

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, başlangıcından sonuna kadar, gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisansımın başından sonuna kadar benim yanımda olan, desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Musa Tan KAYIPMAZ

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Beton Yollarda Isıl Genleşmeye Bağlı Gerilmelerin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Muhammet 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. 09/12/2019

Musa Tan KAYIPMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Derzli Donatısız Beton Kaplamalar	4
1.3. Beton Kaplamalarda Gerilmeler	6
1.3.1. Tekerlek Yükünden Kaynaklanan Gerilmeler	7
1.3.2. Beton Kaplamada Sıcaklık Değişimlerinin Etkisi.....	10
1.3.3. Beton Plak Kalınlığı Boyunca Oluşan Sıcaklık Dağılımı	11
1.3.4. Sıcaklık Etkisinde Beton Plağın Eğilmesi ile Oluşan Gerilmeler	29
1.3.5. Plağın Genleşmesine Bağlı Sürtünme Gerilmeleri	34
1.4. Gerilmelerin Birleştirilmesi	36
1.5. Derz Aralıklarının Hesaplanması.....	37
1.5.1. İzafi Rijitlik Yarıçapına Göre Hesaplama	39
1.5.2. Sürtünme Gerilmesi Formülüne Göre Hesap.....	42
1.5.3. Derz Hareketine Göre Uygun Derz Aralığının Hesaplanması.....	43
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	45
2.1. Formüller Yardımıyla Gerilmelerin Hesabı.....	45
2.2. ANSYS Modellemesi ve Gerilme Hesabı	53
3. TARTIŞMA	76
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
5. KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETON YOLLARDA ISIL GENLEŞMEYE BAĞLI GERİLMELERİN
ARAŞTIRILMASI

Musa Tan KAYIPMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2019, 92 Sayfa

Bu çalışmada farklı derz aralıkları, plak kalınlıkları ve sıcaklık farkı değerleri için ısı genleşmeler ve tekerlek yükleri etkisi altında beton yol plaklarının davranışları Ansys sonlu elemanlar programı yardımıyla araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kritik yüklemelere göre ısı genleşmelerden kaynaklanan gerilmelerin en az tekerlek yükleri kadar önemli olduğu ve bu gerilmelerin beraber etkimesi durumunda beton yol plağının dayanımını aşabilecek gerilmeler oluşturdukları tespit edilmiştir. Beton plak uzunluğu ve genişliğinin artmasının, gerilmelerin plak kenarından plak merkezine doğru artmasına ve maksimum gerilmenin plak merkezinde oluşmasına sebep olduğu, ısı genleşmeler sebebiyle oluşacak çatlakların önlenmesi için beton plak boyutlarının maksimum 4 m ile sınırlandırılması gerektiği görülmüştür. Beton plak kalınlığının ise sıcaklığa bağlı gerilmeler üzerinde dolaylı olarak etkili olduğu görülmüştür. Beton plak kalınlığı arttıkça, yüzey ile taban arasındaki sıcaklık farkı da artacaktır. Bu da gerilmelerin artmasına sebep olacaktır. Kalınlıkları 15 cm ve daha az beton kaplamalarda tekerlek yükünden dolayı oluşacak gerilmelerin daha kritik olduğu, plak kalınlığı arttıkça tekerlek yükü gerilmelerinin azalarak sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerin altında değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durumda daha kalın beton kaplamalarda sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerin daha önemli olduğu söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Derzli donatısız beton kaplama, Termal analiz, Ansys

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF STRESSES DUE TO THERMAL EXPANSION ON
CONCRETE PAVEMENTS

Musa Tan KAYIPMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Muhammet Vefa AKPINAR
2019, 92 Pages

In this study, the behavior of concrete road pavements under the effect of thermal expansion and wheel loads for different joint spacings, pavement thicknesses and temperature difference values were investigated with Ansys finite element program. As a result, it was found that the stresses caused by thermal expansion are as important as the wheel loads and when these stresses act together, they create tensile stresses that can exceed the strength of the concrete. It has been observed that the increase in the length and width of the concrete slab causes the stresses to increase from the edge of the slab towards the center of the slab and the maximum stress occurs in the slab center, and the concrete slab dimensions should be limited to a maximum of 4 m in order to prevent cracks due to thermal stresses. The thickness of the concrete slab was found to have an indirect effect on the stresses due to temperature. The higher the thickness of the concrete slab, the higher the temperature difference between the surface and the base. This will increase the stresses. In concrete pavements with a thickness of 15 cm or less, it was found that the stresses due to the wheel load were more critical and as the plate thickness increased, the wheel load stresses decreased and formed under the stresses caused by the temperature. In this case, it can be said that the stresses caused by temperature are more important in thicker concrete pavements.

Key Words: Jointed plain concrete pavement, Thermal analysis, Ansys

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kaplamalarda yük dağılımı.....	1
Şekil 2. Beton kaplama türleri	3
Şekil 3. Derzli donatısız beton kaplama (1) ve derzin enine görüntüsü (2)	4
Şekil 4. Beton kaplamada derzler	5
Şekil 5. Beton kaplamada genleşme derzi.....	6
Şekil 6. Plakta tekerlek yükü nedeniyle oluşan kritik gerilmelerin yerleri	7
Şekil 7. Beton plak kalınlığı boyunca etki eden sıcaklık	10
Şekil 8. Güneşli bir günde alınan, saatlik hava ve kaplama sıcaklık değerleri.	11
Şekil 9. Polonya’da Temmuz ayında ölçülen 30 günlük hava sıcaklığı	12
Şekil 10. Polonya’da Temmuz ayında kaplama yüzeyinde ölçülen 30 günlük sıcaklık.	12
Şekil 11. Beton plak kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi.	14
Şekil 12. Beton plak kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi	14
Şekil 13. Beton örnek içinde doğrusal olmayan sıcaklık değişimleri.	15
Şekil 14. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri.....	15
Şekil 15. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri.....	16
Şekil 16. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri.....	17
Şekil 17. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri.....	17
Şekil 18. Yüzey ve taban arası sıcaklık farklarına göre eğilme miktarları	18
Şekil 19. Beton plağın merkezi, kenarı ve köşesindeki düşey yer değiştirmeler	19
Şekil 20. Beton plağın kenarı ve köşesindeki düşey yer değiştirmeler (eğilmeler).....	20
Şekil 21. Yatay derz hareketleri.....	21
Şekil 22. Choubane vd. (1995) yaptıkları çalışmada hesapladıkları gerilme değerleri	23
Şekil 23. FWD yüklemesi ile zamanla oluşan şekil değiştirmeler	24
Şekil 24. Ölçülen ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	25
Şekil 25. Sıcaklık farkından dolayı oluşan eğilmeler	27
Şekil 26. Sıcaklık gradyanları dağılımı, 1973-1977 Belçika.....	28
Şekil 27. Bradbury’nin C katsayısı	30
Şekil 28. Pozitif sıcaklık gradyanı durumunda eğilme gerilmeleri ve deformasyon.....	33
Şekil 29. Plak uzunluğu ile enine çatlama arasındaki ilişki	37
Şekil 30. 0-4 durumlarında tasarım ömrü boyunca çatlama tahminleri.....	38

Şekil 31. Zeminin sınıflandırılması	39
Şekil 32. Efektif plak kalınlığı.....	40
Şekil 33. Maksimum plak uzunluğu ile plak kalınlığı arasındaki ilişki.....	41
Şekil 34. Formüle göre plak uzunluğu ile α ve ε değerleri arasındaki ilişki	44
Şekil 35. Westergaard formülleri ile hesaplanan tekerlek yükü gerilmeleri	49
Şekil 36. Sıcaklık gradyanı nedeniyle plak kenarı altında oluşan gerilmeler	50
Şekil 37. Sıcaklık gradyanı nedeniyle plak merkezinin altında oluşan gerilmeler	51
Şekil 38. Tüm gerilmelerin tek grafikte gösterimi.....	52
Şekil 39. ANSYS modellemesinin ana hatları	53
Şekil 40. Modelin mesh atandıktan sonraki görüntüsü	54
Şekil 41. Oluşturulan temas yüzeyi	54
Şekil 42. Yerçekimi ivmesi	55
Şekil 43. Beton kaplama altında oluşan çekme gerilmeleri	56
Şekil 44. Sadece kaplama ve temel ile yapılan hesaplama	56
Şekil 45. Zemin olması durumunda yer değiştirme miktarları.....	57
Şekil 46. Zemin bulunmayan durumda yer değiştirme miktarları.....	57
Şekil 47. 24 m kaplamada 5 enine derz bulunması halinde altta çekme gerilmeleri.....	58
Şekil 48. 24 m kaplamada 2 enine derz bulunması halinde altta çekme gerilmeleri.....	59
Şekil 49. 24 m kaplamada 1 enine derz bulunması halinde altta çekme gerilmeleri.....	59
Şekil 50. 24 m kaplamada enine derz bulunmaması halinde altta çekme gerilmeleri	60
Şekil 51. Sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri (5 derz)	60
Şekil 52. Sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri (3 derz)	61
Şekil 53. Sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri (2 derz)	61
Şekil 54. Sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri (1 derz)	62
Şekil 55. Sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri (derz yok).....	62
Şekil 56. 4 x 3.5 m boyutlu beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler	63
Şekil 57. 4.5 x 3.5 m boyutlu beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler	64
Şekil 58. 5 x 3.5 m boyutlu beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler	64
Şekil 59. 6 x 3.5 m boyutlu beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler	65
Şekil 60. 10 x 3.5 m boyutlu beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler	65
Şekil 61. 20 x 3.5 m boyutlu beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler	66
Şekil 62. 4 x 3.5 m boyutlu plak yüzeyinde sıcaklık ve tekil yük etkisinde gerilmeler	67
Şekil 63. 4 x 3.5 m boyutlu plak altında sıcaklık ve tekil yük etkisinde gerilmeler	67

Şekil 64. 5 x 3.5 m boyutlu plak yüzeyinde sıcaklık ve tekil yük etkisinde gerilmeler	68
Şekil 65. 5 x 3.5 m boyutlu plak altında sıcaklık ve tekil yük etkisinde gerilmeler	68
Şekil 66. Yüksek sıcaklık (50°C) etkisi altında genişleyen beton kaplama	69
Şekil 67. Genleşen kaplama yüzeyinde oluşan gerilmeler	70
Şekil 68. Genleşen kaplama altında oluşan gerilmeler	70
Şekil 69. Beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri (5 enine derz)	71
Şekil 70. Beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri (3 enine derz)	72
Şekil 71. Beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri (2 enine derz)	72
Şekil 72. Beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri (1 enine derz)	73
Şekil 73. Beton kaplama altında oluşan çekme gerilmeleri (Derz yok).....	73
Şekil 74. Negatif sıcaklık farkı durumunda oluşan gerilmeler	74
Şekil 75. Beton plağın tek başına olduğu durumda oluşacak gerilme	75
Şekil 76. ANSYS analizi sonucu elde edilen beton plak kenarı altındaki gerilmeler	76
Şekil 77. Formülasyonda elde edilen beton plak kenarı altında oluşan toplam gerilmeler	77
Şekil 78. ANSYS analizinde elde edilen beton plak merkezi altında oluşan gerilmeler	77
Şekil 79. Farklı plak kalınlıkları için kenar altındaki gerilme değerleri	78
Şekil 80. Tek plak olması durumunda kenar altında oluşan gerilmeler	78
Şekil 81. 10°C ve 15°C sıcaklık farkı durumunda oluşan gerilmeler	79

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Zemin türüne bağlı olarak tahmin edilen k değerleri.	8
Tablo 2. Maksimum ve minimum sıcaklığın en sık görüldüğü saatler	13
Tablo 3. Plaklarda maksimum düşey yer değiştirmeler	20
Tablo 4. Derzlerde maksimum yatay hareketler	22
Tablo 5. Dutch dizayn metodunda beton kaplamalarda standart sıcaklık gradyan dağılımı	28
Tablo 6. Donatısız beton plaklar için önerilen derzler arası mesafe	38
Tablo 7. Çalışmada ele alınan plak ve kayma donatısı boyutları	39
Tablo 8. Tasarım k değerleri	41
Tablo 9. PCC ısı genleşme katsayısı için değerler (α)	43
Tablo 10. PCC büzülme katsayısı değerleri (ϵ)	44
Tablo 11. Tekerlek yükü ve sıcaklıktan kaynaklanan eğilmede çekme gerilmeleri	47
Tablo 12. ANSYS tasarımında kullanılan malzeme özellikleri	53
Tablo 13. Boyuna doğrultuda kenar yüklemesi sonuçları (sıcaklık değişimi yok)	79
Tablo 14. Yalnız sıcaklık etkisinde plak merkezi altında oluşan çekme gerilmeleri	80
Tablo 15. Sıcaklık değişimi nedeniyle eğilen plak merkezi altında oluşan gerilmeler	82
Tablo 16. Hesaplanan, sıcaklık değişimine bağlı plak merkezi altında oluşan gerilmeler ..	83
Tablo 17. Doğrusal olmayan sıcaklık değişimi etkisinde oluşan çekme gerilmeleri	83
Tablo 18. Beton dayanımları arasındaki ilişki	84
Tablo 19. 1C beton plağı için gerilme analizi	85
Tablo 20. 1G beton plağı için gerilme analizi	86
Tablo 21. 2C beton plağı için gerilme analizi	86

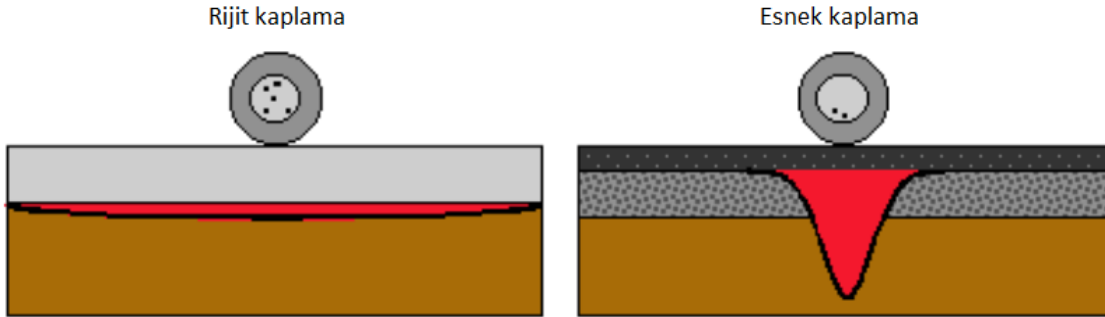
SEMBOLLER DİZİNİ

- a: Tekerlek yükünün yayılma alanına eşdeğer dairenin yarıçapı (mm)
- b: Yük dağılım dairesinin eşdeğer yarıçapı (mm)
- C: Destek uzunluğu
- C_x, C_y : Bradbury katsayısı
- E: Elastisite modülü (N/mm^2)
- f: Sürtünme katsayısı
- h: Beton plak kalınlığı (mm)
- k: Zemin reaksiyon katsayısı (N/mm^3)
- L: Beton plak uzunluğu (m)
- l: İzaflı rijitlik yarıçapı
- P: Tekerlek yükü (N)
- t: Beton plak yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
- T_t : Beton plak yüzey sıcaklığı
- T_b : Beton plak taban sıcaklığı
- W: Beton plak genişliği
- α : Isıl genleşme katsayısı ($^{\circ}C^{-1}$)
- Δt : Sıcaklık gradyanı ($^{\circ}C/cm$)
- σ : Gerilme (N/mm^2)
- γ : Betonun birim ağırlığı (kg/m^3)
- v: Poisson oranı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Karayolu üst yapıları, yapımda kullanılan malzemeye ve yüzey çeşidine göre rijit üstyapı, esnek üstyapı ve kompozit üstyapı olarak üç gruba ayrılır. Rijit üstyapılarda kaplama tabakasında, bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılırken esnek üstyapılarda asfalt kullanılmaktadır. Kompozit üstyapılarda ise beton ve asfalt tabakaları birlikte kullanılır. Esnek üstyapılarda yük, kaplama ve temel tabakalarında taşınarak zemine aktarılır ve tabaka sayısı daha fazladır. Rijit üstyapılarda ise beton kaplama tabakası betonun yüksek elastisite modülü ve rijitliği sayesinde yükü büyük ölçüde karşılar, temel tabakası da beton kaplamaya düzgün bir yüzey teşkil eder (Şekil 1). Üstyapı kaplaması, trafik türü, mevcut ve beklenen trafik hacmi, sürüş güvenliği ve konforu, zemin ve çevre koşulları, yapım ve bakım maliyeti gibi faktörlere bağlı olarak seçilir ve tasarlanır (Yeğinobalı, 2009).



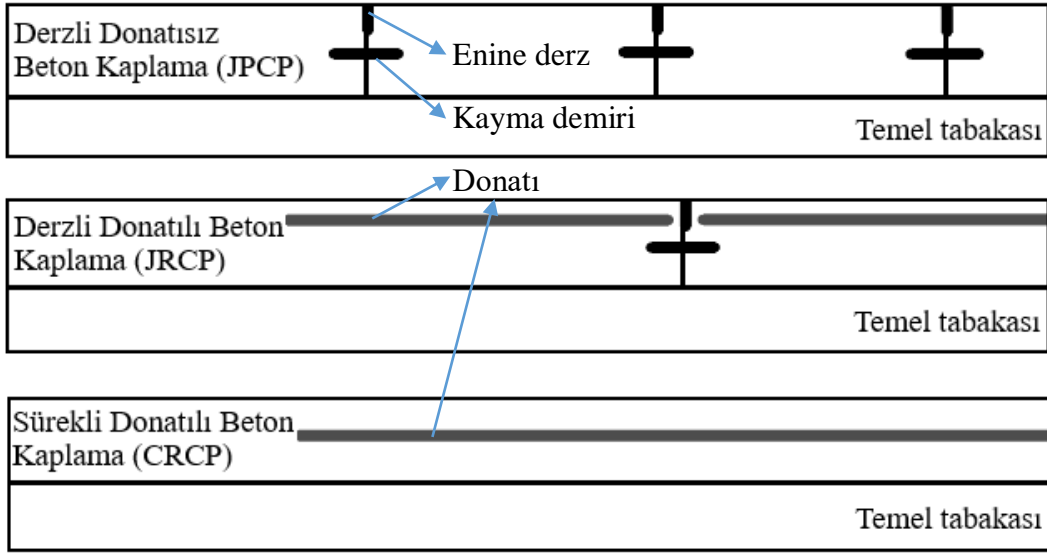
Şekil 1. Kaplamalarda yük dağılımı

Kaplama türü seçilirken bakılan en önemli etkenlerden biri de maliyettir. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğine (2017) göre beton yolun ilk yapım maliyeti, artan petrol fiyatları sebebiyle asfalt yollar ile rekabet edebilir seviyeye gelmiştir. Taban zemininin zayıf olması durumunda beton kaplama, düşük trafik hacimlerinde bile asfalt kaplamalara göre daha ekonomik olmaktadır. Zeminin kuvvetli olması durumunda ise asfalt kaplama belirli bir trafik değerine kadar daha ucuzken yüksek trafik hacimlerinde beton kaplama daha ekonomik olmaktadır (THBB, 2003). Servis ömrünün asfalt yollara nazaran uzun olması ve

bakım masraflarının az olması, beton yolları asfalt yollara göre daha ekonomik bir seçenek haline getirmektedir. Asfalt yollarda, yapımlarından 3-5 yıl sonra bakım onarım çalışmalarına gerek duyulmakta, 10 yıl sonra ise kaplama yüzeyinin yenilenmesi gerekmektedir. Ancak beton yollarda, hizmet ömürleri boyunca 4-5 yılda bir derz dolgusu kontrolü yapılır ve genellikle ilk onarımlar 10-12 yıl sonra gerekebilir. Beton yolların faydalı ömürleri asfalt yollardan daha fazladır. Asfalt yollar genellikle 20 yıllık hizmet süresi için projelendirilirken beton yollarda bu süre 40-50 yıla ulaşmaktadır. Araştırmalara göre asfalt yollarda araç tekerleri (özellikle ağır vasıta) esnek olan yüzeye gömülerek yakıt maliyetini artırmaktadır. Bu tür taşıtlar için beton kaplama ortalama %5-11 arası yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Tüm bunların ötesinde beton yerli ve yaygın bir üretime sahiptir. Beton yolların dezavantajları da vardır. Beton yolun servise açılması için bir süre beklenmesi gerekir. Ayrıca beton yollardaki onarımlar da asfalt yola göre daha uzun sürmektedir. Sürüş konforu olarak bakılırsa beton yolların daha gürültülü olduğu söylenebilir.

Beton yollar, ABD ve Avrupa'da yaklaşık 100 yıllık bir geçmişe ve yoğun bir kullanıma sahiptir. ABD'de, özellikle yoğun trafiğe maruz şehirlerde beton yollar kullanılmaktadır. Los Angeles gibi bazı büyük şehirlerde çevre yollarında beton yol kullanım oranı %90'a yaklaşmıştır. ABD'de ilk beton yol 1891 yılında Ohio'da yapılmıştır. Avustralya'da 1880 yılında Sydney şehrinin ağır trafik taşıyan caddeleri için beton kaplama yapılmış ve bu yol en az 50 yıl hizmet vermiştir. Avrupa'da ise geçtiğimiz yüzyılın başlarından itibaren yaygınlaşmıştır. Belçika'da 1920'lerde, Almanya'da 1930'larda beton yollar yaygınlaşmaya başladı. Belçika'da bugün köy yollarının bile %60'ı betondandır. Asya'da Japonya ve Çin'de beton yollar yapılmakta, Hindistan'da ise 1300 km beton yol bulunmaktadır. Türkiye'ye bakıldığında ise yaklaşık 2000 km otoyol, 31000 km devlet yolu ve 31000 km'si il yolu olmak üzere toplam 64000 km karayolu ağı bulunmaktadır. Bu yolların %81'i asfalt sathi kaplama, %13'ü asfalt betonu geri kalanı ise stabilize veya toprak yoldur. Yaklaşık 294000 km köy yollarının ise %27'si asfalt sathi kaplama, geri kalanı stabilize ve toprak yoldur (Yeğınobalı, 2010). Türkiye'de beton yol yapımı TÇMB finansmanı ile Afyonkarahisar ve İstanbul'da yapılan 5.5 km ile başlamış ve daha sonra birkaç beton yol daha eklenmiştir. Günümüzde ise Eskişehir İnönü'de 10 km beton yol yapımına başlanmış ve Eskişehir Seyitgazi'de 30 km, Tepebaşı ilçesinde ise 9 km daha beton yol yapılması planlanmaktadır. Diğer ülkelere bakıldığında ülkemizdeki beton yol kullanımının yok denecek kadar az olduğu görülmektedir.

Beton kaplamalar, derzli donatısız (JPCP), derzli donatılı (JRCP), sürekli donatılı (CRCP) ve kompozit donatılı olarak sınıflandırılır. Derzli donatısız beton kaplamalarda kayma ve bağlantı donatıları dışında betonun içinde donatı bulunmaz. Derzli donatılı beton kaplamalarda ise derzler ile kesilmiş beton plakların içinde güçlendirme donatıları bulunur ve bu yollarda derzler, derzli donatısız kaplamaya göre daha seyrekler. Sürekli donatılı beton kaplamalarda beton yol boyunca kesintisiz donatı bulunur (Şekil 2). Bu sebeple derz bulunmaz. Derz yerine bu yollarda kontrollü çatlakların oluşması beklenir.

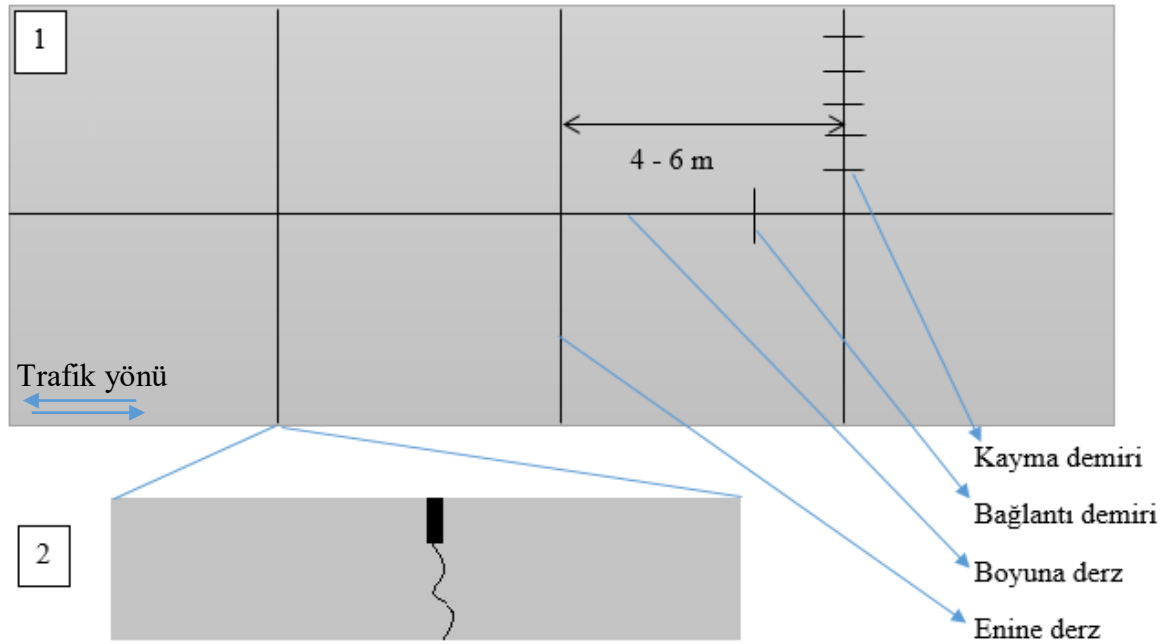


Şekil 2. Beton kaplama türleri

Beton basınç dayanımı yüksek bir malzemedir. Ancak plaka halindeki beton kaplama yüklendiği zaman kaplamanın altında eğilmede çekme gerilmeleri oluşur. Trafik yüküne ilaveten gece gündüz arası sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde beton sıcaklık etkisinde genleşip büzülerek eğildiği zaman kendi ağırlığıyla yüklenir ve kritik yükleme durumuna gelir. Trafik yükü ve sıcaklık etkisinde kendi ağırlığı ile yüklenen beton kaplama, dayanımı yetmediğinde çatlama başlar. Bu yüklerin altında beton kaplamanın çatlama için ise derzler kullanılır.

1.2. Derzli Donatısız Beton Kaplamalar

Derzli donatısız beton kaplamalarda, derzli donatılı beton kaplamalar ve sürekli donatılı beton kaplamaların aksine beton plaklar boyunca donatı bulunmaz. Sadece plaklar arasında yük aktarımı için kayma donatısı ve bağlantı donatısı bulunabilir (Şekil 3). Donatısız beton kaplamalarda; trafik yükünden kaynaklanan gerilmeler, plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimine bağlı olarak plakta oluşan eğilmeler ve gerilmeler, sıcaklık değişimine bağlı plakta oluşacak büzülme ve genleşme nedeniyle plak altındaki tabaka ile plak arasında oluşan sürtünme gibi sebeplerle çatlamlar oluşur. Bu çatlamların önlenmesi için beton kaplamalarda derzler kullanılır. Bu derzler enine ve boyuna doğrultuda oluşturulur (Şekil 4). Enine ve boyuna doğrultulu derzler sayesinde beton yol beton plaklara bölünür. Gerilmeleri sınırlamak için beton plaklar olabildiğince kare şekilli ve sınırlı boyutlarda olmalıdır. Bu derzler 3 – 6 mm genişliğinde ve beton plak kalınlığının 1/3'ü veya 1/4'ü derinliğinde kesilir (ACPA).



Şekil 3. Derzli donatısız beton kaplama (1) ve derzin enine görüntüsü (2)

Yükün beton plaklar arasında daha iyi aktarılması için enine derzlere, beton plak kalınlığının ortasından kayma donatısı uygulanabilir. Kayma donatıları, yaklaşık 30 cm aralıklarla yerleştirilir ve boyutları beton plak kalınlığına göre değişmekle birlikte yaklaşık 3 cm çap ve 50 cm uzunluğa sahip olan çelik çubuklardır. Donatısız beton kaplamalarda kayma donatısı ve bağlantı donatısı hariç donatı bulunmaz.

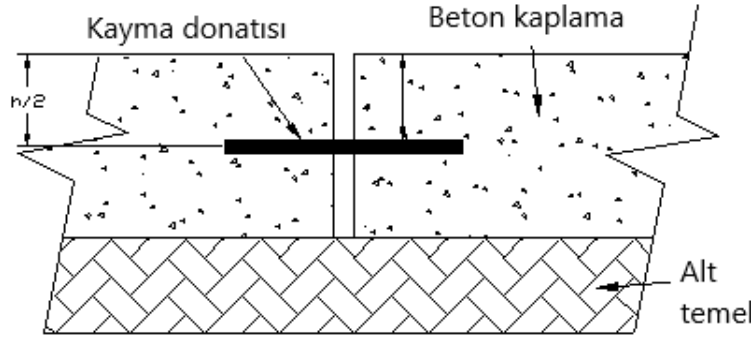
Ayrıca beton yolların genleşme ve büzülmesine olanak sağlayan genleşme derzleri de bulunur. Bu derzler tam derz tipindedir. Yani beton plak kalınlığı boyunca oluşturulur. Genleşmeye engel olacak maddelerin ve suyun derzlere girmemesi için bu derzler, sıkışabilir ve geçirimsiz bir dolgu malzemesi ile doldurulur (Şekil 5).



Şekil 4. Beton kaplamada derzler

Enine derz

Boyuna derz



Şekil 5. Beton kaplamada genleşme derzi (FHWA, 2009).

1.3. Beton Kaplamalarda Gerilmeler

Beton kaplamalarda; trafik yükü, sıcaklık değişimi, sürtünme, nem, büzülme gibi sebeplerle yer değiştirmeler ve buna bağlı olarak gerilmeler oluşur. Beton plaklara; trafik yükünden dolayı eğilmede çekme gerilmesi, sıcaklık farkı ve betonun eğilmesinden kaynaklanan eğilmede çekme gerilmeleri, mevsimsel sıcaklık değişimi ile betonun genişmesi ve büzülmesi ile sürtünmeye bağlı gerilmeler etki eder. Beton yollarda oluşan gerilmelerin hesaplanabilmesi için çeşitli formüller geliştirilmiştir. Trafik yükü gerilmeleri için Westergaard formüller geliştirmiştir (Mathew ve Krishna Rao, 2007). Sıcaklık değişimi sebebiyle gerilmeler için ise Eisenmann ve Bradbury formüller geliştirmişlerdir (Houben, 2009; Krishna Rao, 2015).

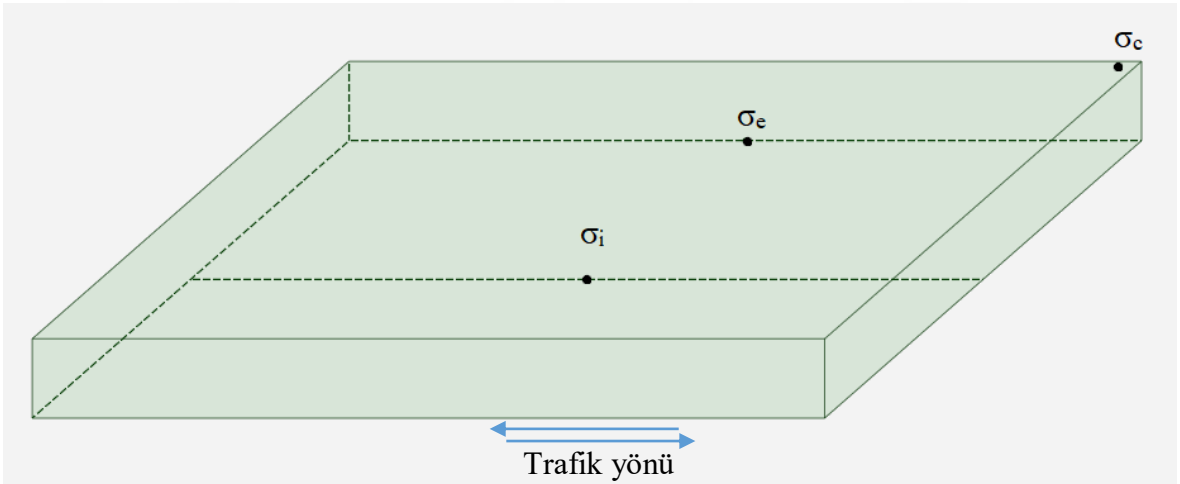
Betonun prizi sırasındaki büzülme ve sıcaklık değişimleri nedeniyle oluşan gerilmeler ve yer değiştirmeler beton kaplamayı derzler ile plakalara bölerek azaltılır. Betonda nemden kaynaklanan gerilmeler ise sadece aşırı iklim koşullarında önemlidir. Bu gerilmeler, yüzeyin tabandan daha çok kuruması durumunda beton plağın bükülmesi ile gerçekleşir. Ilıman iklimlerde betonun kurutulması önemli bir sorun değildir (Houben, 2009).

Gerilmeler;

- Tekerlek yükünden kaynaklanan gerilmeler
- Sıcaklık değişimine bağlı gerilmeler
- Betonun sertleşmesi sırasında büzülmeden kaynaklanan gerilmeler ve betonun nem içeriğindeki değişimler ile oluşan gerilmeler

1.3.1. Tekerlek Yükünden Kaynaklanan Gerilmeler

Rijit kaplamalar yük altında esnek üst yapılar gibi esneklik gösteremezler. Bu sebeple yük taşıma kapasiteleri rijitliğe ve plağın yüksek elastisite modülüne bağlıdır (Mathew ve Krishna Rao, 2007). Westergaard, elastik bir temel üstündeki rijit bir plakta tek tekerlek yükü nedeniyle oluşan maksimum eğilmede çekme gerilmeleri ve maksimum yer değiştirmeler için teori geliştirmiştir. Westergaard'ın geliştirdiği formüller yardımıyla plakta kritik gerilmeler; plak merkezinin altında, plak kenarının altında ve plak köşesinin üstünde hesaplanabilir (Şekil 6). Bunlar kritik gerilme noktalarıdır (Houben, 2009).



Şekil 6. Plakta tekerlek yükü nedeniyle oluşan kritik gerilmelerin yerleri

- σ_e : Plak kenarının altındaki eğilmede çekme gerilmesi
- σ_i : Plak merkezinin altındaki eğilmede çekme gerilmesi
- σ_c : Plak köşesinin üstündeki eğilmede çekme gerilmesi

Westergaard rijit plağı, yoğun bir sıvı olarak kabul ettiği zemin üzerinde yatan ince elastik bir plaka olarak düşünür. Yukarı yönlü tepki ile eğilmenin orantılı olduğunu varsayar. Bu varsayım ile Westergaard taban zemini reaksiyon modülü k 'yı kg/cm^3 biriminden şöyle hesaplamıştır: (Mathew ve Krishna Rao, 2007)

$$k = \frac{p}{\Delta} \quad (1)$$

Burada;

k: zemin reaksiyon katsayısı (Tablo 1)

Δ : 0.125 cm olarak alınan yer değiştirme seviyesi

p: 0.125 cm'lik bir eğilmede 75 cm'lik rijit plaka tarafından beklenen basınç

Plak eğilmesine karşı zemin bir direnç oluşturur. Zemindeki deformasyon plak eğilmesine bağlı olarak oluşan deplasmanla aynıdır. Bu nedenle plak eğilmesi, doğrudan zemin basıncının değerini verir. Rijit kaplamalardaki bu basınç deformasyon karakteristiği, izafi rijitlik yarıçapı terimini tanımlamasında Westergaard'a yardım etmiştir. İzafi rijitlik yarıçapı, mm biriminden; (Mathew ve Krishna Rao, 2007)

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12k(1 - \nu^2)}} \quad (2)$$

Burada;

l: izafi rijitlik yarıçapı (mm)(diğer bilinmeyenlere göre 450 mm ile 1900 mm arası değerler olabilir)

E: elastisite modülü (N/mm²) (beton sınıfına göre 27000 MPa ile 37000 MPa arası)

ν : betonun Poisson oranı (0.2)

h: beton plak kalınlığı (mm) (15 cm ile 40 cm arası değişebilir)

k: zemin reaksiyon katsayısı (N/mm³) (Tablo 1)

Tablo 1. Zemin türüne bağlı olarak tahmin edilen k değerleri (İMO, 2006).

Zemin Cinsi	k değeri (N/mm ³)	
	Alt değer	üst değer
Humuslu toprak	0.0050	0.015
nceki toprak set	0.010	0.02
İnce veya az sıkıştırılmış kum	0.015	0.03
İyi sıkıştırılmış kum	0.050	0.10
Çok iyi sıkıştırılmış kum	0.100	0.15

Tablonun devamı

Kil veya KK (nemli)	0.030	0.06
Kil veya KK	0.080	0.10
Kum kil	0.080	0.10
Kumlu kırmataş	0.100	0.15
İri kırmataş	0.200	0.25
İyi sıkıştırılmış kırmataş	0.200	0.30

$$a < 1.724 h \text{ için } b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \quad (3)$$

$$\text{Aksi takdirde } b = a \quad (4)$$

Westergaard'ın kritik gerilme formülleri;

$$\sigma_i = \frac{0.316 P}{h^2} \left[4 \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 1.069 \right] \quad (5)$$

$$\sigma_e = \frac{0.572 P}{h^2} \left[4 \log_{10} \left(\frac{l}{b} \right) + 0.359 \right] \quad (6)$$

$$\sigma_c = \frac{3 P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (7)$$

Burada;

σ_i : plak merkezinin altındaki eğilmede çekme gerilmesi

σ_e : plak kenarının altındaki eğilmede çekme gerilmesi

σ_c : plak köşesinin üstündeki eğilmede çekme gerilmesi

h: beton plak kalınlığı (mm) (15 cm ile 40 cm arası değişebilir)

P: tekerlek yükü (N) (8.9 kN ile 133.4 kN arası (AASHTO))

l: izafi rijitlik yarıçapı (mm)

a: tekerlek yükünün yayılma alanına eşdeğer dairenin yarıçapı (mm)

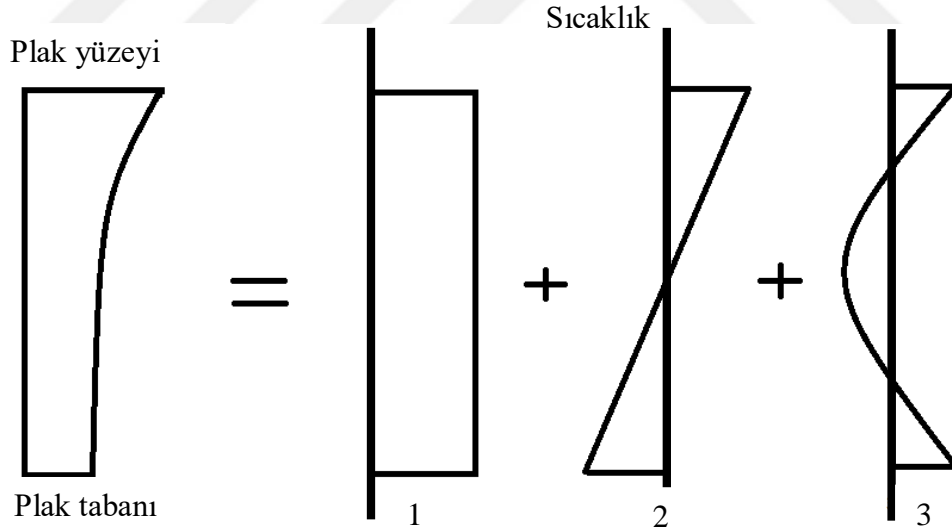
b: yük dağılım dairesinin eşdeğer yarıçapı (mm)

Bu gerilmelerden en kritik olanlar kenar ve merkez altında oluşan σ_e ve σ_i 'dir. Formüllerden görüleceği üzere plak kalınlığının artması gerilmeyi düşürecektir (Şekil 6).

1.3.2. Beton Kaplamada Sıcaklık Değişimlerinin Etkisi

Sıcaklık değişimi beton kaplamalarda yatay ve düşey doğrultulu yer değiştirmelere dolayısıyla gerilmelere neden olur.

- Beton plaktaki sıcaklık değişimi nedeniyle plağın genişmesi ve büzülmesi, beton plak ile plağın altındaki temel tabakası arasında sürtünme gerilmesi (basınç ve çekme gerilmeleri) oluşturur (Şekil 7 - 1).
- Gün içinde sıcaklık değişimleri dolayısıyla oluşan, beton plak kalınlığı boyunca değişken olan sıcaklık, beton plakta eğilme gerilmeleri oluşturur (Şekil 7 - 2).
- Plak kalınlığı üzerinde düzensiz sıcaklığa bağlı gerilmeler (Şekil 7 - 3). Bu gerilmeler çok ince beton plaklarda dikkate alınır. Normal plak kalınlıklarında ihmal edilebilir. (Houben, 2009)

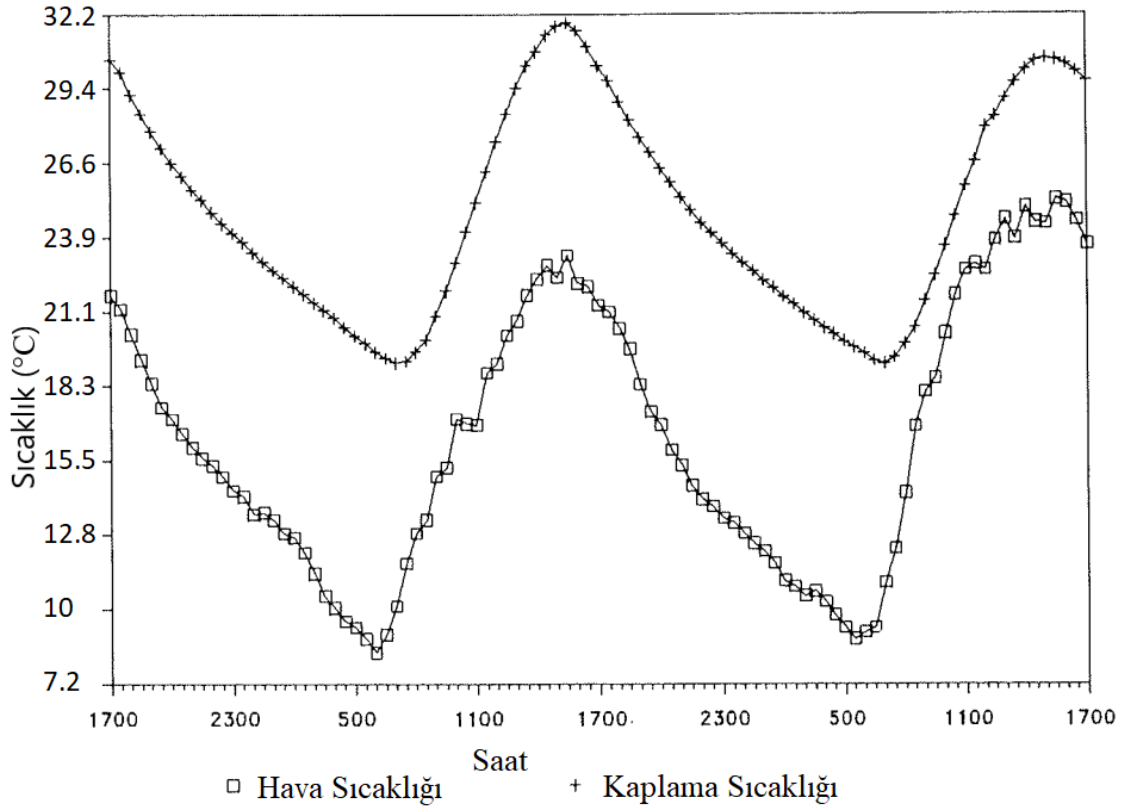


Şekil 7. Beton plak kalınlığı boyunca etki eden sıcaklık

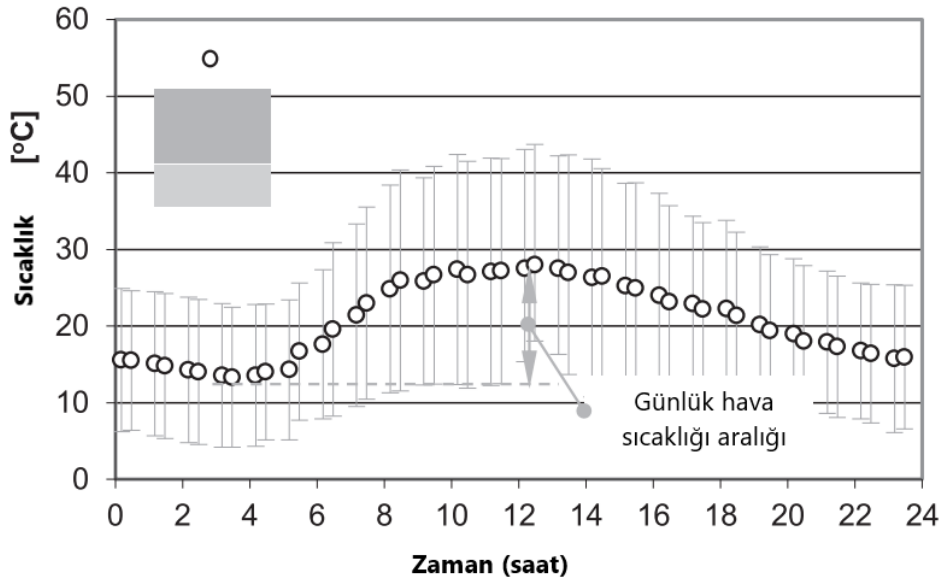
1. Düzenli sıcaklık değişimi, ΔT (Genleşmeye sebep olur)
2. Plak kalınlığı boyunca değişken olan sıcaklık, Δt (Eğilmeye sebep olur)
3. Düzensiz sıcaklık değişimi

1.3.3. Beton Plak Kalınlığı Boyunca Oluşan Sıcaklık Dağılımı

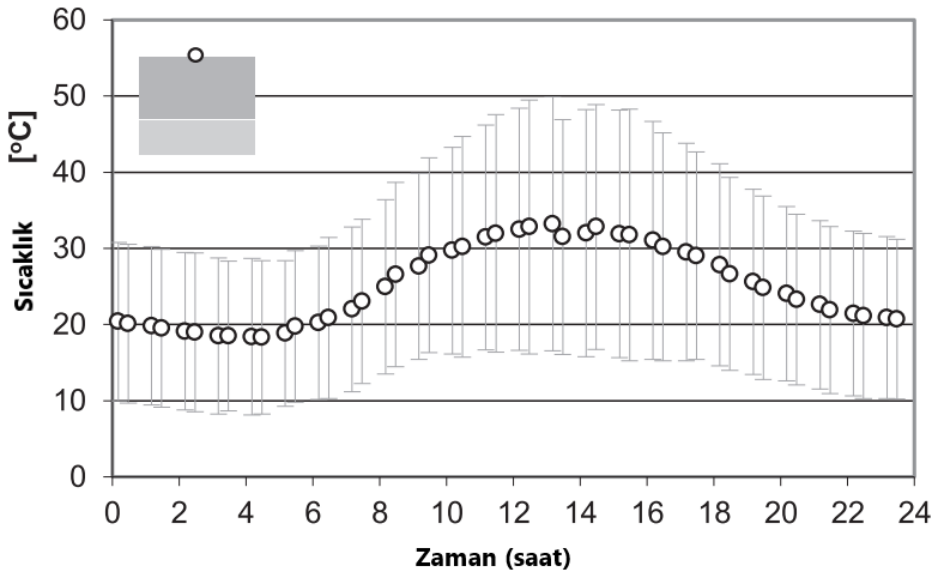
Beton kaplamanın sıcaklığı hava sıcaklığının değişmesiyle önemli ölçüde değişir (Armaghani vd., 1987). Bu sıcaklık değişimleri Şekil 8, 9 ve 10'da görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere gündüz beton plak sıcaklığı daima hava sıcaklığından yüksektir. Beton kaplama ve hava sıcaklığı arasındaki fark, Armaghani vd. nin 1982'de Florida'da 23 cm kaplama kalınlığına sahip bir test yolu üzerinde yaptığı çalışmaya göre güneşli günlerde yaklaşık 10°C 'dir. Buna karşın bulutlu ve yağmurlu günlerde sıcaklık farkının önemli ölçüde düşmekte olduğu söylenmiştir. Mackiewicz'in (2014) yaptığı çalışmada ise yaklaşık 5°C 'lık bir fark vardır. Kaplamada maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinin, hava sıcaklığının maksimum ve minimum değerlerine ulaşmasından yaklaşık 1-2 saat sonra oluştuğu görülmektedir.



Şekil 8. Güneşli bir günde alınan, saatlik hava ve kaplama sıcaklık değerleri (Armaghani vd., 1987).



Şekil 9. Polonya'da Temmuz ayında ölçülen 30 günlük hava sıcaklığı (Mackiewicz, 2014).



Şekil 10. Polonya'da Temmuz ayında kaplama yüzeyinde ölçülen 30 günlük sıcaklık (Mackiewicz, 2014).

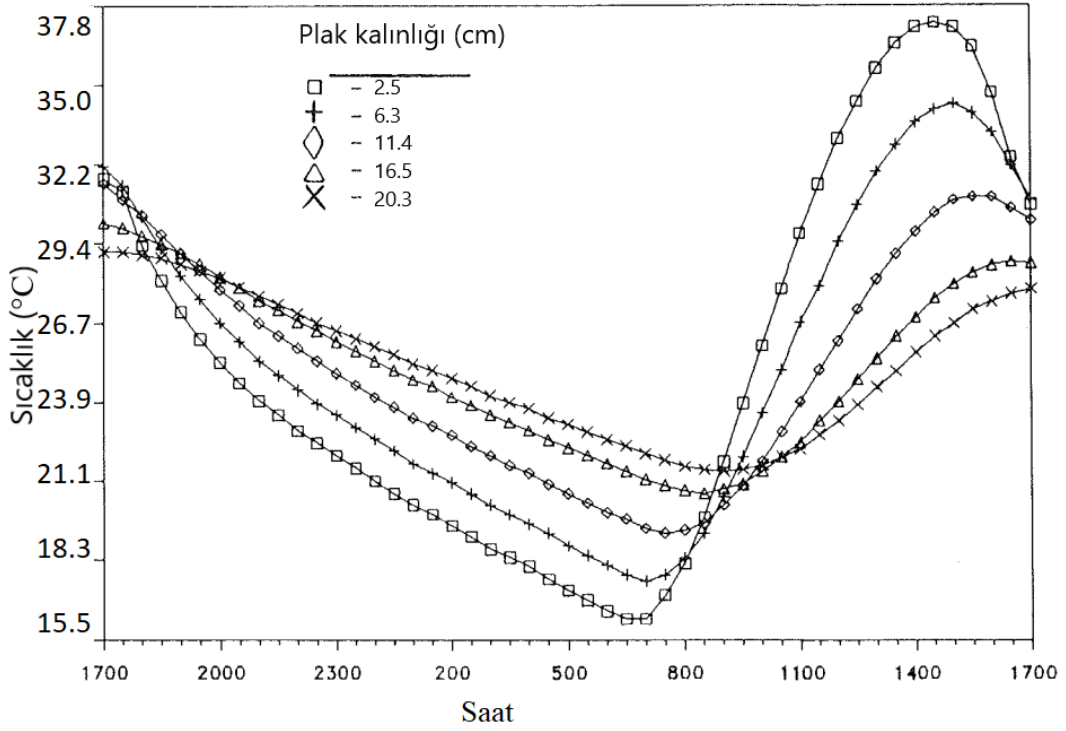
Yine Armaghani vd.'nin (1987) yaptığı çalışmada 1983-1986 arasında ölçülen sıcaklıkların istatistiksel analizi Tablo 2'den görülmektedir. Buna göre minimum hava sıcaklığı en çok 5:00 – 7:00 saatleri arasında, minimum ortalama plak sıcaklığı en çok 6:00 – 8:00 saatleri arasında gerçekleşmiştir. Diğer yandan maksimum hava sıcaklığı en çok 12:00 – 14:00 saatleri arasında ve maksimum ortalama plak sıcaklığı ise en çok 13:00 –

15:00 saatleri arasında gerçekleşmiştir. Tabloda belirtilen pozitif sıcaklık farkı, kaplama yüzey sıcaklığının taban sıcaklığından daha fazla olduğu durumu, negatif sıcaklık farkı ise bunun tersini belirtmektedir.

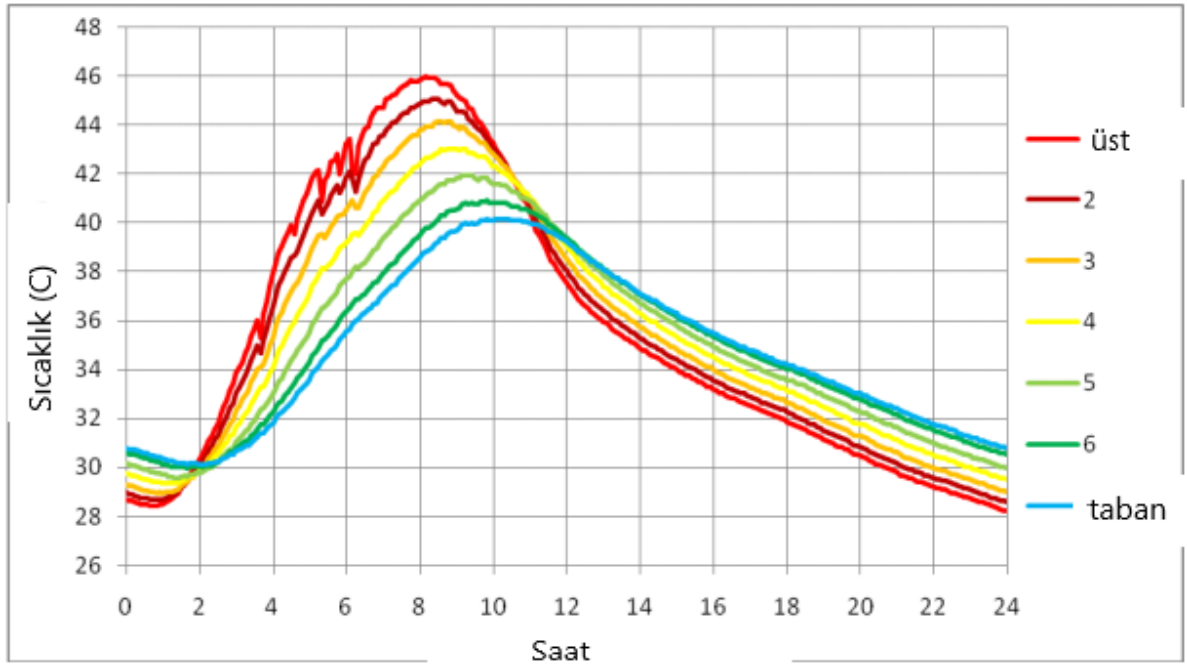
Tablo 2. Maksimum ve minimum sıcaklığın en sık görüldüğü saatler (Armaghani vd., 1987).

	Minimum		Maksimum	
	Saat (24h)	%	Saat (24h)	%
Hava sıcaklığı	5:00 – 7:00	64	12:00 – 14:00	36
Ort. Kaplama sıcaklığı	6:00 – 8:00	81	13:00 – 15:00	68
Kaplama yüzey sıcaklığı	6:00 – 8:00	72	13:00 – 15:00	71
Kaplama merkez sıcaklığı	7:00 – 9:00	74	15:00 – 17:00	68
Kaplama taban sıcaklığı	8:00 – 10:00	71	17:00 – 19:00	61
Negatif sıcaklık farkı	---	---	5:00 – 7:00	54
Pozitif sıcaklık farkı	---	---	12:00 – 15:00	67

Bu sıcaklık değişimleri beton kaplamanın yüzeyinden tabanına kadar doğrusal olmayan bir sıcaklık dağılımının oluşmasını sağlar. Armaghani vd.'nin (1987) yaptığı çalışmasından alınan Şekil 11'de ve Karunarathne vd.'nin (2010) yaptığı çalışmadan alınan Şekil 12'de plak kalınlığına göre 24 saatlik sıcaklığın dağılımı görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi gece ile gündüz arası sıcaklık değişiminin en fazla olduğu yer plağın yüzeyidir. Tabana doğru gidildikçe gece ile gündüz arası sıcaklık değişimi de azalmaktadır. Geceleri plak yüzeyi tabandan daha soğuktur. Gündüz ise yüzey sıcaklığı taban sıcaklığından fazladır.

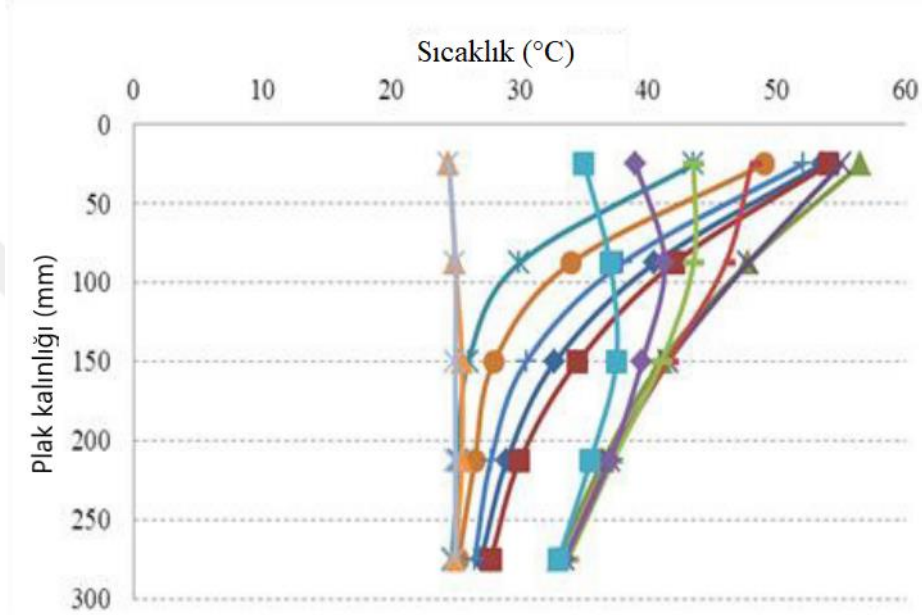


Şekil 11. Beton plak kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi (Armaghani vd., 1987).

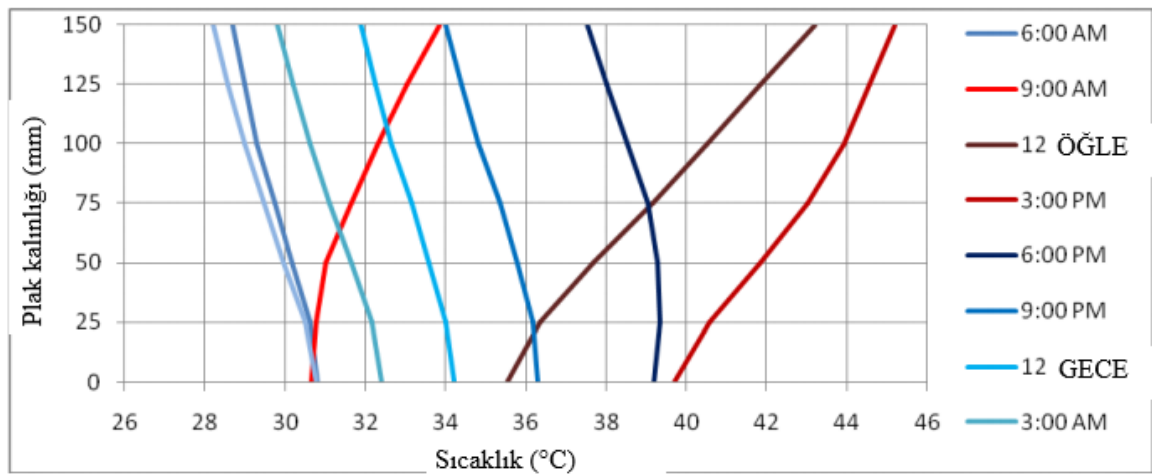


Şekil 12. Beton plak kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi (Karunaratne vd., 2010).

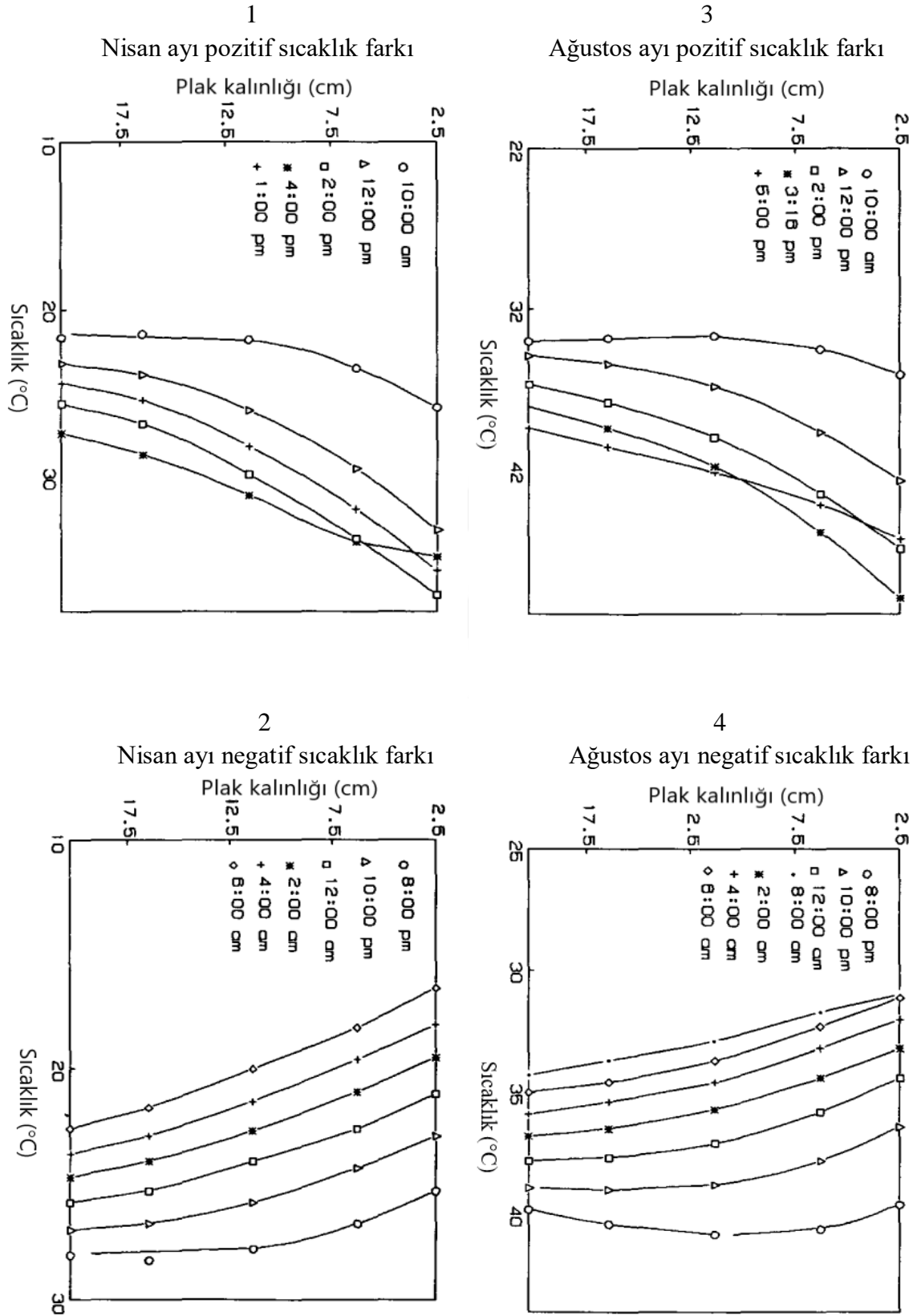
Şekil 13, 14, 15, 16 ve 17’de plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri farklı zaman dilimleri için gösterilmektedir. Sıcaklık değişiminin plak kalınlığı boyunca doğrusal olmadığı şekillerden görülmektedir. Plak tabanı ile yüzeyi arasındaki en büyük sıcaklık farkı şekillerden görüldüğü gibi öğleden sonra saat 13 – 14 civarında olmaktadır. En büyük negatif sıcaklık farkı ise sabaha doğru güneşin en uzun süre görülmediği saatlerdedir.



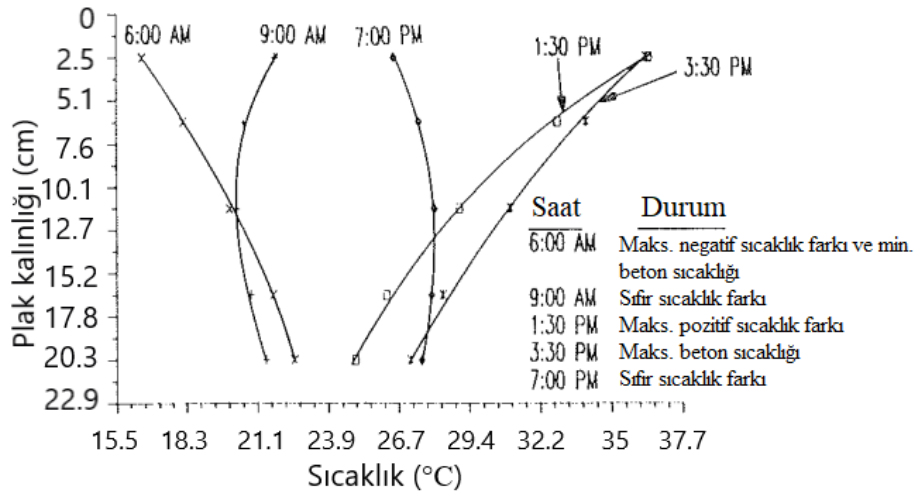
Şekil 13. Beton örnek içinde doğrusal olmayan sıcaklık değişimleri (Maitra vd., 2013).



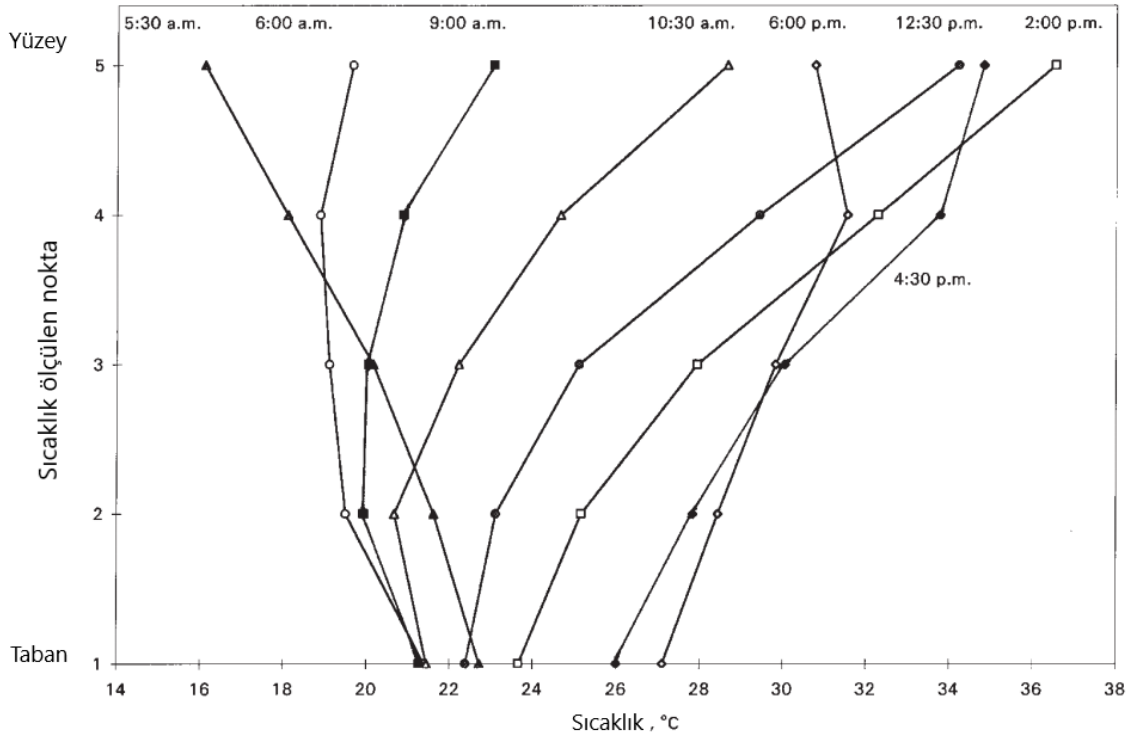
Şekil 14. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri (Karunaratne vd., 2010).



Şekil 15. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri (Choubane vd., 1995).

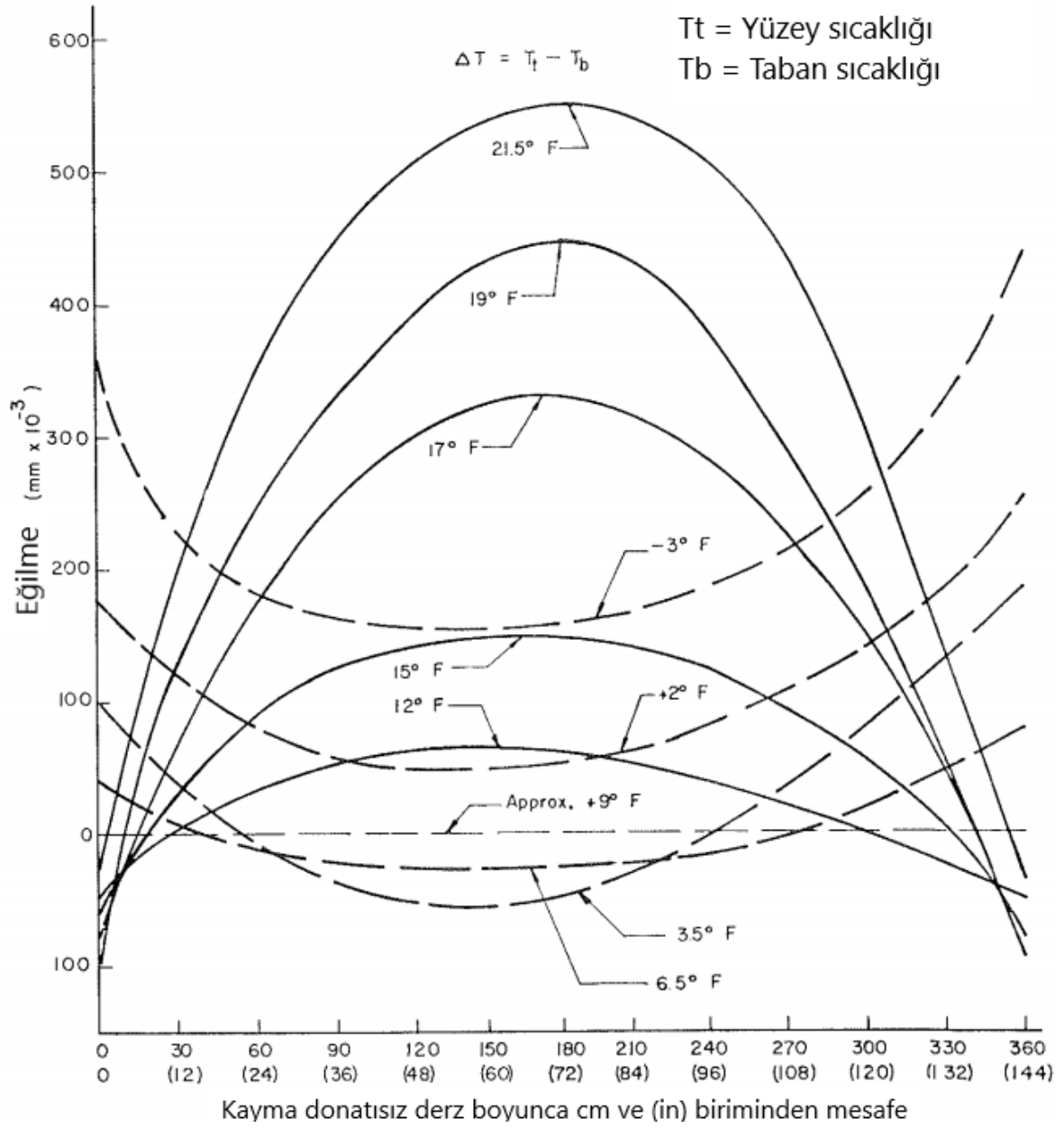


Şekil 16. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri (Armaghani vd., 1987).



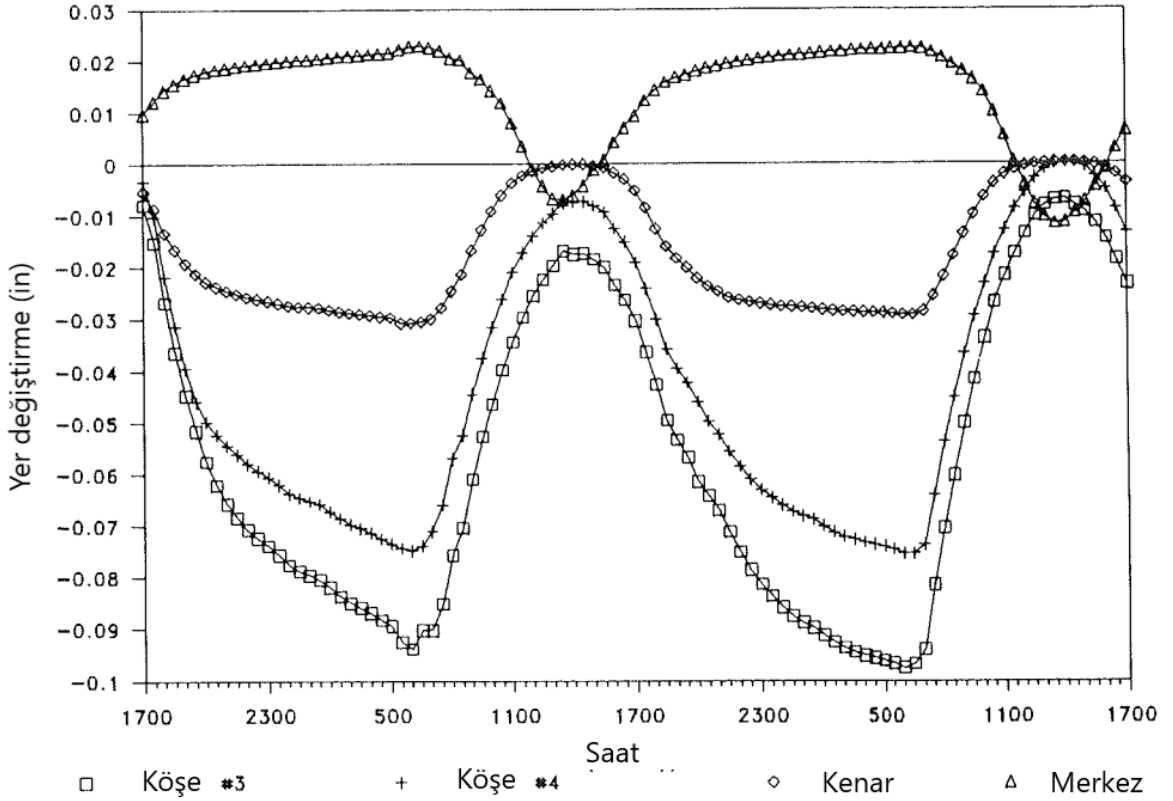
Şekil 17. Plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri (Yu vd., 1998).

Plak yüzeyi ile tabanı arasındaki bu sıcaklık farkı plakta şekil değiştirmelere sebep olur. Yüzey sıcaklığı fazla olduğu zaman plak yüzeyi daha fazla genişler ve plak kenar ve köşeleri aşağı yönlü eğilir. Yüzey sıcaklığı daha az olduğu durumda ise plak kenar ve köşeleri yukarı yönlü eğilir. Şekil 18'de yüzey ve taban arasındaki sıcaklık farklarına göre eğilme miktarları görülmektedir.

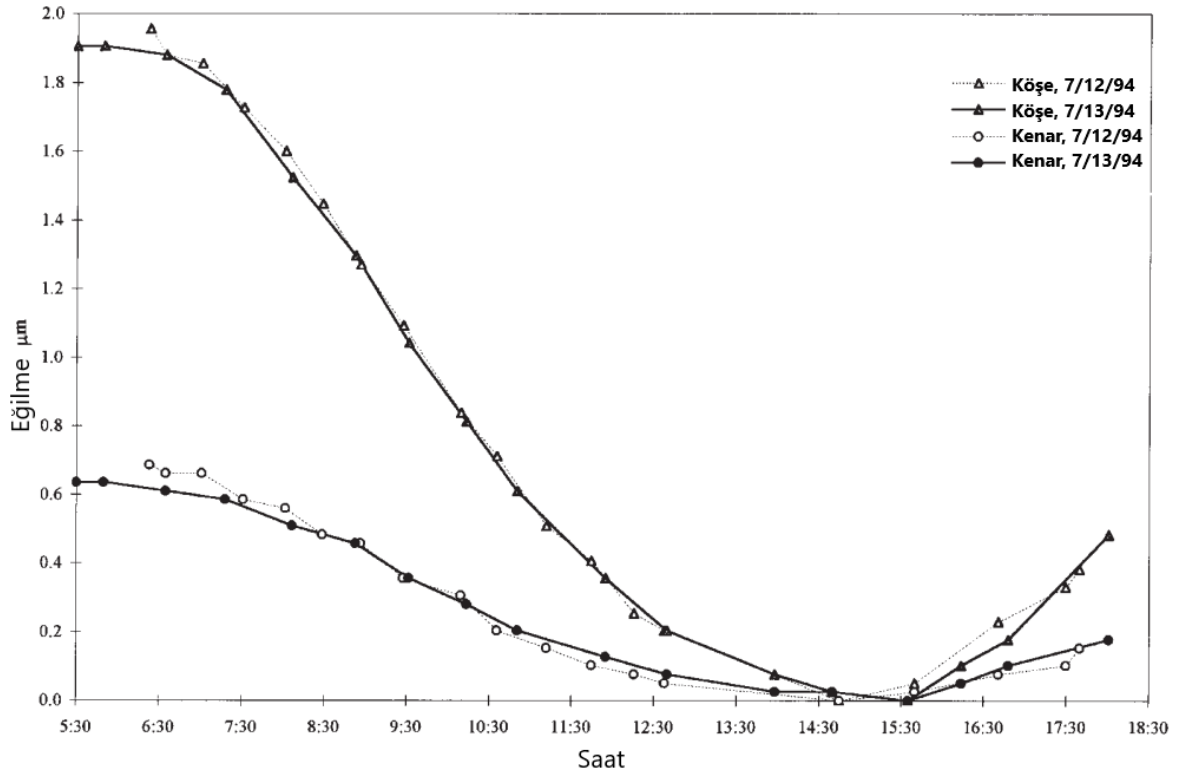


Şekil 18. Yüzey ve taban arası sıcaklık farklarına göre eğilme miktarları (Armaghani vd., 1987).

Düşey yer değiştirmeler Şekil 19'da görölmektedir. Bekleneceği üzere plak merkezindeki yer değiştirme ile kenar ve köşelerdeki yer değiştirme birbirine zıt istikamettedir. Ayrıca kenar ve köşelerin yer değiştirmesi merkezden daha fazladır. Yaklaşık olarak saat 6'da, negatif sıcaklık farkının maksimum olduğu saatlerde, merkez, kenar ve köşelerde yer değiştirmeler maksimum seviyelerine ulaşmaktadır. Ayrıca Yu vd. (1988) yaptıkları çalışmada ölçtükleri düşey yer değiştirmeler de Şekil 20'de görölmektedir. İki grafikten ve Şekil 14 ve Şekil 17'den görüleceği üzere kenar ve köşelerdeki en büyük yer değiştirmeler, sabah saat 5 – 6 arasında negatif sıcaklık farkının en büyük değere ulaştığı saatlerde gerçekleşmiştir.



Şekil 19. Beton plağın merkezi, kenarı ve köşesindeki düşey yer değiştirmeler (Armaghani vd., 1987).



Şekil 20. Beton plağın kenarı ve köşesindeki düşey yer değiştirmeler (eğilmeler) (Yu vd., 1998).

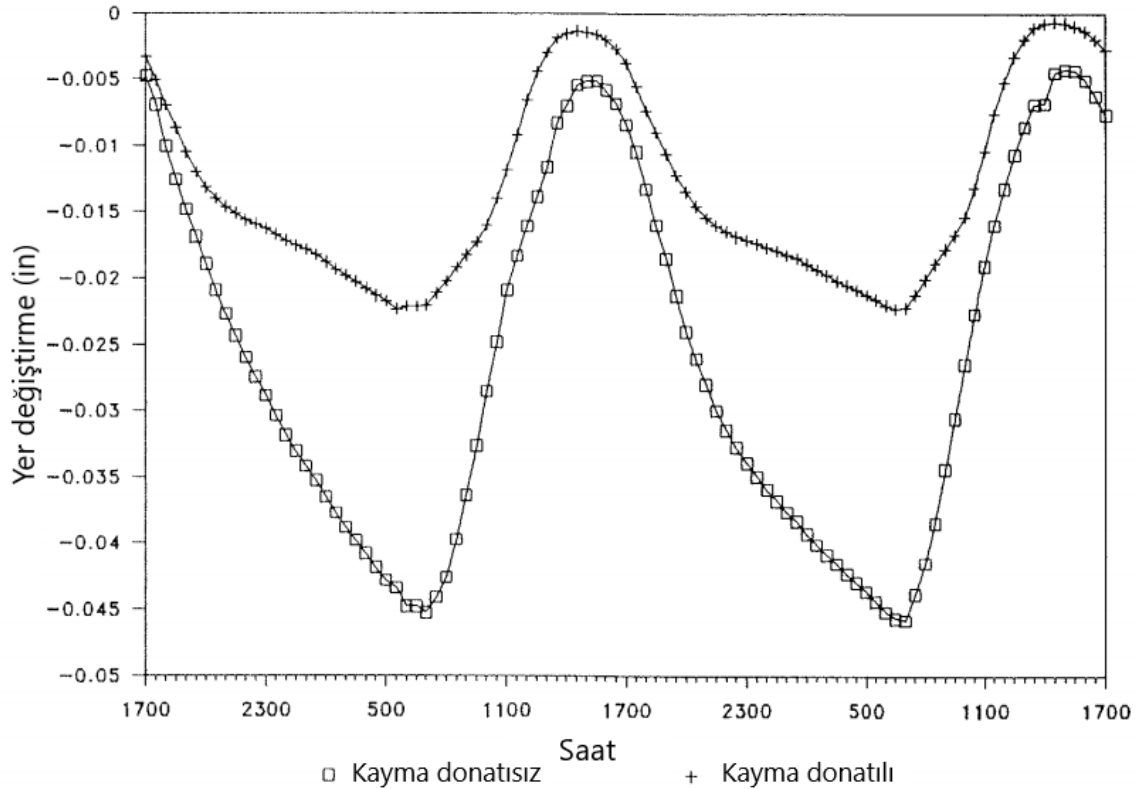
Tablo 3'te Armaghani vd.'nin (1987) çalışmasından alınan Ocak ile Haziran ayları arasında sıcaklık farklarına göre oluşan maksimum yer değiştirmeler görülmektedir. Armaghani vd.'ne göre neredeyse tüm maksimum yer değiştirmeler kuru ve güneşli günlerde, gündüz ile gece arasındaki sıcaklık farkının fazla olduğu durumlarda oluşmuştur. En büyük yer değiştirmeler Nisan ve Mayıs aylarında oluşmuştur.

Tablo 3. Plaklarda maksimum düşey yer değiştirmeler (Armaghani vd., 1987).

Ay	Saat		Sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$)		Ort. Beton sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)		Maksimum düşey yer değiştirme (cm)			
							Köşe		Kenar	Merkez
							Plak 3	Plak 4	Plak 4	Plak 4
Ocak	07:00	14:00	-4	9.5	11.1	20.5	0.117	0.117	0.048	0.053
	14:00	07:00	10.5	-4	18.9	10.5	0.129	0.127	0.051	0.058
Şubat	6:00	14:00	-5	9.5	12.2	21.7	0.150	0.150	0.058	0.056
	14:00	06:00	9.5	2.7	21.7	16.7	0.112	0.107	0.043	0.051
Nisan	06:00	14:00	-6	11	20	30	0.249	0.216	0.076	0.094
	14:00	06:00	11.7	-5.8	31.1	18.9	0.233	0.195	0.073	0.094

Tablonun devamı

Mayıs	05:00	13:00	-4.4	14	25	37.2	0.226	0.172	0.071	0.114
	14:00	05:00	14	-4	39.4	30	0.213	0.167	0.066	0.101
Haziran	05:00	14:00	-3.6	12.7	31.7	41.7	0.205	0.165	0.066	0.091
	14:00	05:00	12.7	-3.3	41.7	31.7	0.203	0.167	0.068	0.089
Ortalama							0.183	0.160	0.063	0.081



Şekil 21. Yatay derz hareketleri (Armaghani vd., 1987).

Şekil 21’de kayma donatılı ve kayma donatısız derzlere sahip plaplarda yatay yer değiştirmeler görülmektedir. Plaplardaki eğilmeler de derzlerin yatay açılıp kapanmasına katkıda bulunabilir. Ancak yatay plak hareketleri daha çok plağın genişmesi ile gerçekleşir.

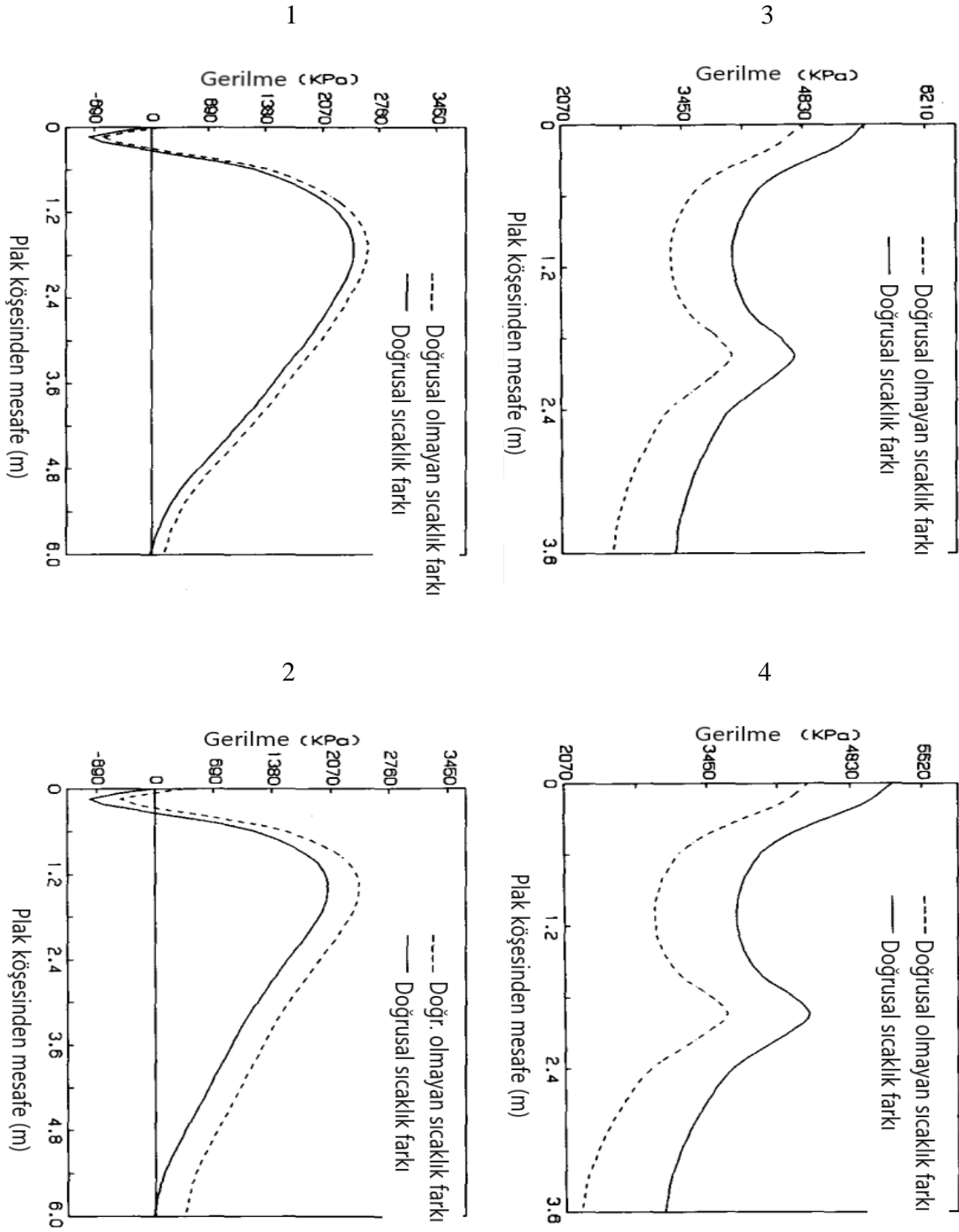
Kayma donatısının da plaktaki yatay hareket üzerinde etkisi vardır. Kayma donatılı derzlerdeki plak hareketleri kayma donatısız derzlerdeki plak hareketlerinin yaklaşık yarısı kadardır. Bu araştırmaya göre en büyük derz hareketleri Nisan ayında gerçekleşmiştir (Tablo 4) (Armaghani vd., 1987). Maksimum yatay yer değiştirmeler gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farkının en fazla olduğu dönemlerde oluşur. Bodocsi vd. yaptıkları çalışmada da en büyük yer değiştirme değerlerini Şubat – Mayıs ayları arasında bulmuşlardır (Bodocsi vd., 1993).

Tablo 4. Derzlerde maksimum yatay hareketler (Armaghani vd., 1987).

Ay	Saat Aralığı	Sıcaklık farkı (°C)	Ort. beton sıcaklığı değişimi (°C)		Maks. yatay hareket (cm)	
					kayma donatısız	kayma donatılı
Ocak	8:00 – 14:00	(-6) – 6.7	3.9	12.8	0.086	0.025
	14:00 – 8:00	4 – (-6.7)	15	3.9	0.084	0.023
Şubat	8:00 – 14:00	(-5) – 6.7	9.4	16.6	0.086	0.046
	15:00 – 8:00	6 – (-4)	22.8	14.4	0.076	0.030
Nisan	7:00 – 15:00	(-6) – 11.7	19.4	31.1	0.109	0.058
	15:00 – 7:00	11.7 – (-5.8)	31.1	18.3	0.109	0.053
Mayıs	6:00 – 15:00	(-4) – 14.5	22.2	35.5	0.104	0.041
	15:00 – 6:00	14.5 – (-3.3)	35.5	23.9	0.094	0.046
Haziran	6:00 – 13:00	(-3.3) – 11	28.9	38.9	0.089	0.041
	13:00 – 6:00	12.2 – (-3.3)	40.5	31.1	0.084	0.035
Ortalama					0.091	0.041

Beton plakta oluşan bu düşey şekil değiştirmeler sonucu eğilen beton kendi ağırlığı ve trafik yükü ile yüklenir ve plakta eğilmede çekme gerilmeleri oluşur. Pozitif sıcaklık farkı durumu için (plak yüzeyi daha sıcak) plak kenarı ve merkezi altında, negatif sıcaklık farkı durumu için ise plak kenar ve merkezi üstünde ve plak köşesinin altında eğilmede çekme gerilmeleri oluşur. Choubane vd. (1995) plakta kritik gerilme noktalarının, pozitif sıcaklık farkı durumunda plak kenarı, negatif sıcaklık farkı durumunda ise plak köşesi olduğunu söylemişlerdir. Florida’da yaptıkları çalışmada maksimum sıcaklık gerilmesini hesaplamak için FEACONS IV kullanmışlardır. 98 kN tek tekerlek yükü ve yılın değişik zamanlarında ölçülen maksimum pozitif ve negatif sıcaklık farkları kullanılmıştır. (Şekil 15’teki sıcaklık farkları) Sıcaklık farklarının doğrusal ve doğrusal olmadığı durumları kullanarak hesaplama yapmışlardır. Bu şartlar altında elde edilen sonuçlar şekillerden görülmektedir. Pozitif değerler çekme gerilmelerini, negatif değerler basınç gerilmelerini göstermektedir. Şekil 22-1 ve 22-2’den maksimum negatif sıcaklık farkı ve köşeye etki eden tek tekerlek yükü durumu, Şekil 22-3 ve 22-4’ten ise maksimum pozitif sıcaklık farkı ve kenara etki eden tek

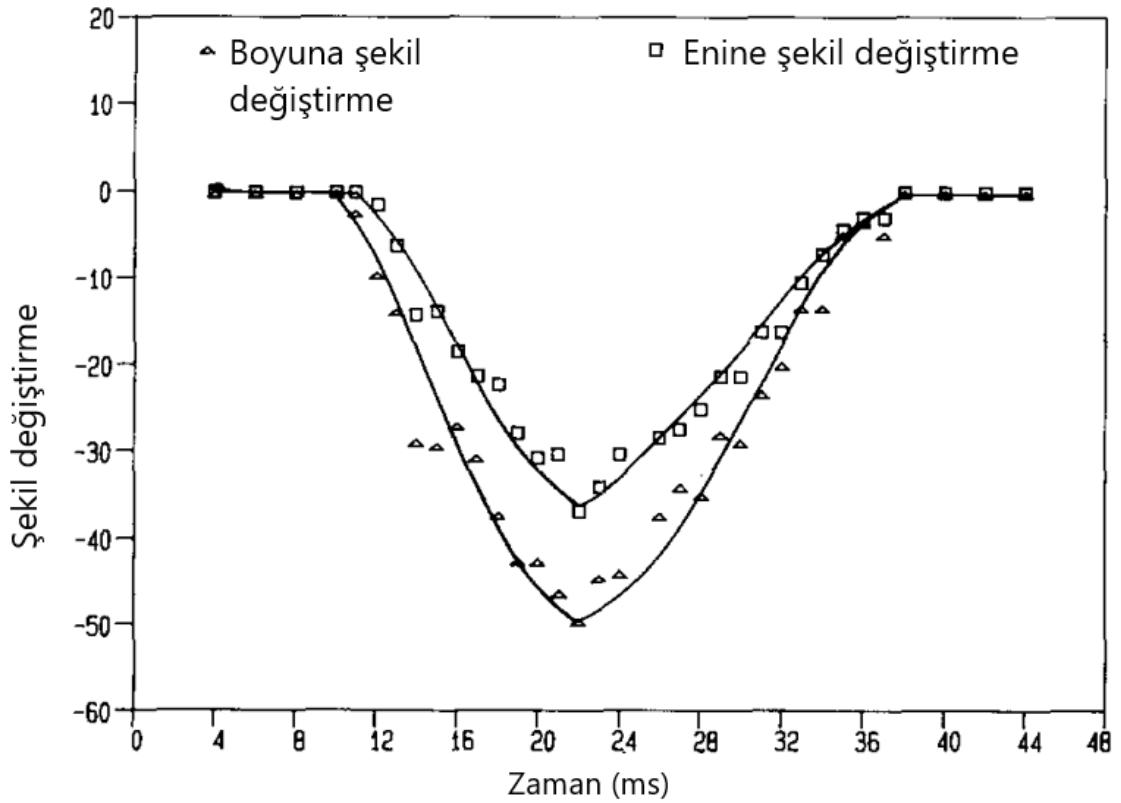
tekerlek yükü durumu görülmektedir. Sıcaklık farkının doğrusal alınması durumunda hesaplanan maksimum çekme gerilmeleri sıcaklık farkının doğrusal olmadığı kabul edilen duruma göre gündüz daha fazla, gece ise daha az çıkmaktadır.



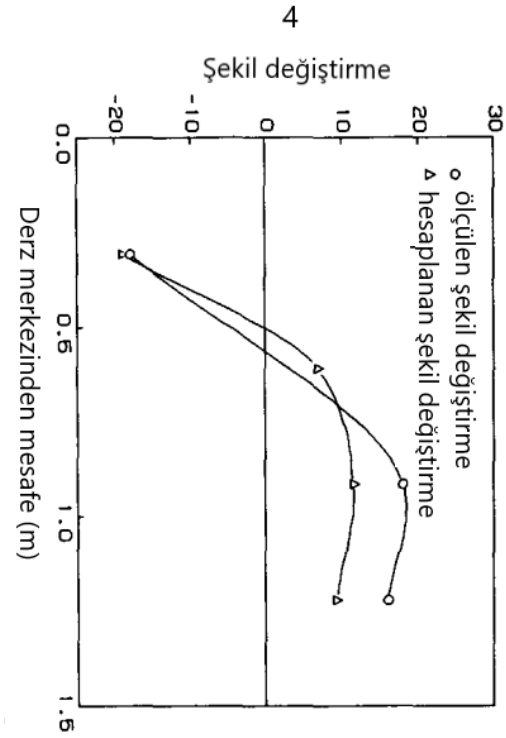
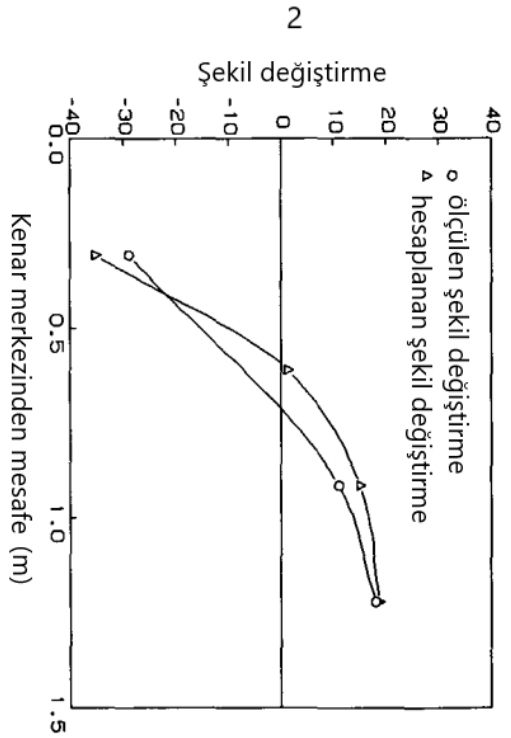
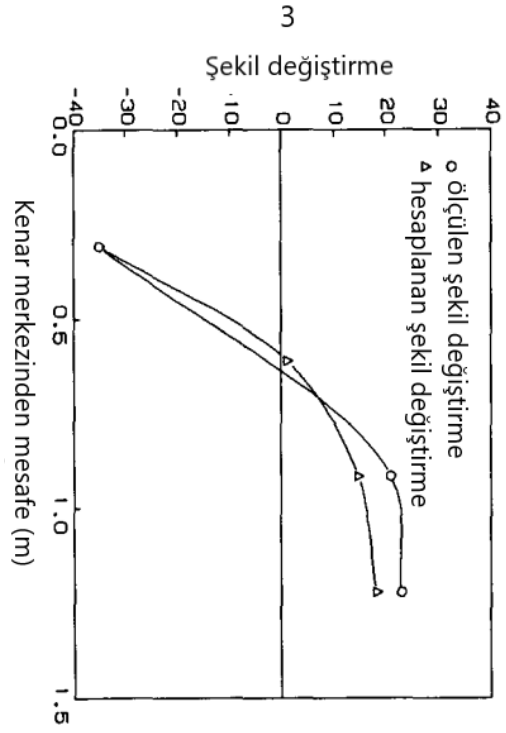
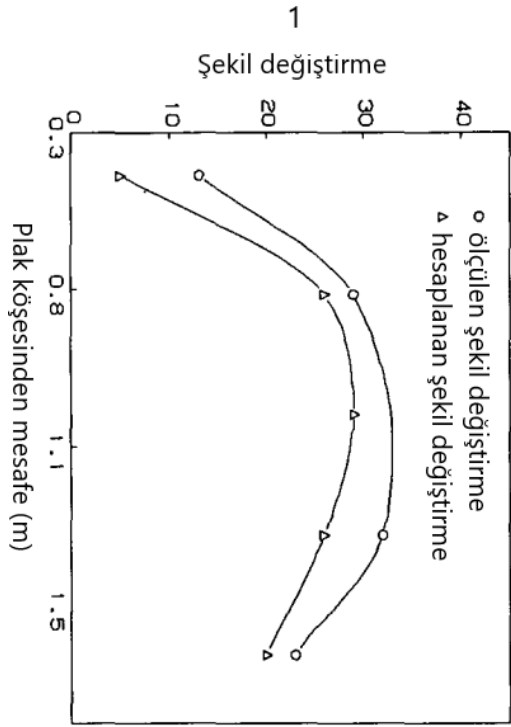
Şekil 22. Choubane vd. (1995) yaptıkları çalışmada hesapladıkları gerilme değerleri

1. Plak köşesine uygulanan 98 kN tek tekerlek yükü ve Nisanda kaydedilen -8°C sıcaklık farkı nedeniyle plak kenarı boyunca oluşan maksimum eğilme gerilmesi
2. Plak köşesine uygulanan 98 kN tek tekerlek yükü ve Ağustosta kaydedilen -5°C sıcaklık farkı nedeniyle plak kenarı boyunca oluşan maksimum eğilme gerilmesi
3. Plak kenarına uygulanan 98 kN tek tekerlek yükü ve Haziranda kaydedilen 17°C sıcaklık farkı nedeniyle plak merkezinde enine doğrultu boyunca oluşan maksimum eğilme gerilmesi
4. Plak kenarına uygulanan 98 kN tek tekerlek yükü ve Ağustosta kaydedilen 16°C sıcaklık farkı nedeniyle plak merkezinde enine doğrultu boyunca oluşan maksimum eğilme gerilmesi (Şekil 22)

Choubane vd. (1995) arazi testlerinde sadece uygulanan yük sonucu oluşan şekil değiştirmeleri ölçmüşler ve FEACONS IV ile karşılaştırmışlardır. FWD yüklemesi ile oluşan şekil değiştirme değerleri Şekil 23'te görülmektedir.



Şekil 23. FWD yüklemesi ile zamanla oluşan şekil değiştirmeler (Choubane vd., 1995).



Şekil 24. Ölçülen ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması (Choubane vd., 1995).

1. Plak köşesine uygulanan 1000 kPa FWD basıncı ve -4.5°C sıcaklık farkı durumunda plak kenarı boyunca ölçülen ve hesaplanan şekil değiştirmelerin karşılaştırılması
2. Plak kenarının merkezine uygulanan 1000 kPa FWD basıncı ve -3°C sıcaklık farkı durumunda plak kenarı boyunca ölçülen ve hesaplanan şekil değiştirmelerin karşılaştırılması
3. Plak kenarının merkezine uygulanan 1000 kPa FWD basıncı ve 9°C sıcaklık farkı durumunda plak kenarı boyunca ölçülen ve hesaplanan şekil değiştirmelerin karşılaştırılması
4. Plakta derzin ortasına uygulanan 1000 kPa FWD basıncı ve -3°C sıcaklık farkı durumunda plakta derz boyunca ölçülen ve hesaplanan şekil değiştirmelerin karşılaştırılması (Şekil 24)

Bu çalışmadan görüleceği üzere beton plak kalınlığı boyunca sıcaklık farkının doğrusal kabul edildiği ya da doğrusal olmadığı durumlarda bulunan gerilme değerleri birbirine yakın ve tutarlıdır. Sıcaklık dağılımı doğrusal olarak ele alındığında hesaplanan maksimum çekme gerilmesi değerleri, sıcaklık dağılımının doğrusal olmadığı durumda hesaplanan maksimum çekme gerilmesi değerlerine göre gündüzleri daha yüksek geceleri ise daha düşük olma eğilimindedir (Şekil 22, Şekil 23 ve Şekil 24) (Choubane vd., 1995).

Beton plağın eğilmesi ve buna bağlı oluşan gerilmeler plak yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkından dolayı oluşur. Bu sıcaklık farkının plak kalınlığına oranı ise sıcaklık gradyanını verir. Sıcaklık gradyanı Δt şöyle hesaplanır;

$$\Delta t = \frac{T_t - T_b}{h} \quad (8)$$

Burada;

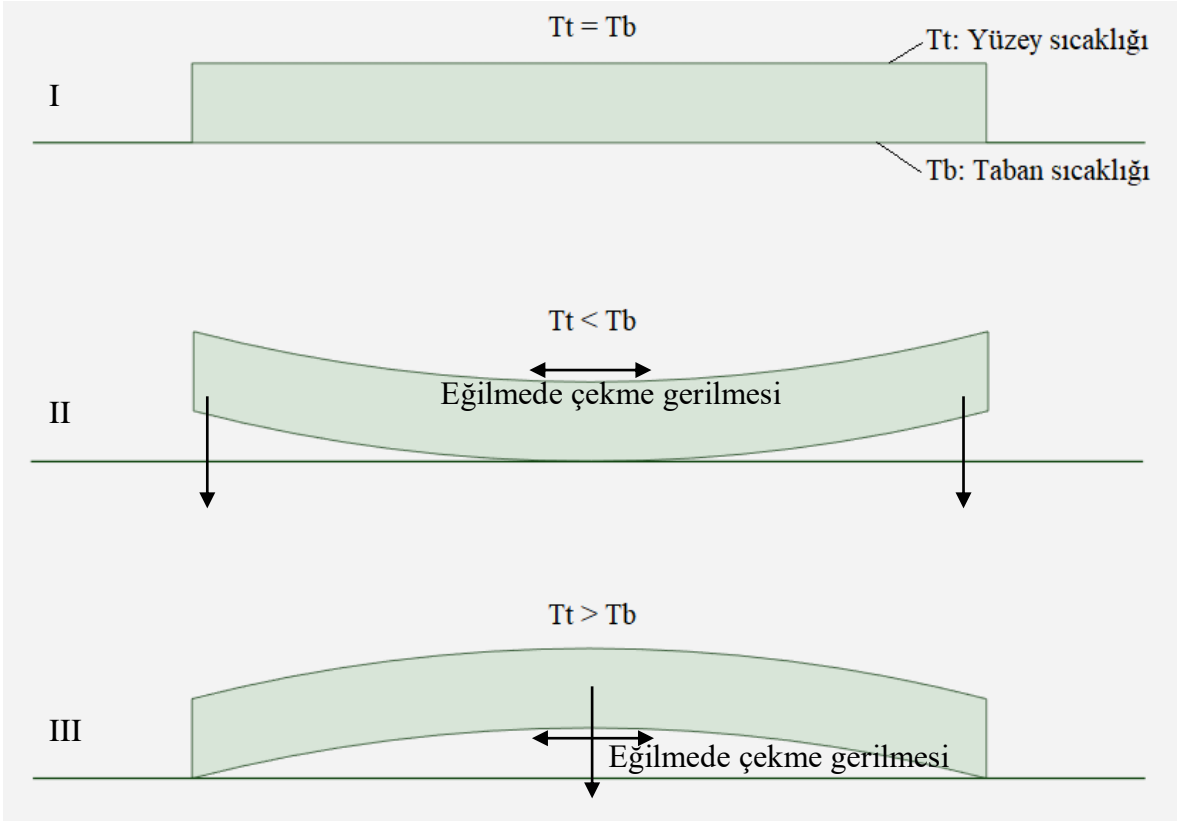
Δt : sıcaklık gradyanı (°C/mm)

T_t : beton plak yüzeyinin sıcaklığı (°C)

T_b : beton plak tabanının sıcaklığı (°C)

h : beton plak kalınlığı (mm)

Gece oluşan negatif sıcaklık gradyanı durumunda plak yüzey sıcaklığı, plak taban sıcaklığından daha azdır ve plak köşeleri ve kenarları yukarı yönlü eğilir. Bu durumda plağın kendi ağırlığı nedeniyle plak yüzeyinde eğilmede çekme gerilmesi oluşur. Gündüz oluşan pozitif sıcaklık gradyanı durumunda ise plak yüzeyinin sıcaklığı, plak tabanının sıcaklığından fazladır ve plak köşeleri ve kenarları aşağı yönlü eğilir. Bu durumda plağın altında kendi ağırlığı nedeniyle eğilmede çekme gerilmesi oluşur (Şekil 25).



Şekil 25. Sıcaklık farkından dolayı oluşan eğilmeler

I; yüzey ve taban sıcaklıkları eşitse eğilme oluşmaz

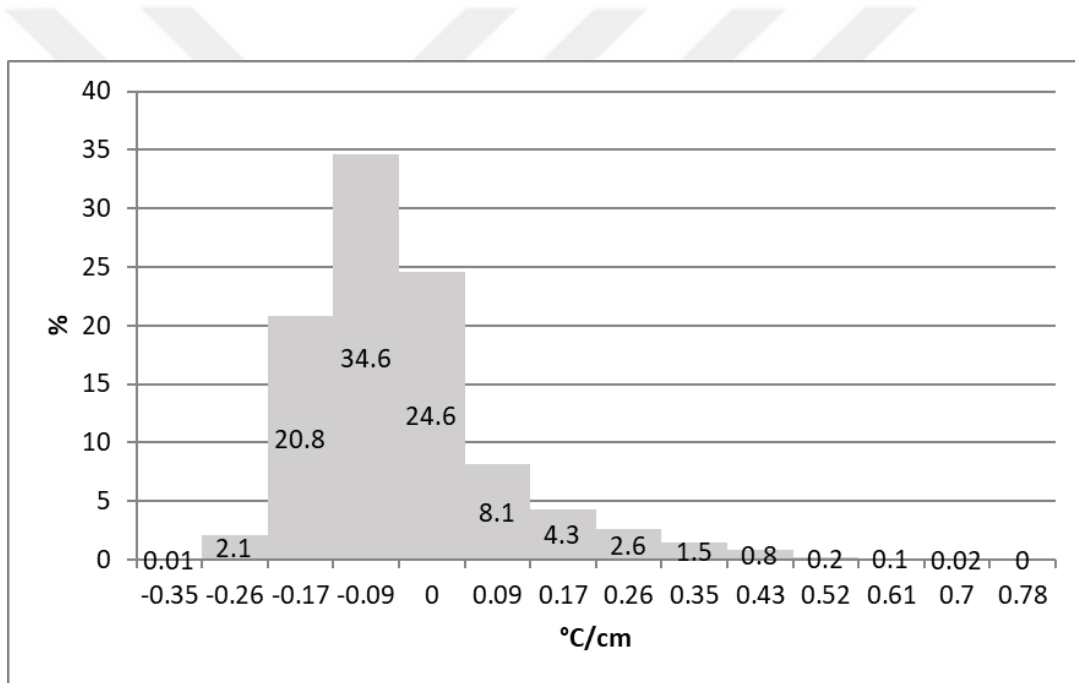
II; taban sıcaklığı yüzey sıcaklığından fazla ise beton kenarları yukarı yönlü eğilir (negatif sıcaklık gradyanı durumu)

III; yüzey sıcaklığı taban sıcaklığından fazla ise beton kenarları aşağı yönlü eğilir (pozitif sıcaklık gradyanı durumu)

Genellikle negatif sıcaklık gradyanı durumu, beton kaplama tasarımında dikkate alınmaz. (Houben, 2009) Bunun sebepleri;

- Negatif sıcaklık farkının maksimum değeri, pozitif sıcaklık farkının maksimum değerinden daha küçüktür (Şekil 24, Tablo 5). Bir beton plak için maksimum sıcaklık gradyanı alınacaksa bu değer gündüz için $0.55 - 0.77 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$, gece için ise bunun yarısı kadar alınır (Huang, 1993).
- Gece trafik yükü daha azdır.

Şekil 26'da en çok görülen sıcaklık gradyanının $-0.09 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$ değeri ile negatif bir değerde oluştuğu görülmektedir. Ancak oluşan maksimum sıcaklık gradyanı değerlerine bakıldığında, pozitif sıcaklık gradyanının maksimum değeri, negatif sıcaklık gradyanının maksimum değerinin yaklaşık iki katıdır. Aynı şekilde Tablo 5'e göre oluşan maksimum pozitif sıcaklık gradyanı aralığı $0.55 - 0.65 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$ ile bu durumu doğrular niteliktedir.



Şekil 26. Sıcaklık gradyanları dağılımı, 1973-1977 Belçika (Houben, 2009).

Tablo 5. Dutch dizayn metodunda beton kaplamalarda standart sıcaklık gradyan dağılımı

Sıcaklık gradyan aralığı ($^\circ\text{C}/\text{cm}$)	Ortalama sıcaklık gradyanı Δt ($^\circ\text{C}/\text{cm}$)	Sıklık (%)
0.00 – 0.05	0.025	59
0.05 – 0.15	0.1	22
0.15 – 0.25	0.2	7.5
0.25 – 0.35	0.3	5.5
0.35 – 0.45	0.4	4.5
0.45 – 0.55	0.5	1.0
0.55 – 0.65	0.6	0.5

1.3.4. Sıcaklık Etkisinde Beton Plâğın Eğilmesi ile Oluşan Gerilmeler

Bradbury formülleri;

Plak merkezinde, kenarında ve köşesinde oluşan eğilme gerilmeleri sırasıyla; σ_{ti} , σ_{te} ve σ_{tc} aşağıdaki Bradbury formülleri yardımıyla hesaplanabilir. Bu çekme gerilmeleri beton plâğın kendi ağırlığından dolayı, gündüz plak yüzey sıcaklığının daha fazla olduğu durumda, plak merkezinin ve kenarının altında, plak köşesinin üstünde meydana gelir. Gece plak yüzeyinin tabanından daha soğuk olduğu durumda ise plak merkezinin ve kenarının üstünde, plak köşesinin altında çekme gerilmeleri oluşur (Şekil 25).

$$\sigma_{ti} = \frac{E\alpha t}{2} \left(\frac{C_x + \nu C_y}{1 - \nu^2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{te} = \text{Max} \left(\frac{C_x E\alpha t}{2}, \frac{C_y E\alpha t}{2} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{tc} = \frac{E\alpha t}{\sqrt[3]{1 - \nu^2}} \sqrt{\frac{a}{l}} \quad (11)$$

Burada;

σ_{ti} : plak merkezinin altında eğilme nedeniyle oluşan gerilme

σ_{te} : plak kenarının altında eğilme nedeniyle oluşan gerilme

σ_{tc} : plak köşesinin üstünde eğilme nedeniyle oluşan gerilme

E: betonun elastisite modülü (N/mm²)

α_t : °C başına betonun ısı genleşme katsayısı

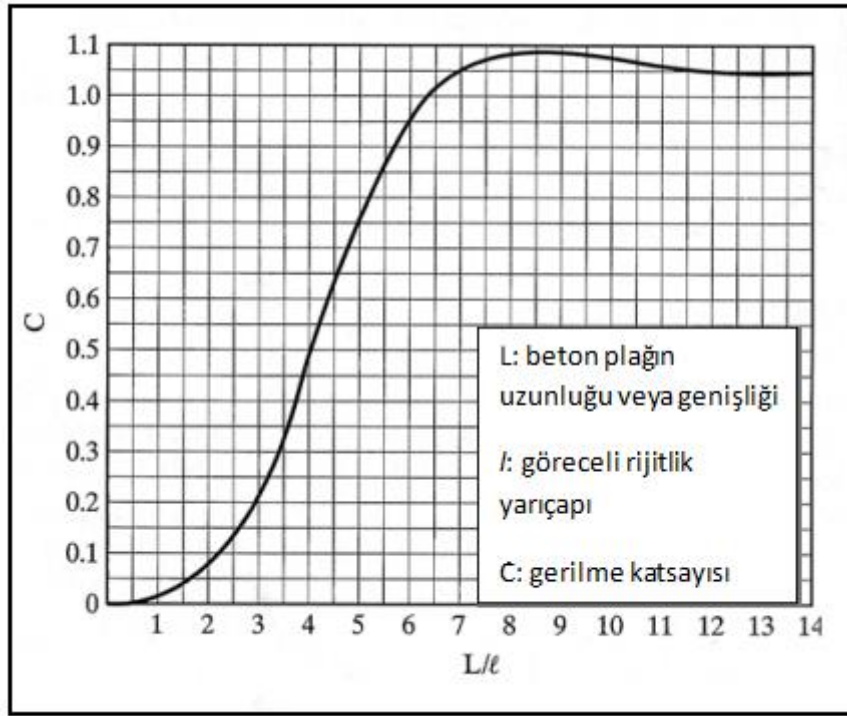
t: beton yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkı (°C)

C_x ve C_y : L_x/l veya L_y/l değerine bağlı Bradbury katsayıları (Şekil 27)

ν : Poisson oranı

a: temas alanı yarıçapı

l: izafi rijitlik yarıçapı (mm) (Formül 2)



Şekil 27. Bradbury'nin C katsayısı

Eisenmann Teorisi;

Eisenmann, beton plaklarda oluşan eğilme gerilmelerinin hesaplanabilmesi için bir teori oluşturdu ve kritik plak uzunluğu terimini ortaya çıkardı. Kritik plak uzunluğu; yüzeyi eşit derecede ısıtılan bir beton plağın, yalnızca dört köşesinden ve plak merkezinden alta temas ettiği plak uzunluğudur (Şekil 28). Kritik plak uzunluğu şöyle hesaplanır; (Houben, 2009)

Uzun plak için; $L/W > 1.2$ veya $L/W < 0.8$

$$l_{crit} = 200h\sqrt{E\alpha\Delta t} \quad (12)$$

Kare plak için; $0.8 \leq L/W \leq 1.2$

$$l_{crit} = 228h\sqrt{E\alpha\Delta t} \quad (13)$$

Burada;

l_{crit} : kritik plak uzunluğu (mm)

h: beton plak kalınlığı (mm)

E: betonun elastisite modülü (N/mm²)

α : lineer ısı genleşme katsayısı (°C⁻¹)

Δt : pozitif sıcaklık gradyanı (°C/mm)

L: beton plak uzunluğu (mm)

W: beton plak genişliği (mm)

Ayrıca Eisenmann, beton plağın kenarlarının belirli bir mesafeye kadar desteklendiğini hesaba katar (destek uzunluğu, C) (Şekil 28). Bu durumda plağın L' açıklığı daima plak uzunluğu L'den daha az olacaktır.

$$L' = L - \frac{2}{3}C \quad (14)$$

Destek uzunluğu C yaklaşık olarak;

$$C = 4.5 \sqrt{\frac{h}{k\Delta t}} \quad (15)$$

Burada;

C: destek uzunluğu (mm)

h: beton plak kalınlığı (mm)

k: taban zemini reaksiyon modülü (N/mm³)

Δt : pozitif sıcaklık gradyanı (°C/mm)

L' ve l_{crit} arasındaki ilişkiye bağlı olarak Eisenmann formülü üçe ayrılır (Şekil 28);

1. Plak açıklığı L', kritik plak uzunluğu l_{crit} değerinden çok daha büyükse, beton plağın merkezi alttemele temas etmektedir. Bu durumda boyuna doğrultuda plak merkezinin altındaki eğilmede çekme gerilmesi;

$L' > 1.1 l_{crit}$ için;

$$\sigma_t = \frac{1}{1 - \nu} \frac{h \Delta t}{2} \alpha E \quad (16)$$

2. Plak açıklığı L' , kritik plak uzunluğu l_{crit} değerine eşitse;

$L' = l_{crit}$ için;

$$\sigma'_t = 1.2 \sigma_t \quad (17)$$

3. Plak açıklığı L' , kritik plak uzunluğu l_{crit} değerinden çok daha küçük olduğunda (azaltılmış) gerilme;

$L' < 0.9 l_{crit}$ için;

$$\sigma_t'' = \left(\frac{L'}{0.9 l_{crit}} \right)^2 \sigma_t \quad (18)$$

Burada;

σ_t : plak merkezinin altındaki eğilmede çekme gerilmesi

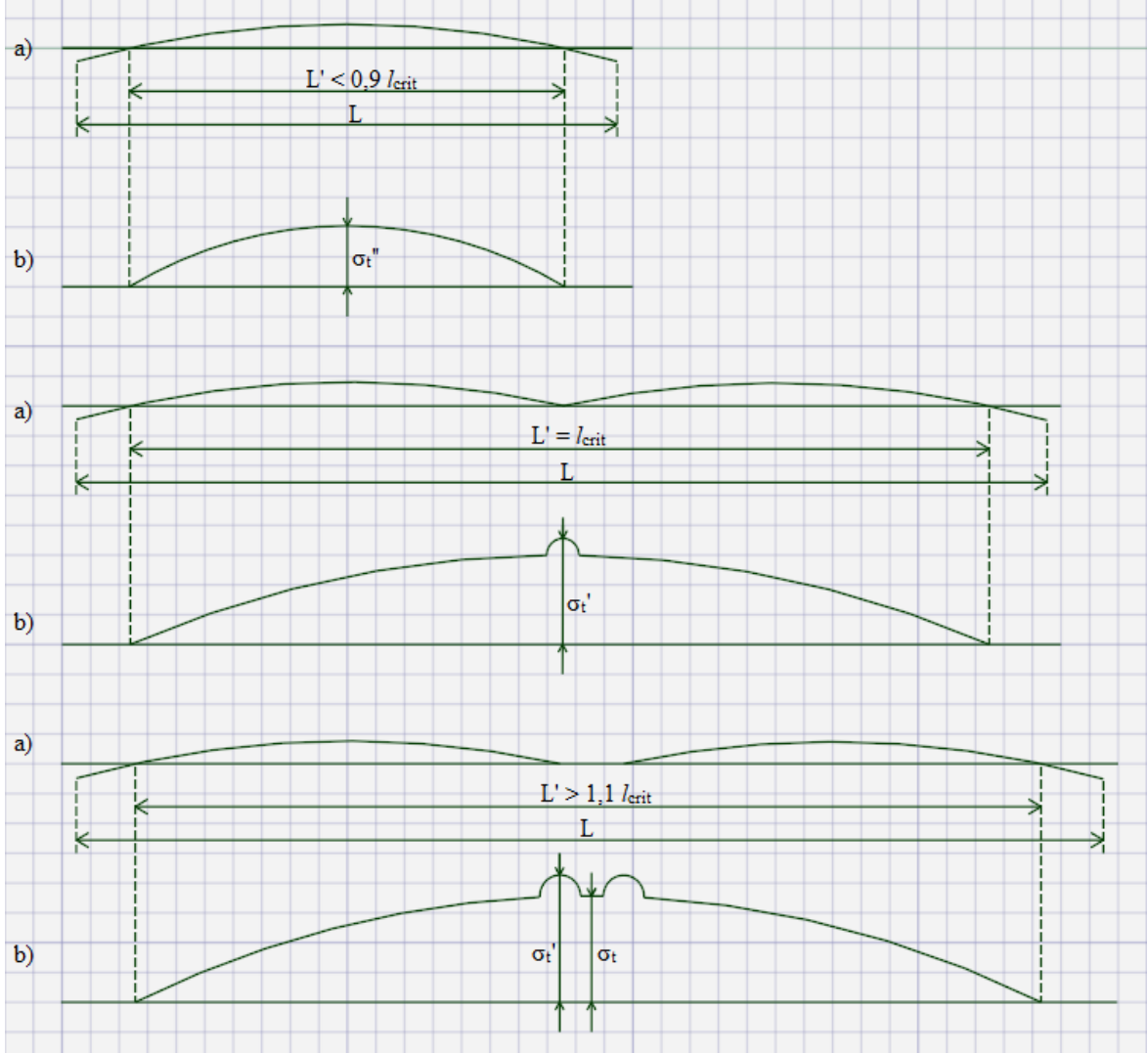
ν : betonun Poisson oranı

h : beton plak kalınlığı (mm)

Δt : pozitif sıcaklık gradyanı ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)

α : lineer ısı genleşme katsayısı ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

E : betonun elastisite modülü (N/mm^2)



Şekil 28. Pozitif sıcaklık gradyanı durumunda plaktaki eğilme gerilmeleri ve deformasyon
 L: plak uzunluğu, L': plak açıklığı, a: düşey deformasyon, b: eğilmede çekme gerilmeleri

Denklemlerden görüldüğü üzere gerilmenin daha az olması için yani azaltılmış eğilme gerilmesi için L' değerinin l_{crit} değerinin yüzde doksandan daha küçük olması gerekir.

Dutch Metodu;

Hollanda'da VNC (Cement Industry Association), donatısız beton kaplamalar için analitik dizayn metodu geliştirdi. Buna göre beton kaplamanın en kritik noktası plağın kenarıdır. Buna göre, sıcaklık gradyanı gerilmelerinin hesaplanması için tüm beton plak değil, sadece plak kenarı boyunca birim genişlikte bir beton kiriş hesaba alınmalıdır (Houben, 2009).

Küçük bir pozitif sıcaklık gradyanı durumunda plak kenarının orta altındaki eğilmede çekme gerilmesi σ_t şu denklemle hesaplanabilir;

$$\sigma_t = \frac{h \Delta t}{2} \alpha E \quad (19)$$

Büyük bir pozitif sıcaklık gradyanı durumunda ise beton plak kenarı, altyapı ile teması kaybedecek ve sadece köşelerden destek uzunluğu C mesafesinde alttan desteklenecektir. Bu durumda beton plak kenarı kendi ağırlığıyla yüklenecektir. Plak kenarının orta altındaki eğilmede çekme gerilmesi σ_t boyuna ve enine kenar için sırasıyla;

$$\sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} \times \frac{L'^2}{h} \quad (20a)$$

$$\sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} \times \frac{W'^2}{h} \quad (20b)$$

Burada;

σ_t : beton plak kenarının altında sıcaklık etkisiyle oluşacak eğilmede çekme gerilmesi

h: beton plak kalınlığı (mm)

Δt : pozitif sıcaklık gradyanı ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)

α : lineer ısı genleşme katsayısı ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

E: betonun elastisite modülü (N/mm^2)

L': boyuna doğrultuda plak uzunluğu

W': enine doğrultuda plak uzunluğu

1.3.5. Plağın Genleşmesine Bağlı Sürtünme Gerilmeleri

Beton kaplama sıcaklık değişimi ile genişir ve büzülür. Bu hareketler sırasında kaplama ile temel arasında sürtünme meydana gelir. Bu da beton plakta basınç ve çekme gerilmeleri oluşturur.

Plakta birim genişlik başına sürtünme kuvveti;

$$S = \frac{\gamma \times h \times L \times f}{2} \quad (21)$$

Beton plakta çekme kuvveti;

$$S_f = \sigma_f \times h \quad (22)$$

Burada;

S_f : çekme kuvveti (kN)

σ_f : çekme gerilmesi (kN/m²)

Denklemler eşitlenirse;

$$\sigma_f = \frac{\gamma L f}{2} \quad (23)$$

Burada;

h: plak kalınlığı (m)

γ : betonun birim ağırlığı (kN/m³)

f: zemin sürtünme katsayısı

L: plak uzunluğu (m)

σ_f : sürtünmeden kaynaklanan gerilme (kN/m²)

γ : betonun birim ağırlığı (kN/m³) (yaklaşık 24 kN/m³)

f: plak ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı (genellikle 1.5 alınır)

L: plak uzunluğu (m)

1.4. Gerilmelerin Birleştirilmesi

Gerilmeler için üç kritik durum vardır.

- Yazın gün içerisinde oluşacak kritik gerilmeler plak kenarının ortasının altındadır. Bu durumda kritik gerilme σ_{cr} ;

$$\sigma_{cr} = \sigma_e + \sigma_{te} - \sigma_f \quad (24)$$

- Kışın gün içerisinde oluşacak kritik gerilme yine plak kenarının ortasında ve altta olacaktır. Bu durumda σ_{cr} ;

$$\sigma_{cr} = \sigma_e + \sigma_{te} + \sigma_f \quad (25)$$

- Ve son olarak gece yarısı için oluşacak kritik gerilme plak köşesindedir.

$$\sigma_{cr} = \sigma_c + \sigma_{tc} \quad (26)$$

Burada;

σ_{cr} : beton plakta oluşacak kritik toplam gerilme

σ_e : plak kenarında tekerlek yükünden dolayı oluşacak gerilme

σ_{te} : plak kenarında sıcaklık farkından dolayı oluşacak gerilme

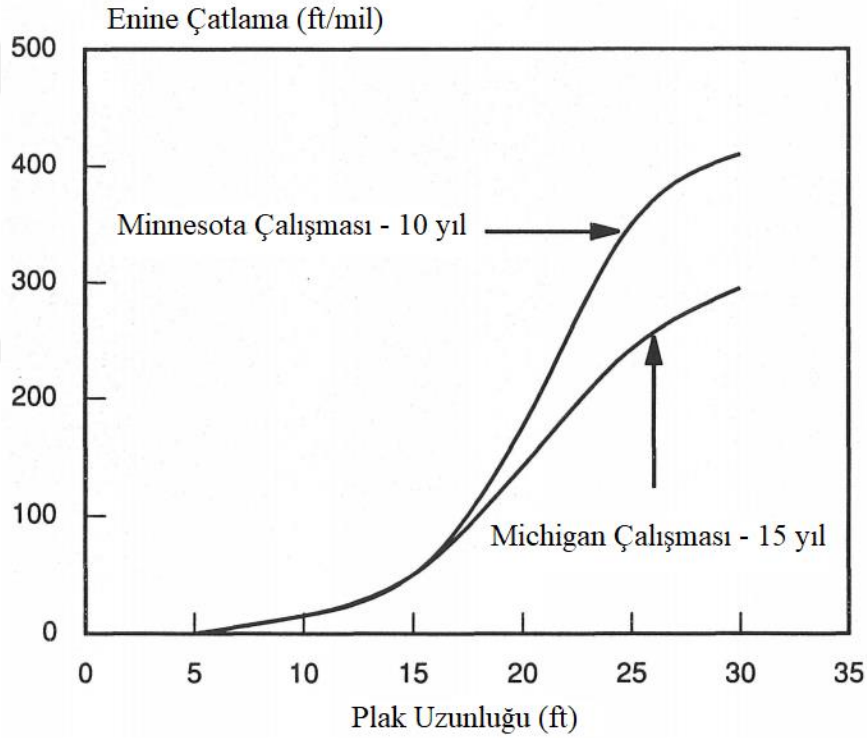
σ_f : mevsimsel sıcaklık değişimi nedeniyle yatay yer değiştirme kaynaklı oluşacak sürtünme

σ_c : plak köşesinde tekerlek yükünden dolayı oluşacak gerilme

σ_{tc} : plak köşesinde sıcaklık farkından dolayı oluşacak gerilme

1.5. Derz Aralıklarının Hesaplanması

Beton plakta oluşan çatlakların en önemli sebeplerinden birisi beton plağın uzunluğudur. Plak uzunluğunun enine yarım derzlerle sınırlandırılması beton kaplamadaki çatlakları azaltmaktadır. Şekil 29, beton kaplamada enine çatlakların plak uzunluğunun artışına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Bu grafiğe göre yaklaşık 5 m plak uzunluğu geçildikten sonra beton plakta çatlak oluşumu artmaktadır. Kabaca beton kaplamada feet biriminden derz aralığı, inç biriminden kaplama kalınlığının iki katını geçmemelidir (Huang, 1993). Örneğin 9 inç plak kalınlığı için derzler arası mesafe 18 feet, 5.48 m'yi geçmemelidir.



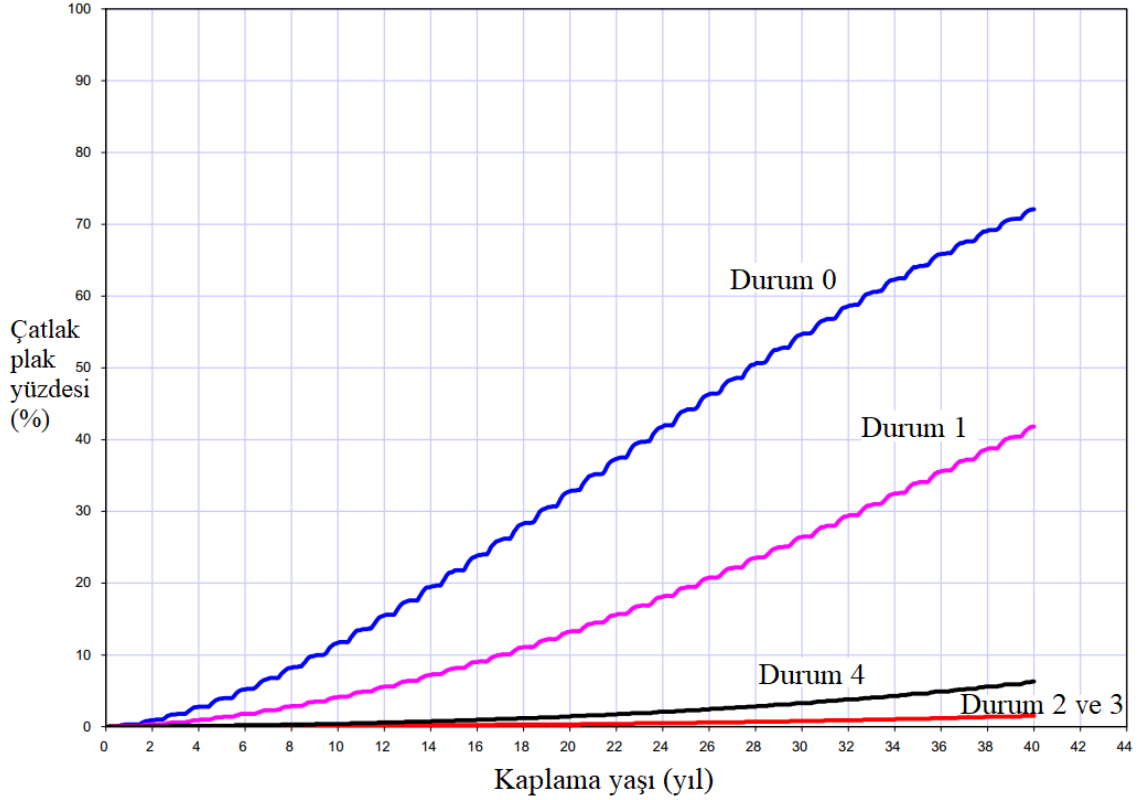
Şekil 29. Minnesota ve Michigan'daki çalışmalara göre plak uzunluğu ile enine çatlama arasındaki ilişki (ACPA, 1992).

Tablo 6, plak kalınlığına göre derzler arası mesafelerin olması gereken değerlerini göstermektedir. Donatısız beton kaplamalarda derz aralığı, plak kalınlığının 24-30 katı kadar ve maksimum 4.5 m olmalıdır. Ayrıca plakların olabildiğince kare şekilli olması da önemlidir. Enine derz aralığı, boyuna derz aralığının en fazla %125-150'si kadar olmalıdır (ACPA, 1992).

Tablo 6. Donatısız beton plaklar için önerilen derzler arası mesafe (ACPA, 1992).

Kaplama kalınlığı (cm)	Derzler arası mesafe (m)
12.5	3.0 – 3.8
15	3.7 – 4.6
17.5	4.3 – 4.6
20 veya fazlası	4.6

Söderqvist ve Silfwerbrand beton plak ve kayma donatısı boyutlarının plak çatlamasına etkisini gösteren bir çalışma yapmışlardır. Buna göre şekli kareye daha yakın olan ve kayma donatısı çapı daha fazla olan plaklarda çatlakların daha az olduğu görülmektedir (Şekil 30) (Tablo 7).



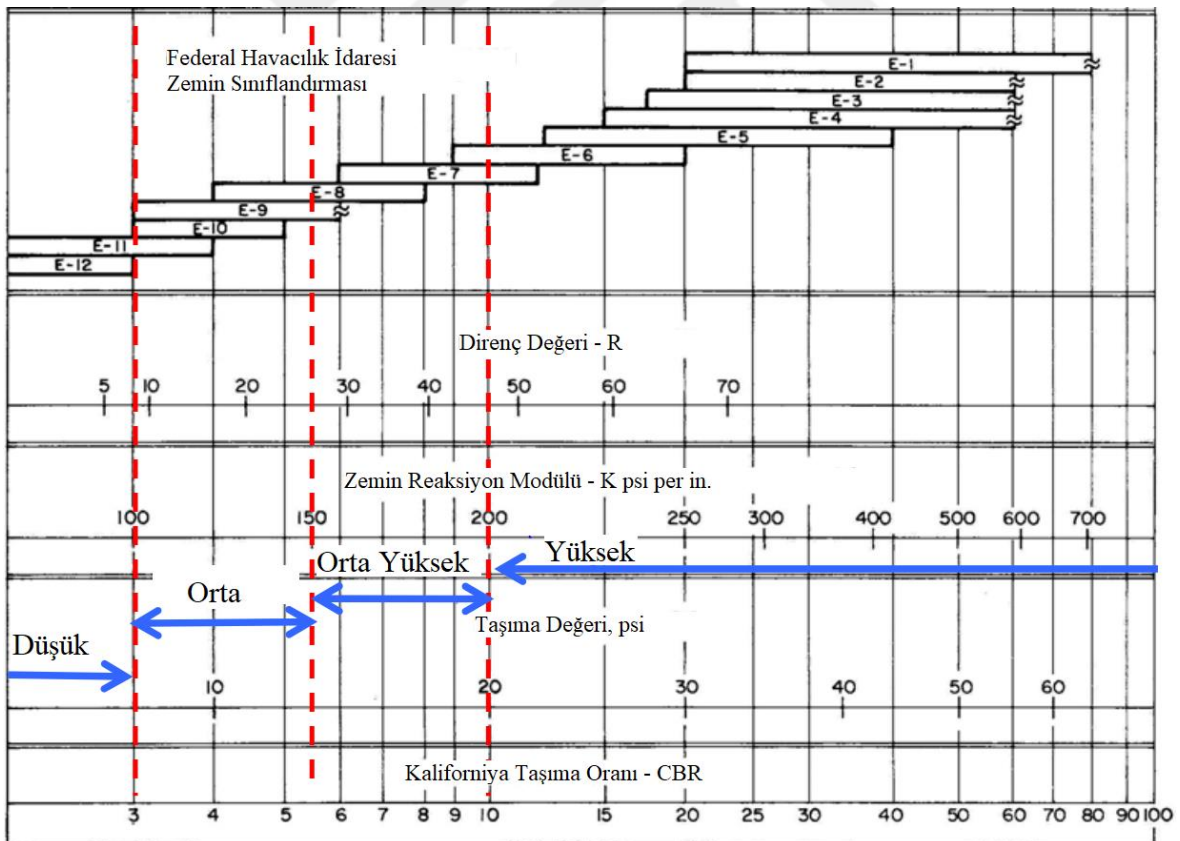
Şekil 30. 0-4 durumlarında tasarım ömrü boyunca çatlama tahminleri (Söderqvist ve Silfwerbrand, 2006).

Tablo 7. Çalışmada ele alınan plak ve kayma donatısı boyutları (Söderqvist ve Silfwerbrand, 2006).

	Durum 0	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4
Derz aralığı (m)	5	4.6	4.6	4.6	5
Kayma donatısı çapı (mm)	25	25	38	38	25
Plak genişliği (m)	3.7	3.7	3.7	4.3	4.3

1.5.1. İzafi Rijitlik Yarıçapına Göre Hesaplama

Maksimum derz aralığı, taban zemininin gücü ve efektif plak kalınlığı dikkate alınarak hesaplanabilir. Zeminin gücünü belirlerken bunu dört kategoriye ayırabiliriz. Düşük, orta, orta üst ve yüksek. Bu ayırım zeminin k değeri ile yapılır (Şekil 31).



Şekil 31. Zeminin sınıflandırılması (Jung ve Zollinger, 2007).

Efektif plak kalınlığı, beton plak ve temel arasındaki bağlanma derecesinin fonksiyonu olarak değişen plak kalınlığıdır (Jung ve Zollinger, 2007). Aşağıdaki formül ile hesaplanır. Efektif plak kalınlığının değişimi Şekil 32’de gösterilmiştir.

$$h_e = \sqrt[3]{h_c^3 + \frac{E_b}{E_c} h_b^3} \quad (27)$$

Burada;

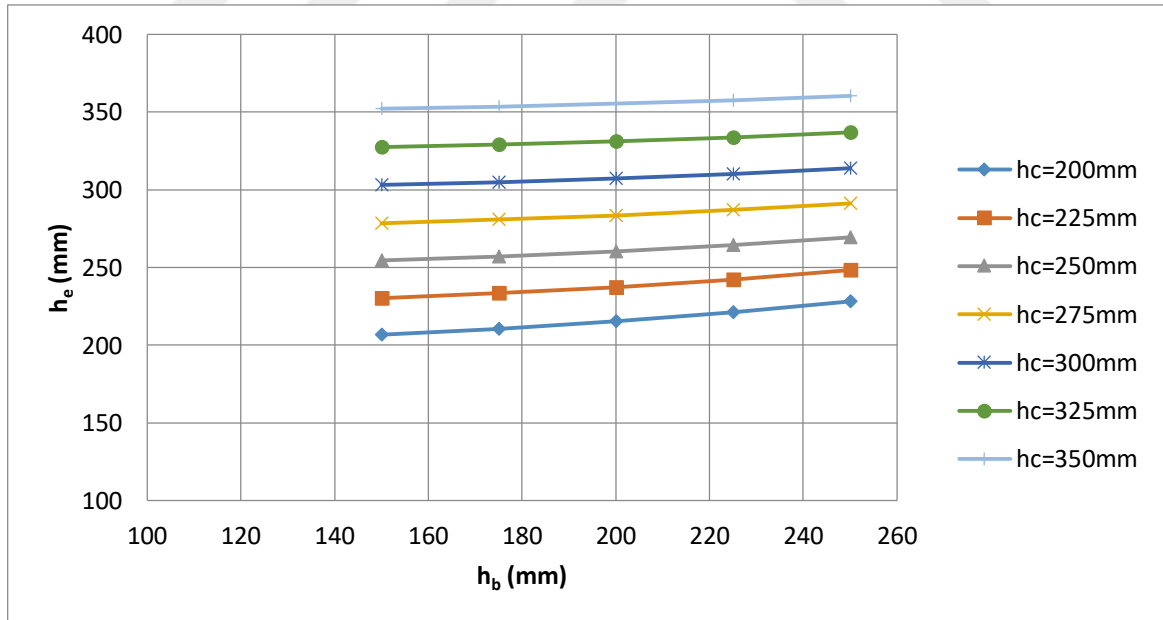
h_e : birleşik plağın efektif kalınlığı (mm)

h_c : beton plak kalınlığı (mm)

h_b : temel kalınlığı (mm)

E_c : betonun elastisite modülü (N/mm²)

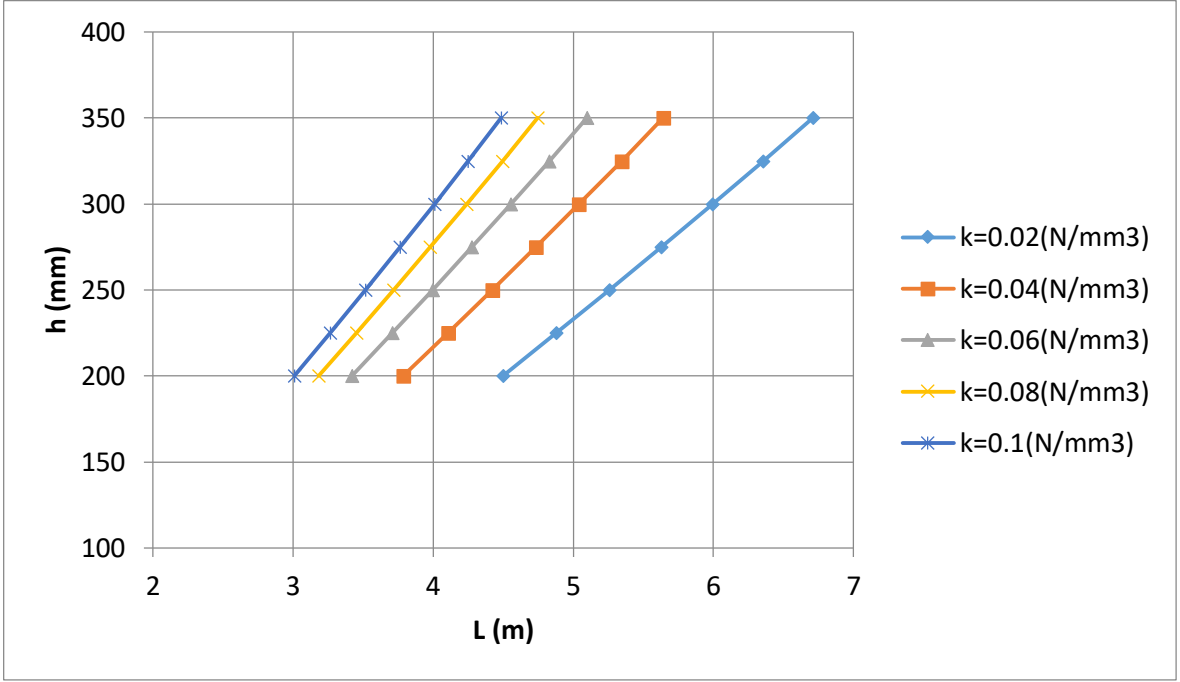
E_b : temelin elastisite modülü (N/mm²)



Şekil 32. Efektif plak kalınlığı ($E_c=28000$ MPa, $E_b=7000$ MPa için)

Tablo 8. Tasarım k değerleri

Taban zemini k değeri (N/mm ³)	İşlenmemiş temel k değeri (N/mm ³)				Çimento ile stabilize edilmiş temel k değeri (N/mm ³)			
	10 cm	15 cm	23 cm	30.5 cm	10 cm	15 cm	23 cm	30.5 cm
0.014	0.018	0.021	0.023	0.03	0.047	0.064	0.086	0.108
0.028	0.036	0.039	0.044	0.052	0.077	0.111	0.144	0.177
0.056	0.061	0.064	0.075	0.088	0.13	0.177	0.23	-

Şekil 33. Maksimum plak uzunluğu ile plak kalınlığı arasındaki ilişki ($E_c = 28000$ MPa, $E_b = 7000$ MPa, $h_b = 15$ cm)

Plak derz aralığının hesabı için önce l izafi rijitlik yarıçapı bulunmalı. Maksimum derz aralığı bu değerın 4.44 katından büyük olmamalıdır (Jung ve Zollinger, 2007). Bu formüle göre plak kalınlığı ile plak uzunluğu arasındaki ilişki Şekil 33'te gösterilmektedir. Görülebildiği üzere plak kalınlığının artması ile plak uzunluğu artırılabilir. k değerinin artması ise plak uzunluğunu azaltmaktadır.

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh_e^3}{12k(1-\nu^2)}} \quad (28)$$

$$L = 4.44l \quad (29)$$

Burada;

L: plak uzunluğu

l: izafi rijitlik yarıçapı (mm)

E: elastisite modülü (N/mm²)

v: betonun Poisson oranı

h_e: efektif plak kalınlığı (mm)

k: temel modülü tasarım k değeri (N/mm³) (Tablo 8)

1.5.2. Sürtünme Gerilmesi Formülüne Göre Hesap

$$\sigma_f = \frac{\gamma L f}{2} \quad (30)$$

Burada;

σ_f : sürtünmeden kaynaklanan çekme gerilmesi (kN/m²)

γ : betonun birim ağırlığı (kN/m³) (22.4 - 24kN/m³)

f: taban zemini sürtünme katsayısı (1.5)

L: plak uzunluğu (m)

Bu formüle göre σ_f , beton için izin verilebilir bir çekme gerilmesi değerinde alınır, kritik plak uzunluğu değeri hesaplanabilir. Beton kürü sırasında betonun izin verilebilir çekme gerilme değeri 80 kPa (Krishna Rao, 2015) alınır (30) numaralı formülden;

$$L = (2 \times 80) / (24 \times 1.5)$$

$$L = 4.44 \text{ m}$$

Bu durumda derz aralığının 4.44 m'yi geçmemesi daha uygun olacaktır.

1.5.3. Derz Hareketine Göre Uygun Derz Aralığının Hesaplanması

Beton kaplamada derzlerin kesileceği aralık betonda oluşacak gerilmelerden çok betonun büzülme karakteristiği ile alakalıdır. Derzlerin daha geniş aralıklarla konması bu derzlerde daha sonra büzülme ile daha fazla boşluk oluşmasına neden olacaktır. Bu da trafik yükünün plaklar arasında aktarılma verimliliğini düşürür (Huang, 1993). Sıcaklık değişimi ile genişecek ve büzülecek olan beton plakta derzlerde oluşacak açılma ve kapanma miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \epsilon) \quad (31)$$

Burada;

ΔL : plak uzunluğunda beklenen değişim, in. (mm)

C: temel/plak sürtünme sınırlama faktörü (stabilize malzeme için 0.65, granüler malzeme için 0.80)

L: plak uzunluğu

α = PCC ısı genleşme katsayısı (Tablo 9)

ΔT : sıcaklık aralığı, yerleştirme sırasındaki sıcaklıktan minimum ortalama aylık sıcaklık çıkarılır ($^{\circ}\text{C}$)

ϵ : betonun büzülme katsayısı (Tablo 10)

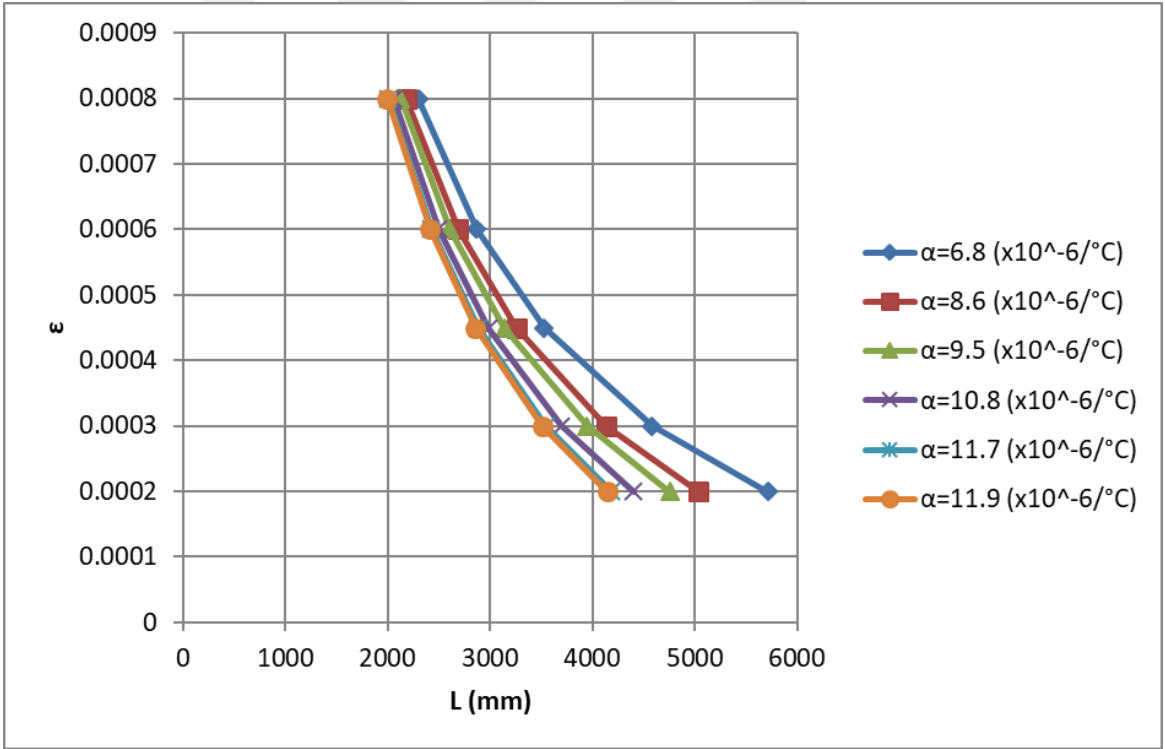
Tablo 9. PCC ısı genleşme katsayısı için değerler (α) (ACPA, 1995).

Agrega tipi	PCC ısı genleşme katsayısı ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Kuvars	11.9
Kumtaşı	11.7
Çakıl	10.8
Granit	9.5
Bazalt	8.6
Kireçtaşı	6.8

Tablo 10. PCC büzülme katsayısı değerleri (ϵ) (ACPA, 1995).

Dolaylı çekme dayanımı	PCC Büzülme Katsayısı
<2.07 MPa (300 psi)	0.0008
2.76 MPa (400 psi)	0.0006
3.45 MPa (500 psi)	0.00045
4.14 MPa (600 psi)	0.0003
>4.83 MPa (700 psi)	0.0002

Bu formül yardımı ile plak uzunluğu, plak uzunluğunda beklenen artışa göre hesaplanabilir. ΔL Huang'a (1993) göre izin verilebilir değere yakın 1.5 mm, ve stabilize zemin için $C = 0.65$ alınırsa olabilecek plak uzunlukları Şekil 34'te gösterilmiştir.

Şekil 34. Formüle göre plak uzunluğu ile α ve ϵ değerleri arasındaki ilişki ($\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$)

Şekilde ϵ değerinin minimum olduğu noktada bile beton plak uzunluğu 6m'ye ulaşmamaktadır. Tüm bu çalışma ve yöntemlerden görüleceği üzere, beton kaplamada kesilecek iki derz arasındaki mesafenin 5 m'yi geçmemesi, beton kaplamada çatlakların minimum düzeyde oluşması için gereklidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Formüller Yardımıyla Gerilmelerin Hesabı

Daha önce belirtilen formüller ile hesaplamalar yapılmıştır. Burada 6 m uzunluğunda ve 25 cm kalınlığında beton yol plağı hesaba katılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan değerler aşağıda verilmiştir. Plak yüzeyi ile tabanı arasındaki maksimum sıcaklık farkı gündüz için $0.55^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ile $0.77^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ arasında alınabilir (Huang, 1993). 25 cm plak kalınlığı için 15°C ($0.6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$) seçilmiştir.

Gerilmeler hesaplanırken alınan değerler;

$P = 45000 \text{ N}$	$\alpha = 10^{-5} /^{\circ}\text{C}$ (TS500)
$p = 0.7 \text{ N}/\text{mm}^2$	$t = 15^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 0.06^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ($h = 250 \text{ mm}$ için)
$h = 250 \text{ mm}$ (100 mm – 400 mm)	$L = 6 \text{ m}$
$\nu = 0.2$ (TS500)	$W = 24 \text{ kN}/\text{m}^3$
C20 / $E = 28000 \text{ MPa}$ (TS500)	$b = 187 \text{ mm}$
$k = 0.1 \text{ MPa}/\text{mm}$	$a = 200 \text{ mm}$
$\gamma = 0.577$	$f = 1.5$

Tekerlek yükü nedeniyle plak kenarının altında oluşan eğilmede çekme gerilmesi Westergaard (2) ve (6) numaralı formüllerden;

$$l = 785.02 \quad \sigma_{e1} = 1.174 \text{ MPa}$$

Tekerlek yükü nedeniyle plak merkezinin altında oluşan eğilmede çekme gerilmesi Westergaard (5) numaralı formülden;

$$\sigma_{i1} = 0.81 \text{ MPa}$$

Sıcaklık farkı nedeniyle plak merkezinin altında boyuna doğrultuda eğilmede çekme gerilmesi (Eisenmann teorisi);

(12) numaralı formülden	$l_{crit} = 6480.74 \text{ mm}$
(15) numaralı formülden	$C = 918.56 \text{ mm}$
(14) numaralı formülden	$L' = 5387.6 \text{ mm}$
0.9 $l_{crit} > L'$ olduğu için;	
(16) ve (18) numaralı formüllerden	$\sigma_t = 2.24 \text{ MPa}$

Sıcaklık farkı nedeniyle plak kenarının orta altında oluşan eğilmede çekme gerilmesi (Dutch metodu ve Bradbury metodu);

(19) numaralı formülden	$\sigma_t = 2.1 \text{ MPa}$	Dutch metodu
(10) numaralı formülden ($C = 1.075$)	$\sigma_t = 2.26 \text{ MPa}$	Bradbury metodu

Plak üstü ve altı arasında sıcaklık farkının fazla olması durumunda Dutch metodunun (20a) numaralı formülünden;

$$\sigma_t = 2.09 \text{ MPa}$$

Sürtünme gerilmesi (23) numaralı formülden;

$$\sigma_f = 0.108 \text{ MPa}$$

Plak uzunluğu artırılırsa sürtünme gerilmesi de artacaktır. Örneğin plak uzunluğunu 15 m alırsak oluşacak sürtünme gerilmesi;

$$\sigma_f = 24 \times 15 \times 1.5 / 2 = 270 \text{ kN/m}^2 = 0.27 \text{ MPa}$$

Hesaplanan gerilme değerlerinden görüleceği üzere plak uzunluğu ile sürtünme gerilmesi arasında doğru orantı vardır. Plak uzunluğunun iki katına çıkarılması durumunda sürtünme gerilmesi değeri de iki katına çıkacaktır. Sürtünme gerilmesinin en önemli değişkeni plak uzunluğudur. Ancak sürtünme gerilmesinin diğer gerilmelere göre çok daha az olduğu da görülmektedir.

Tablo 11. Tekerlek yükü ve sıcaklıktan kaynaklanan eğilmeye çekme gerilmeleri

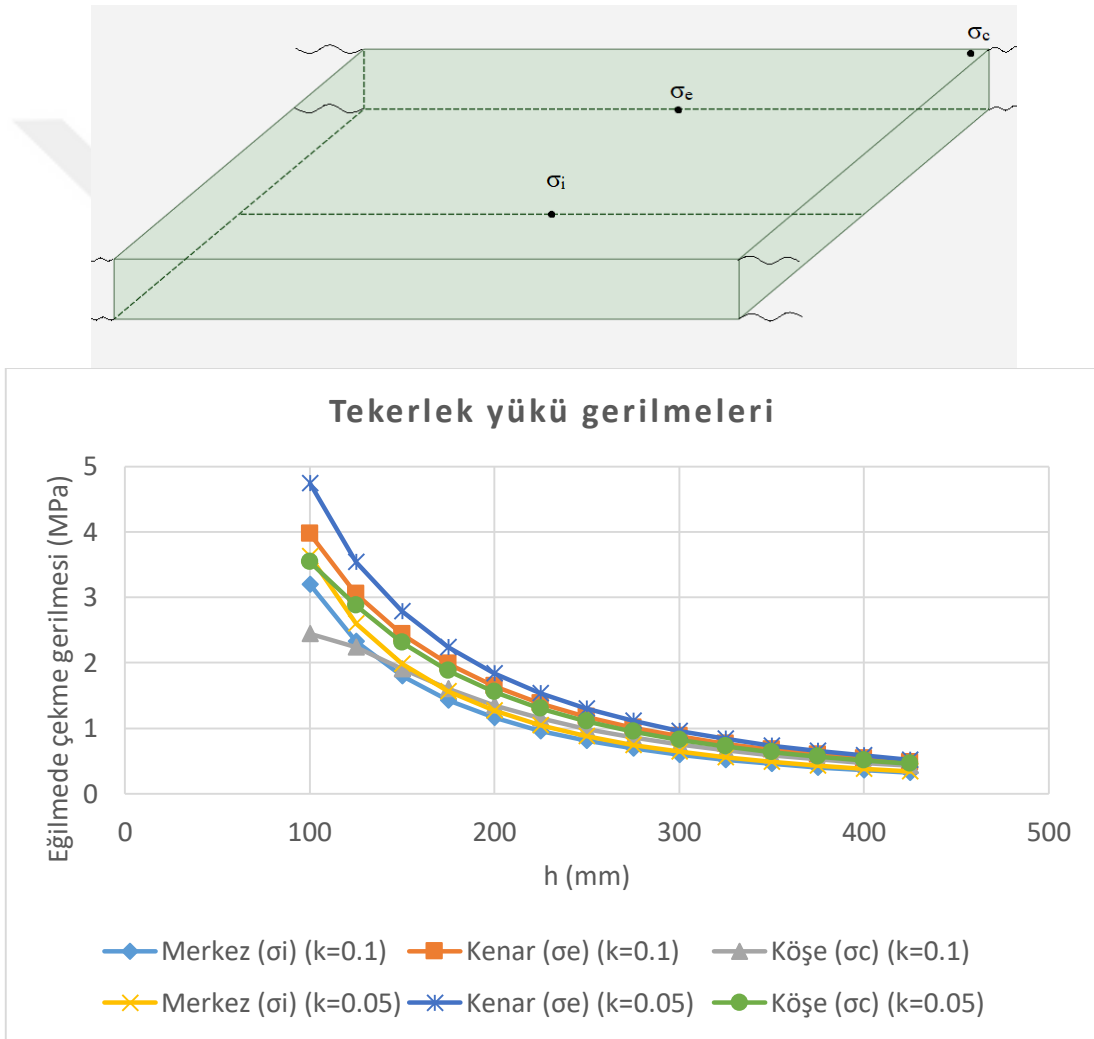
h (mm)	Gerilme (MPa)		h (mm)	Gerilme (MPa)	
100	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	3.97	275	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	1.01
	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	3.20		Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.69
	Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.2		Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.22
	Sıcaklık merkez (Eisenmann)	2.625		Sıcaklık merkez (Eisenmann)	1.99
125	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	3.05	300	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	0.88
	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	2.33		Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.60
	Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.2		Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.15
	Sıcaklık merkez (Eisenmann)	2.625		Sıcaklık merkez (Eisenmann)	1.78
150	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	2.44	325	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	0.77
	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	1.80		Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.52
	Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.2		Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.05
	Sıcaklık merkez (Eisenmann)	2.625		Sıcaklık merkez (Eisenmann)	1.61
175	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	1.99	350	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	0.67
	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	1.43		Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.46
	Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.26		Sıcaklık kenar (Bradbury)	1.99
	Sıcaklık merkez (Eisenmann)	3.15		Sıcaklık merkez (Eisenmann)	1.46

Tablonun devamı

200	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	1.64	375	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	0.60
	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	1.16		Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.40
	Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.27		Sıcaklık kenar (Bradbury)	1.84
	Sıcaklık merkez (Eisenmann)	3.15		Sıcaklık merkez (Eisenmann)	1.33
225	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	1.38	400	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	0.53
	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.96		Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.36
	Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.27		Sıcaklık kenar (Bradbury)	1.74
	Sıcaklık merkez (Eisenmann)	2.55		Sıcaklık merkez (Eisenmann)	1.22
250	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	1.17	425	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	0.48
	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.81		Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	0.32
	Sıcaklık kenar (Bradbury)	2.26		Sıcaklık kenar (Bradbury)	1.6
	Sıcaklık merkez (Eisenmann)	2.24		Sıcaklık merkez (Eisenmann)	1.12

Tablo 11'den ve Şekil 35, 36, 37 ve 38'den görüleceği üzere kalınlığı az olan plaklarda tekerlek yükünden kaynaklanan gerilmeler daha kritik bir durumdadır. Örneğin 15 cm plak kalınlığında, plak kenarında tekerlek yükünden dolayı oluşan gerilme 2.44 MPa değerindeyken sıcaklıktan dolayı oluşan gerilme 2.2 MPa değerindedir. Bu durumda tekerlek yükünden dolayı oluşan gerilme plakta daha önemlidir. Plak kalınlığı arttıkça tekerlek yükü gerilmesi azalarak sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerin altında değerlere inmiştir. Yaklaşık 15 cm plak kalınlığında tekerlek yükünden kaynaklanan gerilmeler sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerin seviyesine inmekte ve plak kalınlığı arttıkça bu değerler daha da azalmaktadır. Örneğin 30 cm plak kalınlığı için, tekerlek yükü gerilmesi

0.88 MPa iken sıcaklık kaynaklı gerilme 2.15 MPa'dır. Bu da daha kalın plaklarda sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerin daha önemli olduğunu gösterir. Ayrıca plak kalınlığının değişmesi, sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerde önemli değişimlere sebep olmamıştır. Bunun sebebi plak yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkının formüllerde sabit 15°C alınmasıdır. Oysa sıcaklık gradyanını sabit kabul ettiğimizde plak kalınlığı arttıkça yüzey ile taban arasındaki sıcaklık farkı da artacaktır. Bu durumda ise kalın beton plaklarda sıcaklığa bağlı gerilmelerin daha yüksek değerlerde oluşması beklenir.

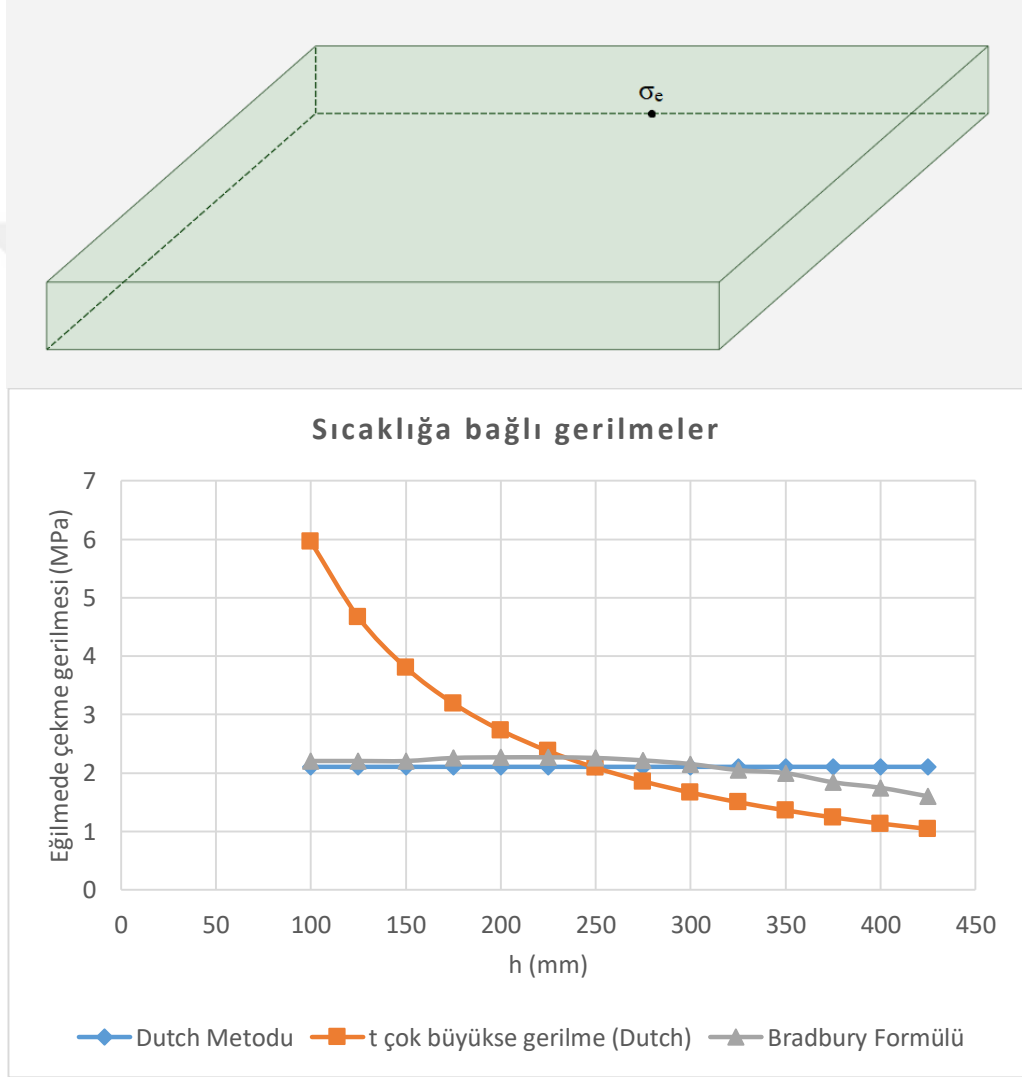


Şekil 35. Westergaard formülleri ile hesaplanan tekerlek yükü nedeniyle oluşan plak kenar ve merkezinin altındaki ve köşesinin üstündeki eğilmede çekme gerilmeleri

Şekil 35'te görüldüğü üzere beton plak kenarının altında tekerlek yükü nedeniyle oluşan eğilmede çekme gerilmeleri, plak merkezinin altında oluşan gerilmelerden daha

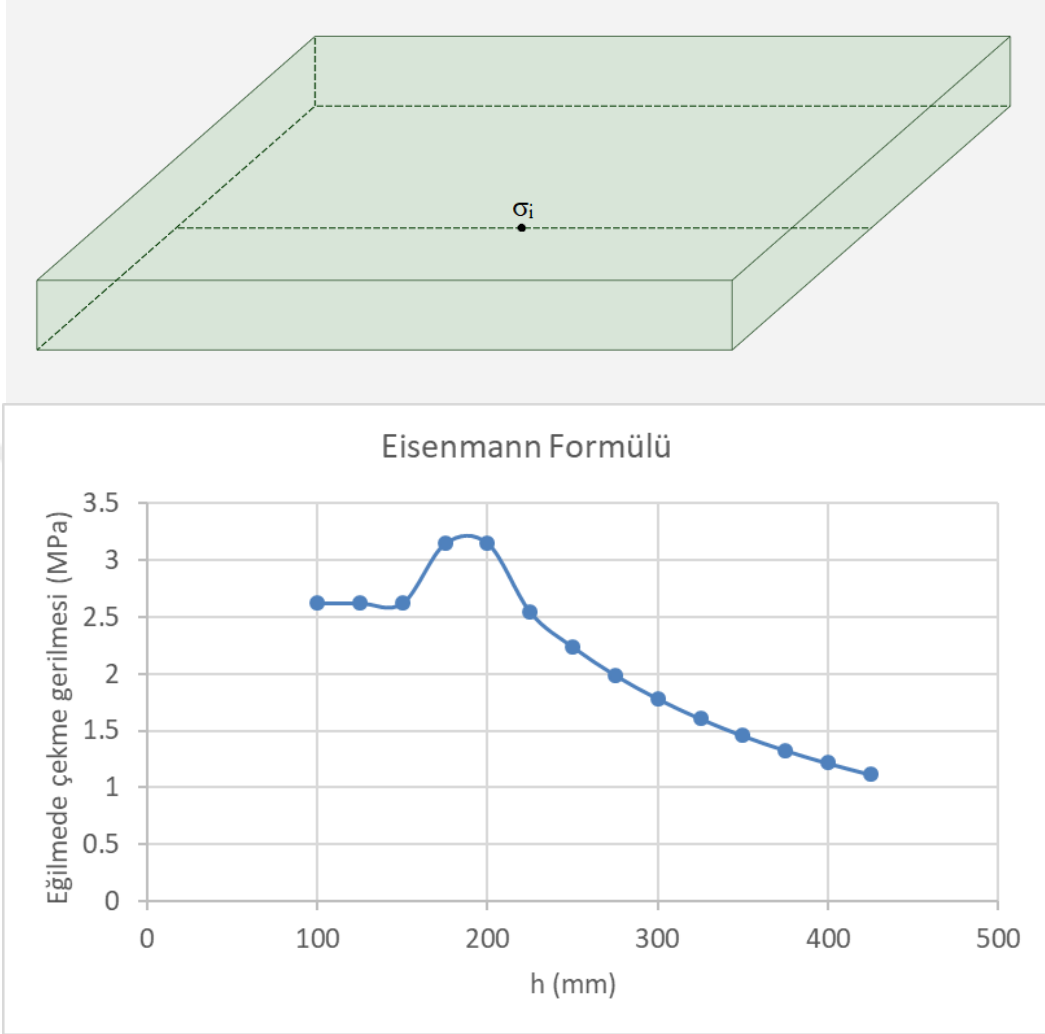
fazladır. Örneğin 20 cm plak kalınlığı için yaklaşık 0.5 MPa fark vardır. Köşelerdeki gerilmeler ise bu noktadan geçen tekerlek yükü nedeniyle oluşur ve yine gündüz plak merkezi altında oluşacak eğilmede çekme gerilmelerinden büyüktür.

Dutch metodu ve Bradbury formülleri ile hesaplanan plak kenarının altında oluşan çekme gerilmesi (eğilme nedeniyle);



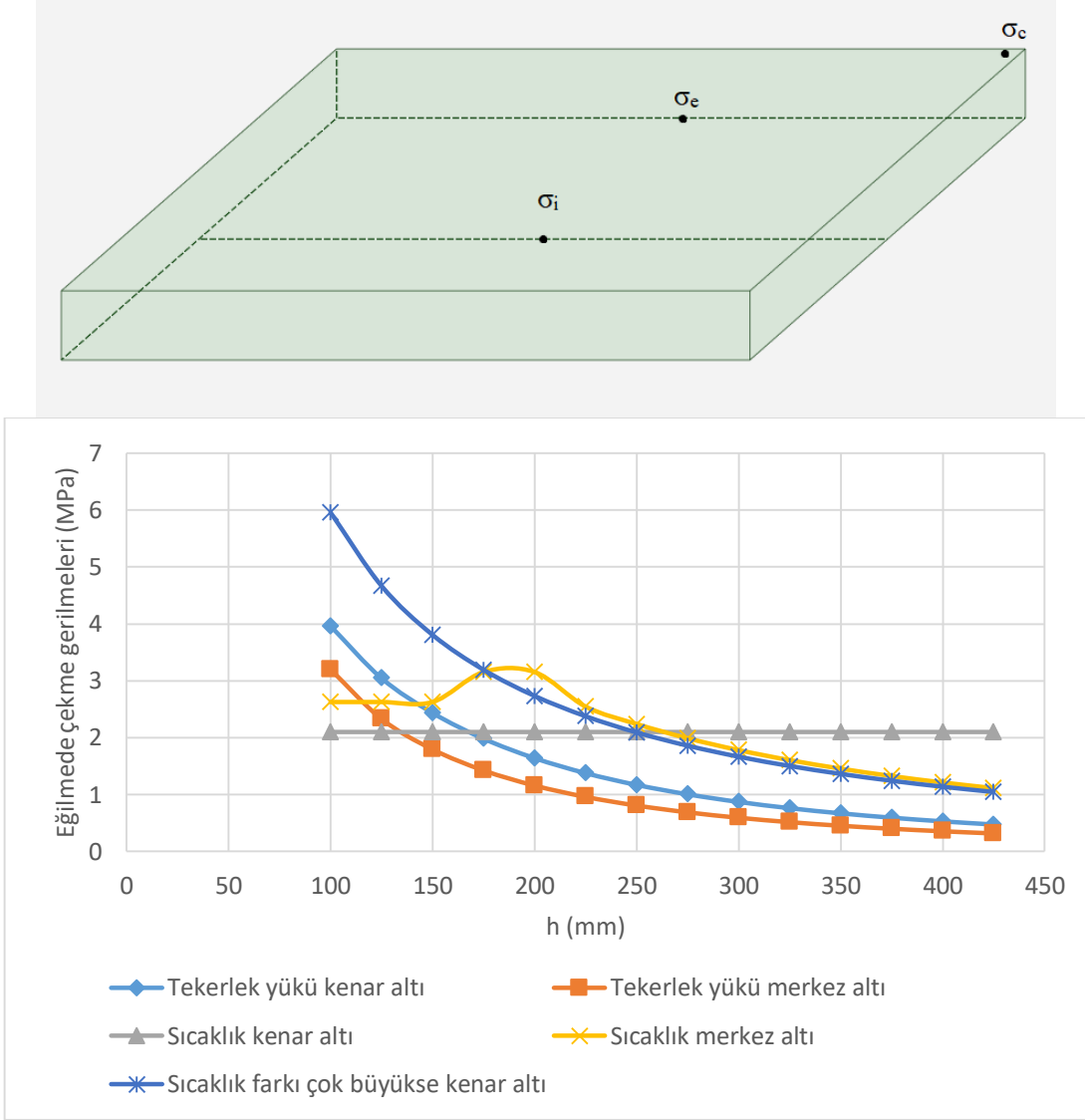
Şekil 36. Sıcaklık gradyanı nedeniyle plak kenarı altında oluşan eğilmede çekme gerilmeleri

Eisenmann formülleri ile hesaplanan plak merkezinin altında oluşan çekme gerilmesi;



Şekil 37. Sıcaklık gradyanı nedeniyle plak merkezinin altında oluşan eğilmede çekme gerilmeleri

Şekil 37'deki gerilmenin 17.5 cm plak kalınlığından sonra artmasının sebebi, Eisenmann formülündeki plak açıklığı (L') ile kritik plak uzunluğu (l_{crit}) değerlerinin yaklaşık olarak birbirine eşit olmasıdır. Bu değerlerin eşit olması durumunda σ_t' gerilmesi $1.2 \times \sigma_t$ olarak alınır. 22.5 cm plak kalınlığından sonra ise gerilme azalmıştır. Bunun sebebi ise plak açıklığı (L') değerinin kritik plak uzunluğu (l_{crit}) değerinden çok daha küçük değerlerde oluşmasıdır. Bu durumda Eisenmann formülünden azaltılmış gerilme bulunur.



Şekil 38. Tüm gerilmelerin tek grafikte gösterimi

Şekil 38'de sıcaklığa bağlı oluşan gerilmeler ile tekerlek yükünden oluşan gerilmeler karşılaştırıldığında sıcaklığa bağlı oluşan gerilmelerin ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Sürtünme gerilmesi ise sıcaklığa bağlı oluşan gerilmelerin on ila yirmide biri kadar oluşmaktadır.

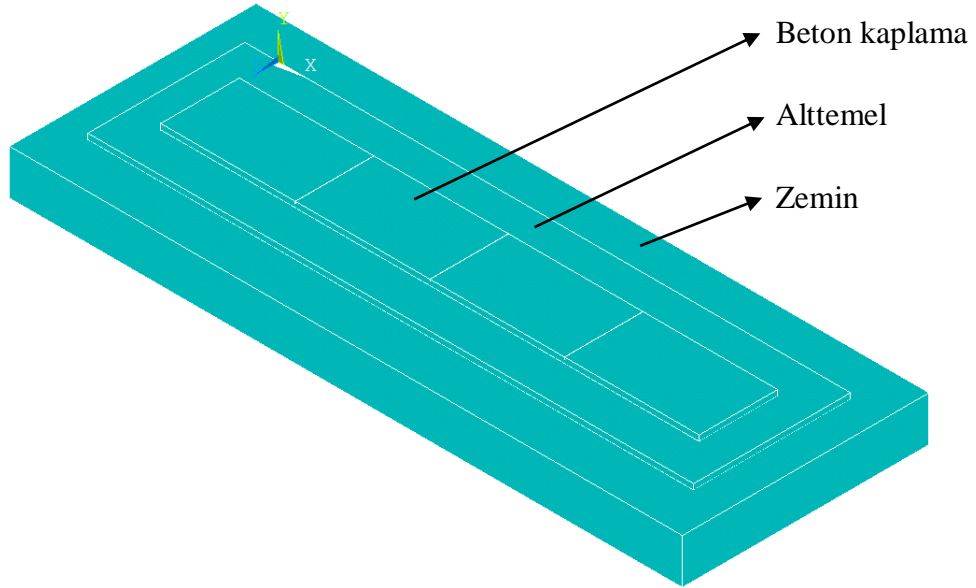
Grafikten görüldüğü üzere en yüksek gerilmeler plak yüzeyi ile tabanı arasında sıcaklık farkının fazla olması durumunda gerçekleşmiştir. Bunun dışında plak kalınlığının az olduğu durumlarda tekerlek yükü nedeniyle oluşan gerilmeler daha fazladır. Plak kalınlığının artması ile sıcaklık nedeniyle oluşan gerilmeler pek değişmemiştir. Bunun sebebi plak kalınlığı boyunca oluşan sıcaklık farkının sabit bir değer olarak alınmasıdır.

2.2. ANSYS Modellemesi ve Gerilme Hesabı

ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak bir modelleme yapılmıştır. Modellemede kullanılan değerler ve yöntemler burada açıklanmıştır.

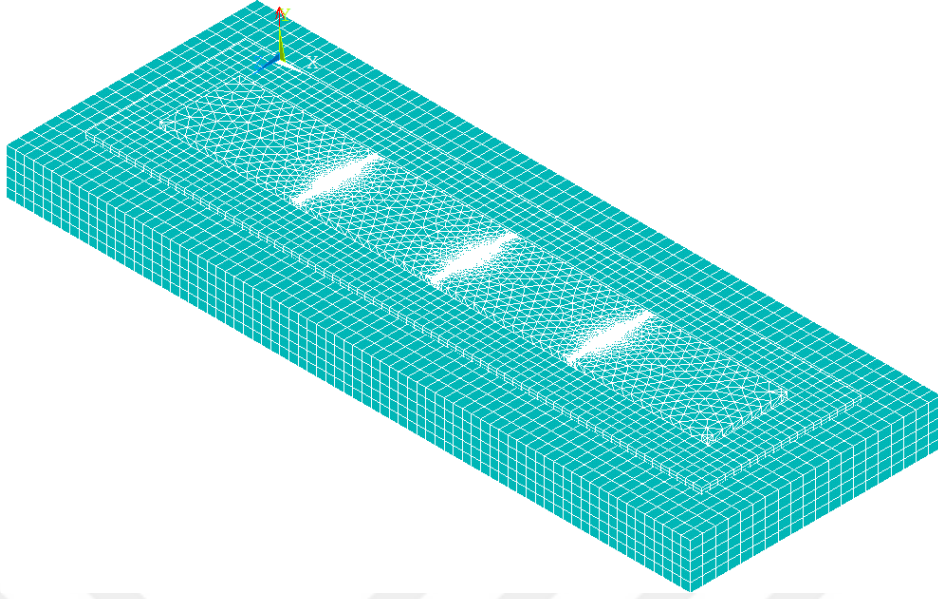
Tablo 12. ANSYS tasarımında kullanılan malzeme özellikleri

	Beton kaplama	Temel	Zemin
E (MPa)	28000 (C20)	2900	120
ν	0.2	0.3	0.35
γ (kg/m ³)	2400	2100	2050
α	10^{-5}	7×10^{-6}	
Isıl iletkenlik (W/m ^{°K})	0.55	0.1	
Boyutlar	24m x 3.5m x 0.25m	27m x 7m x 0.25m	30m x 11m x 2m
Derz aralığı	4m, 6m, 8m, 12m, 24m		
Derz boyutları	0.6cm x 8cm		



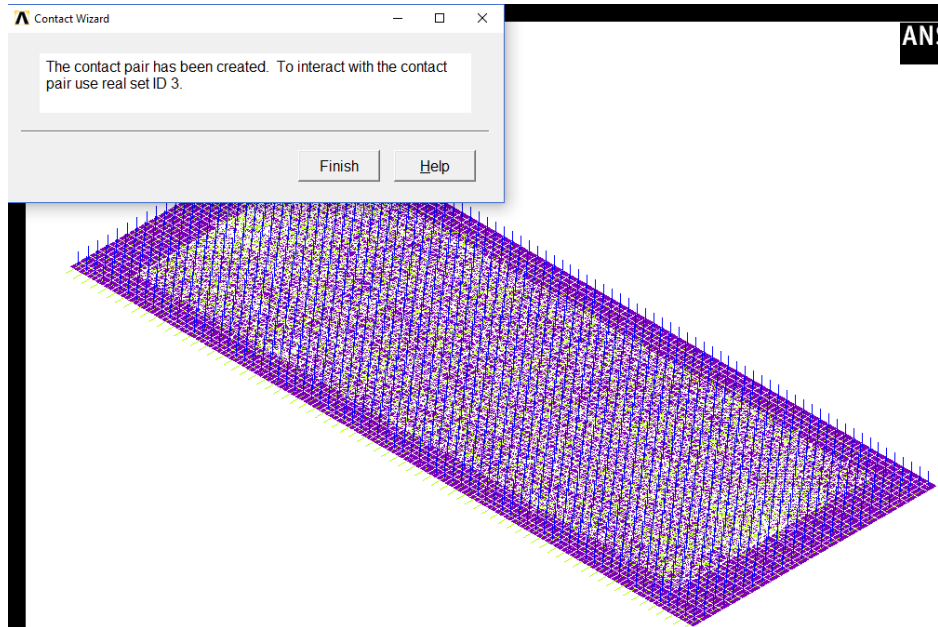
Şekil 39. ANSYS modellemesinin ana hatları

Modelleme yapılırken element tipi Solid 186 seçilmiştir. Malzeme özellikleri beton kaplama, temel ve zemin için Tablo 12’de gösterilmiştir. Malzeme özelliklerinden temel ve zeminin E, ν , γ değerleri Mackiewicz’in (2014) yaptığı çalışmadan alınmıştır.



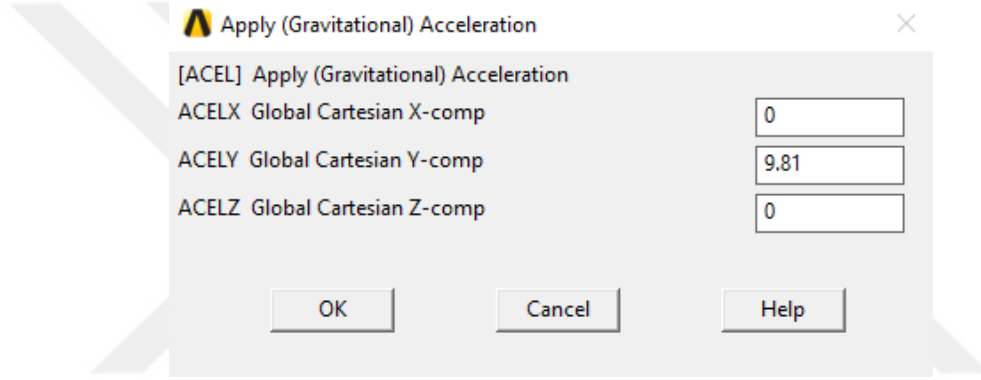
Şekil 40. Modelin mesh atandıktan sonraki görüntüsü

Meshleme işleminden sonra Contact Pair sekmesinden hacimler arasında temas yüzeyi oluşturulmuştur (Şekil 40 ve Şekil 41). Temas yüzeyi oluşturulurken hacimler arasındaki sürtünme katsayısı 0.55 olarak alınmıştır (STRUCT, 2018).



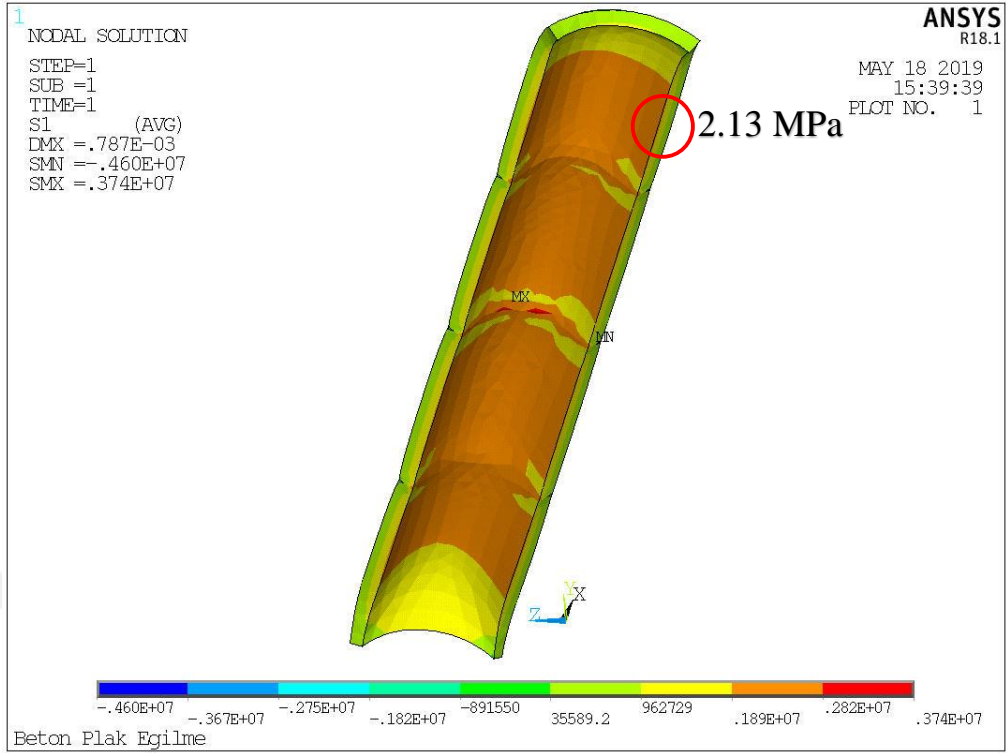
Şekil 41. Oluşturulan temas yüzeyi

Mesh atama ve temas yüzeyi oluşturma işleminden sonra mesnet koşulları ve yüklerin tanımlanması işlemi yapılmıştır. Beton plak üzerine etkiyen yüklerden önce sıcaklıktan dolayı oluşacak gerilme ve genişlemenin hangi referans sıcaklık değerine göre hesaplanacağını belirlemek için referans sıcaklık 30°C tanımlanmıştır. Yük olarak önce sadece sıcaklık etkisine bakmak için yüzeylere sıcaklık atanmıştır. Beton kaplama yüzey sıcaklığı 40°C ve taban sıcaklığı 25°C olarak atanmıştır. Daha sonra beton kaplamadaki eğilme hareketi ile kaplamanın kendi ağırlığıyla yüklenmesi için yerçekimi ivmesi atanmıştır (Şekil 42). Böylece sıcaklık etkisi altında beton kaplamanın eğilmesi ve kendi ağırlığıyla yüklenmesi sonucu oluşacak gerilmeler elde edilmiştir.

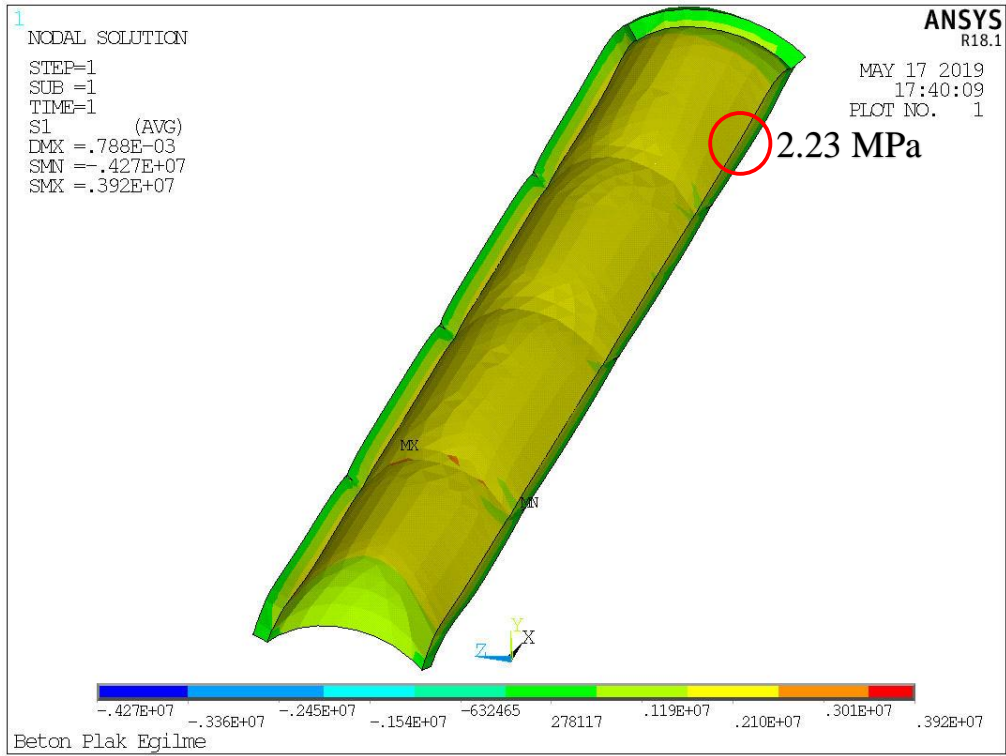


Şekil 42. Yerçekimi ivmesi

Analiz işlemi tamamlandıktan sonra beton kaplama altında elde edilen çekme gerilmeleri Şekil 43'te gösterilmektedir. Boyuna derz tam derz olacağı için sadece tek şerit dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Şekilden görülebileceği üzere beton kaplama altında oluşan çekme gerilmesi değeri plak kenarlarında 2.13 MPa civarındadır. Bradbury formülleri ile yapılan hesapta ise bu değer 2.26 MPa olarak bulunmuştu. Yer değiştirme miktarının daha iyi görülebilmesi için zemin hesaptan çıkarılarak sadece kaplama ve temel ile yapılan hesaplamada gerilme değerlerinde önemli bir değişim olmamıştır. Şekil 44'te zemin olmadan sadece kaplama ve temel ile elde edilen sonuç görülmektedir.

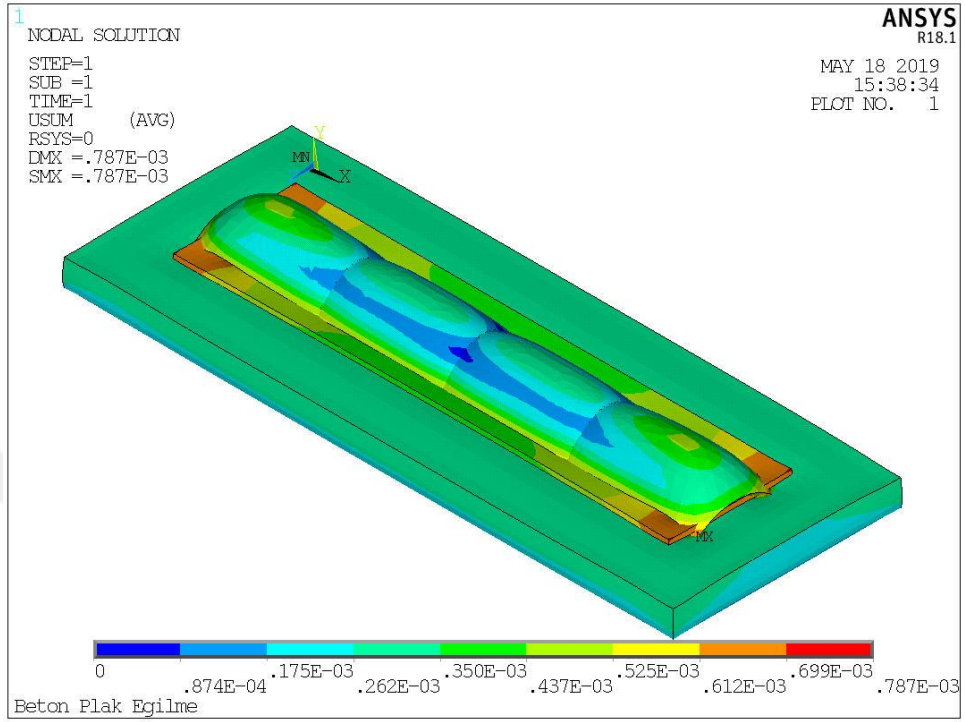


Şekil 43. Beton kaplama altında oluşan çekme gerilmeleri

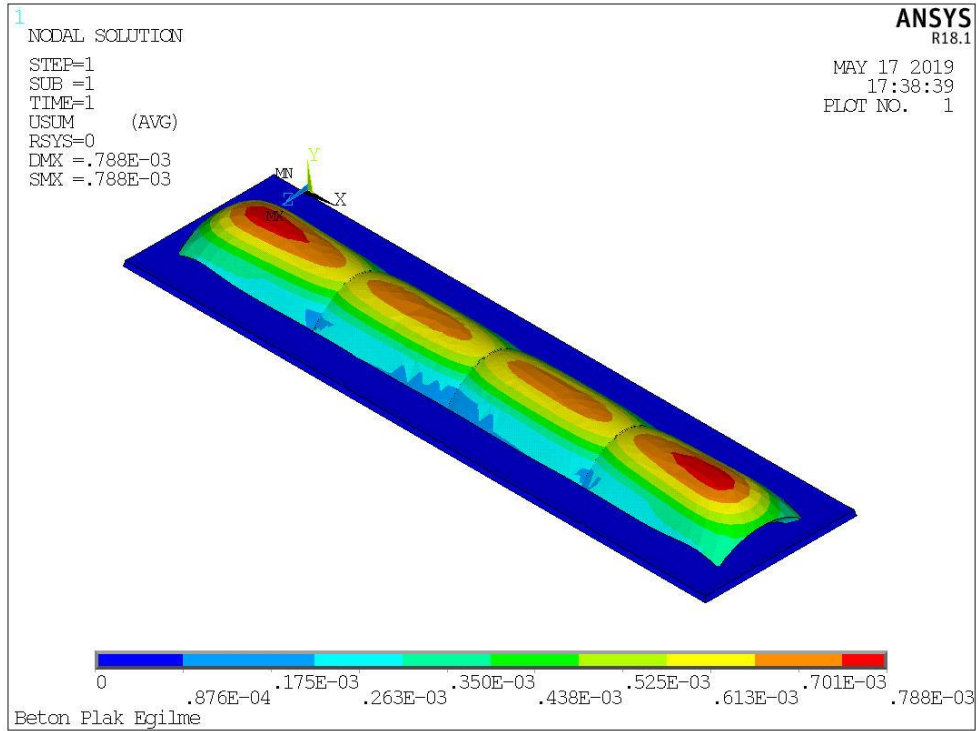


Şekil 44. Sadece kaplama ve temel ile yapılan hesaplama

Şekil 45 ve 46'da beton plaktaki yer değıştirme miktarları görülebılır.

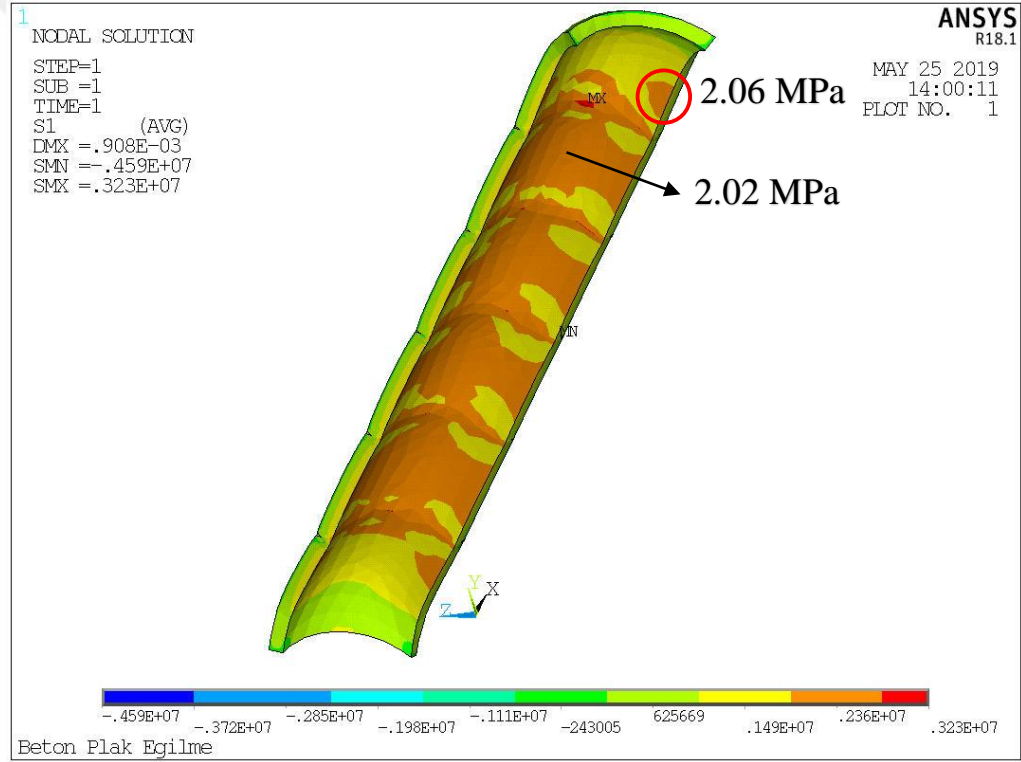


Şekil 45. Zemin olması durumunda yer değıştirme miktarları

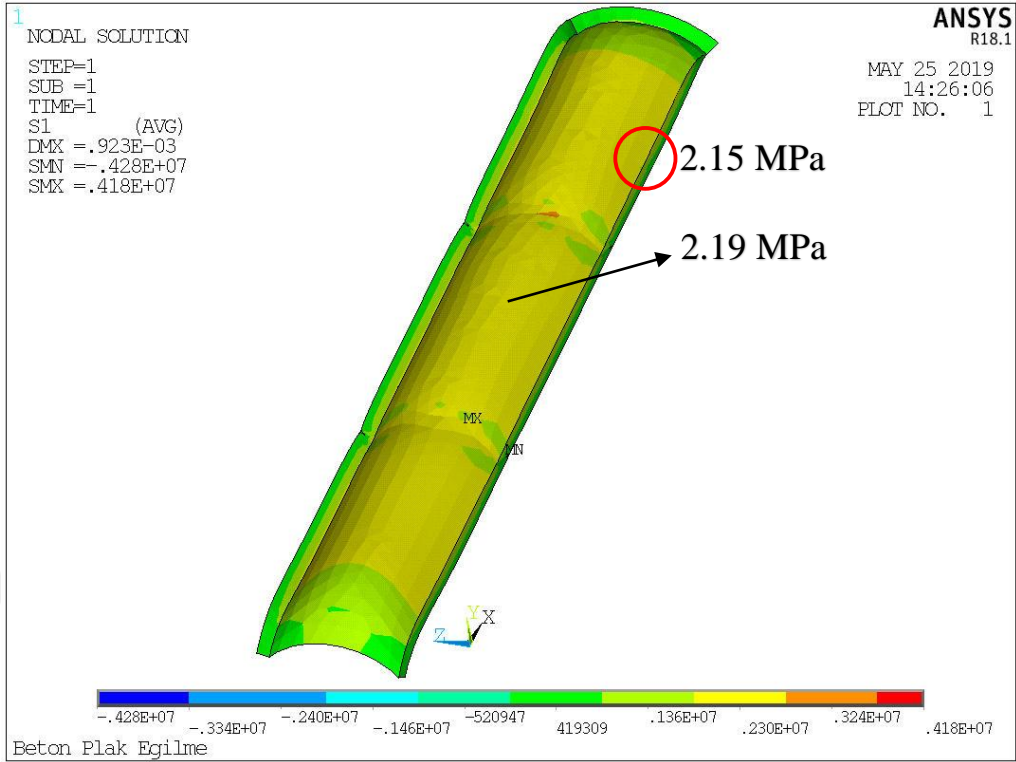


Şekil 46. Zemin bulunmayan durumda yer değıştirme miktarları

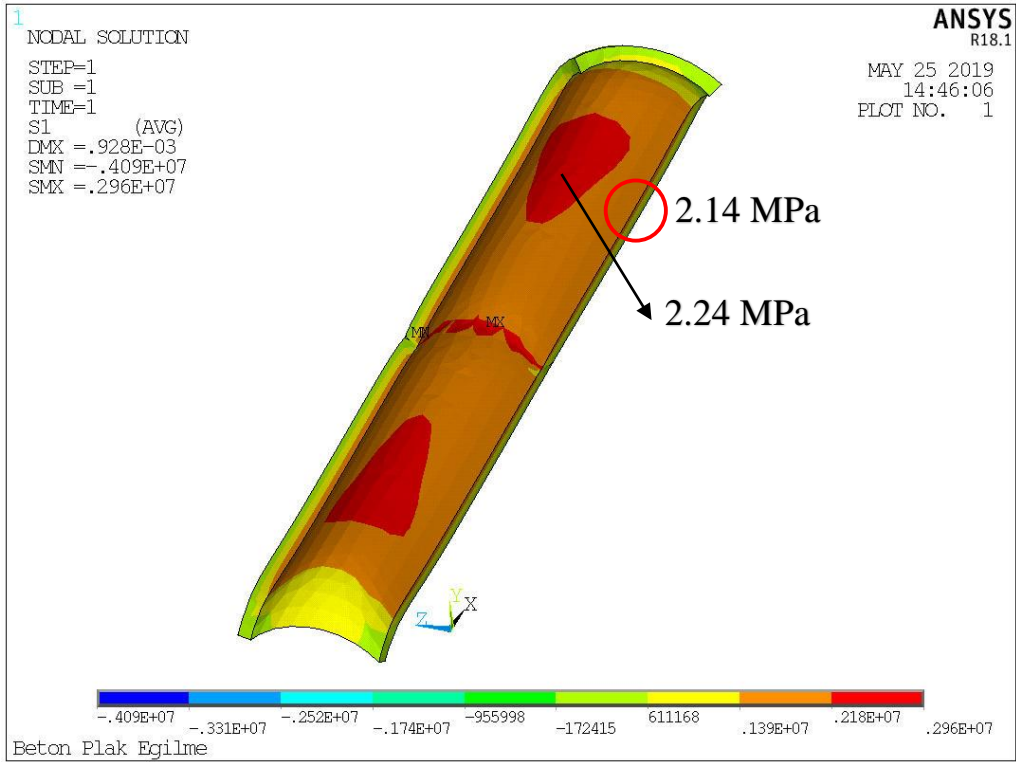
Şekil 47, 48, 49 ve 50'de farklı derz aralıkları için elde edilen gerilme sonuçları verilmiştir. Buna göre derz aralıklarının 4 m, 6 m, 8 m, 12 m ve 24 m olması durumunda gerilme miktarlarında önemli bir değişiklik olmamıştır. Formülasyon sonucu elde edilen sonuçlarda da yine aynı şekilde plak uzunluğunun gerilmelere önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar formülasyon ile uyuşmaktadır. Ayrıca derzlerin altında plakların birleşim noktalarında çekme gerilmeleri diğer noktalardan fazla olduğu görülmektedir. Ancak zaten kesilen derzlerin altından itibaren kaplama tabanına kadar çatlama oluşacağından bu gerilmeler beklenen bir durumdur (Şekil 3).



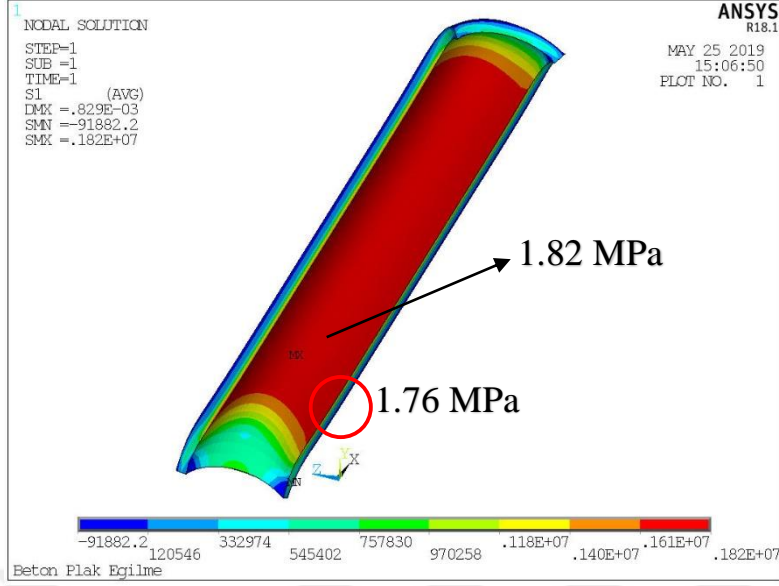
Şekil 47. 24 m kaplamada 5 enine derz bulunması halinde altta çekme gerilmeleri



Şekil 48. 24 m kaplamada 2 enine derz bulunması halinde altta çekme gerilmeleri

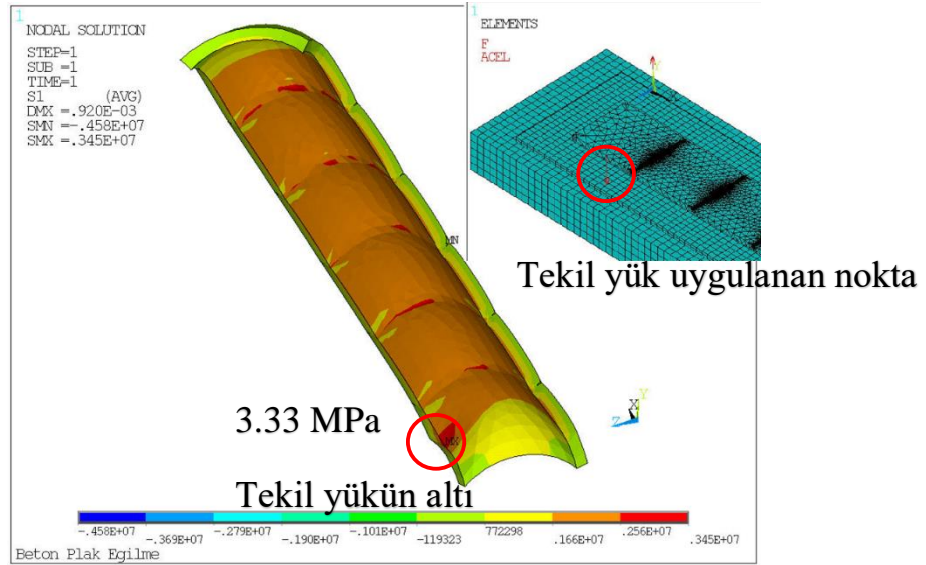


Şekil 49. 24 m kaplamada 1 enine derz bulunması halinde altta çekme gerilmeleri



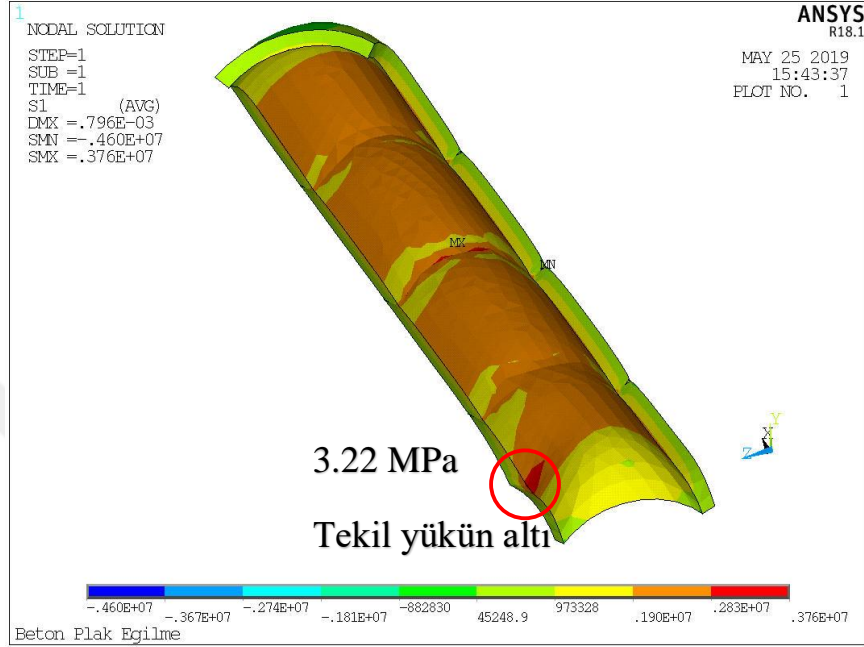
Şekil 50. 24 m kaplamada enine derz bulunmaması halinde altta çekme gerilmeleri

Şekillere göre plak kenarının altındaki eğilmede çekme gerilmeleri 2 MPa civarında oluşmuştur. Bradbury formülü ile hesaplandığında bu değer 2.26 MPa bulunmuştur. Bu değerler birbirini doğrular niteliktedir. Ayrıca plak boyutunun artmasının sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı da görülmüştür. Plak boyutlarının artması ile plak merkezinde oluşan gerilme değerleri bir miktar artmıştır.

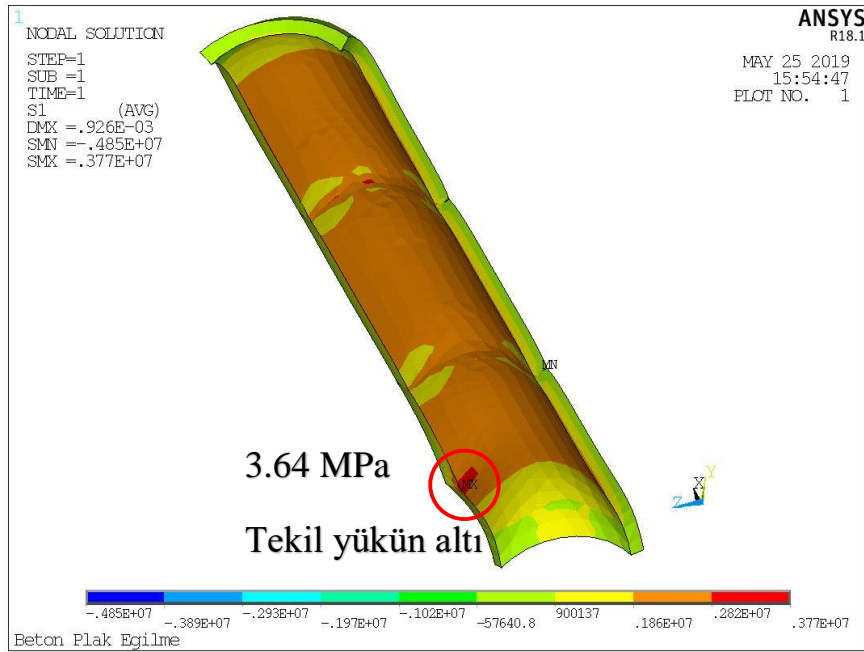


Şekil 51. 5 enine derz bulunması halinde sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri

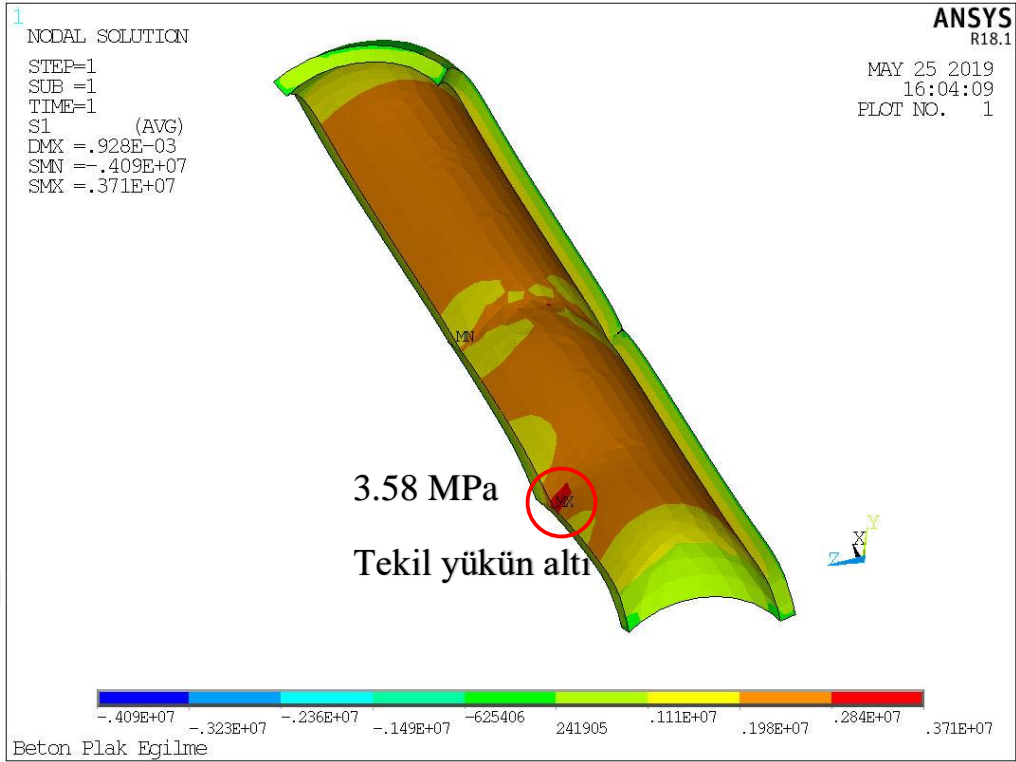
Sıcaklık etkisinin yanında beton plak kenarına tekerlek yükünün de eklendiği durumda elde edilen sonuçlar Şekil 51, 52, 53, 54 ve 55'te görülmektedir. Tekerlek yükü eklendiğinde oluşan toplam gerilmeler 3 MPa'ı aşmaktadır.



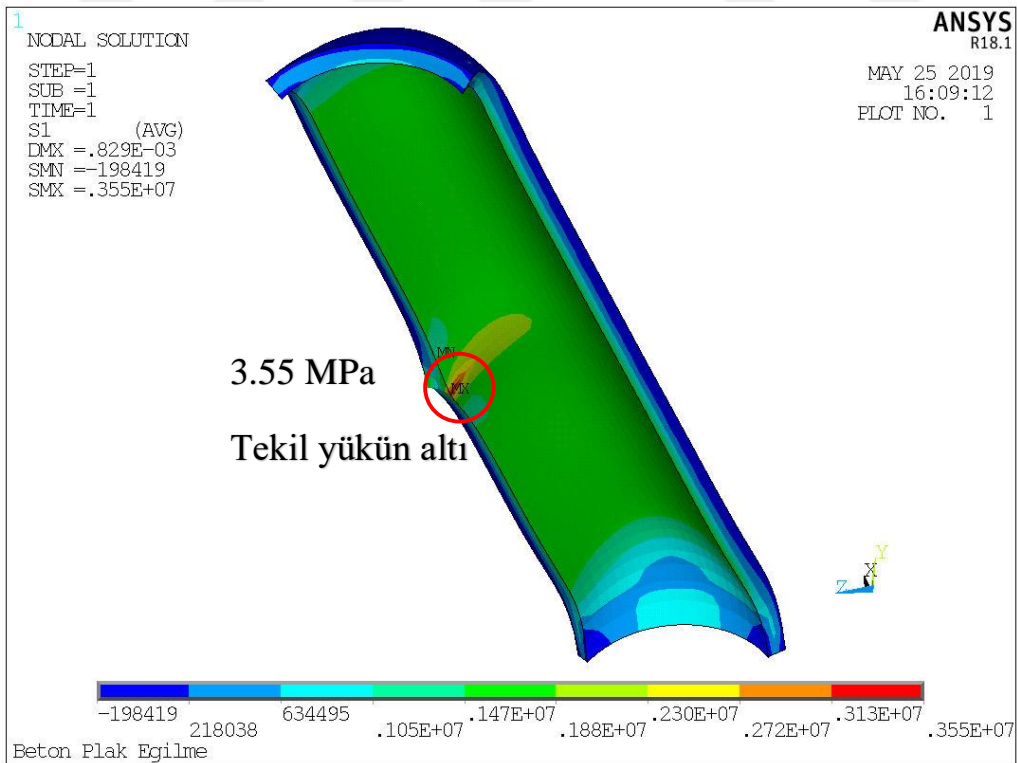
Şekil 52. 3 enine derz bulunması halinde sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri



Şekil 53. 2 enine derz bulunması halinde sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri

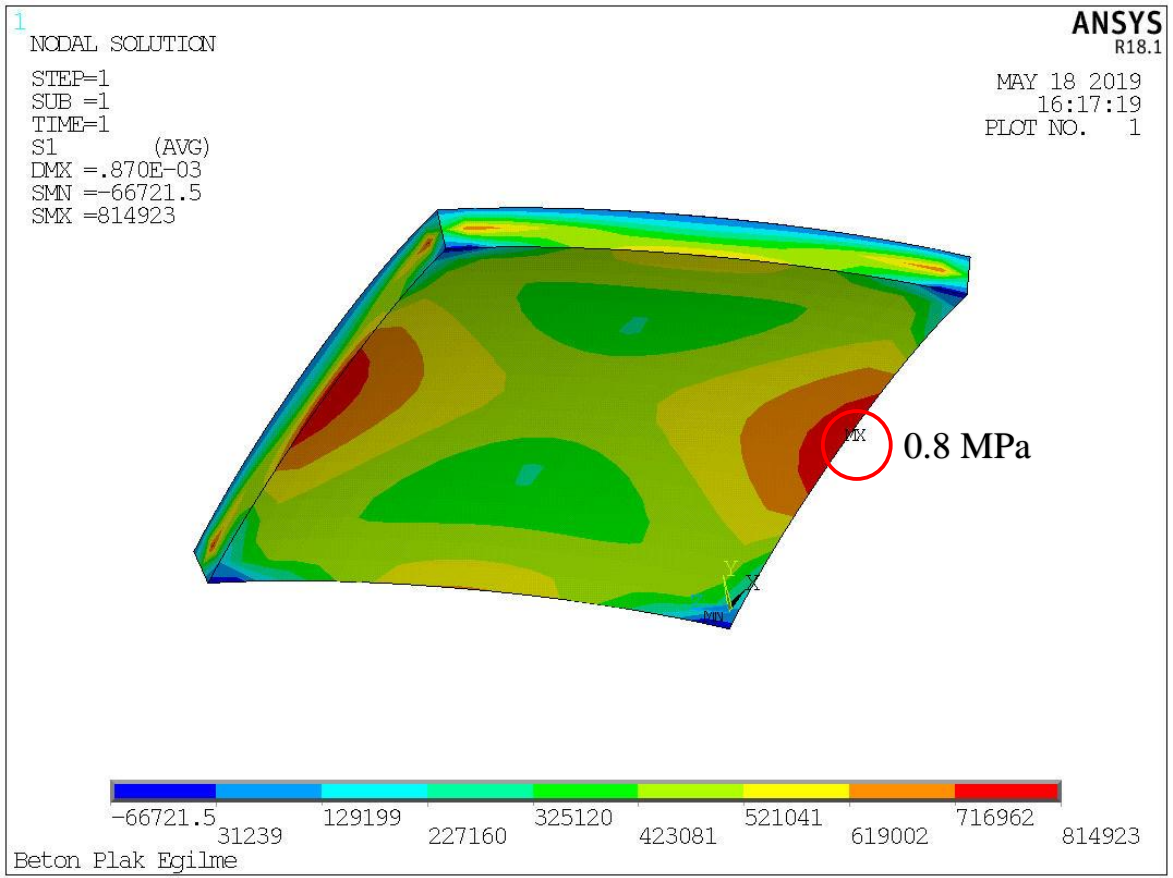


Şekil 54. 1 enine derz bulunması halinde sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri

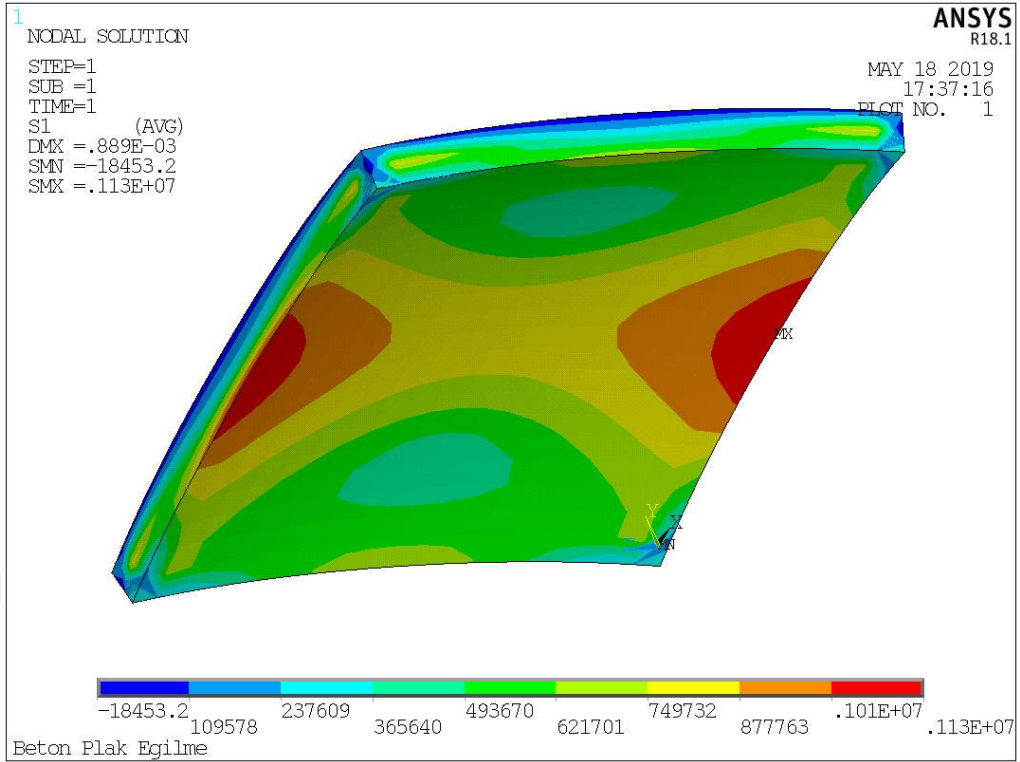


Şekil 55. Enine derz bulunmaması halinde sıcaklık ve tekil yük etkisi altında plak altında çekme gerilmeleri

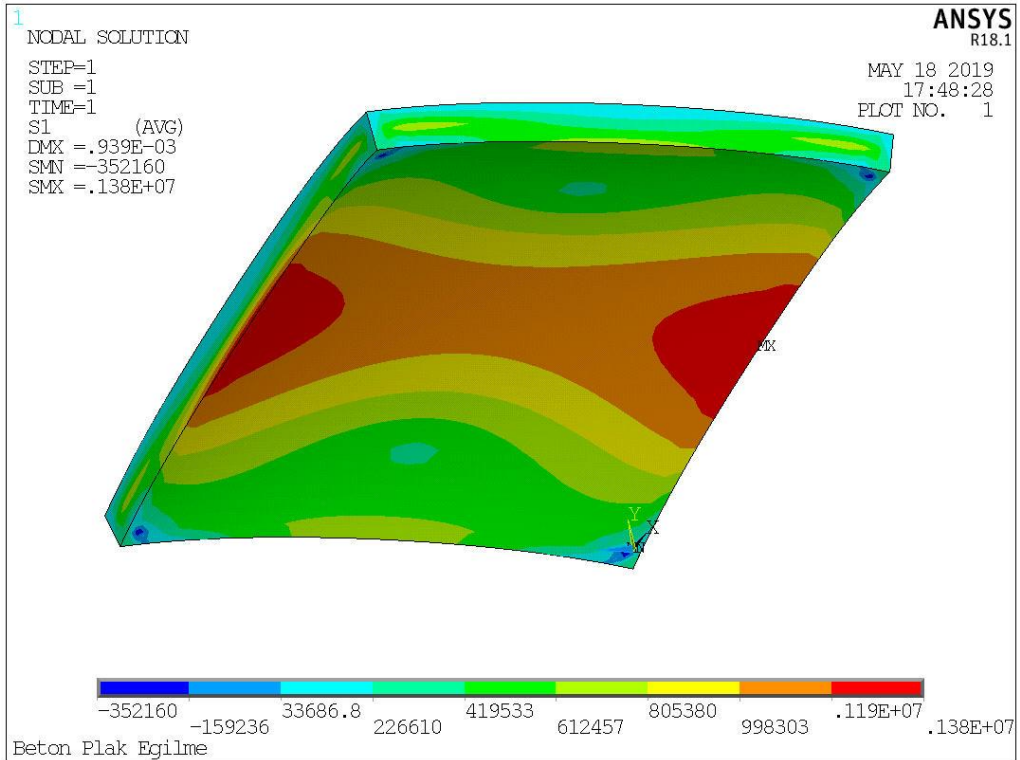
Beton kaplamada kesilen derzlerin alt kısımları zamanla çatlayacağından çatlamadan sonra beton plaklar, sıcaklık etkisinde daha bağımsız bir şekilde eğileceklerdir. Tüm plakları tek tek düşünecek olursak, çeşitli plak boyutları için oluşacak gerilme değerleri Şekil 56, 57, 58, 59, 60 ve 61’de verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere 4 m plak boyutu için plak altında oluşan çekme gerilmesi 0.8 MPa olurken plak uzunluğu arttıkça bu gerilme değeri önemli ölçüde artmaktadır. 4.5 m plak uzunluğu için bu değer 1.1 MPa değerine ulaşırken 5 m plak uzunluğu için 1.4 MPa değerine ulaşmış, 6m plak uzunluğu için ise 1.8 MPa gerilme oluşmuştur.



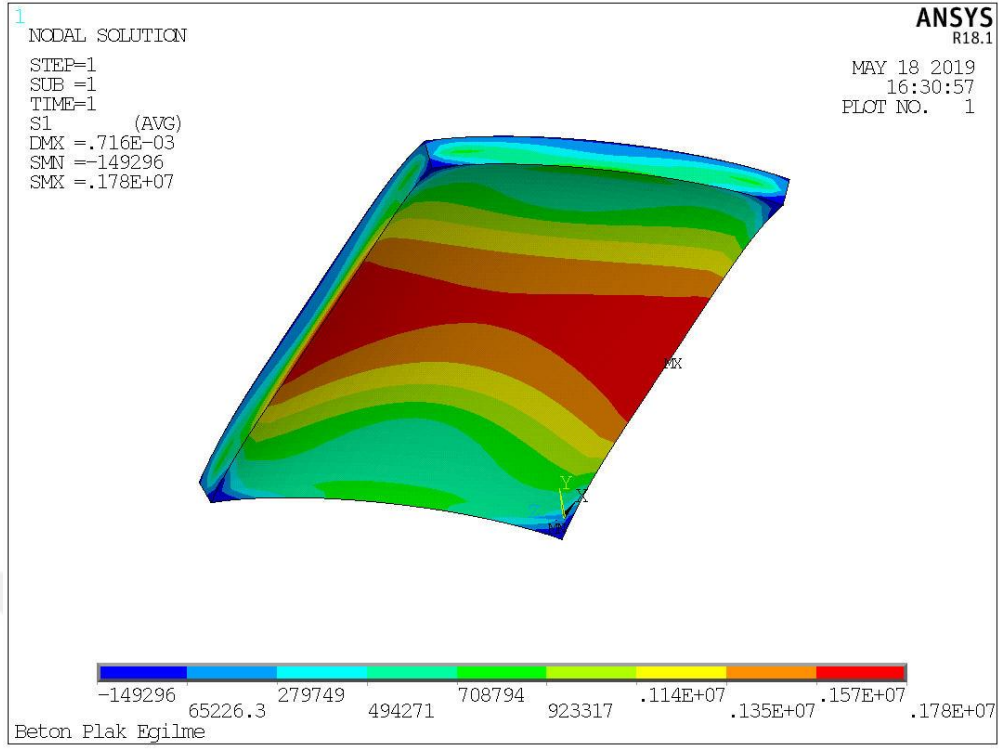
Şekil 56. 4 x 3.5 m boyutlara sahip beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler



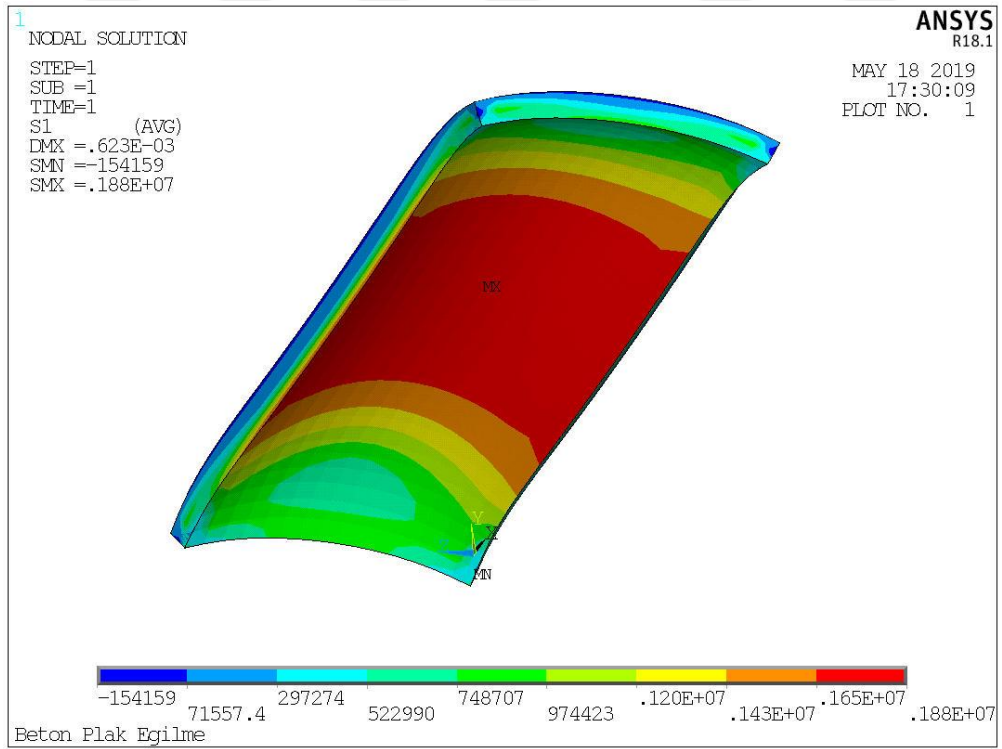
Şekil 57. 4.5 x 3.5 m boyutlara sahip beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler



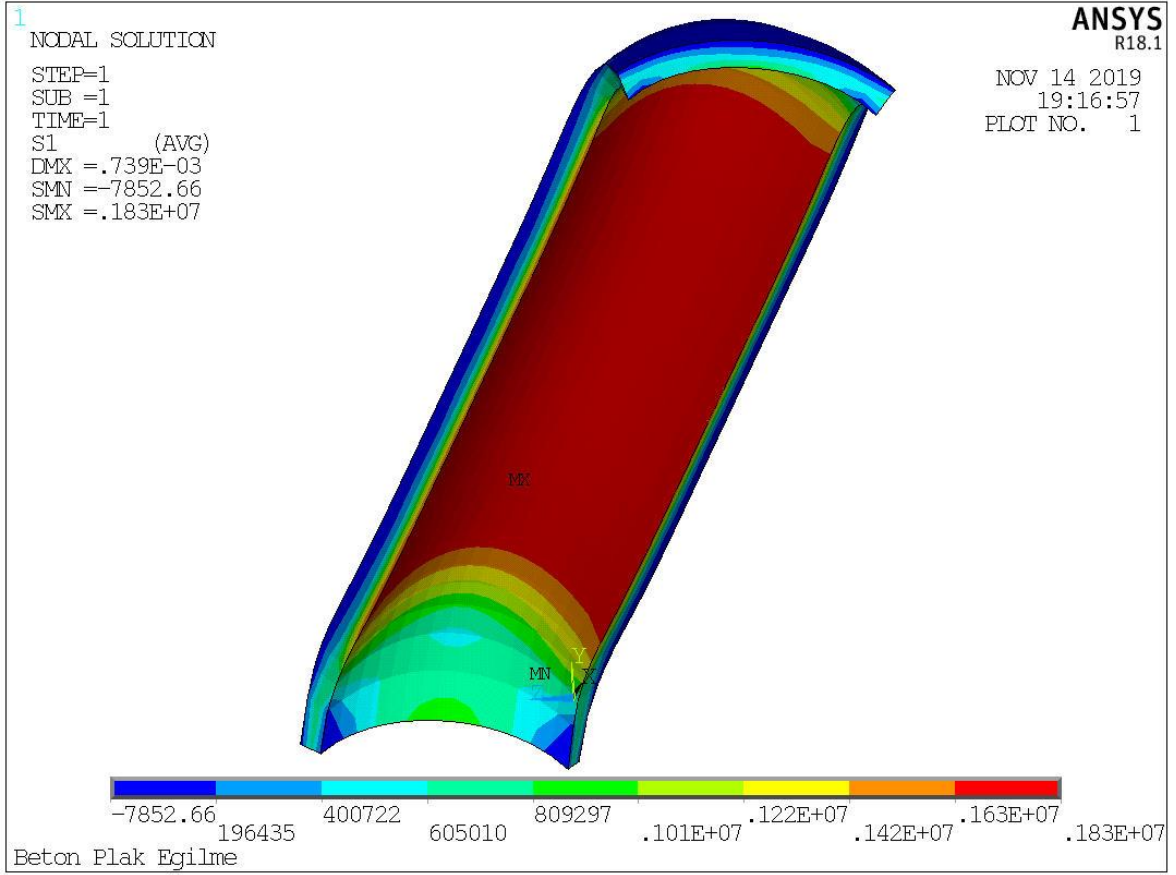
Şekil 58. 5 x 3.5 m boyutlara sahip beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler



Şekil 59. 6 x 3.5 m boyutlara sahip beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler

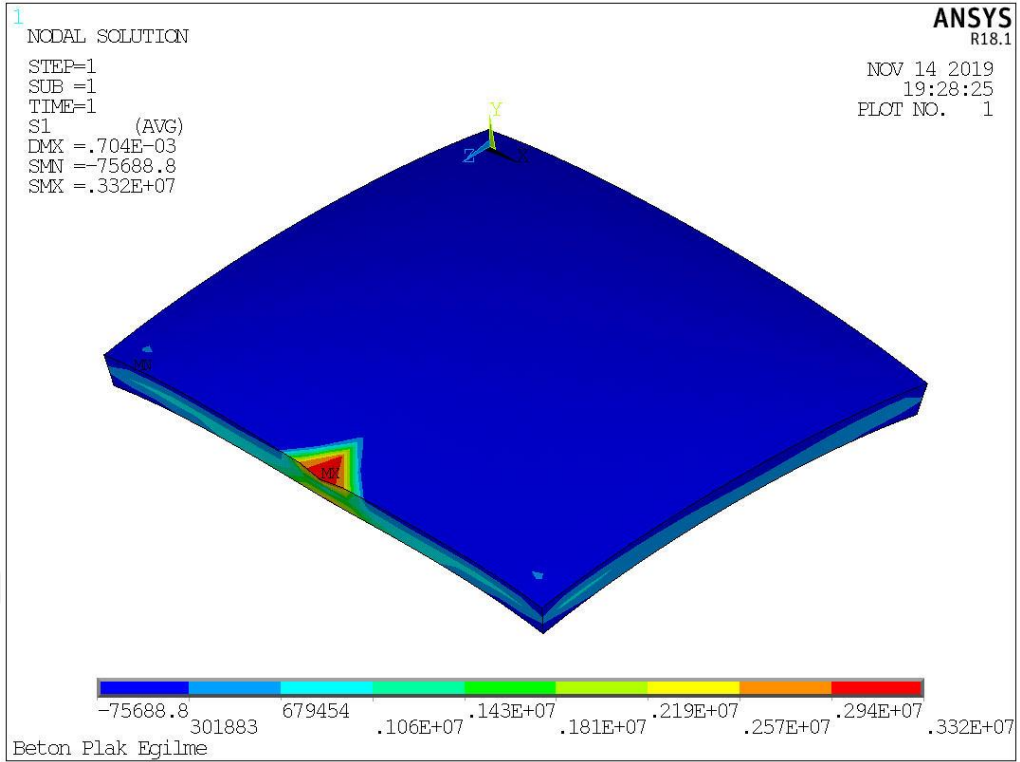


Şekil 60. 10 x 3.5 m boyutlara sahip beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler

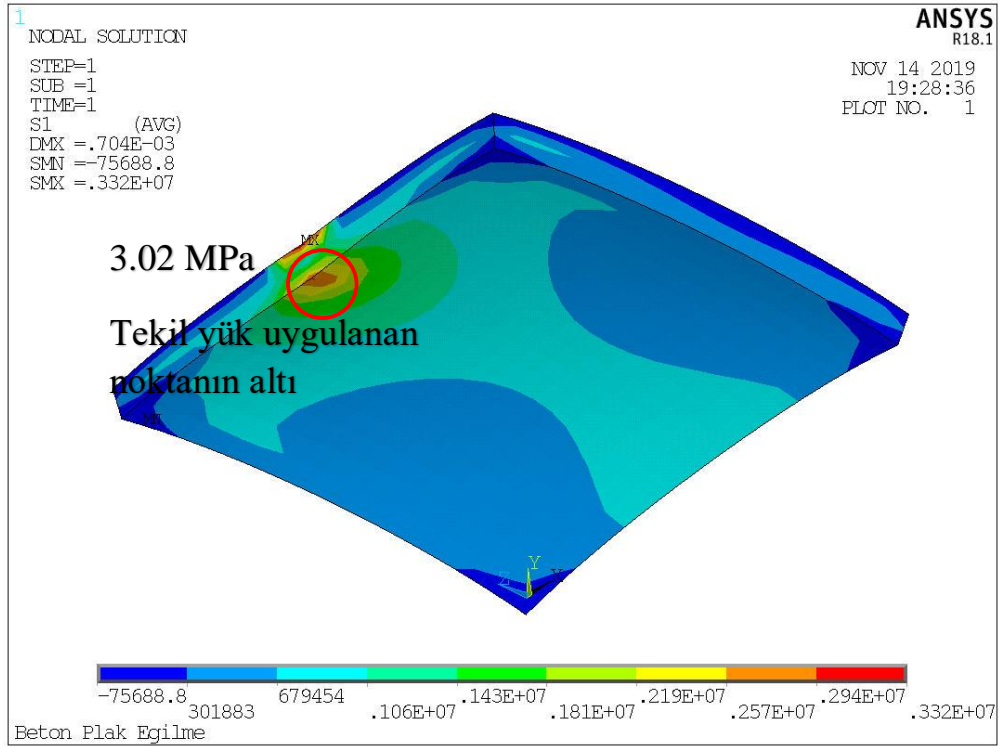


Şekil 61. 20 x 3.5 m boyutlara sahip beton plak altında sıcaklık etkisinde oluşan gerilmeler

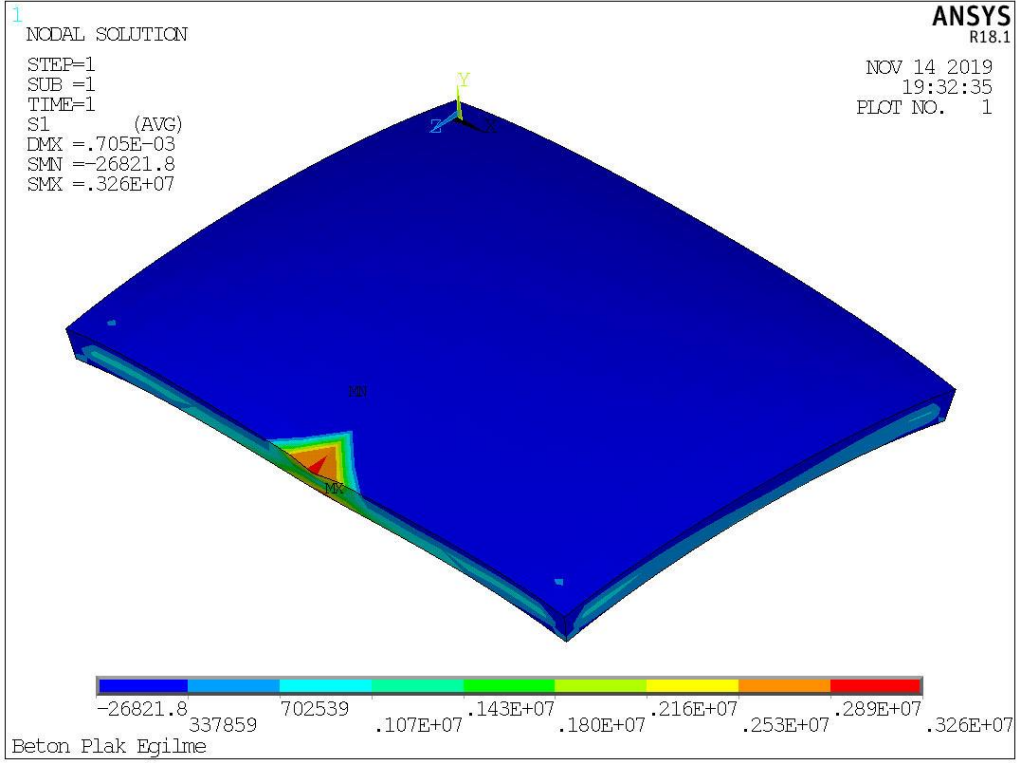
Şekillerden görüleceği üzere 4 m plak boyutu geçildiğinde plak kenarı altındaki çekme gerilmeleri önemli ölçüde artmakta hatta bu gerilmeler plak merkezine de yayılmaktadır. “1.5. Derz Aralıklarının Hesaplanması” bölümünde de belirtilen 4 m – 4.5 m plak uzunluğu önerisi bu gerilme değerleri ile doğrulanmaktadır. Bu plaklara sıcaklık etkisinin yanında 45 kN tekil yük eklendiğinde oluşacak gerilmeler ise Şekil 62, 63, 64 ve 65’te gösterilmektedir. Bu durumda eklenen tekil yükler plak kenarının altında oluşturdukları çekme gerilmelerine ek plak yüzeyinde de çekme gerilmesi oluşturmuştur (Şekil 62). Plak altındaki çekme gerilmeleri ise 4 m plak için de 5 m plak için de 3 MPa’ı aşmaktadır.



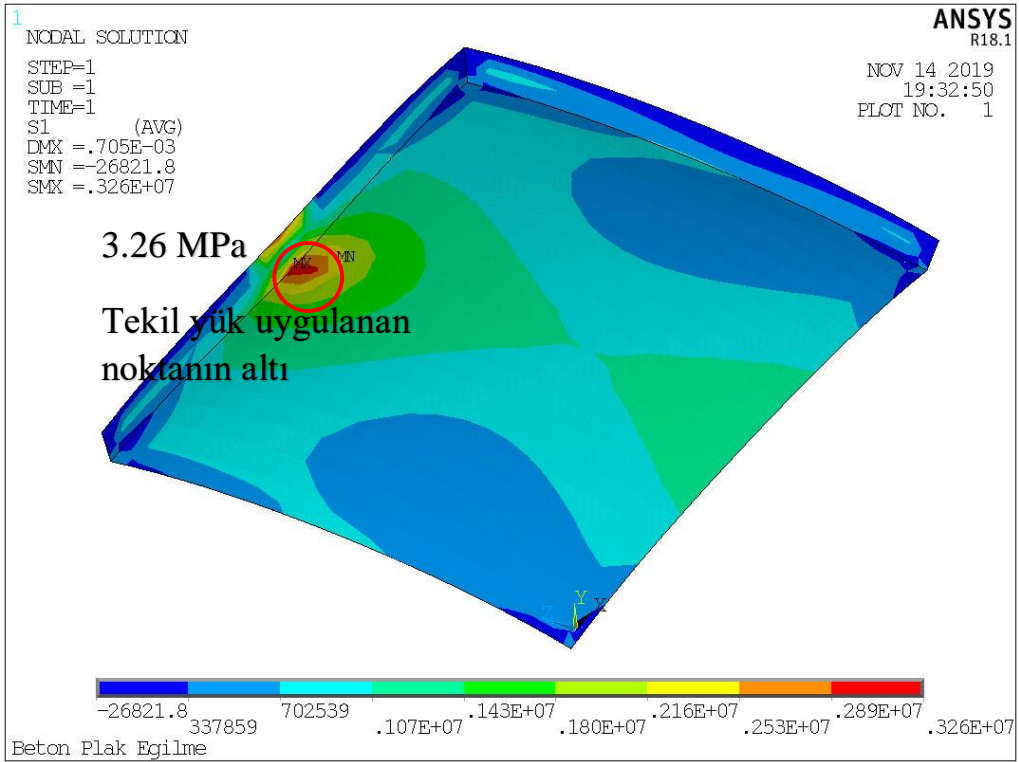
Şekil 62. 4 x 3.5 m boyutlu plak yüzünde sıcaklık ve tekil yük etkisinde oluşan çekme gerilmeleri



Şekil 63. 4 x 3.5 m boyutlu plak altında sıcaklık ve tekil yük etkisinde oluşan çekme gerilmeleri

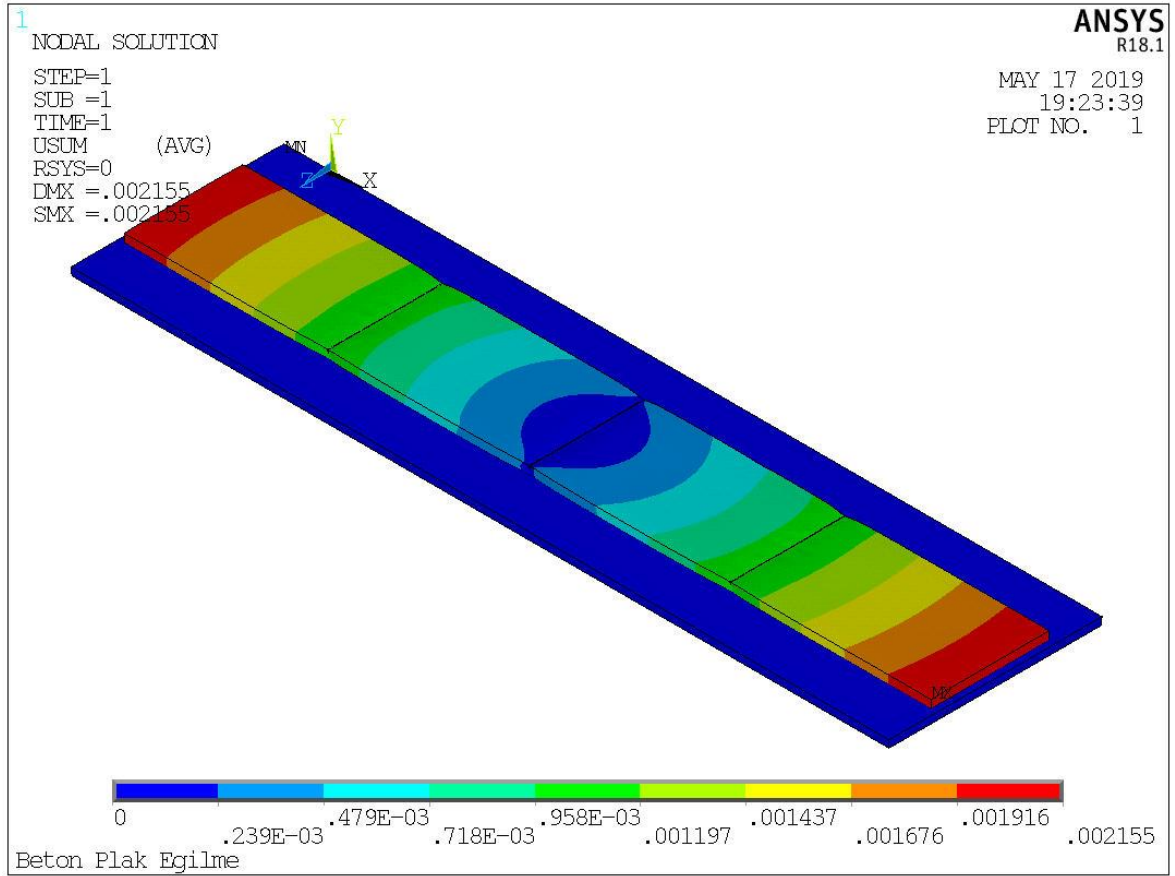


Şekil 64. 5 x 3.5 m boyutlu plak yüzeyinde sıcaklık ve tekil yük etkisinde oluşan çekme gerilmeleri

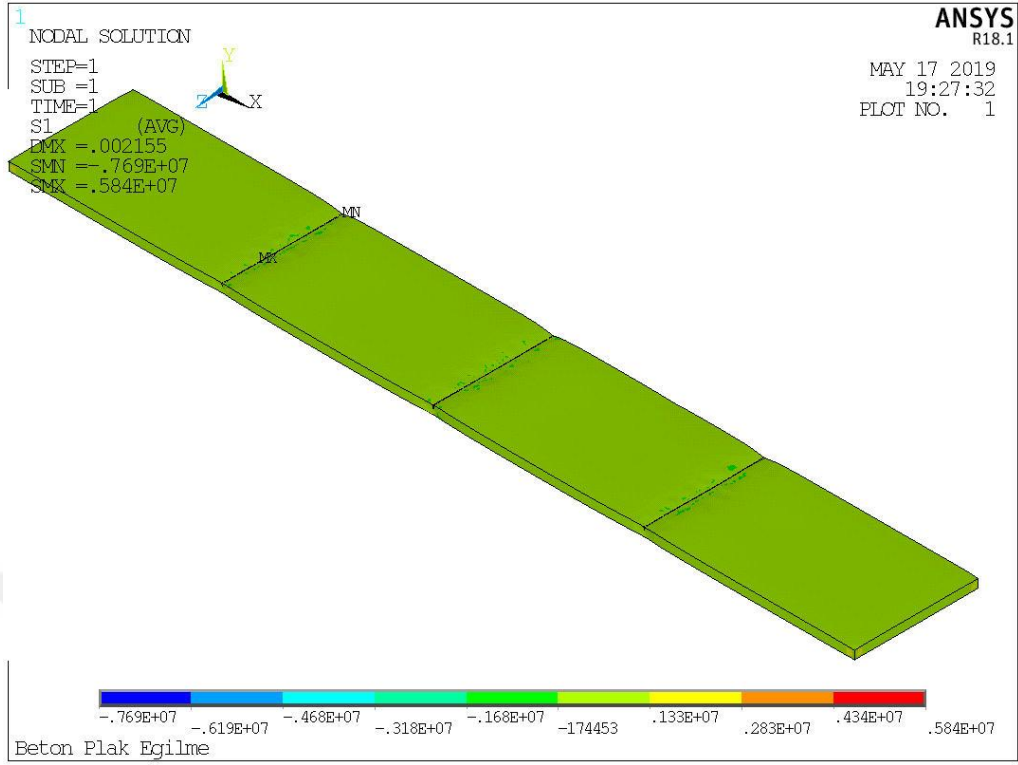


Şekil 65. 5 x 3.5 m boyutlu plak altında sıcaklık ve tekil yük etkisinde oluşan çekme gerilmeleri

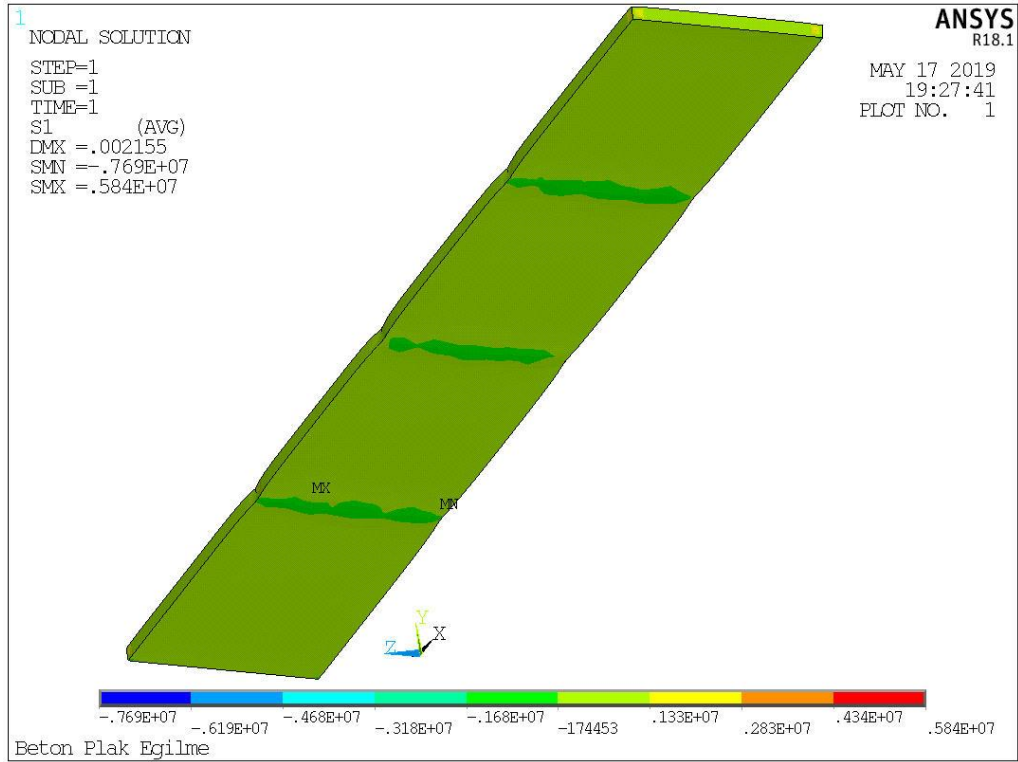
Bu şekillerden sıcaklık etkisi altındaki plağın altında oluşan çekme gerilmelerinin ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Bu gerilmelerin en önemli sebebi beton plak yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkıdır. Bu fark olmasaydı yüksek sıcaklık etkisinde genişleme derzi bulunan bir kaplamada önemli bir çekme gerilmesi oluşmazdı. Sıcaklığın yüksek (50°C) ama sıcaklık farkının az olduğu durumda oluşan yer değiştirme Şekil 66'da ve gerilmeler Şekil 67 ve Şekil 68'de görülmektedir. Görüleceği gibi plak yüzeyi ile altı arasında sıcaklık farkı bulunmadığı durumda plağın yüzeyinde de tabanında da oluşan gerilmeler çok azdır. Ancak bu durum, hiç yarım derz konmamasının iyi sonuç vereceği anlamına gelmez. Yarım derz koyulmazsa beton kaplama bir bütün halinde hareket edecektir ve büzülme durumunda tam derzlerde çok daha büyük boşluklara neden olup yük aktarımını olumsuz yönde etkileyecektir.



Şekil 66. Yüksek sıcaklık (50°C) etkisi altında genişleyen beton kaplama

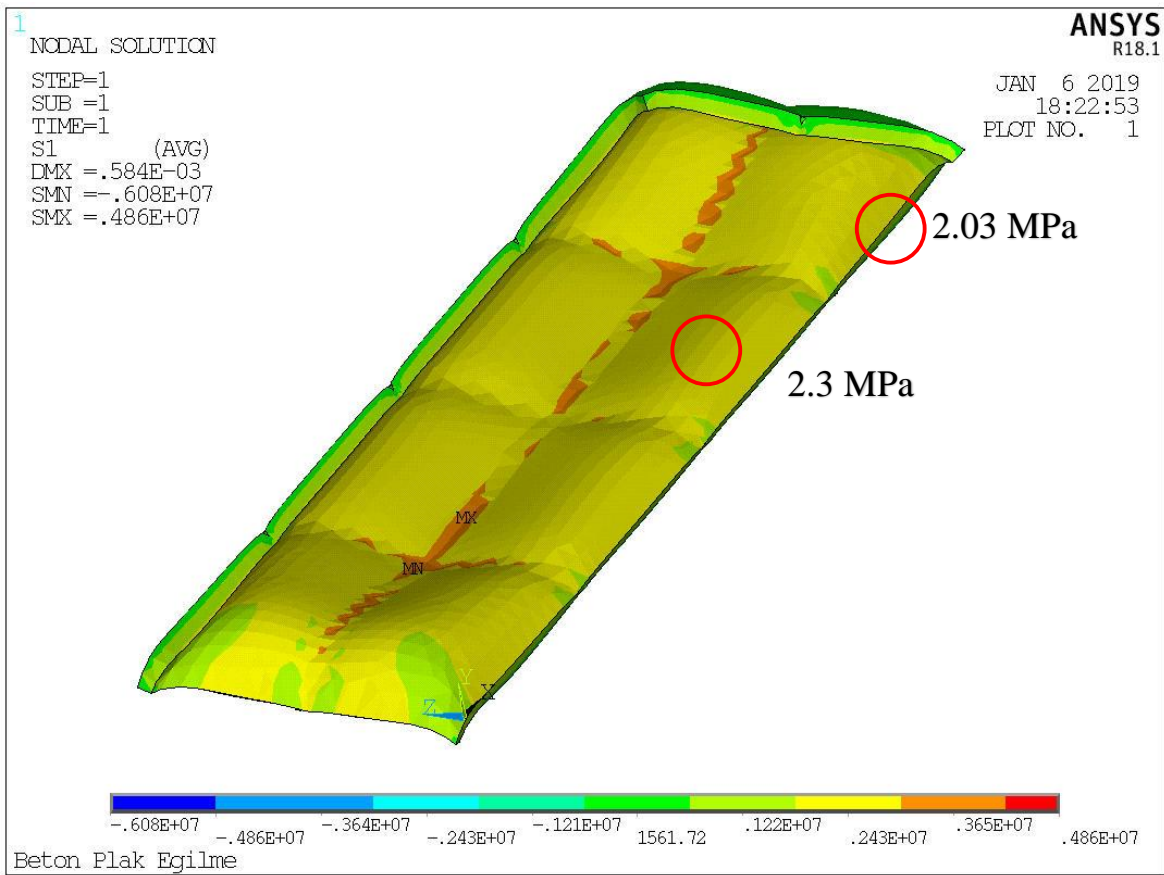


Şekil 67. Genleşen kaplama yüzeyinde oluşan gerilmeler

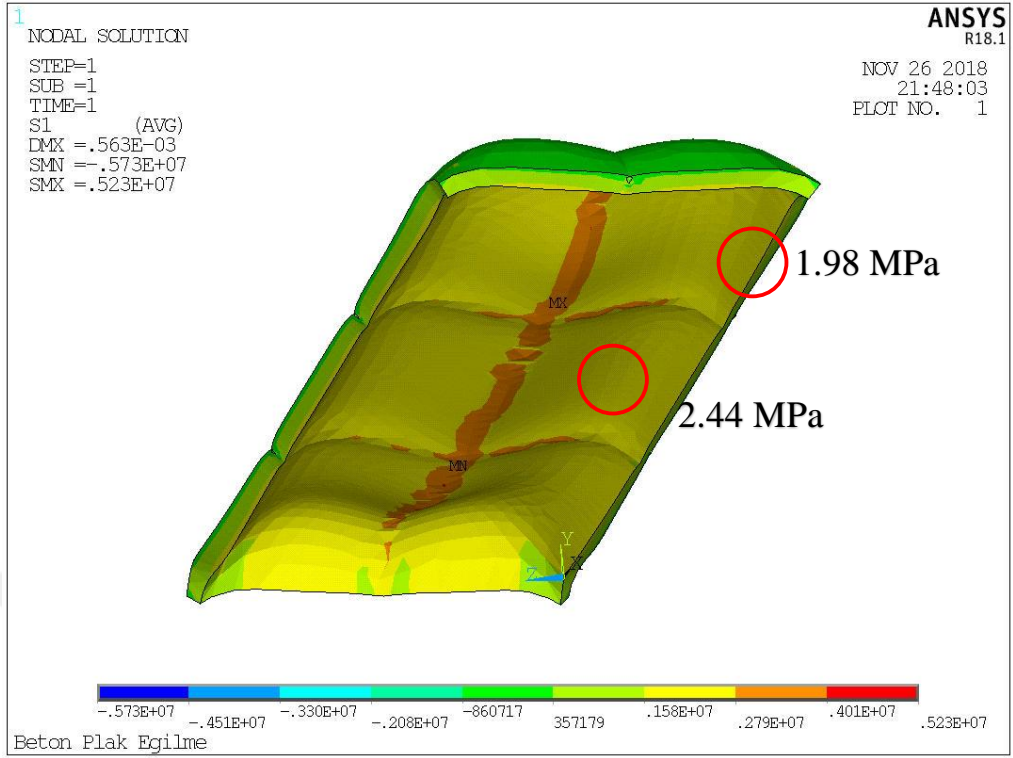


Şekil 68. Genleşen kaplama altında oluşan gerilmeler

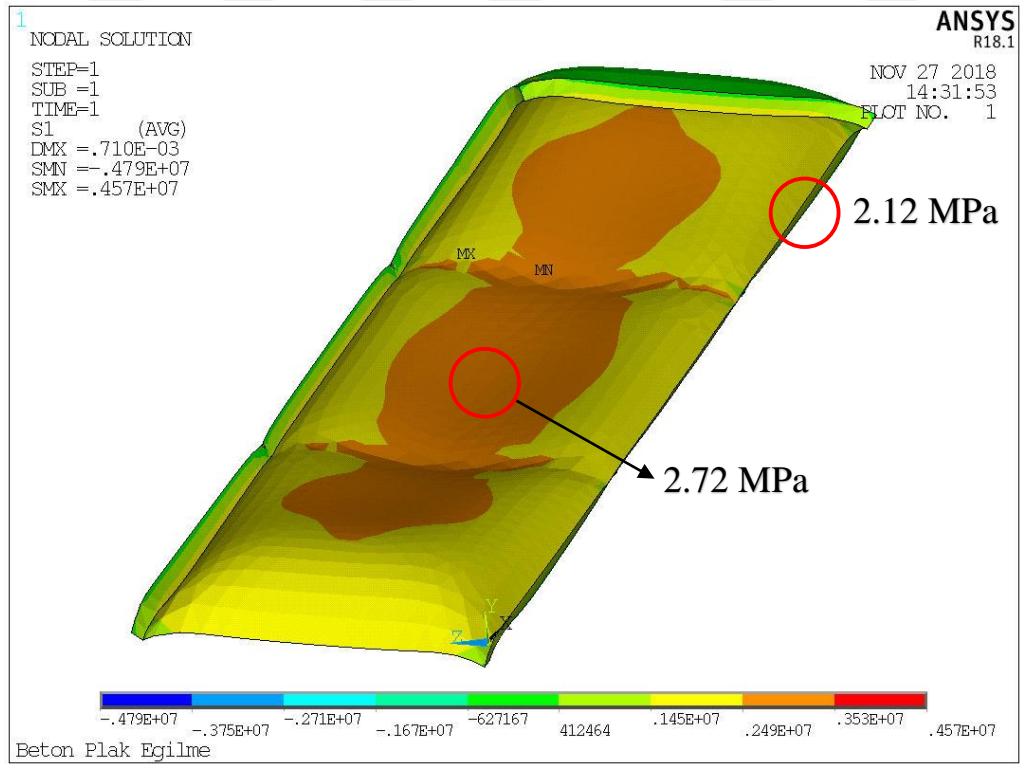
Boyuna derz yarım derz olarak hesaba alınırsa oluşacak gerilme değerleri aşağıda verilmiştir (Şekil 69 ve Şekil 70). Bu durumda kenarlarda oluşacak gerilme değerleri yaklaşık 0.1 MPa düşerken plak merkezinde oluşan gerilme değerleri artmaktadır. Boyuna derz bulunmaması durumunda ise Şekil 71 ve Şekil 72'den görüleceği gibi plak kenarında oluşan gerilmeler 2.1 MPa civarındayken plak merkezinde oluşan gerilmeler 2.44 ve 2.72 MPa değerlerinde oluşmuştur. Bu değerlerden anlaşıldığı gibi plak boyutlarının artması plak kenarında oluşan gerilmeleri çok etkilemezken plak merkezinde oluşan gerilmeleri artırmaktadır.



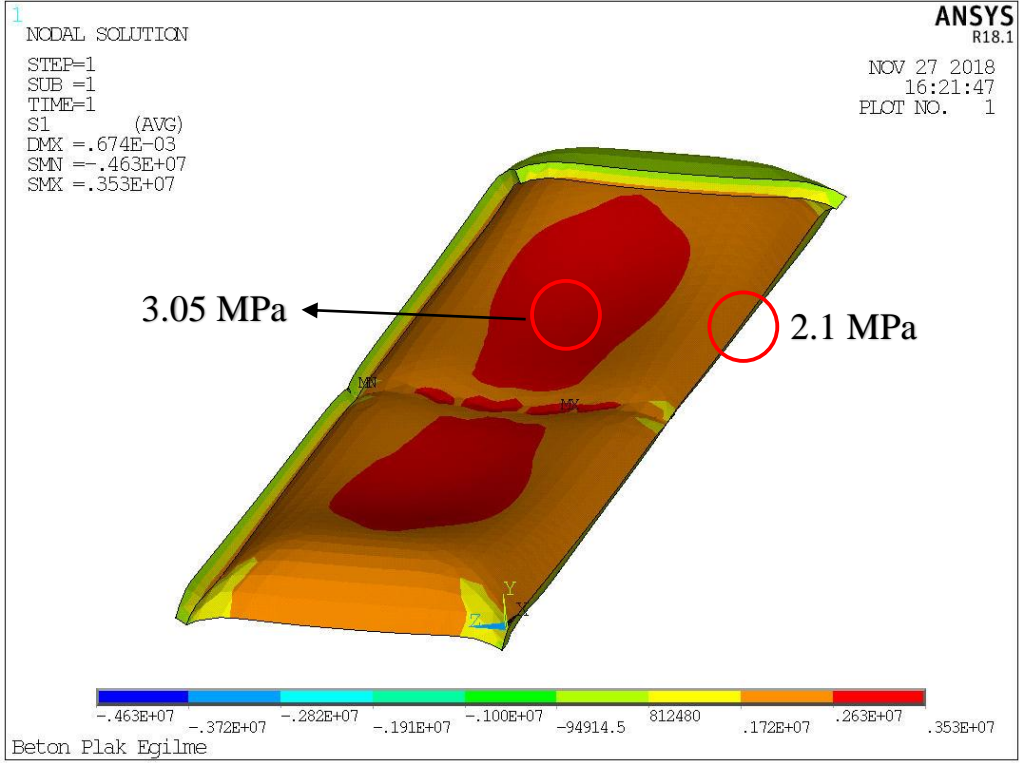
Şekil 69. Derzler arası mesafenin 6 m olduğu durumda beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri



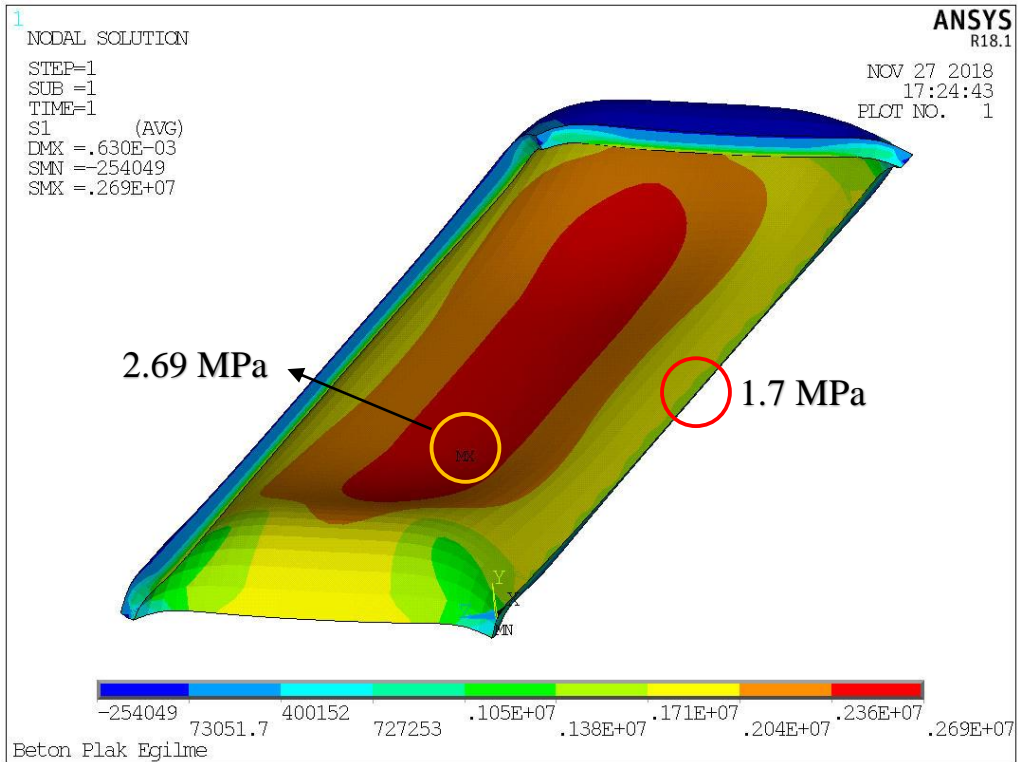
Şekil 70. Derzler arası mesafenin 8 m olduğu durumda beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri



Şekil 71. Derzler arası mesafenin 8 m olması ve boyuna doğrultuda derz bulunmaması durumunda beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri

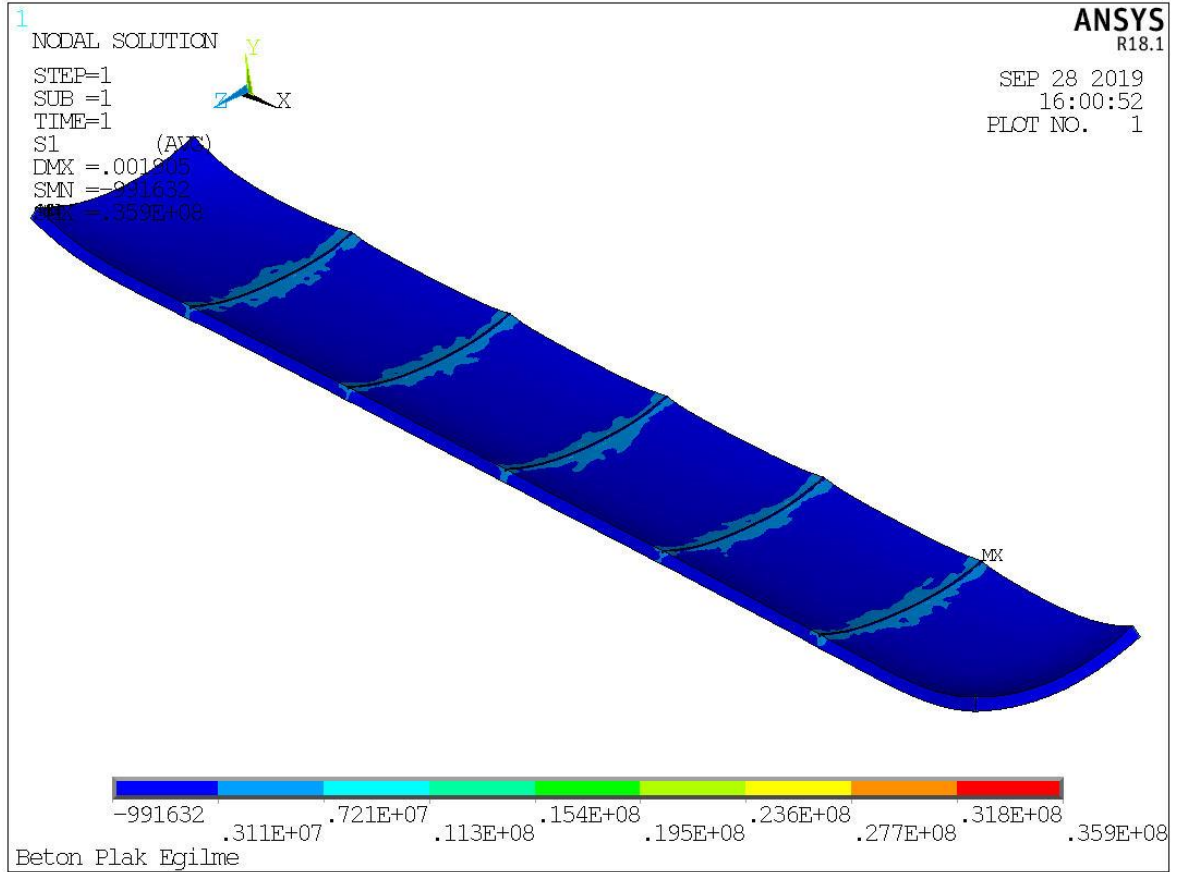


Şekil 72. Derzler arası mesafenin 12 m olduğu durumda beton plak altında oluşan çekme gerilmeleri

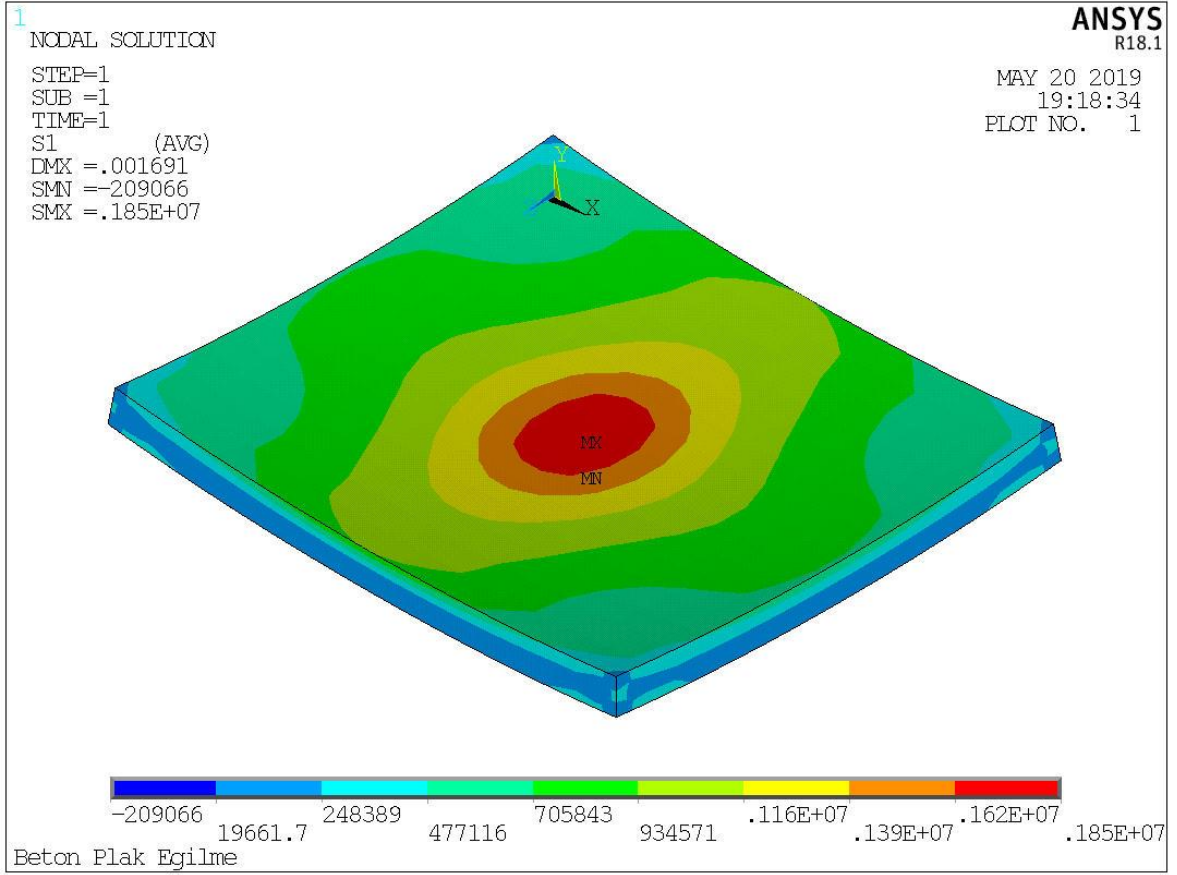


Şekil 73. Derz bulunmaması durumunda 24 m'lik beton kaplama altında oluşan çekme gerilmeleri

Yapılan modellemede yarım derzler olmasına rağmen beton kaplamanın bir bütün olarak hareket ettiği pozitif sıcaklık farkı durumunda derz altlarında daha fazla gerilme oluşturmasıyla görülmüştür. Bu durum negatif sıcaklık farkı durumunda daha da önemli değerlere ulaşmaktadır. Aşağıdaki şekillerde yüzey sıcaklığının taban sıcaklığından daha az olması durumunda oluşacak gerilmeler görülmektedir. Buna göre derzlere yakın noktalarda 7 MPa gibi çok büyük değerlerde çekme gerilmeleri oluştuğu görülmüştür (Şekil 74). Ancak gerçek hayatta beton kaplamada derzlerin altları çatlayacağından bu gerilmeler bu değerlerde oluşmayacaktır. Şekil 75'e göre beton plağın tekil olması durumunda oluşan gerilme plak merkezinin üstünde 1.85 MPa ile diğer durumda oluşan gerilmeden çok daha düşük değerdedir.



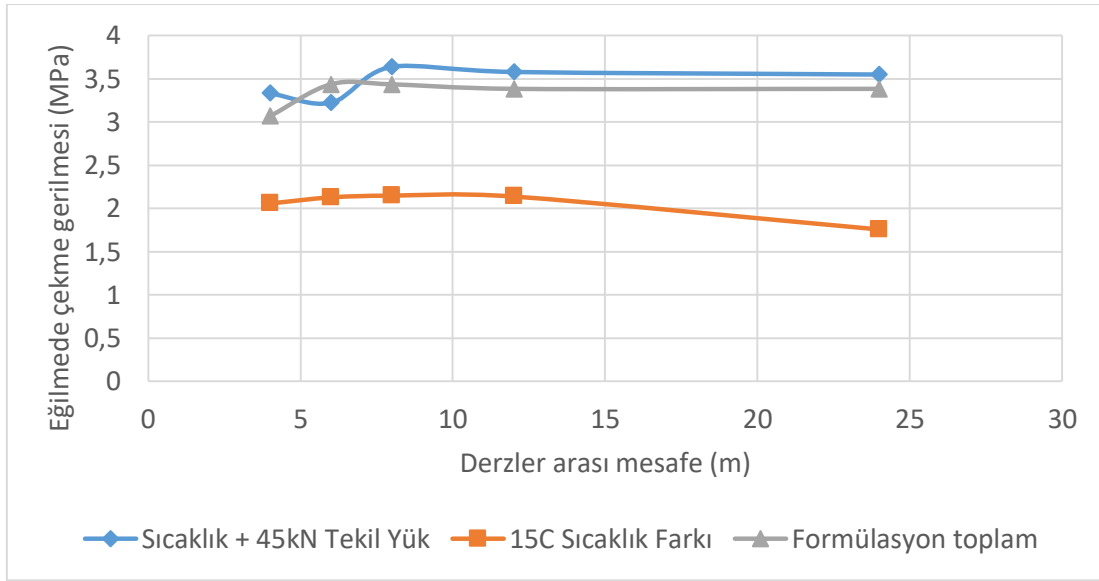
Şekil 74. Negatif sıcaklık farkı durumunda oluşan gerilmeler



Şekil 75. Beton plağın tek başına olduğu durumda oluşacak gerilme

3. TARTIŞMA

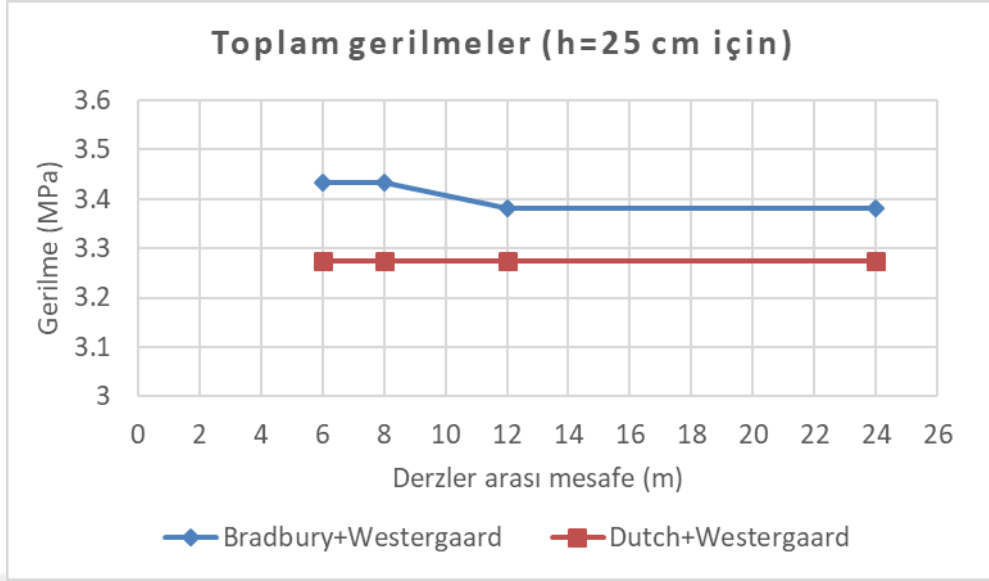
ANSYS analizi sonucu elde edilen sadece sıcaklık farkı sonucu oluşan gerilmeler ile sıcaklık farkı ve tekerlek yükü bulunması durumunda oluşacak gerilmeler Şekil 76'daki grafikte verilmiştir.



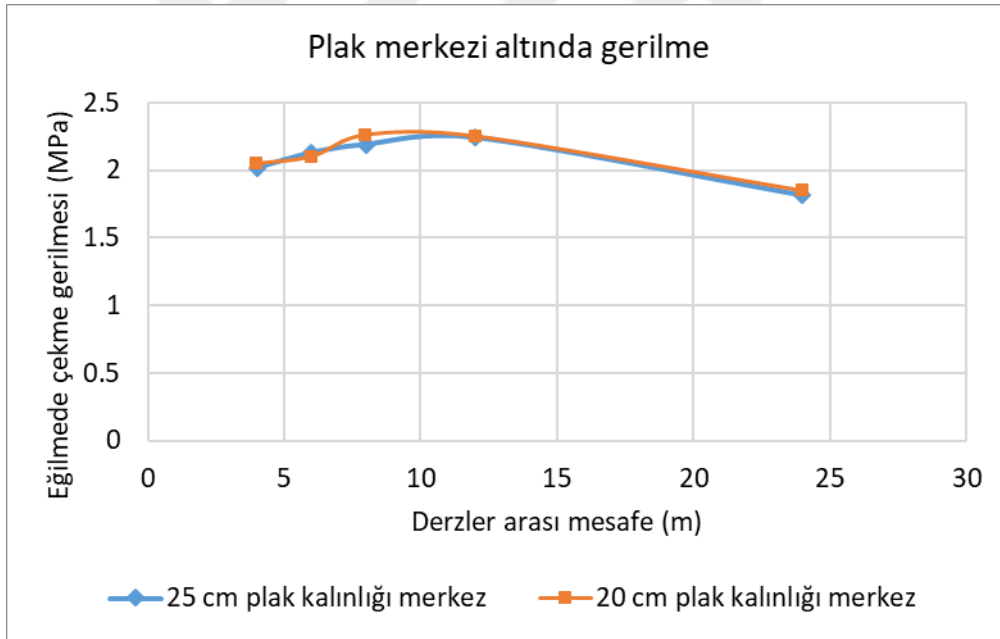
Şekil 76. ANSYS analizi sonucu elde edilen beton plak kenarı altındaki gerilmeler

Şekilden görüleceği üzere sıcaklık ve 45 kN tekil yük etkisi altında oluşan gerilme değerleri 3.5 MPa civarında oluşmuştur. Formüller ile hesaplanan değerlerde ise gündüz beton plak kenarı altındaki kritik gerilme durumu, sıcaklık kaynaklı gerilme ile tekerlek yükünü kaynaklı gerilmelerin toplamı ile elde ediliyordu. Bu durumda 25 cm plak kalınlığı için formüller ile elde edilen toplam gerilme, 2.26 MPa sıcaklık kaynaklı gerilme ve 1.17 MPa tekerlek yükü kaynaklı gerilmenin toplamı olmaktadır. Formüller ile elde edilen toplam gerilme 3.43 MPa olarak bulunur. Şekil 77'de hesaplanan toplam gerilme değerleri bulunmaktadır. Bu değerler ANSYS sonuçları ile uyusmaktadır.

Şekil 78'de ise plak merkezi altında oluşan eğilmede çekme gerilmesi değerlerinden görüleceği üzere derz aralığı arttıkça plak merkezi altında oluşan gerilme değerleri de artmaktadır. Yalnızca 24 m derzsiz plak için gerilme değerinin düştüğü görülmektedir.



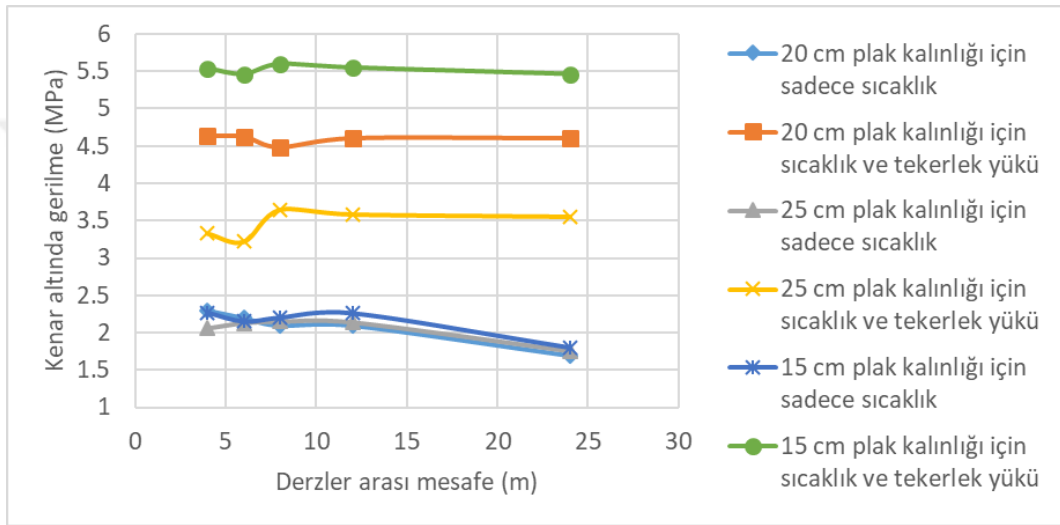
Şekil 77. Formül hesaplaması sonucu elde edilen beton plak kenarı altında oluşan toplam gerilmeler



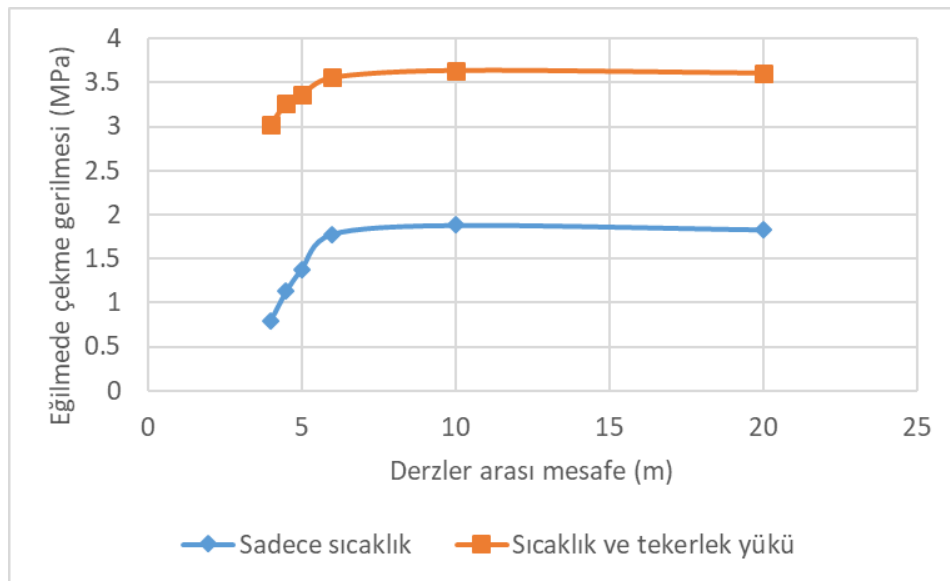
Şekil 78. ANSYS analizi sonucu elde edilen beton plak merkezi altında oluşan çekme gerilmeleri

Şekil 79'da gerilmeler ile beton plak kalınlığı arasındaki ilişki bulunmaktadır. Şekilde plak kalınlığının, sıcaklığa bağlı gerilmelerde etkisinin çok az olduğu görülmektedir. Tekerlek yüküne bağlı gerilmelerin eklendiği durumda ise kalınlığı az olan plaklarda çok daha fazla çekme gerilmeleri oluştuğu görülmektedir. Şekillerden, derz aralığının ve plak

kalınlığının, sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelere etkisinin olmadığı görülmektedir ancak bu tam olarak doğru değildir. Plak kalınlığının etkisi yok gibi görünmekte çünkü yüzey ile taban arasındaki sıcaklık farkı sabit alınmıştır. Derz aralığının etkisi ise Şekil 80’de tek plak üzerinde yapılan hesaplamada görülmektedir. Beton kaplama yarım derzlerin altından itibaren çatlayacağı için bu plakların birbirleriyle bir bağı kalmayacaktır ve Şekil 80’deki gibi bir gerilme durumu oluşturacaktır. Bu durumda ise 4 – 4.5 m derz aralığı geçildiği takdirde çekme gerilmelerinin arttığı görülmektedir.

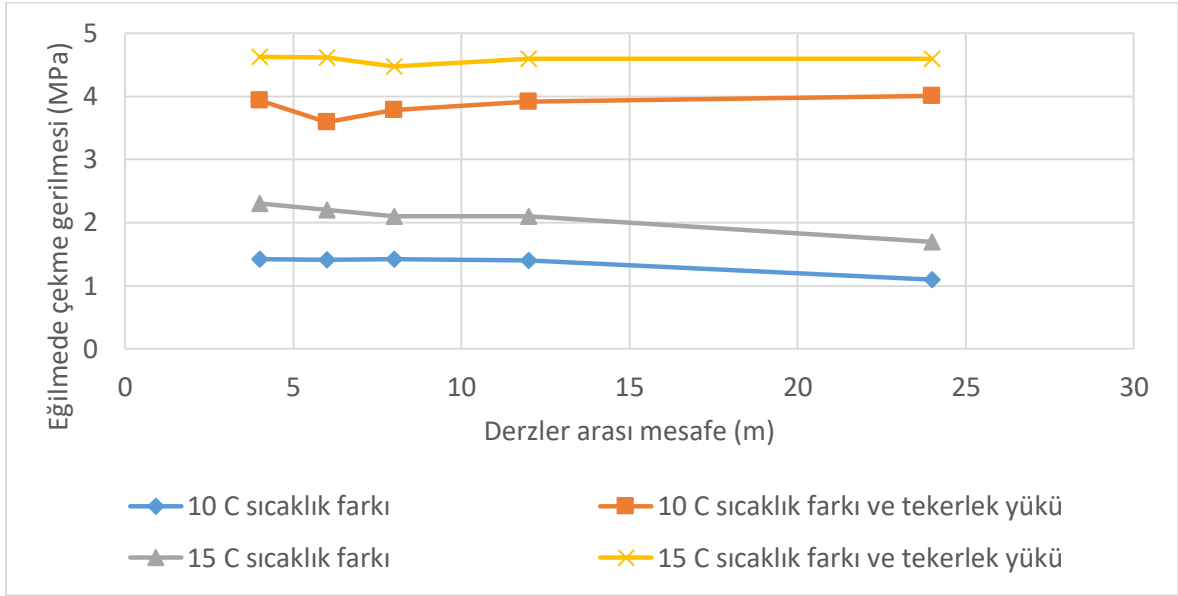


Şekil 79. Farklı plak kalınlıkları için kenar altındaki gerilme değerleri



Şekil 80. Tek plak olması durumunda kenar altında oluşan gerilmeler

Sıcaklık farkının 10°C veya 15°C olması durumunda 20 cm plak kalınlığı için Ansys programı ile hesaplanan gerilme değerleri Şekil 81’de bulunmaktadır. Beklendiği gibi sıcaklık farkı arttıkça gerilmelerde de artış olmuştur.



Şekil 81. 10°C ve 15°C sıcaklık farkı durumunda oluşan gerilmeler

Huang’ın (1977) kitabından alınan Tablo 13’ten görüleceği üzere kayma donatısı bulunmayan yarım derz ve bunun altında oluşan çatlaktaki sürtünme ile yük aktarımı sağlanan beton yol, tam derz kesimi ve kayma donatısı ile yük aktarımı sağlanan duruma göre hem plağın altında daha az gerilme oluşturmuştur hem de derzlerde yük aktarımı daha verimli olmuştur. Bu da göstermektedir ki bu çalışmada ele alınan kayma donatısız beton kaplamalar dezavantajlarının yanında ağır trafik dışında daha iyi yük aktarımı ve daha düşük maliyeti ile avantajlara da sahiptir.

Tablo 13. Boyuna doğrultuda kenar yüklemesi sonuçları (sıcaklık değişimi yok) (Huang, 1977).

Yük transferi	Model (program)	Minimum boyuna derz verimi (%)	Plak altında maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Temel altında maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Maksimum sapma (10^{-3} cm)
Agrega kenetlenmesi unbonded	KENSLABS	74	1.17	0.26	19.6
	ILLI-SLAB	74	1.19	0.264	20.1
	JSLAB	74	1.15	0.255	20.1
Agrega kenetlenmesi bonded	KENSLABS	72	0.46	0.46	15.7
	ILLI-SLAB	72	0.46	0.47	16
	JSLAB	72	0.46	0.47	16
Kayma donatısı unbonded	KENSLABS	43	1.35	0.3	23.9
	ILLI-SLAB	60	1.28	0.285	21.8
	JSLAB	44	1.33	0.295	24.4
Kayma donatısı bonded	KENSLABS	41	0.53	0.54	19.8
	ILLI-SLAB	57	0.49	0.51	17.3
	JSLAB	42	0.53	0.54	19.6

Tablo 14. Yalnız sıcaklık etkisinde beton plak merkezinin altında oluşan çekme gerilmeleri

h (cm)	Metod (program)	Gerilme (MPa) ($k; n/mm^3$ biriminden)		
		k=0.014	k=0.056	k=0.136
20.32	KENSLABS	1.51	1.86	1.96
	ILLI-SLAB	1.54	1.95	2.08
	JSLAB	1.24	1.55	1.61
	Bradbury formülü	1.75	2.50	2.69
25.4	KENSLABS	1.33	1.78	1.99
	ILLI-SLAB	1.37	1.91	2.17
	JSLAB	1.11	1.53	1.72
	Bradbury formülü	1.55	2.75	3.23
35.56	KENSLABS	0.96	1.4	1.54
	ILLI-SLAB	0.99	1.49	1.65
	JSLAB	0.8	1.27	1.41
	Bradbury formülü	1.55	2.75	3.23

Tablo 14, Huang'ın (1993) çalışmasından alınmıştır. Bu gerilmeler hesaplanırken kullanılan değerler; 6.1m plak uzunluğu, 3.7m plak genişliği, 34500 MPa elastisite modülü, 0.2 Poisson oranı, $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ısıl genişleme katsayısı ve $0.66^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ sıcaklık gradyanıdır.

Tablo 15'te sıcaklık etkisi altındaki beton plağın merkezinin altında oluşan eğilmede çekme gerilmesi değerlerinin farklı analiz programları ile hesaplandığı görülmektedir. Bu analizler yapılırken; 6.1m plak uzunluğu, 3.7m plak genişliği, 34500 MPa elastisite modülü, 0.2 poisson oranı, $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ısıl genişleme katsayısı, $0.66^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ pozitif, $-0.33^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ negatif sıcaklık gradyanı, $0.0786\text{N}/\text{mm}^3$ zemin reaksiyon modülü değerleri kullanılmıştır (Masad, 1996). Bu çalışmada elde edilen değerler ile Tablo 14 ve Tablo 15'te görülen diğer analiz programları ile hesaplanan değerlerin tutarlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan değerler yukarıdaki tabloda kullanılan değerler ile %100 uyuşmasa da birbirine yakındır. Bu nedenle kıyaslanacak olursa bu çalışmada bulunan gerilme değeri 2.3 MPa ile ABAQUS, KENSLABS ve JSLAB programlarıyla bulunan değerlerden %15 ila %35 daha fazla, buna karşın Khan vd.'nin (2014) yaptığı ANSYS çalışmasında hesaplanan değer ile çok yakındır. Ayrıca plak merkezinin altındaki gerilmeyi hesaplamada Bradbury formülünün analiz programlarından yaklaşık %50 daha fazla çıktığı görülmüştür. Eisenmann formülü ile hesaplanan değer ise programlardaki değerlere daha yakındır. Ancak analiz programlarının da %100 gerçek sonucu vermediği de bilinmektedir. 35.56 cm kalınlığındaki beton plak için bulunan değerlere bakıldığında Khan'ın yaptığı ANSYS çalışması sonucu diğerlerinden neredeyse %100 fazla çıkmıştır. Sonlu elemanlar programları arasında da böyle önemli farklılıklar çıkabilmektedir. Ayrıca bu çalışmada beton plak kalınlığının artması gerilmelerin önemli ölçüde artmasına sebep olmamıştı. Ancak tabloda kalınlığın artması gerilmelerin de artmasına sebep olmuştur. Bunun sebebi tablodaki değerler bulunurken sabit bir sıcaklık farkı kullanılmaması, sıcaklık farkının beton plak kalınlığına bağlı olarak artmasıdır.

Tablo 15. Sıcaklık değişimi nedeniyle eğilen plak merkezinin altında oluşan gerilmeler

h (cm)	Analitik model		Maksimum çekme gerilme (MPa) (0.66°C/cm)
20	Bu çalışma	ANSYS	2.05 (0.75°C/cm için)
		Eisenmann (formül)	3.15 (0.75°C/cm için)
20.32	ANSYS (Khan vd., 2014)		1.76
	ABAQUS (Masad vd., 1996)		1.45
	KENSLABS (Huang, 1993)		1.96
	ILLI-SLAB (Tabatabaie, 1977)		2.08
	JSLAB (Tayabji vd., 1986)		1.61
	Bradbury (formül)		2.69
25	Bu çalışma	ANSYS	2.02 (0.6°C/cm için)
		Eisenmann (formül)	2.24 (0.6°C/cm için)
25.4	ANSYS (Khan vd., 2014)		2.21
	ABAQUS (Masad vd., 1996)		1.72
	KENSLABS (Huang, 1993)		1.99
	ILLI-SLAB (Tabatabaie, 1977)		2.17
	JSLAB (Tayabji vd., 1986)		1.72
	Bradbury (formül)		3.23
35.56	ANSYS (Khan vd., 2014)		3.08
	ABAQUS (Masad vd., 1996)		1.68
	KENSLABS (Huang, 1993)		1.54
	ILLI-SLAB (Tabatabaie, 1977)		1.66
	JSLAB (Tayabji vd., 1986)		1.41
	Bradbury (formül)		3.74

Tia vd.'nin (1992) çalışmasından alınan Tablo 16'da yine Bradbury formülü ile hesaplanan değerlerin FEACONS IV ile hesaplanan değerlerden fazla olduğu görülmektedir. Bu gerilmeler hesaplanırken kullandıkları değerler; 31000MPa elastisite modülü, 6m x 3.66m x 0.23m beton plak boyutları, $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ısı genleşme katsayısı ve 0.2 Poisson oranıdır. Tablo 16 ve Tablo 17'den oluşacak en yüksek sıcaklık farkının öğleden sonra saat 1 – 2 civarında olduğu görülmektedir. Ayrıca Haziran ayının en yüksek sıcaklık farkının oluştuğu ay olduğunu görmek mümkün.

Tablo 16. Bradbury ve FEACONS IV ile hesaplanan sıcaklık değişimine bağlı plak merkezinin altında oluşan gerilmeler (Tia vd. 1992).

Ay	Saat	Sıcaklık farkı (°C)	Gerilmeler (MPa)	
			Bradbury formülü	FEACONS IV
Ocak	13:00	5.13	1.06	1.01
	14:00	5.25	1.09	1.04
Haziran	11:00	12.75	2.64	2.14
	13:00	17.08	3.54	2.88
Kasım	12:00	9.28	1.92	1.71
	13:18	11.38	2.36	2.03

Tablo 17. Doğrusal olmayan sıcaklık değişimi etkisinde beton plakta oluşan çekme gerilmeleri (Tia vd. 1992).

Ay	Saat	Çekme gerilmesi (MPa)
Ocak	13:00	0.58
	14:00	0.74
Nisan	13:00	1.76
	14:00	1.93
Haziran	13:00	2.17
	15:00	1.93
Temmuz	14:30	1.74
	16:00	1.91
Ağustos	15:16	1.81
Kasım	14:00	1.41

Aşağıda tabloları verilen (Tablo 19, Tablo 20 ve Tablo 21) çalışmada Kumara (2005), FEACONS programı yardımıyla araziden elde ettiği verileri kullanarak gerilme değerlerini hesaplamıştır. Programda kullandığı diğer parametreler; 22.86 cm plak kalınlığı, 27579 MPa elastisite modülü, 0.2 poisson oranı, $8.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ısıl genleşme katsayısı, 3.66 m x 4.88 m beton plak boyutlarıdır. Aşağıdaki tablolarda gösterilen 1C, 1G gibi isimlendirilen plakların farklılıkları, beton karışımlarından gelmektedir ve bu farklılıklar tablolarda basınç, çekme dayanımları ve elastisite modülüne bakılarak görülebilir. Bu tablolardan hem sıcaklık etkisi hem de HVS yüklemesi altındaki beton plakta oluşan gerilme değerleri görülmektedir. Bu

plaklardan 2C plağında çatlaklar 3. gün meydana gelmiştir. Bu çatlakların sebebi ise beton plak yüzeyi ile tabanı arasında yüksek sıcaklık farkından dolayı daha fazla gerilme oluşmasıdır (Kumara, 2005). Görülebildiği üzere diğer plaklarda 53.4 kN yük altında oluşan maksimum gerilme 2.5 MPa civarındayken beton plak yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkının 11°C seviyesine yükseldiği 2C plağında bu gerilme değeri 3 MPa'ı aşmıştır ve çatlaklara neden olmuştur. Bu da sıcaklık etkisi altında oluşan gerilmelerin ne denli önemli olduğunu göstermektedir.

Tüm bu araştırmalar göstermektedirki ısıl genleşme ile betonda oluşan eğilmede çekme gerilmeleri en az tekerlek yükü nedeniyle oluşan gerilmeler kadar önemlidir. Beton kaplamanın bu gerilmelerin etkisi altında çatlamaması için betonun eğilmede çekme dayanımının, oluşan gerilmelerden büyük olması gerekir. Betonun eğilmede çekme dayanımı ise basınç dayanımının yaklaşık beşte biri kadardır (Yazıcı, 2012). Ayrıca TS 500'de bulunan ifadeye göre eksenel çekme dayanımı, eğilme deneyinden elde edilen çekme dayanımını 2 ile bölerek yaklaşık olarak hesaplanabilir (TSE, 2000). Bu açıklama da bir önceki cümleyi doğrular niteliktedir.

Tablo 18. Beton dayanımları arasındaki ilişki (Yazıcı, 2012).

Beton dayanımı (MPa)			Dayanımların oranı (%)		
Basınç	Eğilme	Çekme	Eğilme/Basınç	Çekme/Basınç	Çekme/Eğilme
6.9	1.6	0.8	23.0	11.0	48
13.8	2.6	1.4	18.8	10.0	53
20.7	3.3	1.9	16.2	9.2	57
27.6	4.0	2.3	14.5	8.5	59
34.5	4.7	2.8	13.5	8.0	59
41.3	5.3	3.2	12.8	7.7	60
48.2	5.9	3.6	12.2	7.4	61
55.1	6.4	4.0	11.6	7.2	62
62.0	7.0	4.3	11.2	7.0	63

Yapılan çalışmalarda dikkate alınan beton sınıfı C20 idi. Bu durumda Tablo 18'ten hareketle eğilmede çekme dayanımı değerini 3.3 MPa olarak kabul edebiliriz.

Tablo 19. 1C beton plağı için gerilme analizi (Kumara, 2005).

Süre (saat)	Sıcaklık farkı (°C)	Birikmiş HVS geçişleri	Uygulanan yük (kN)	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Hesaplanan gerilme (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)		Hesaplanan gerilme/dayanım
							Hesaplanan	Ölçülen	
4	1.8	0	53.4	6.76	11797	1.56	1.62	1.78	0.88
6	2.7	0	53.4	11.72	15540	1.74	2.13	2.34	0.74
8	1	0	53.4	15.58	17919	1.69	2.46	2.70	0.63
24	4.1	5311	53.4	32.76	25972	2.21	3.56	3.92	0.56
72	3.9	29090	53.4	36.41	27386	2.23	3.76	4.13	0.54
168	3.6	74680	53.4	41.10	29096	2.24	3.99	4.39	0.51
216	3.6	86001	53.4	41.56	29254	2.25	4.01	4.41	0.51
216	3.6	86001	66.7	41.56	29254	2.69	4.01	4.41	0.61
312	*3.6	145000	66.7	42.47	29578	2.70	4.06	4.46	0.60
312	*3.6	145000	80	42.47	29578	3.14	4.06	4.46	0.70
360	*3.6	156300	80	42.92	29737	3.15	4.08	4.49	0.70
672				45.88	30744		4.22	4.64	

* Veri mevcut değil. Veri toplamanın son gününün sıcaklık farkı yazılmıştır.

Tablo 20. 1G beton plağı için gerilme analizi (Kumara, 2005).

Süre (saat)	Sıcaklık farkı (°C)	Birikmiş HVS geçişleri	Uygulanan yük (kN)	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Hesaplanan gerilme (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)		Hesaplanan gerilme/dayanım
							Hesaplanan	Ölçülen	
4	-3.4	0	53.4	4.89	8.74	1.42	1.38	1.52	0.94
6	3.5	0	53.4	7.58	10.87	1.77	1.72	1.89	0.94
8	4.3	1015	53.4	10.48	12.78	1.90	2.01	2.22	0.85
24	8.3	9134	53.4	23.03	18.95	2.50	2.98	3.29	0.76
72	7.7	44987	53.4	33.12	22.75	2.63	3.58	3.94	0.67
168	7.6	95187	53.4	38.20	24.41	2.73	3.85	4.23	0.64
216	6.9	115996	53.4	38.84	24.68	2.65	3.88	4.27	0.62
216	6.9	115996	66.7	38.84	24.68	3.12	3.88	4.27	0.73
264	5.3	139128	66.7	39.49	24.95	2.95	3.92	4.30	0.69
672				44.95	27.23		4.18	4.59	

Tablo 21. 2C beton plağı için gerilme analizi (Kumara, 2005).

Süre (saat)	Sıcaklık farkı (°C)	Birikmiş HVS geçişleri	Uygulanan yük (kN)	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Hesaplanan gerilme (MPa)	Eğilmede çekme dayanımı (MPa)		Hesaplanan gerilme/dayanım
							Hesaplanan	Ölçülen	
4	0.8	0	53.4	3.31	7.10	1.50	1.13	1.13	1.32
6	-1.9	0	53.4	5.93	9.57	1.49	1.52	1.52	0.98
8	-4	990	53.4	8.07	11.22	1.43	1.77	1.77	0.81
24	5.3	8914	53.4	19.10	18.13	2.20	2.72	2.99	0.73
72	11.2	33176	53.4	26.77	22.22	3	3.22	3.54	0.85
168	11.2	82243	53.4	34.61	26.38	3.25	3.66	4.03	0.81
672				44.88	30.10		4.17	4.59	

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Literatür çalışmasından öğrenildiği ve yapılan çalışmalardan elde edildiği gibi sıcaklık etkisi altında oluşan gerilmeler en az trafik yükü kadar beton kaplamayı etkilemektedir. Özellikle gün içinde değişken olan hava sıcaklığının, beton plağın yüzeyi ile tabanı arasında sıcaklık farkı oluşturması, bu sıcaklık farkı etkisinde eğilen beton plakta önemli gerilmelere sebep olmaktadır. Gündüz beton plağın yüzeyinin fazla genişmesi ile plak kenarının ve merkezinin altında oluşan eğilmede çekme gerilmeleri trafik yükü ile birleştiği zaman bu noktalarda kritik gerilme durumu oluşturmaktadır.

1. Ansys çalışmasından elde edilen verilere göre beton plak boyutlarının artması gerilmelerin plak kenarından plak merkezine doğru artmasına ve maksimum gerilmenin plak merkezinde oluşmasına sebep olmuştur. Isıl gerilmeler sebebiyle oluşacak çatlakların önlenmesi için beton plak boyutları sınırlandırılmalıdır.
2. Beton kaplamada derzlerin altında çatlamlar oluşacağından beton kaplama bir bütün olarak davranış göstermeyecektir. Bu sebeple beton plaklar tek parça olarak incelendiğinde 4 m x 3.5 m boyutlu beton plakta oluşan sıcaklık gerilmesinin çok daha düşük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla hem literatürde belirtildiği gibi hem de Ansys sonuçlarından görülebildiği gibi enine derzlerin 4 m'den daha seyrek olmaması gerektiği söylenebilir.
3. Bu gerilmelerin oluşmasının en önemli sebebi olan plak yüzeyi ile tabanı arasındaki sıcaklık farkının ortadan kaldırılması da bir çözüm olabilir. Bu durumda oluşacak sıcaklık gerilmelerinin büyük bir kısmının önüne geçilebilir.
4. Beton plak kalınlığının ise sıcaklığa bağlı gerilmeler üzerinde dolaylı olarak etkili olduğu görülmüştür. Beton plak kalınlığı arttıkça, yüzey ile taban arasındaki sıcaklık farkı da artacaktır. Bu da gerilmelerin artmasına sebep olacaktır.
5. Kalınlığı az olan plaklarda tekerlek yükünden dolayı oluşacak gerilmeler daha kritik bir durumdadır. Plak kalınlığı arttıkça tekerlek yükü gerilmeleri azalarak sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerin altında değerlerde oluşacaktır. Bu durumda daha kalın beton kaplamalarda sıcaklıktan kaynaklanan gerilmelerin daha önemli olduğu söylenebilir.

6. Plak uzunluğu ile s¼rt¼nme gerilmesi arasında doğru orantı vardır. Plak uzunluğunun artırılması halinde s¼rt¼nme gerilmesi de aynı oranda artmaktadır. Ancak s¼rt¼nme gerilmesinin diğer gerilmelere g¼re çok daha az olduğu da g¼r¼lmektedir. S¼rt¼nme gerilmeleri yaklaşık olarak, sıcaklığa bağlı oluşan gerilmelerin on ila yirmide biri kadar oluşmaktadır.

¼neriler;

Elde edilen verilere g¼re, daha ince olan beton yollarda tekerlek y¼k¼ne bağlı gerilmeler kritik durumda bulunurken yol kalınlığı arttıķça sıcaklık gradyanına g¼re y¼zey ile taban arasında sıcaklık farkı da artacağından sıcaklığa bağlı gerilmeler daha fazla olacaktır. Bu durumda ideal performansın elde edilebilmesi için beton yol boyutları ve derz aralıkları optimize edilebilir.

5. KAYNAKLAR

- ACPA, Design and Construction of Joints for Concrete Streets.
<http://plumconstructioninc.com/resources/jointdesign.pdf> 20 Kasım 2016
- ACPA, Joint and Crack Sealing and Repair for Concrete Pavements.
https://www.pavementpreservation.org/wp-content/uploads/2010/12/Cracks_Joints_Sealing.pdf 15 Eylül 2016
- ACPA, Joints.
http://metiebar.acpa.org/Concrete_Pavement/Technical/Fundamentals/Joints.asp
15 Eylül 2017
- Armaghani, J., M., Larsen T., J., ve Smith L., L., Temperature Response of Concrete Pavements. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1121/1121-004.pdf> 6 Mart 2017
- Bodocsi, A., Minkarah, I., A., ve Arudi R., S., Analysis of Horizontal Movements of Joints and Cracks in Portland Cement Concrete Pavements. 12 17, 2016
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1392/1392-006.pdf> 17 Aralık 2016
- Choubane, B. ve Tia, M., Nonlinear Temperature Gradient Effect on Maximum Warping Stresses in Rigid Pavements.
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1370/1370-002.pdf> 2 Ekim 2017
- Choubane, B., Tia, M., ve ASCE, Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement.
<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-947X%281995%29121%3A1%2875%29> 16 Mayıs 2017
- FHWA, Design and Evaluation of Jointed Plain Concrete Pavement With Fiber Reinforced Polymer Dowels Chapter 6. Analytical Evaluation.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/06106/c-hap6.cfm> 1 Mart 2019
- THBB Beton Yollar Teknik Çalışma Grubu, Beton Yollar.
<http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/215.pdf> 15 Mayıs 2019
- Houben, L., J., M., Structural Design of Pavements Part IV Design of Concrete Pavements. <https://studylib.net/doc/18112062/structural-design-of-pavements-part-iv-design-of-concrete> 18 Aralık 2016
- Huang, Y., H., Pavement Analysis and Design.
<https://www.scribd.com/doc/83152393/Pavement-Analysis-and-Design-by-Yang-H-Huang> 14 Nisan 2019

- İMO, Endüstriyel Betonların Oturduğu Zemin Özellikleri.
<http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11203.pdf> 27 Aralık 2018
- Jung, Y., S., ve Zollinger, D., G., Design And Construction Transition Guidelines For Concrete Pavement. <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-5320-P3.pdf> 15 Ekim 2016
- Karunaratne, A., Mampearachchi, W. ve Nanayakkara, A., Modelling of Thermal Effects due to Solar Radiation on Concrete Pavements.
<https://iirrr.ucalgary.ca/files/iirrr/109.pdf> 21 Eylül 2016
- Krishna Rao, K., V., Stresses in Rigid Pavements.
https://www.civil.iitb.ac.in/~kvkrao/uploads/5/9/3/7/59372049/ce742lec_8_11.pdf 20 Ocak 2017
- Kumara, M., A., W., Analysis and Verification of Stresses and Strains and Their Relationship to Failure in Concrete Pavements Under Heavy Vehicle Simulator Loading. <http://ufdc.ufl.edu/UFE0010099/00001> 13 Mayıs 2017
- Mackiewicz, P., Thermal Stress Analysis Of Jointed Plain Concrete Pavements.
https://ac.els-cdn.com/S1359431114007789/1-s2.0-S1359431114007789-main.pdf?_tid=4cb97180-6209-46c7-9772-dd14d40d7c0d&acdnat=1551688229_6925332dd83c7a98e555eee7633b665e 15 Mayıs 2018
- Maitra, S., R., Reddy, K., S. ve Ramachandra L., S., Estimation of Critical Stress in Jointed Concrete Pavement. https://ac.els-cdn.com/S1877042813045047/1-s2.0-S1877042813045047-main.pdf?_tid=b48560d2-bf13-4e04-99ac-e38d499da2d6&acdnat=1551184634_4388c625b6825b8d861dc5c1237e9218 10 Ekim 2017
- Masad, E., Taha, R. ve Muhunthan B., Finite-Element Analysis of Temperature Effects on Plain-Jointed Concrete Pavements.
<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-947X%281996%29122%3A5%28388%29> 15 Mayıs 2018
- Mathew, T., V. ve Krishna Rao, K., V., Rigid Pavement Design.
<https://nptel.ac.in/courses/105101087/downloads/Lec-29.pdf> 20 Ocak 2017
- PavementInteractive, Dowel Bars. <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-types-and-history/pavement-types/dowel-bar/> 26 Aralık 2018
- PavementInteractive, Joints. <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/construction/placement/joints/> 01 Mart 2018
- Söderqvist, J. ve Silfwerbrand, J., Design of Concrete Pavements: A Comparison between Swedish and U.S. Methods. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:11234/FULLTEXT01.pdf> 15 Ekim 2016

- STRUCT, Static Friction Coefficients. https://structx.com/Material_Properties_007.html
15 Mayıs 2018
- TÇMB, Beton Yollar Genel Bilgi.
<http://www.betonyol.org.tr/icerik.php#iid=12&aid=64&lang=tr> 10 Mayıs 2019
- T.S.E., Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TS 500.
<https://web.itu.edu.tr/mdaskiran/wp-content/uploads/2014/09/TS500.pdf> 08 Mart 2018
- Yazıcı, H., Sertleşmiş Betonun Diğer Özellikleri.
http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/YM2/YM-II%202312_SERTLESMIS_BETONUN_DIGER_OZELLIKLERI.pdf 08 Mart 2018
- Yeğınobalı, A., Niçin Beton Yol. <https://docplayer.biz.tr/92953-Turkiye-cimento-mustahsilleri-birligi-nicin-beton-yol-tcmb-ar-ge-y-09-01-prof-asim-yeginobali-temmuz-2009-ankara.html> 28 Şubat 2018
- Yeğınobalı, A., Türkiye'nin İlk Beton Karayolları.
<http://www.betonyol.org.tr/userfiles/file/betonyol/Turkiyenin-ilk-beton-yollari.pdf>
15 Mayıs 2019
- Yu, T., Khazanovich, L., Darter, M. ve Ardani, A., Analysis of Concrete Pavement Responses to Temperature and Wheel Loads Measured from Instrumented Slabs.
https://www.researchgate.net/publication/245558498_Analysis_of_Concrete_Pavement_Responses_to_Temperature_and_Wheel_Loads_Measured_from_Instrumented_Slabs?enrichId=rgreq-d95622380fa337010ea46bf2ad264539-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI0NTU1ODQ5ODtBUzoyMjM2 12 Mart 2017

ÖZGEÇMİŞ

Musa Tan KAYIPMAZ, 1992 yılında Sivas'ta doğdu. İlköğretimini Kadı Burhanettin İlköğretim Okulunda, ortaöğretimini Sivas Kongre Lisesinde tamamladıktan sonra 2011 yılında Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2015 yılında inşaat mühendisi olarak mezun oldu. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yabancı dil olarak orta-üst seviyede İngilizce bilmektedir.

