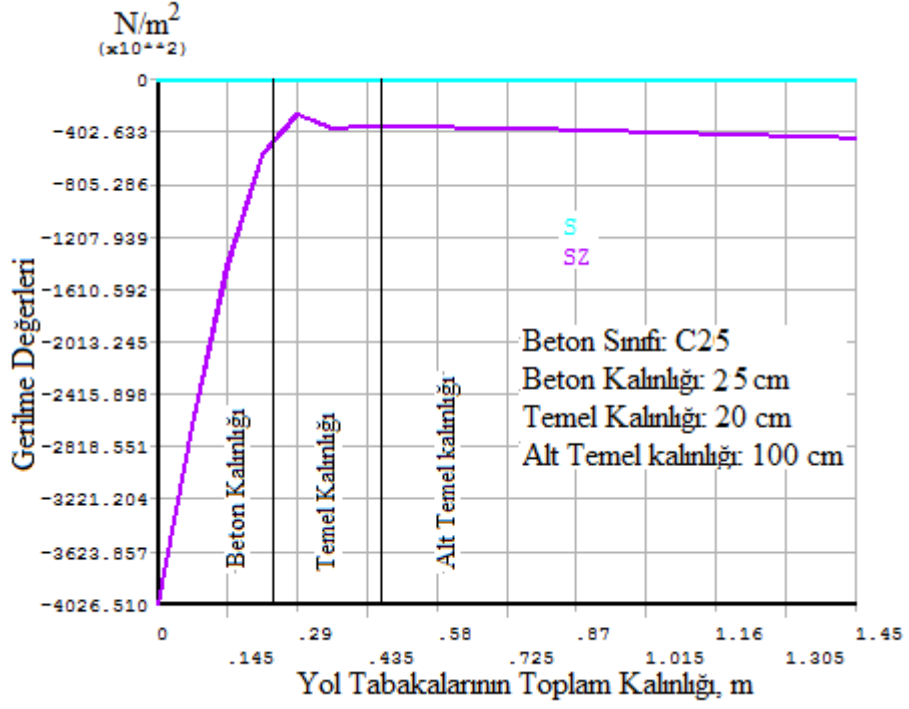
Ek Şekil 6.22. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



Ek Şekil 6.23. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )

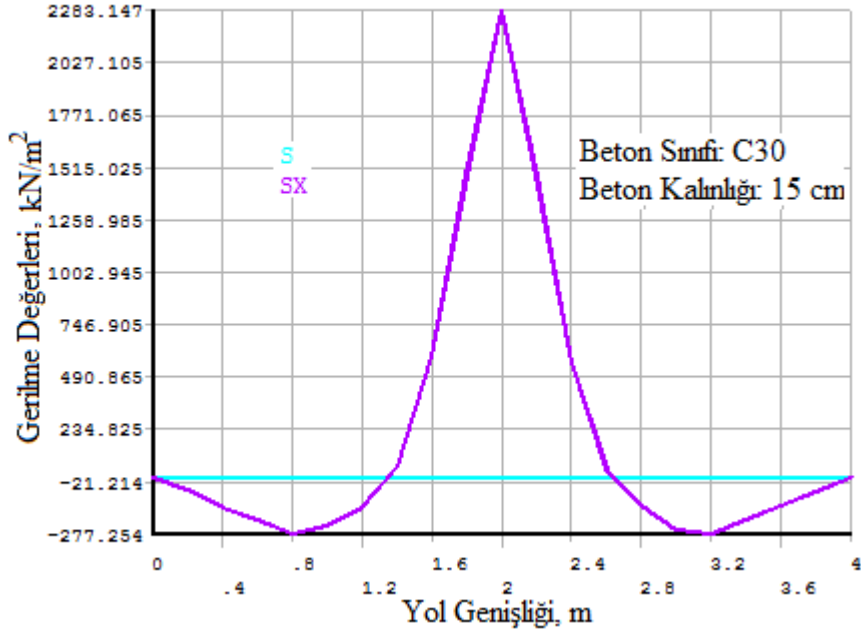


Ek Şekil 6.24. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )

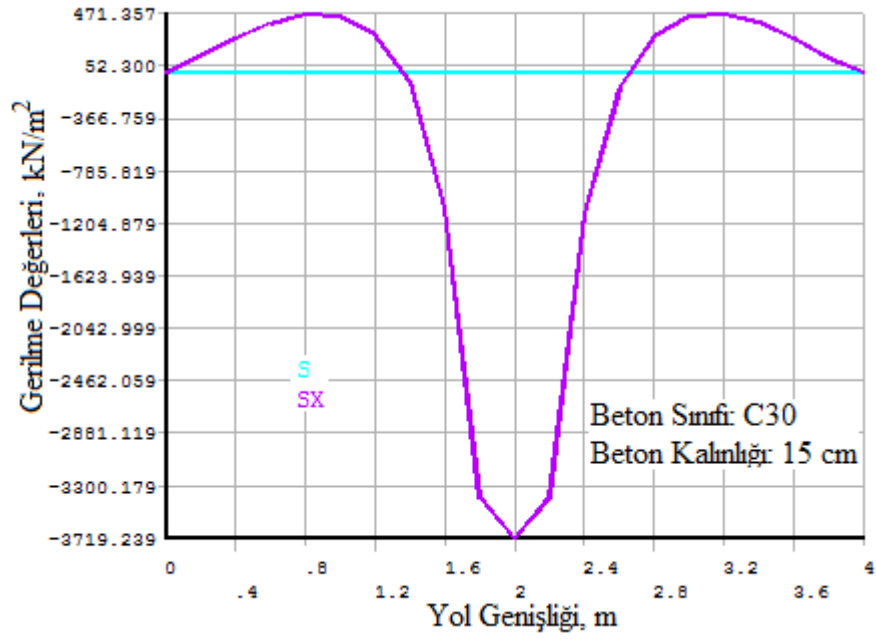


Ek Şekil 6.25. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=s_z$ )

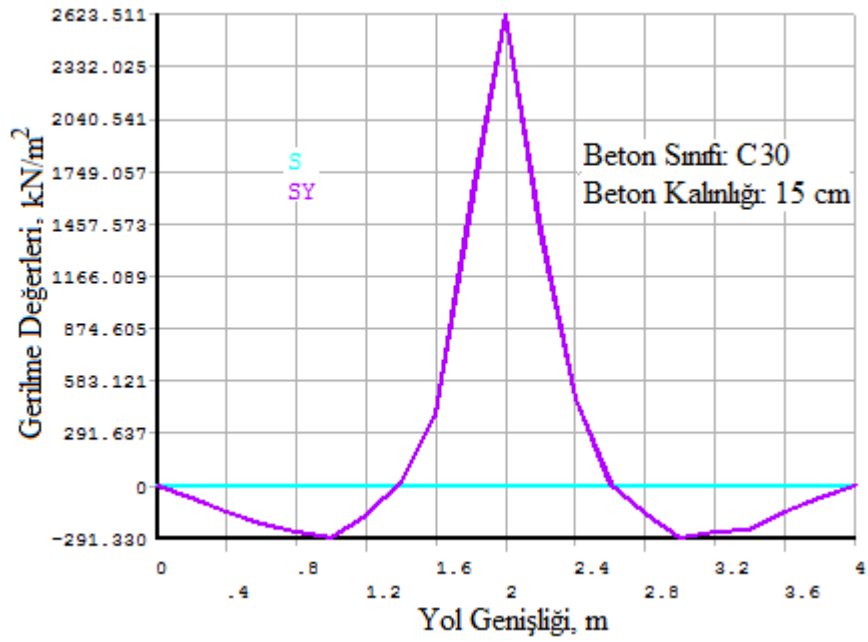
- C30 betonu, beton plak kalınlığının 15 cm olması ve 10 cm'lik "mesh"leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



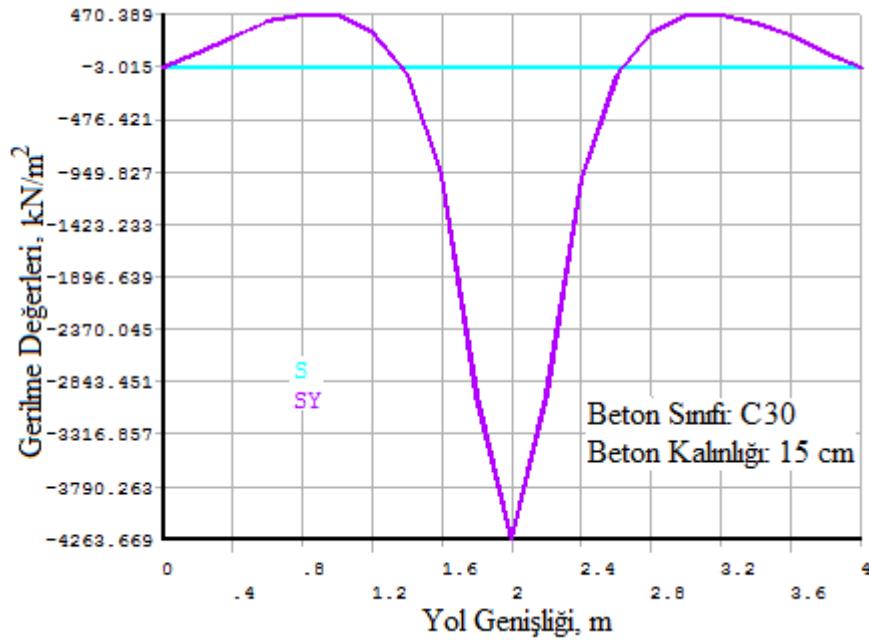
Ek Şekil 6.26. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=s_x$ )



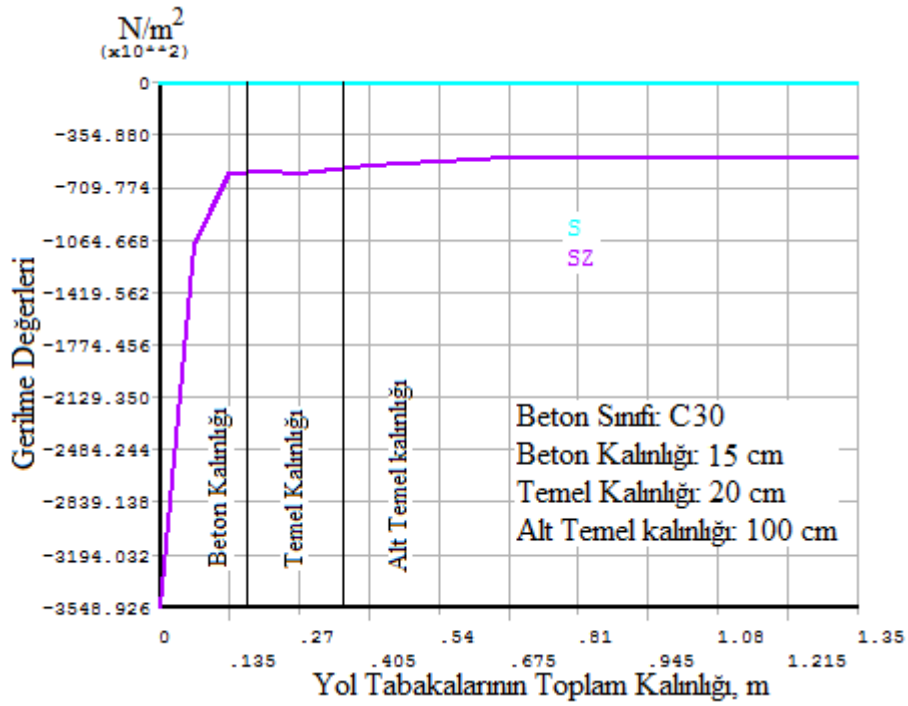
Ek Şekil 6.27. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=s_x$ )



Ek Şekil 6.28. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=s_y$ )

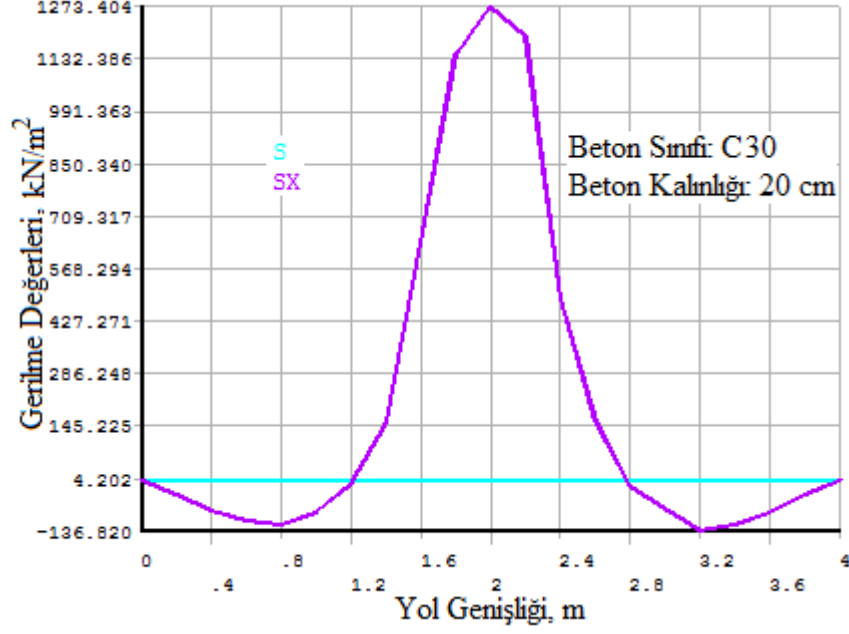


Ek Şekil 6.29. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )

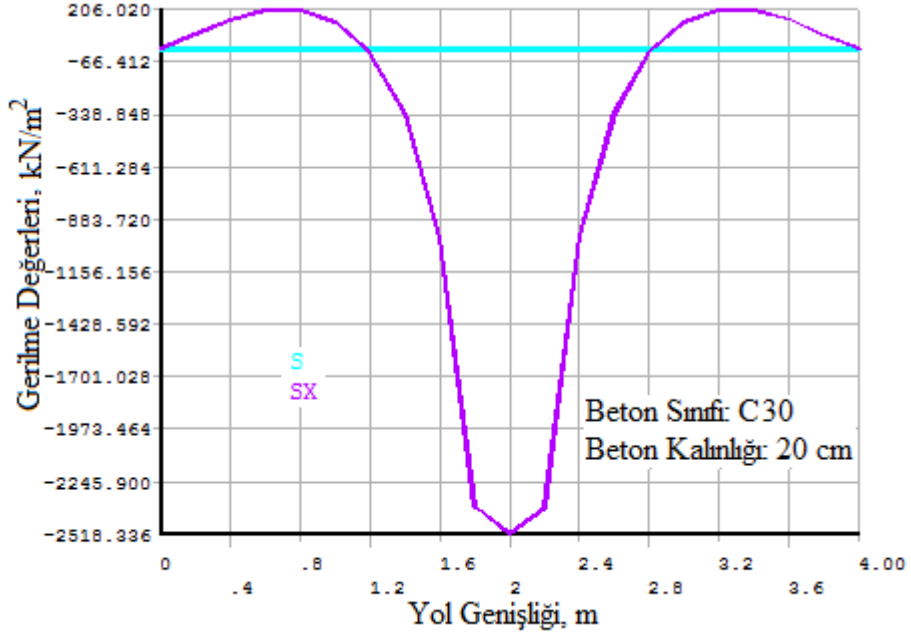


Ek Şekil 6.30. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ )

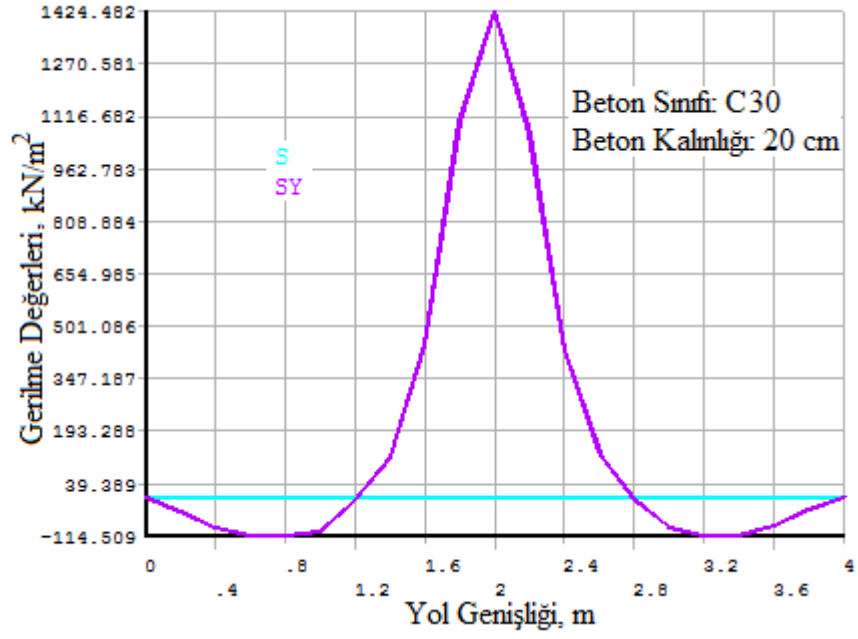
- C30 betonu, beton plak kalınlığının 20 cm olması ve 10 cm'lik "mesh"leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



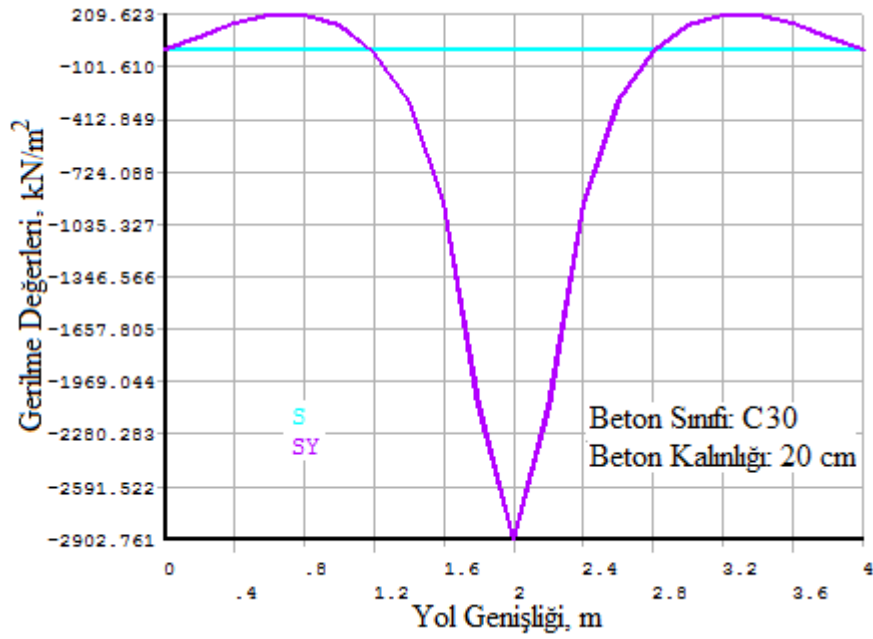
Ek Şekil 6.31. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



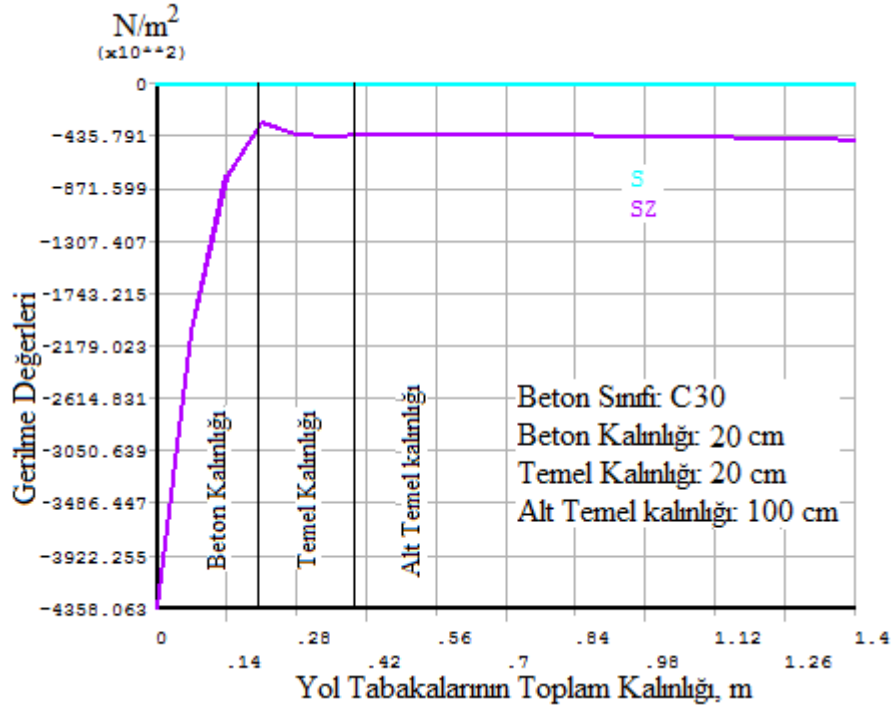
Ek Şekil 6.32. x doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=sx$ )



Ek Şekil 6.33. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )

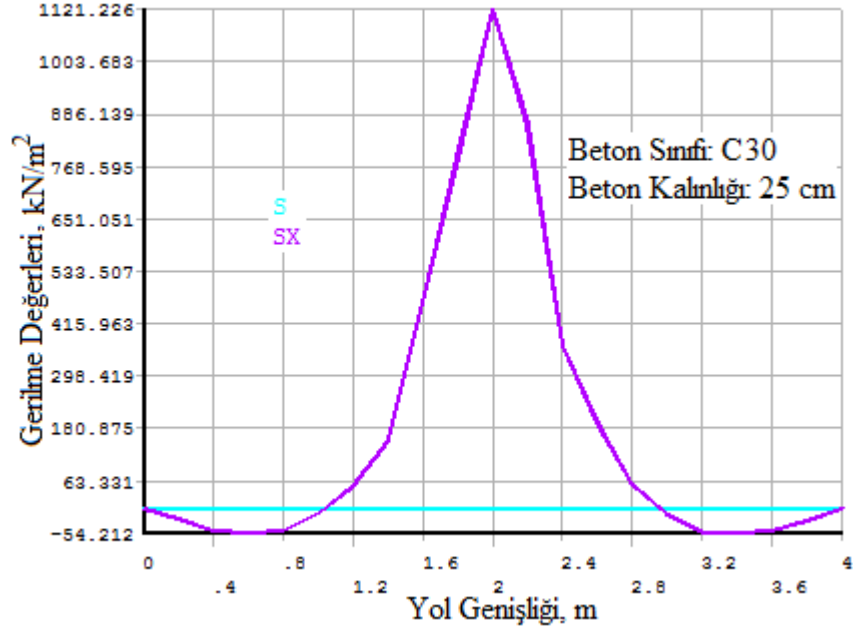


Ek Şekil 6.34. y doğrultusundaki yol yüzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )



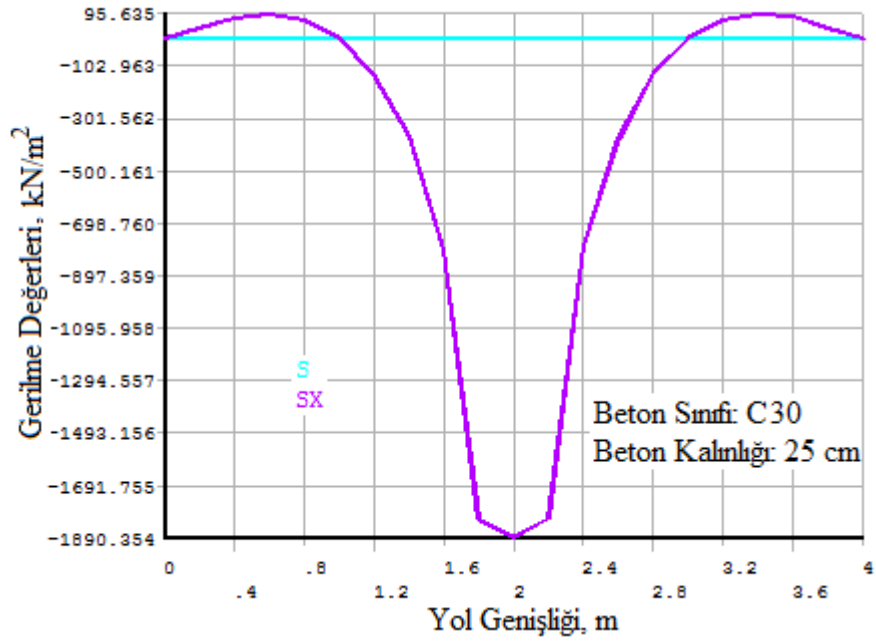
Ek Şekil 6.35. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=s_z$ )

- C30 betonu, beton plak kalınlığının 25 cm olması ve 10 cm'lik "mesh"leme olması halinde oluşan gerilme değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

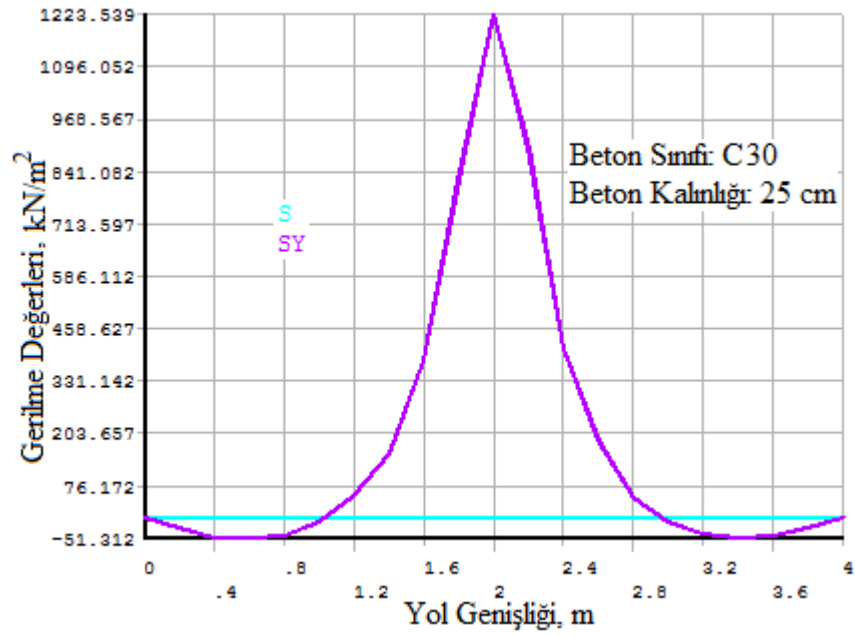


Ek Şekil 6.36. x doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_x=s_x$ )

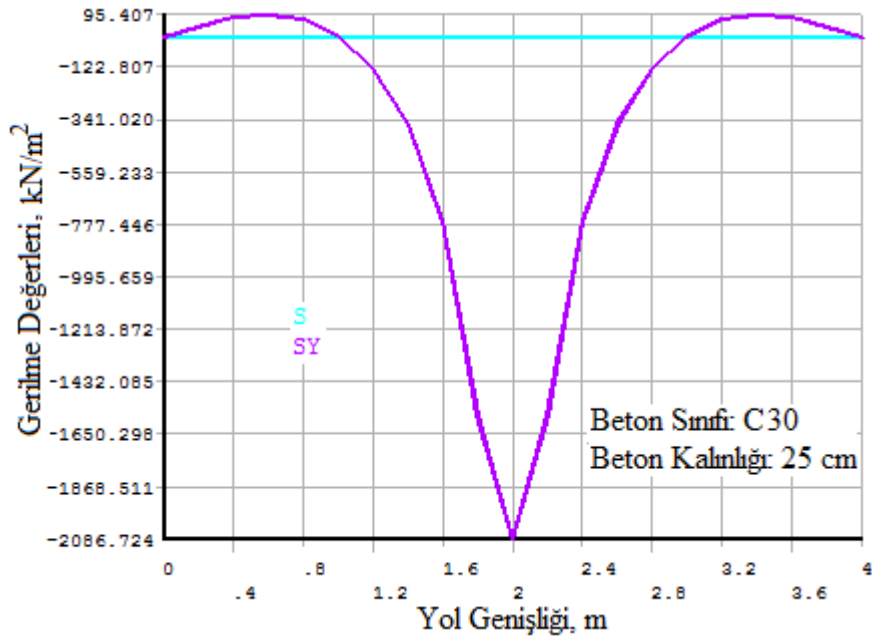




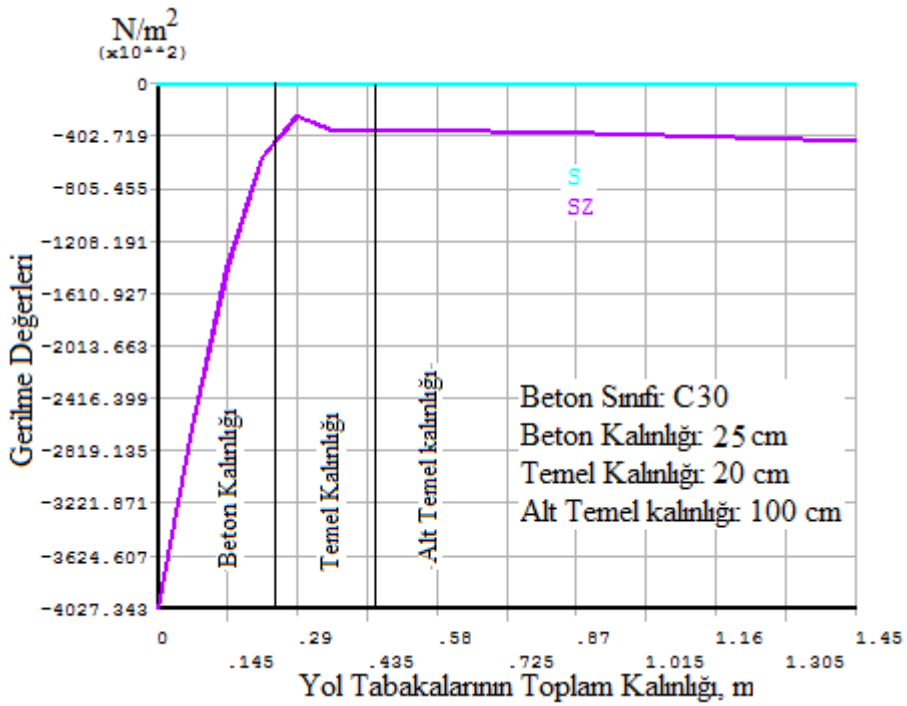
Ek Şekil 6.37. x doğrultusundaki yol yzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_x=s_x$ )



Ek Şekil 6.38. y doğrultusundaki yol altı gerilmeler ( $\sigma_y=s_y$ )



Ek Şekil 6.39. y doğrultusundaki yol yzeyindeki gerilmeler ( $\sigma_y=sy$ )



Ek Şekil 6.40. z doğrultusundaki gerilme dağılışı ( $\sigma_z=sz$ )

## **ÖZGEÇMİŞ**

Trabzon'un Akçaabat ilçesinin Çiçeklidüz Köyü'nde doğdu. İlkokulu Çiçeklidüz İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu Mevlüt Selami Yardım İlköğretim Okulu'nda ve liseyi de Akçaabat Lisesi'nde okudu. 2005-2006 eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2009-2010 eğitim öğretim yılında İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve aynı yıl, aynı bölümde yüksek lisansına başladı. Orta derecede İngilizce bilmektedir. 2012 yılının Şubat ayında yapı denetim firmasında işe başladı ve Aralık ayında işten ayrıldı.