



XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ

24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

BETON YOLLARDA GÜNLÜK MEYDANA GELEN SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN OLUŞTURDUĞU GERİLMELERİN 3-D SONLU ELEMANLAR YARDIMIYLA MEKANİSTİK AMPİRİK ANALİZİ

Mehmet T. SEFEROĞLU¹, Ayşegül G. SEFEROĞLU² Muhammet V. AKPINAR³

^{1,3}Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh., TRABZON

²Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Müh., TRABZON

ABSTRACT

One of the most common reason for deterioration in concrete-covered roads are thermal strains which occurs due to daily temperature changes. Additional strains occurs due to thermal differences between bottom and top layers of concrete covers.

Even if thermal related cracks do not cause fundemantal structural problems in its initial development stage, these cracks could increase due to freeze and thaw of the rigid pavement. Consequently, the drained water in the base layers cause deteriorations in base ground and other layers.

The most common used concrete pavement class in Turkey and around the world C30 class concrete was poured in accelarated road test laboratory facility in 1/1 scale ratio conditions and thermal measures were daily taken from the edge and middle of the 5 mt by 4.5 mt and 0.15 mt thick concrete plate section.

Thermal variations through the 0.15 mt thickness were measured every 5 cm depth by the thermocouples. Thermal data were entered in ANSYS finite element models and afterwards thermal expansion based strains were computed. The results show that the thermal difference between top and bottom layers were as high as 15 °C causing 15 times more stress, according to Bradbury and Wastergaard equations, compared to when there is no thermal differences.

The study also showed that the joint spaces between the plates is overestimated and applied on the field considering the small lateral displacements as low as 0.5 mm found in this study. Moreover, the current joint spacing applications on the field allows clay materials to penetrate and later cause surface cracks.

ÖZET

Ülkemizde beton kaplamalı yollarda sık görülen bozulma nedenlerinden birisi de günlük sıcaklık farklılığından dolayı oluşan ısıl gerilmelerdir. Beton yol kaplamaların alt ve üst yüzeyinde meydana gelen sıcaklık farklarından dolayı ek gerilmeler oluşmaktadır.

Termal nedenlerden dolayı oluşan çatlaklar ilk geliştiği evrelerde önemli yapısal problemlere neden olmasalar bile, zamanla donma ve çözünmeye bağlı olarak hacimce

büyüyebilmektedir. Bunun neticesinde yol tabanına sızan sular, taban zemini ve diğer taşıyıcı tabakalarda bozulmalara neden olmaktadır.

Yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında termal gerilmelerden ötürü beton yollarda önemli gerilmelerin oluştuğuna rastlanılmıştır. Bu gerilmeler arazi çalışmaları ya da sonlu elemanlar modellemeleri ile literatürde yer bulmuştur. Beton kaplamalarda derinlik boyunca oluşan sıcaklık dağılımının non-lineer olması durumu lineerliğe oranla daha fazla gerilme oluşturduğu görülmektedir.

Türkiye’de ve yurtdışında en yaygın olarak kullanılan C30 betonu gerçek koşullarda Hızlandırılmış Yol Test Laboratuvarında yol temel tabakası üzerine dökülerek, ısı ölçümleri kenar ve orta bölgelerinde plaka kesiti boyunca günlük olarak alınmıştır. Laboratuvarda alınan ısı verileri ANSYS sonlu elemanlar modelimizde girilmiş ve daha sonra beton kaplamanın yüzeyinde, köşe ve kenar bölgelerinde çatlakları meydana getiren ısıl genleşmeye bağlı gerilmeler tespit edilmiştir. Sonuçlar, beton yollarda kaplamanın üst ve alt yüzeyi arasında ki sıcaklık farkının 15 °C lere çıktığını göstermektedir. Bu durumda Bradbury ve Wastergaard ısıl gerilme denklemlerine göre oluşan gerilmeler sıcaklık farkının olmadığı duruma göre 15 kat artmaktadır. Yatay doğrultuda bulunan deplasman değerleri, uygulamadaki beton yol plaklar arasındaki derz boşluklarının gereğinden fazla bırakıldığını göstermiş ve 0,5 mm bırakılacak bir derzin yeterli olacağını göstermiştir. Ayrıca mevcut uygulanan derz boşlukları, killi malzemelerin birikmesine izin vererek daha sonra kaplama yüzeyinde çatlaklara neden oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Isıl gerilmeler, ANSYS, Günlük sıcaklık, Isıl çatlaklar*

GİRİŞ

Beton kaplamalı yollar özellikle ağır taşıt trafiğine maruz kalan yollarda, asfalt kaplamalara bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu kaplama tipi yüksek mukavemeti, uzun ömürlü olması, daha az bakım onarım gereksinimi gibi avantajları nedeniyle yol altı zemin tabakasının zayıf olması halinde dahi kullanıma elverişlidir.

Beton kaplamalar, mevsimsel sıcaklık döngüsünün ve günlük sıcaklık değişimlerinin etkisinde genleşme ve büzülme gibi oluşumlara maruz kalırlar. Bu fiziksel değişiklikler, beton kaplamalarda bir takım problemlere neden olur. Beton kaplamalar, servis ömrü boyunca genleşme ve büzülme problemleri ile sorunsuz kullanılabilmesi amacıyla donatı kullanılarak ve/veya derzler bırakılarak inşa edilebilmektedirler.

Derz açıklığı, beton kaplamanın yapısal ve fonksiyonel performansının yanısıra inşaat ve onarım maliyetlerini de etkileyen kritik bir tasarım faktörüdür. Beton kaplama plakasında sıcaklık farklarından meydana gelebilecek rötre ve kıvrılma gerilmelerinin oluşturacağı çatlakların kontrol edilmesi için derzler ihtiyacı duyulmaktadır. Bu gerilmeler, derz açıklığı büyüdükçe artmaktadır. Yani derz aralığının artması derz kaynaklı kaplama hasarlarının da artması anlamına gelir. Uygun derz aralığının seçimi; plaka kalınlığı ve genişliği, kaplama malzemesinin özellikleri, temel tipi ve rijitliği ve kaplamanın sıcaklık değişimleri gibi çeşitli tasarım özellikleri dikkate alınarak yapılmalıdır. Çok güneş alan plakalar gün içerisinde yüksek sıcaklık değişimlerine maruz kaldıkları için daha kısa derz aralığı seçilmesi gerekmektedir [1].

Sıcak havalarda beton kaplama yüzeyi genişirken soğuk havalarda büzülmeaktadır. Derz açıklıkları betonun sıcaklık etkisiyle genleşmesi için bırakılmış boşluklardır. Bu sayede kaplama alt ve üst yüzeyindeki sıcaklık farkından dolayı oluşan ilave gerilmeler derzler tarafından karşılanmaktadır. Bununla birlikte derzli beton kaplamaların derz bölgeleri, kaplamada oluşan ilave gerilmelerin karşılanması için faydalı olmakta fakat iyi tasarlanmamış

derzler faydalı olmak bir kenara kaplamada sorunlara sebep olabilmektedirler. En sık karşılaşılan sorunlar faylanma, pumping (fişkırtma), betonun parçalanması, patlaması, sökülmesi, soyulması, enine ve boyuna çatlakların oluşmasıdır. Özellikle hydro pumping olayı dikkatle incelenmesi gereken bir husustur.

Pumping, rijit kaplamalarla ilgili önemli bir olaydır. Pumping, beton plak altındaki su ve alt zemin malzemesinin derzlerden, çatlaklardan ve kaplama kenarından dışarı çıkması demektir. Kaplama plakası içerisinde meydana gelen sıcaklık değişimlerinin bir sonucu olarak kaplamanın eğrilmesi veya uygulanan yükler nedeniyle bükülmesinden sonra, kaplamada oluşan plastik deformasyonlar neticesinde kaplama plağı altında boşluklar meydana gelir. Daha sonra su, sürekli tekrar eden trafik yüklemeleri sayesinde bu boşlukta birikir. Bu su derzler içinden veya kaplama kenarından sızarak uzaklaşabilir. Alttemel veya temel malzemesi granüler ise su rahatça zeminden tahliye olur. Eğer malzeme ince ise su kolay boşalamayacaktır ve ilave yük tekrarları zemin malzemesinin suyla karışarak çamur oluşturmaya neden olacaktır. Daha fazla yük tekrarı ve kaplama plakasının deformasyonu, bu çamurun kaplama yüzeyine püskürmesi ile sonuçlanacaktır. Bu durum pumping olarak ifade edilmektedir. Pumping olayı, beton plaka altındaki boşlukların (oyukların) büyümesiyle devam eder. Bu durum, derzlerin faylanması ve nihayetinde de enine çatlakların oluşması veya plaka köşelerinin kırılması ile sonuçlanır. Ayrıca yüzeye çıkmış olan çamur, suyun buharlaşması ile birlikte kuruyacak ve geri kalan ince zemin malzemeleri de derz bölgelerini tıkayacaktır. Zamanla kaplamanın genişlemesini engelleyen bu oluşum, derz bölgelerinde çatlaklar oluşturarak, beton kaplamanın parçalanmasına neden olur. Pumping olayını önlemek için yapılabilecek esas tasarım işlemi; pumping genellikle bu derzlerde meydana geldiğinden genişleme derzlerinin azaltılması, boşluklarının küçültülmesi veya ortadan kaldırılmasıdır [2].

Derz boşluklarının, mevcut yol plakasında meydana gelen sıcaklık değişimleri göz önüne alınarak, kaplama yüzeyinde veya alt zeminlerde hasar meydana getirmeyecek şekilde ayarlanması gerekmektedir. Yıllık sıcaklık değişimleri bir yana gün içindeki sıcaklık farkları bile kaplamada mikro hasar ile başlayıp kaplamanın kaybedilmesine varan sorunlar doğurabilmektedir. Çalışmamızda günlük sıcaklık farklarının beton kaplamalarda bir hasar yaratmaması için kullanılması gereken optimum derz açıklıkları belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece başta pumping olmak üzere beton kaplamalarda oluşan derz problemlerine bir çözüm aranmıştır.

LİTERATÜR TARAMASI

Beton Kaplamalarda Sıcaklık Etkisi

Deneyssel ve nümerik çalışmalar beton kaplamalardaki sıcaklık dağılımının belirlenebilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton kaplamaların sıcaklık profilinin çıkarılabilmesi için ölçümlerin arazi koşullarında alınması gerekmektedir. Kaplama kalınlığı boyunca oluşan sıcaklık dağılımı farklı derinliklere yerleştirilen termokapılar sayesinde ölçülerek kaydedilir ve görüntülenir[3,4,5]. Bu veriler, kısa dönemli okumalar için kesin olmakla beraber uzun dönemli termokapıl okumaları için sıfır noktası sapmasından dolayı önemli hatalar ortaya çıkabilmektedir. Aynı zamanda bu verilerden yanıltıcı sonuçlar çıkabilir çünkü yerinde gözlemler, kaplama ile çevre arasındaki ısı transferinden etkilenen özel şartlara sahip alanları kapsamayabilir[3,4,6].

Araziden alınan ölçümlerin, analitik çözümler ya da bilgisayar modellemeleri ile kıyaslanması faydalı olacaktır. Ölçüm sonuçları netleştirildikten sonra beton kaplamada meydana getirdiği ekstra iç gerilmeler incelenmektedir. Beton kaplamalarda oluşan sıcaklık dağılımı kaplamanın kıvrılması ve büzülmesini artırmayla sonuçlanacak iç gerilmeler oluşturmaktadır. Beton kaplamaların tasarımı ve analizi esnasında kaplama kalınlığı boyunca

oluşan sıcaklık dağılımının lineer olduğu kabul edilmektedir. Ancak gerçek arazi ölçümleri alındığında nonlinear bir dağılımın olduğu görülebilmektedir.

1993'te Huang tarafından yapılan bir çalışmada kaplamanın alt ve üst yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının gün içerisinde maksimum 0,5-0,6 °C/mm olduğu geceleri bu değer yarısına kadar ulaştığı belirlenmiştir[7]. Zhang ve ark. yaptıkları bir çalışmada, kaplama içerisindeki lineer sıcaklık dağılımının aşırı çekme gerilmeleri oluşturduğunu tespit etmişler ve nonlinear dağılımın maksimum çekme gerilmesi oluşturarak lineer olanına göre % 75 civarında bir artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir[8]. Çekme gerilmeleri beton kaplamalarda kıvrılma ve büzülme gerilmeleri olarak ortaya çıkabilmektedirler. Bu kıvrılma ve büzülme gerilmeleri rijit kaplamalarda hasara yol açarlar. Büzülme kaplama betonunun erken yaşlarında önemli gerilmeler oluşturduğu için yol trafiğe açıldıktan sonra kaplama boyunca oluşan kılcal çatlaklar sürekli çatlaklara dönüşmektedir. Zaman geçtikçe büzülme gerilmeleri azalarak gerilmelerde rahatlama meydana gelir ancak kıvrılma gerilmesinin döngüsü kaplamanın bozulmasını hızlandıracak gerilmeler meydana getirmektedir[9].

Sıcaklık Değişiminin Oluşturduğu Gerilmeler ve Analiz Yöntemleri

Beton kaplamalarda ısı değişiminin gerilme oluşturduğu ilk olarak Wastergaard tarafından ortaya atılmıştır[10]. Onun kaplama derinliği boyunca lineer olarak dağılan sıcaklık dağılımı varsayımı kıvrılmaya maruz kalan beton kaplamalarda ki kıvrılma gerilmelerinin tahmininde geniş çapta kabul görmüştür[11]. Wastergaard'ın beton kaplama boyunca oluşan termal gerilmeleri fikri Bradbury tarafından sonlu boyutlara indirgenmiş ve kaplamanın alt ve üst yüzey sıcaklıklarının bilinmesi halinde oluşacak termal gerilmenin kesin olarak bulunabileceği fikri ileri sürülmüştür[12]. Daha sonraki çalışmalar, beton kaplamaların açıkta kalan kenar yüzeylerinin üst yüzeydeki ısı akışından kolayca etkilenebildiği için lineer değil nonlinear bir sıcaklık dağılımına sahip olduğunu göstermiştir.

Channakesava ve ark. 1993'te derzli beton kaplamaların nonlinear statik analizini yapmıştır. Üç boyutlu solid eleman olarak tasarladığı beton kaplamanın altına spring eleman kullanarak zemin tabakası yerleştirmiştir. Analizlerini termal yük ve tekerler yükü altında gerçekleştirerek nonlinearitenin beton da yol açtığı çatlakları gözlemlemiştir. Derzlerin birbirine yaklaştığını tespit ettikten sonra bağ demiri kullanarak modelini yenilemiştir[13]. Zaman ve ark. 1993'te betondaki sıcaklık değişimi ve trafik yükünden oluşan büzülmelere maruz kalan rijit havaalanı kaplamalarındaki dinamik tepkileri belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir algoritma geliştirmişlerdir. Beton kaplamayı ince plak eleman olarak tanımlamış uniform olarak spring elemandan oluşturduğu viskoelastik bir temel tabakası üzerine oturtmuştur. Çalışmasının temelinde derz aralıklarının etkisini ve sıcaklık dağılımı ile ilişkisini incelemiştir[14].

YAPILAN ÇALIŞMALAR

Deneyisel Çalışma

Yapılan çalışmaların ilk kısmını, K.T.Ü hızlandırılmış yol testi laboratuvarında bulunan beton plakların sıcaklık ölçümlerinin alınması oluşturmaktadır. Hızlandırılmış yol testi laboratuvarı, yolun gerçek arazi koşulları altında maruz kaldığı trafik yüklerini laboratuvar ortamında aktarmaya çalıştığımız bir sistemdir (Resim 1). Sistemdeki iki adet kamyon tekerleği 9 ile 40 ton arasında yükleme yapabilme kapasitesine sahiptir. Çalışmada Trabzon ili Arsin ilçesi karayolu üzerinde ağır tonajlı araçlardan ölçülen basınç değerlerini uygulayacak şekilde sistem tasarlanmış ve kalibre edilmiştir. Otomatik olarak hareket eden sistem PLC yazılım sayesinde kontrol edilip iki farklı hız seçeneğine ayarlanabilmektedir. Tekerlekler

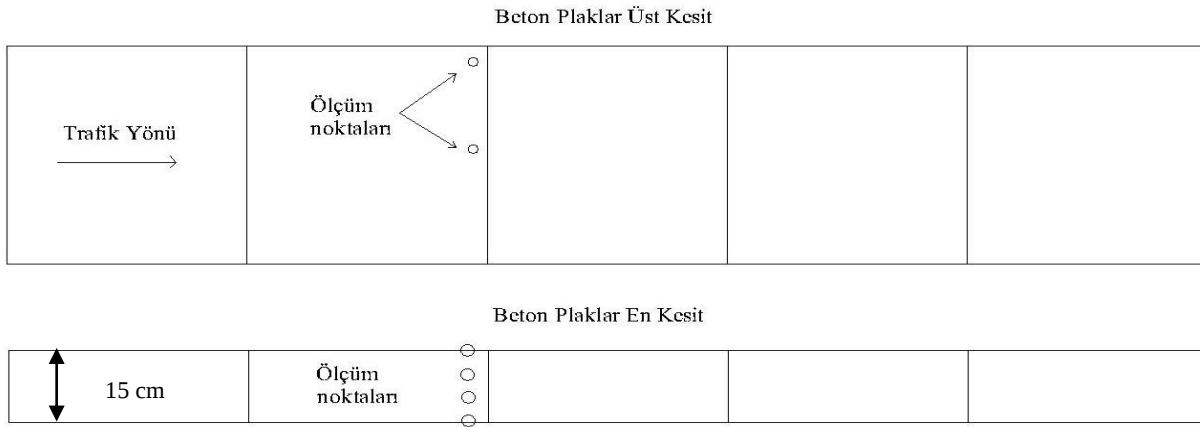
yatay yönde 1,5 m sağa veya sola hareket ettirilerek kaplamanın istenilen bölgesine yük aktarabilmektedir.



Resim 1. Hızlandırılmış yol testi laboratuvarı

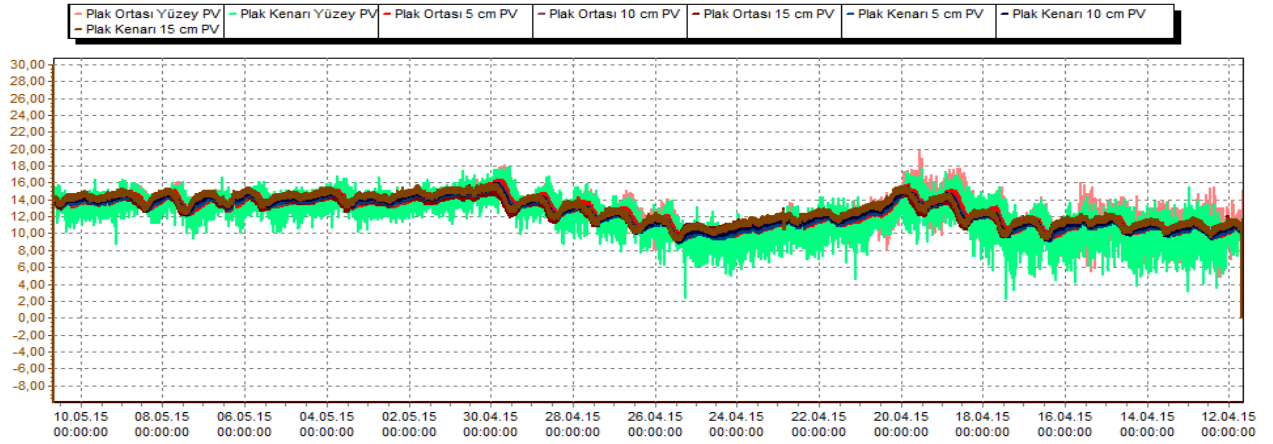
Hızlandırılmış yol testi laboratuvarında hazırlanmış 5 adet beton plak bulunmaktadır. Bu plakların 3 tanesi 15 cm, 2 tanesi 20 cm kalınlığındadır. Plaklar arası derzlerle ayrılmıştır ve boyutları 4,5x5 metredir. Plakların basınç dayanımları 25, 30 ve 35 MPa değerlerindedir. Çalışmamızda 30 MPa basınç dayanımına sahip 15 cm yüksekliğindeki plak kullanılmıştır.

Seçilen beton plağın derz kenarından ve derze yakın plak ortasından kaplamanın derinliği boyunca 5 cm'de bir K tipi termokapıl kullanılarak sıcaklık ölçümleri alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Beton plakların genel görünüşü ve sıcaklık ölçüm noktaları

11 Nisan 2015 tarihinde başlanarak 1 ay süreyle 15 dakika aralıklarla sıcaklık verileri bilgisayarda kaydedilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2.30 günlük sıcaklık verileri

ANSYS Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Statik-Termal Analiz

Çalışmanın bu kısmı sonlu elemanlar modelinin hazırlanıp analiz edilme süreci ile ilgilidir. Sonlu elemanlar modeli hazırlanırken ANSYS 14.5 Workbench arayüzü kullanılmıştır. Sınır koşulları ve geometrik modelleme aşamaları sonlu elemanlar çalışmasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Beton kaplamanın kıvrılma gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla yaptığımız analizler çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

Sonlu elemanlar modeli, geometri oluşturma, malzeme modelinin hazırlanması, mesh ve sınır koşulları gibi aşamaları içermektedir. Modelin geometrisi laboratuvar ortamındaki beton plağın ölçüleri baz alınarak oluşturulmuştur. Beton plak malzeme özellikleri için "Concrete" eleman seçilmiş ve betonun elastisite modülü, yoğunluğu, poisson oranı, termal genleşme katsayısı ve termal iletkenlik katsayısı değerleri Tablo 1'deki gibi girilmiştir. Beton plak oluşturulduktan sonra sonlu elemanlara ayırmak için mesh analizleri yapılmış ve en uygun mesh boyutları tespit edildikten sonra "fine mesh" yapılmıştır.

Tablo 1. Betonun ANSYS'e girilen özellikleri

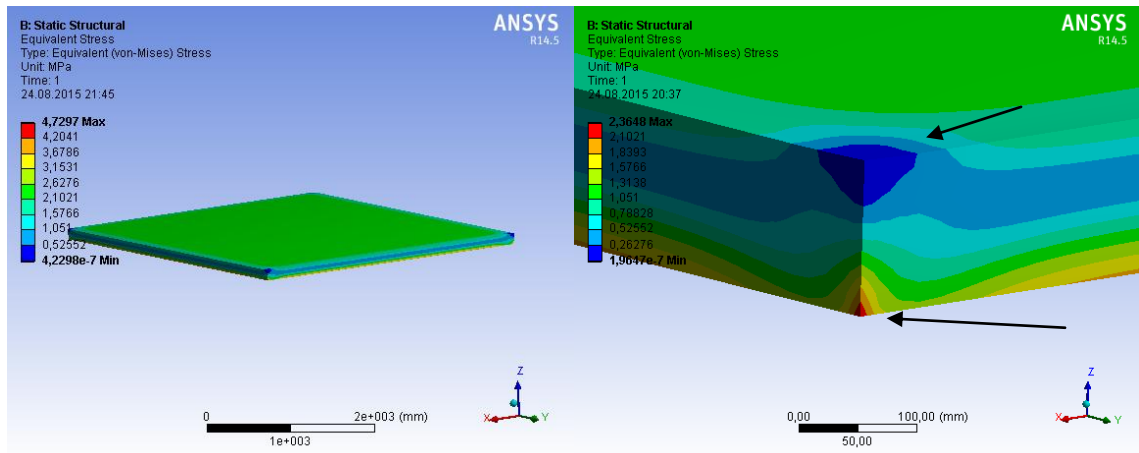
Betonun elastisite modülü, MPa	32000
Poisson oranı	0,2
Termal genleşme katsayısı, C ⁻¹	1,3x10 ⁵
Yoğunluğu, kg/m ³	2300
Termal iletkenlik katsayısı, W/mK	0,72

Laboratuvar ortamında alınan sıcaklık verileri analiz edilerek 30 günlük süre içerisinde beton kaplamanın alt ve üst yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları incelenmiştir. Sıcaklık farkının en fazla olduğu günler tespit edilerek, o günlerde oluşan sıcaklık farkları beton kaplamaya uygulanmıştır. Bu adımda gerçekleştirilen işlemin nedeni kaplama alt ve üst yüzeyinde meydana gelen sıcaklık farkının en yüksek olduğu durumun en fazla kıvrılma gerilmesine neden olmasıdır. Bu sayede derz bölgesinde oluşacak genleşme miktarı belirlenmiş olacaktır.

Beton plaklardaki toplam deplasman miktarları tespit edilmiş olup "x" ve "y" doğrultusundaki uzama miktarları belirlenmiştir (Tablo 2). Ayrıca maksimum çekme gerilmelerinin olduğu bölgeler belirlenerek betonun çekme dayanımını aşmadığı görülmüştür (Şekil 3).

Tablo 2. Farklı sıcaklık değerleri için beton plakta oluşan deplasman değerleri

Deplasman doğrultusu	Deplasmanlar (mm)			
	Beton yüzeyi:5 ⁰ C Beton tabanı:10 ⁰ C	Beton yüzeyi:10 ⁰ C Beton tabanı:5 ⁰ C	Beton yüzeyi:15 ⁰ C Beton tabanı:5 ⁰ C	Beton yüzeyi:20 ⁰ C Beton tabanı:5 ⁰ C
Y	0.47	0.47	0.39	0.32
X	0.38	0.38	0.32	0.25
Z	0.03	0.03	0.03	0.03



Şekil 3. Beton plaktaki gerilmelerin gösterimi

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Beton yolların gelişimi ve asfalt kaplamalı yollara oranla daha çok kullanılmasının desteklenmesi için beton yollarda çatlamaya sebep olan derz probleminin çözülmesi gerekmektedir. Çalışmamızda, beton yollardaki maksimum derz aralıklarının tespiti amacıyla hızlandırılmış yol test laboratuvarında hazırlanan 1/1 ölçekli beton plaklar üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüş ve 30 gün boyunca sıcaklık ölçümleri plaklar üzerinde alınmıştır. Bu ölçümler ANSYS sonlu elemanlar programı ile modellenerek meydana gelebilecek gerilmeler ve derz kenarlarındaki deplasman miktarları hesaplanmıştır.

AASHTO standartlarına göre beton kaplamalardaki genleşme derzlerinin genişliği 20 mm ve daha fazlası olarak tavsiye edilmektedir. Bu durum Hydro pumping ve derz sıkışma problemlerine sebep olmakla birlikte sürüş konforu açısından da oldukça olumsuz şartlar sunmaktadır. Yapılan bu çalışma koşullarında 20 mm derz açıklığının gereğinden fazla olduğu derzlerde 1-2 mm'lik bir açıklığın yeterli olacağı gösterilmiştir.

Çalışmamızın devamında hızlandırılmış yol test laboratuvar ortamında sıcaklık değişimine maruz kalan beton plakların derz bölgelerindeki deplasman miktarları ölçülecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Dmomenichini, L and Kawano, H. “Yoğun Trafiğe Maruz Yollar İçin Beton Kaplama”, 9. Uluslararası Beton Yollar Sempozyumu Bildirileri, İstanbul, s.37-81, 04-07 Nisan 2004.
- [2] Nicholas J.G. and Lester A.H., "Traffic and Highway Engineering", Four Edition, s.1084, 2009.
- [3] Richardson JM, Armaghani JM. 1987. Stress caused by temperature gradient in portland cement concrete pavement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1121:7-13.
- [4] Yu H., Khazanovich L., Darter M., Ardani A. 199,. Analysis of Concrete Pavement Responses to Temperature and Wheel Loads Measured from Instrumented Slabs, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1639(-1):94-101.
- [5] Jeong J-H., Zollinger D. 2003, Development of Test Methodology and Model for Evaluation of Curing Effectiveness in Concrete Pavement Construction, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1861(-1):17-25.
- [6] Mohamed A., Hansen W. 1997, Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavements, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1568:65-71.
- [7] Huang, Y. H., *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1993.
- [8] Zhang, J., T. W. Fwa, K. H. Tan, and X. P. Shi. Model for Nonlinear Thermal Effect on Pavement Warping Stresses, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 6 , November-December 2003, pp. 695-702.
- [9] Hiller JE, Roesler JR. 2010. Simplified nonlinear temperature curling analysis for jointed concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering* 131(8):654-663.
- [10] Westergaard, H. M. Analysis of Stressed in Concrete Pavements due to Variations of Temperature. Proc., *Highway Research Board*, Vol. 6 , National Research Council, Washington, D.C., 1926, pp. 201-217.
- [11] Papagiannakis AT, Masad EA. 2007. Pavement design and materials. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [12] Bradbury RD. 1938. Reinforced concrete pavement. Washington D.C.: Wire Reinforcement Institute.
- [13] Channakeshava, C., F. Barzegar, and G. Z. Voyiadjis. Nonlinear FE Analysis of Concrete Pavements with Doweled Joints, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 5, September/October 1993, pp. 763-781.
- [14] Zaman, M. M., A. M. R. Taheri, and V. Klianna. Dynamics of Concrete Pavement to Temperature Induced Curling, 72nd Annual Meeting of *Transportation Research Board*, Washington, D.C., 1993.