

Granüler Yol Malzemeleri için Düşük Maliyetli Dinamik Üç Eksenli Test Cihazı Geliştirilmesi

Altan YILMAZ^{*}, Mustafa KARAŞAHİN¹, Mehmet Fatih ÇAĞLAR²

^{*}Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD / ISPARTA

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü / ISPARTA

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, Elektronik-Haberleşme Mühendisliği Bölümü / ISPARTA

Alınış tarihi:04.12.2007, Kabul:05.05.2008

Özet: Dinamik üç eksenli deneyleri ile yol malzemelerinin trafik yükleri altındaki mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Laboratuvar deneyleri ile belirlenen bu malzeme parametreleri genellikle üstyapı tasarımında kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, granüler yol malzemelerinin mekanik özelliklerinin (Esneklik modülü, Poisson oranı) belirlenebilmesi için, düşük maliyetli dinamik bir üç eksenli test cihazı geliştirilmiştir. Cihaz bilgisayar kontrollü olup deneyi süren program da bu makalenin yazarları tarafından hazırlanmıştır, dolayısıyla program üzerinde değişiklik yapmak, yeni veriler eklemek mümkündür. Deney cihazında yük kontrolü yük hücresi aracılığı ile yüklemeler ise elektro-pnömatik valf sistemi ile yapılmaktadır. Bu cihaz ile 100x200mm ve 150x300mm ebatlarındaki silindirik numuneler test edilebilmektedir. Geliştirilen deney cihazının maliyeti ithal fiyatının yaklaşık 1/5'i civarındadır. Geliştirilen bu dinamik deney düzeneği ile gerçekleştirilen üç eksenli deneylerinden elde edilen veriler benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında başarılı sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yol üstyapısı, Dinamik üç eksenli test cihazı, Esneklik modülü, Granüler malzemeler, Elektro-pnömatik kontrol

Development of Low-Cost Dynamic Triaxial Test Apparatus for Granular Materials

Abstract: Dynamic triaxial testing system measures the mechanical response of pavement materials to a cyclic load simulating the traffic. The material parameters measured during the test are commonly used in design of pavement structures. In this study, to test the mechanical properties of granular materials, such as resilient modulus and Poisson's ratio, a new low-cost dynamic triaxial testing apparatus was developed. This apparatus is fully computer controlled, and the control software has been developed by the writers of this article. Therefore new design parameters can be added to the program or changes can be made. The load is controlled by a load cell, and the pressure is applied by an electro-pneumatic system. The available specimen sizes are 100x200mm and 150x300mm with cylindrical shaped. The cost of developed apparatus is approximately twenty percent of imported cost. In fact, it is seen through the data obtained from dynamic triaxial tests that considerably successful results have been realized as compared to similar test results.

Key Words: Highway pavements, Dynamic triaxial test apparatus, Resilient modulus, Granular materials, Electro-pneumatic control

Giriş

Esnek yol üstyapıları, ağır trafik şartlarında en çok kullanılan üstyapı türüdür. Tekrarlı dingil yükleri yol katmanlarında zamanla deformasyonlara ve bozulmalara sebep olmaktadır. Dolayısıyla kaliteli üstyapı tasarımı için, kullanılan malzeme performansını önceden belirlemek ve bu amaçla deneysel verilerden faydalanmak önem arz etmektedir. Yapılan deneyler aracılığı ile üstyapının fonksiyonunu kaybetmesine neden olan faktörler ve çözüm yolları incelenebilir. Üstyapı tasarımında bu faktörlerin dikkate alınması ile yolun kalite ve ömrü artırılabilir (Karaşahin ve Tığdemir, 1998; Tığdemir vd., 2001). Böylece ekonomik olarak büyük kazançlar elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında, granüler yol malzemelerinin mekanik özelliklerinin (Esneklik modülü, Poisson oranı) laboratuvar ortamında belirlenebilmesi için, yurtdışı araştırmalarda yaygın olarak kullanılmakta olan ülkemizde ise son yıllarda yeni uygulanmaya başlanan dinamik üç eksenli deneyleri için düşük maliyetli bir test

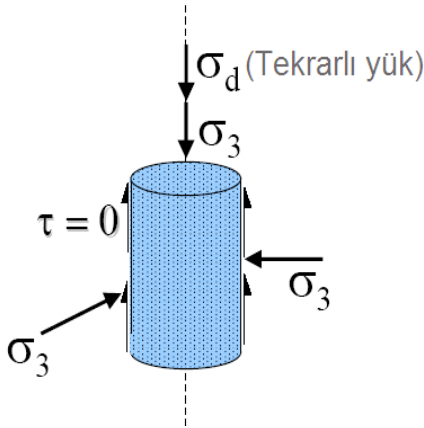
cihazı geliştirilmiştir. Cihaz bilgisayar kontrollü olup, 2 adet analog çıkış, 6 adet analog giriş ve bir konnektör bloğu içeren veri toplama kartı aracılığı ile kontrol edilmektedir. Deney programı görsel tabanlı bir paket program (MATLAB) aracılığı ile hazırlanmıştır, dolayısıyla program üzerinde değişiklik yapmak, yeni veriler eklemek mümkündür. Deney cihazında yük kontrolü, yük hücresi aracılığı ile yüklemeler ise elektro-pnömatik valf sistemi ile yapılmıştır. Numune deformasyonları düşey ve yatay yönde yerleştirilmiş olan ikişer adet LVDT aracılığı ile ölçülmektedir.

Dinamik Üç Eksenli Deneyleri

H.B. Seed'in 1950'li yıllarda başlattığı ilk çalışmalardan bu yana dinamik üç eksenli deneyleri oldukça gelişmiş, birçok ülkede yaygınlaşmış ve günümüzde bağlayıcısız granüler malzemelerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin belirlenebilmesi için en çok tercih edilen deneylerden birisi haline gelmiştir (Sweere, 1990).

Dinamik üç eksenli deneyleri ile hem granüler (kohezyonsuz) malzemelerin hem de kohezyonlu zeminlerin, “Esneklik modülü” ve “Plastik şekil değiştirmesi” belirlenebilmektedir. AASHTO’nun 1986 yılında çıkardığı üstyapı tasarım rehberinde ve sonraki güncellemelerinde de bağlayıcısız yol malzemeleri için esneklik modülünün (tasarım parametresi olarak) kullanılması önerilmektedir. Ancak deneyin kompleks yapısı ve ilgili yükleme sistemlerinin yüksek maliyetli olması hala uygulamada yaygın kullanılmasının önünde engel oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı da yerel üretim imkânları kullanılarak, ülkemiz şartlarına uygun, düşük maliyetli eşdeğer bir deney sisteminin geliştirilmesidir.

Üstyapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için, düşey yükten dolayı oluşan gerilmelerin; büyüklüğü ve frekansı, malzeme tane boyutu ve sıkıştırılma şartları gerçek ortam şartlarına en uygun şekilde dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla klasik mukavemet deneyleri olan “CBR deneyi, Tek eksenli basınç deneyi vb. deneyler” tek başlarına gerçek malzeme davranışını belirlemede yeterli olmamaktadır. Trafikten kaynaklanan dinamik yüklerin de temsil edildiği daha kompleks deney yöntemlerinin uygulanması burada önem kazanmaktadır (Karaşahin ve Tığdemir, 1998). Tekrarlı yüklemeli üç eksenli deney cihazı, yol malzemeleri için gerçek gerilme durumuna yakın bir deney modelini oluşturduğu için tercih edilmektedir. Dinamik üç eksenli deneylerinde düşey ve yanal gerilmeler, numuneye Şekil 2.1’de görüldüğü gibi uygulanmaktadır. Kesme gerilmesinin tekerlek eksenli altında sıfır olduğu kabul edilmektedir. Burada σ_d = Deviator gerilme, σ_3 = Çevre basıncı, $\sigma_d + \sigma_3$ = Toplam eksenel gerilmeyi göstermektedir (Tutumluer ve Dawson, 2004).



Şekil 2.1. Üç eksenli numunesine etkiyen yükler

Dinamik üç eksenli deneyleri ile “Esneklik modülü” yani sıra numunelerin düşey ve yanal deformasyonları da tespit edildiği için malzemelerin Poisson oranı (ν) bulunabilmektedir. Analitik üstyapı tasarımında malzemelerin bu tür mekanik özelliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

Üç eksenli ve tekrarlı yük şartları altında test edilen malzemenin esneklik modülü ve Poisson oranı aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

M_R : Esneklik Modülü

σ_d : Deviator gerilme

ϵ_r : Esnek birim şekil değiştirme (Eksenel yönde)

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

ν : Poisson Oranı

ϵ_x : Yanal yöndeki geri dönebilen birim şekil değiştirme

ϵ_y : Eksenel yöndeki geri dönebilen birim şekil değiştirme
Granüler bir temel veya alt temel tabakasının direnci, gerilmeler sistemine doğrudan bağlıdır. Üstyapıya etkiyen gerçek gerilmeler; tekrarlı düşey ve yatay gerilmeler ile kesme gerilmesinden oluşur. Bu gerilmeler tekerlek yükü aracılığıyla oluşan σ_1 , σ_2 , σ_3 asal gerilmelerinin bir varyasyonudur (Shaw, 1980). Her üç yöndeki bu asal gerilmelerin toplamı olan “ θ ” numuneye etkiyen gerilmelerin mertebesini en iyi biçimde belirler.

Esneklik modülünün asal gerilmelere bağlı olarak değişimini göstermekte sıklıkla kullanılan eşitlik (toplam gerilme modeli) aşağıdaki gibidir (Allen ve Thompson, 1974; Barksdale ve Alba, 1997).

$$M_R = K_1 \cdot (\theta)^{K_2}$$

$\theta = 3\sigma_3 + \sigma_d$ (Asal gerilmelerin toplamı)

K_1 ve K_2 ; Malzeme ile ilgili katsayılardır.

Deney Cihazı Geliştirilmesi

Laboratuar ortamında dinamik yükleme yapabilen bir deney düzeneğinin, aşağıda sıralanan özelliklere sahip olması gerekmektedir.

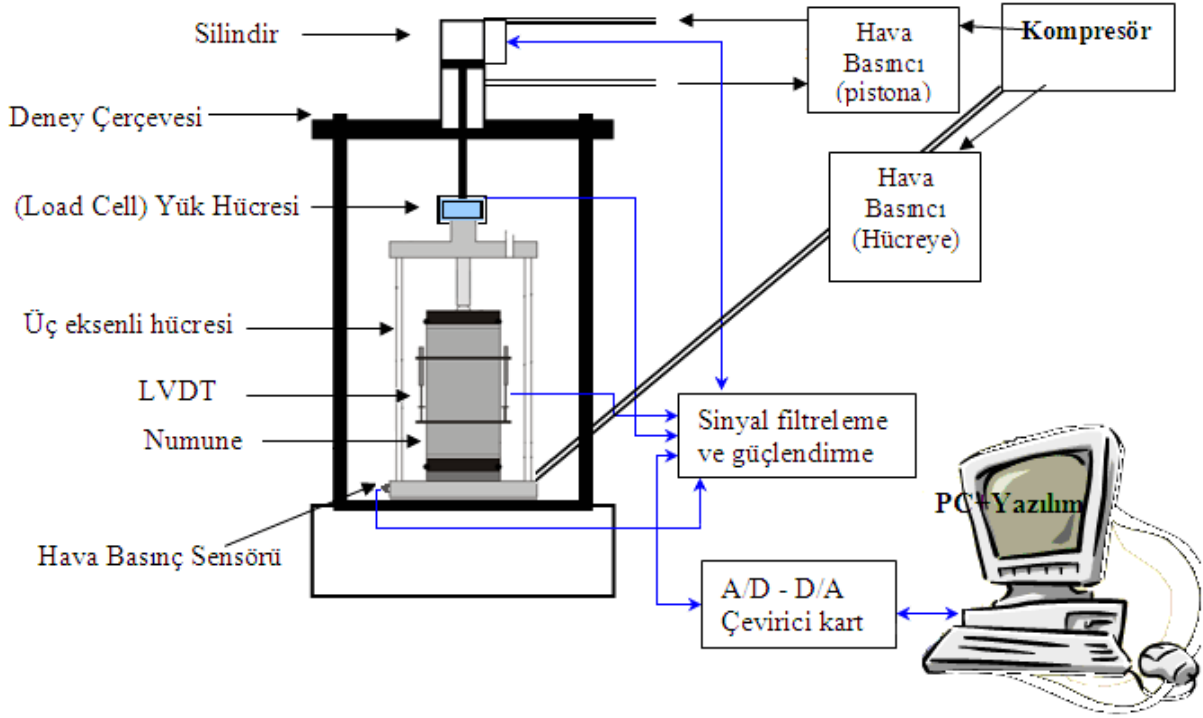
- Dinamik yükleme yapabilen elektronik kontrollü bir yükleme sistemi
- Veri toplama ve kontrol ünitesi (+Sensörler)
- Bilgisayar ve uygun yazılım
- Bunları kullanabilecek olan kalifiye teknik eleman

Yukarıda belirtilen özelliklerin bir araya getirilmesi göreceli olarak güç olduğu için her araştırma merkezinde dinamik bir deney sistemine rastlamak mümkün değildir. Ülkemiz için oldukça yeni olan dinamik üç eksenli deneyleri, Karayolları Genel Müdürlüğü yanı sıra birkaç büyük üniversitede uygulanabilmektedir.

Dinamik deneylerde eksenel yöndeki tekrarlı yükün (σ_d), elektronik kontrollü bir yükleme sistemi aracılığıyla uygulanması gerekmektedir. Bu yükleme sistemi; - Hidrolik (sıvı basıncı ile çalışan) - Pnömatik (hava basıncı ile çalışan) veya Elektromekanik sistemlerden birisi olabilir. Pnömatik yükleme sistemleri yaklaşık 10KN kapasiteye kadar verimli çalışmaktadır. Ancak basınçlı havanın sıvı kadar kararlı bir ortam olmaması nedeniyle pnömatik sistemlerde yükleme hızını ayarlamak daha zordur. Dinamik üç eksenli deneylerinde çoğunlukla kullanılan yükleme frekansı 1-10Hz arasındadır (Marr vd., 2003; Menzies vd., 2004).

Yanal gerilmeyi temsil eden hücre basıncını sağlamak için su veya hava gibi bir akışkan kullanılmaktadır. Hava kullanılması durumu suya göre daha pratik bir yöntemdir. Su kullanılması durumunda sızdırmazlık önem kazanmakta, ayrıca üç eksenli hücresi içerisine yerleştirilen ölçüm aletlerinin suya karşı geçirimsiz olması ve paslanmaz olması gerekmektedir. Bu durum sistem maliyetlerini artırmaktadır (Yılmaz ve Karşahin, 2007).

Bu çalışmada maliyet unsuru dikkate alınarak hem eksenel yöndeki yüklemeler için, hem de hücre basıncı için pnömatik sistemler tercih edilmiştir. Geliştirilen dinamik üç eksenli deney cihazının genel şeması Şekil 3.1'de görülmektedir. Silindir şeklinde hazırlanan numune pleksiglas hücre içerisine yerleştirildikten sonra deney uygulanmaktadır.



Şekil 3.1. Dinamik üç eksenli deney cihazının şeması

Şekil 3.1'de görülen deney cihazı Süleyman Demirel Üniversitesi'nde yerel imkanlar kullanılarak oluşturulmuştur, cihazı oluşturan bileşenlerin detayları ilerleyen paragraflarda verilmiştir.

Deney Çerçevesi

Deney çerçevesi, tekrarlı yük uygulayacak olan piston boyutlarına ve uygulanacak olan maksimum yüke göre tasarlanmıştır. Alt tabla sabit olup üst başlık istenilen yüksekliğe ayarlanabilmektedir. Çerçevenin, alt tablası 25mm kalınlığında paslanmaz çelik levhadan, üst başlığı ise 100x100mm ebatlarında dolu gövdeli çelik lamadan imal edilmiştir. Şekil 3.5'de deney çerçevesi ve deneye hazır bir numune görülmektedir.

Pnömatik Tekrarlı Yükleme Sistemi

Numuneye düşey yönde, tekrarlı yük uygulayan sistemdir. Pnömatik çift etkili silindir ve piston vasıtasıyla yük uygulanmaktadır. Silindir ve pistona basınçlı hava veren aksamlar (yönlendirme valfi, oransal regülatör, hava şartlandırma sistemi vb.) bir pano içerisinde toplu halde bulunmaktadır (Şekil 3.2). Hava basınç kaynağı olarak 10bar'lık kompresör kullanılmıştır.

Elektro-pnömatik yükleme sistemi (maks 1000kg'a kadar) istenilen büyüklükte tekrarlı yük uygulayabilmektedir.

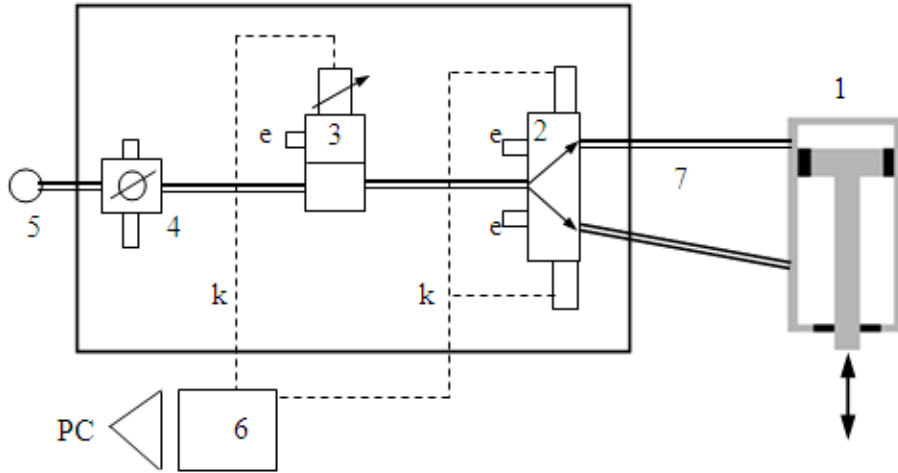
Yük kontrolü yük hücresi (load cell) aracılığıyla yapılmaktadır. Düşey yönde uygulanan tekrarlı yük yarım sinüs dalgası (haver-sine) şeklindedir. İstenildiği takdirde kare, üçgen ve buna benzer formlarda yükleme şekilleri de uygulanabilmektedir.

Uygulanan Yükleme Şekli

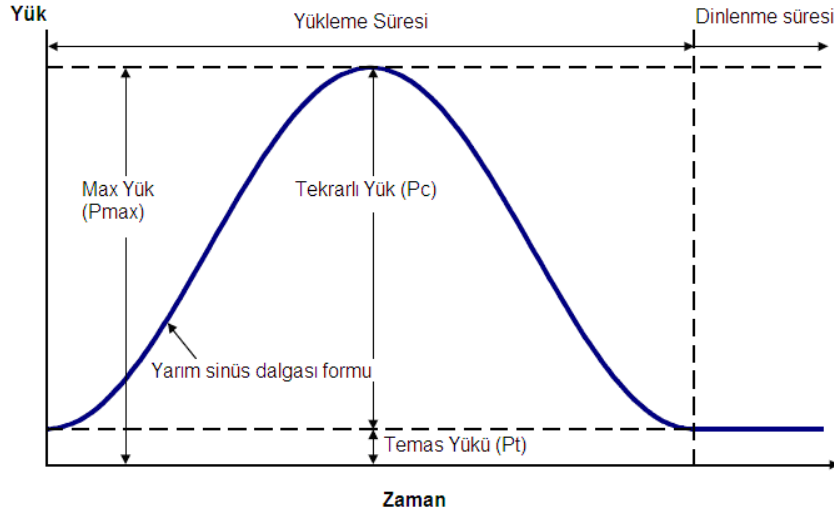
Eksenel yöndeki tekrarlı yükler için standartlarda önerilen şekil, yarım sinüs dalgası $(1-\cos\theta)/2$ şeklindedir (Şekil 3.3). Burada maksimum eksenel yük, tekrarlı yük ile temas gerilmesinin toplamından oluşmaktadır. Temas gerilmesi maks gerilmenin %10'u mertebesindedir. Bu basınç, yükleme yapan silindirin pistonu ile üç eksenli numunesinin üst plakası arasında sürekli bir temas sağlamak için deney sırasında sabit (statik) kalmaktadır (Anonim, 1997; Anonim, 1996).

Deney sırasında aşağıdaki yükleme parametreleri kullanılmıştır.

- P_{maks} : Toplam yük ($P_{temas} + P_{tekrar}$)
- P_{temas} : Numune temas yükü
- P_{tekrar} : Tekrarlı yükleme yükü (genlik)
- N : Yükün tekrarlanma sayısı
- T_y : Yükün uygulanma süresi
- T_b : Bekleme süresi



Şekil 3.2. Tekrarlı yükleme sisteminin blok diyagramı; 1: piston, 2: yön valfi, 3: oransal valf 4: filtre, 5: hava basıncı kaynağı, 6: Konnektör blok, 7: pnömattik bağlantı, e: egzoz, k: elektrik bağlantısı



Şekil 3.3. Yarım sinüs dalgası şeklindeki tekrarlı yükleme formu (Anonim, 1996)

Bu çalışmada pnömattik yükleme sisteminin el verdiği ölçüde, Şekil 3.3'e benzer şekilde en hızlı yükleme formu uygulanmaya çalışılmıştır. Yapılan denemeler sonrasında 1sn.'nin altındaki yükleme hızları için pnömattik valflerin yeterince hızlı cevap vermediği görülmüştür. Oluşturulan yükleme sistemi dakikada 30-40 defa yük tatbik edebilmektedir. Dolayısıyla deneylerde yükleme-boşaltma süresi (tekrarlı yükün uygulanma süresi) olarak 1sn. seçilmiştir. Bekleme süresi de 1sn. olarak alınmıştır. Bir yükleme tekrarı 1sn. yükleme ve 1sn. bekleme süresi olmak üzere, toplam 2sn. sürmektedir.

Pnömattik Hücre Basıncı Sistemi

Bu sistem, üç eksenli hücresi içerisinde belirli bir hava basıncı oluşturmak, diğer bir deyişle numuneye çevresel basıncı uygulamak amacıyla kullanılmıştır. Basıncı büyüklüğü 0 – 1000 Kpa aralığında 1Kpa duyarlılıkla ayarlanabilmektedir. Hava basıncı kaynağı olarak 10bar'lık kompresör kullanılmıştır.

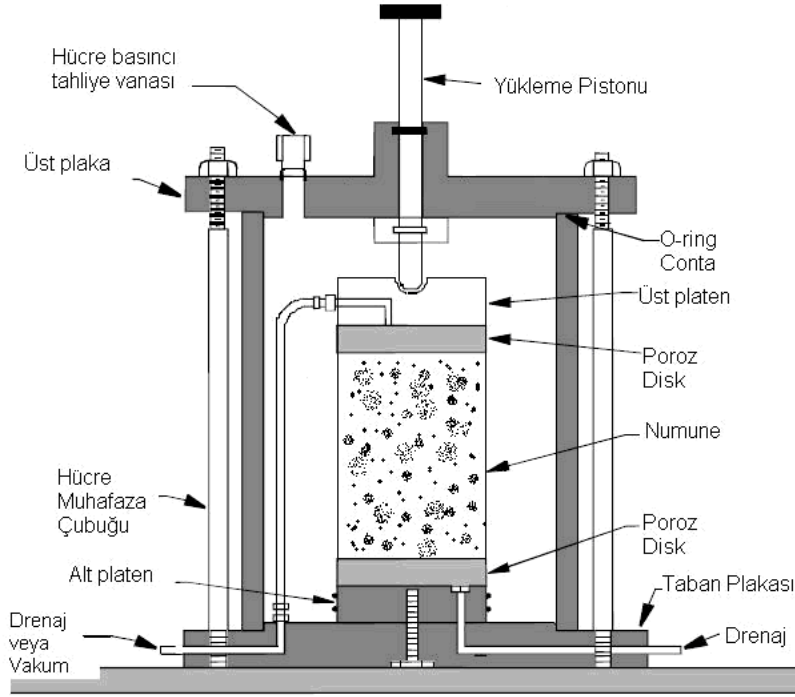
Hücre basıncı sistemi içerisinde, hava şartlandırma elemanı, elektro-pnömattik bir oransal valf ve dijital göstergeli bir basıncı sensörü bulunmaktadır. Basıncı sensörü hücre içerisine bağlıdır ve oransal valf vasıtasıyla verilen basıncı havanın kontrol edilebilmesi amacıyla kullanılmıştır. Deney süresince bu sensörden alınan veriler hücre basıncının değişimini göstermekte ve veri dosyasına kaydedilmektedir

Üç Eksenli Hücresi

Üç eksenli deney hücresinin kullanılma amacı, silindirik numuneye çevre basıncı uygulayabilecek kapalı bir ortam oluşturmaktır. Ayrıca numunenin yan ve düşey deformasyonunu ölçmek için kullanılan LVDT'ler (Linear Variable Displacement Transducer) bu hücre içerisine sabitlenmektedir.

Şekil 3.4'de kesiti görülen hücrenin çeperi 10mm kalınlıkta pleksiglas malzemeden yapılmıştır ve 1000Kpa

Basınca Dayanıklı ve İki Döşaklı Ahşaplı Hücre Üç Eksenli Test Cihazı Çıkarılmıştır. İki adet vana, numunenin alt ve üst



Şekil 3.4. Üç eksenli hücrenin kesiti



Şekil 3.5. Deney cihazının yüklem çerçevesi ve hücre içerisindeki numune

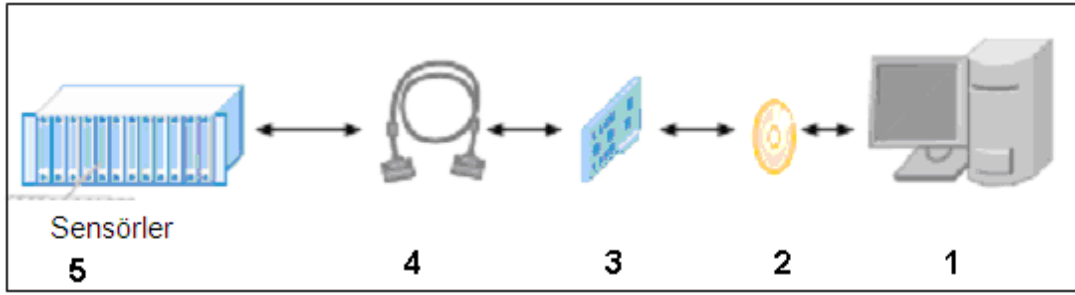
drenajını sağlamak için iki adet drenaj musluğu, hücre içine LVDT ve benzeri ölçüm aletlerinin bağlanabilmesi için kendinden contalı 4 adet kablo girişi yerleştirilmiştir. Bu hücre ile 100x200mm ve 150x300mm ebatlı silindirik numuneler test edilebilmektedir.

Veri Toplama ve Kontrol Sistemi

Veri toplama ve kontrol donanımı ile yazılım senkronize edilerek deney düzeneğine bağlanmış, deneylerin standart koşullara uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlamış ve deney süresince sensörlerden toplanan tüm veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Şekil 3.6'da oluşturulan veri toplama ve kontrol sisteminin şeması görülmektedir.

Şekil 3.6'daki sistem elemanları sırasıyla aşağıda tanımlanmıştır.

- 1- P4 tabanlı PC
- 2- Yazılım (MATLAB)
- 3- Veri işleme kartı (16 bit çözünürlük, 1.25 MS/s işlem hızı, 16 analog giriş, 2 analog çıkış, 24 dijital I/O kanalı)
- 4- Veri iletim kablosu (68 pin)
- 5- Konnektör blok ve sensör bağlantıları



Şekil 3.6. Veri toplama ve kontrol sistemi

Bilgisayar ile analog elemanları (sensörleri ve valfleri) aynı ortamda birleştirebilen, bir bakıma çevirmenlik yapan bir ara elemana, Analog-Dijital/Dijital-Analog (AD/DA) çeviriciye gereksinim duyulmaktadır. Bu ara eleman üç numaralı veri toplama/işleme kartıdır. Bu elektronik kart bilgisayardaki PCI yuvalarından birisine takılarak bilgisayarın ürettiği dijital komutları analog sinyallere çevirerek, analog olan elemanlara iletir. Analog elemanlardan gelen sinyalleri de bilgisayarın anlayacağı dijital bilgilere dönüştürür.

Tüm sensörler ve kontrol valfleri Şekil 3.6'da görülen 5 numaralı konnektöre bağlıdır. Algılayıcılar tarafından toplanan bilgiler, bilgisayara gitmeden önce kuvvetlendirilmektedir. Bu amaçla elektronik yükseltme (amplifikasyon), filtreleme gibi işlemleri yapabilen, elektronik arabirim ünitesi (signal conditioner) kullanılmıştır.

Yazılım

Deney sisteminin kullanılabilir hale gelmesi için en önemli aşamalardan birisi de yazılım hazırlanmasıdır. Bu amaçla MATLAB paket programı ile deney programı yazılmıştır. Program, dinamik üç eksenli deneyi için tanımlanan yükleme aşamalarını, önceden hazırlanmış bir Excel tablosundan okuyarak (yükleme adımları, yük büyüklükleri, tekrar sayısı vb.) hafızasına yükledikten sonra kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan deney adımlarını otomatik olarak uygulamakta ve deney sonunda basınçları sıfırlayarak deneyi sonlandırmaktadır. Sensörlerden toplanan veriler bilgisayardaki depolama birimine kayıt edilmekte ve deney sonunda grafiklere aktarılmaktadır (Şekil 3.7). 16 adımlı standart bir deney planının uygulanması yaklaşık 1 saat sürmektedir. Elde edilen esneklik modülü deney bulguları için Şekil 4.2'de örnek bir grafik verilmiştir.

Deney Sistemi Özellikleri

Deney esnasında veri toplama kanallarından (Load cell ve LVDT'ler) gelen, sinyal işlemesi yapılmış veriler kesintisiz olarak bilgisayara aktarılmakta ve 1000 kS/s hız ile örneklenmektedir. Hücre içindeki hava basıncı her dinamik yükleme başında bir kez örneklenmektedir.

Pnömatik aksel yüklemesi için yüksek hızlı yük kontrolü yapılmaktadır. Yük kontrolü için bir adet Load Cell kontrol kanal girişi kullanılmaktadır. Numunenin eksensel ve yanal deformasyonunu ölçmek için 4 adet LVDT girişi ve hücre içi basıncı ölçmek için 1 adet basınç sensörü girişi bulunmaktadır. Çizelge 1'de deney cihazının özellikleri toplu halde verilmiştir.

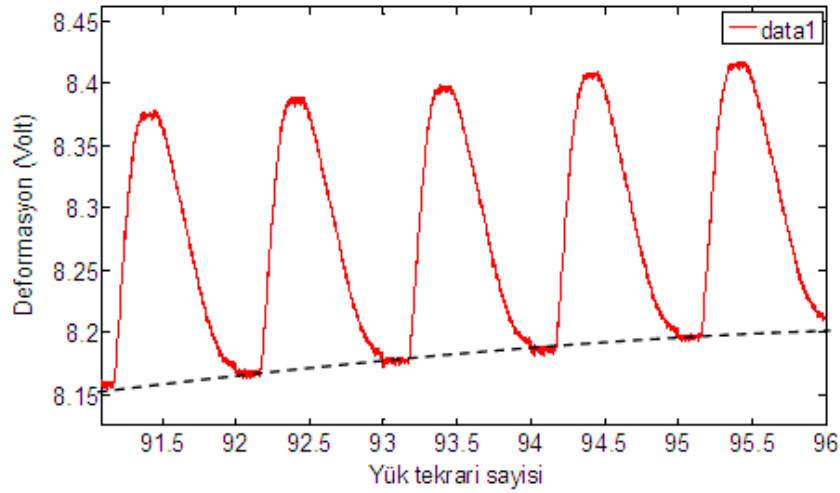
LVDT'lerden alınan deformasyon verileri için Şekil 4.1'de örnek verilmiştir. Şekil 4.1'deki grafikten görüldüğü üzere, deney sırasında tekrarlı yüklemeler nedeniyle numunelerde belirgin şekilde elastik (geri dönebilen) deformasyonlar oluşurken, çok az miktarda plastik (geri dönmeyen) deformasyon meydana gelmektedir (kesikli çizgi).

Bu çalışmada kullanılan 150x300mm ebatlı silindir numuneler (granüler yol temel malzemesi) için deney sonundaki toplam plastik deformasyon değerleri 2-3 mm arasında bulunmuştur. Gerçekte de trafik yükleri kaplama vasıtasıyla zemine tekerrürlü yük olarak intikal etmekte ve zeminde yarattığı deformasyonların büyük bir kısmı kalıcı olmayan yani elastik deformasyonlar olmaktadır (Karaşahin vd., 1993; Uzan, 1985).

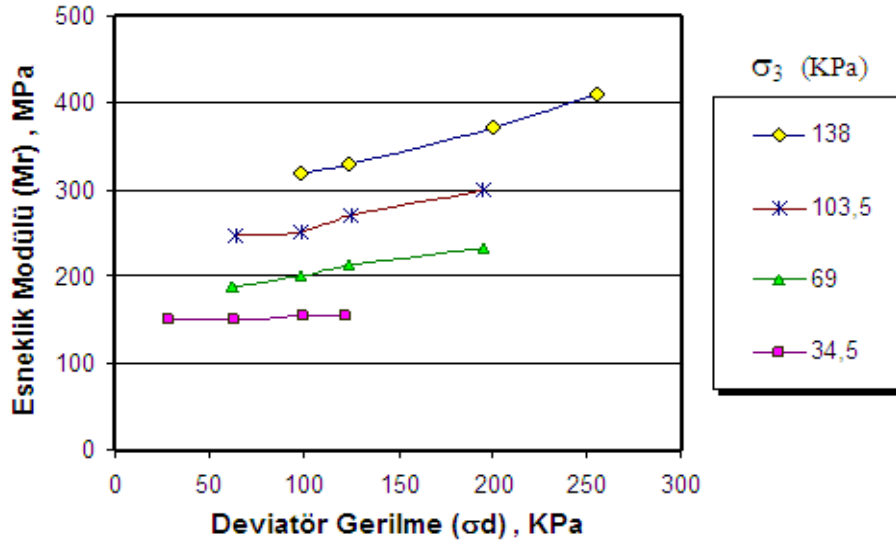
İncelenen kaynaklarda belirtildiği üzere, esneklik modülü değeri uygulanan gerilmeler (σ_3 ve σ_d) ile yakından ilgilidir (Rada ve Witczak, 1981; Houston vd., 1993). Şekil 4.2'deki grafiğe bakıldığında, çevre basıncı σ_3 'ün esneklik modülü (M_r) üzerindeki etkisi belirgin olarak görülmektedir. σ_3 'ün artması ile M_r değerleri de artmaktadır. Deviyatör gerilme σ_d 'nin etkisi ise bu kadar belirgin değildir; Düşük σ_3 değerleri için σ_d 'nin etkisi sifira yakınken σ_3 arttıkça, deviyatör gerilmenin esneklik modülü üzerindeki etkisi de artmıştır. Sweere (1990), Maher vd. (2000), Tutumluer ve Dawson (2004)'ün çalışmalarında da granüler yol malzemeleri için benzer bulgular elde edildiği görülmüştür.

Çizelge 1. Dinamik üç eksenli deney cihazının özellikleri

Mekanik Özellikler	
Yükleme Tipi	Elektro-pnömatik
Deney numunesi boyutları (R x H)	Silindir: (10 - 15 cm çap x 20 - 25 cm yükseklik)
Yük tekrar hızı	0 - 1 Hz
Yük kapasitesi – Dinamik	0 – 1000 kg arasında 5 kg duyarlılıkla ayarlanabilir
Yükleme çerçevesinin maks kapasitesi	5000 kg
Üç eksenli hücresinin maks. kapasitesi	10 kg/cm ²
Sensörler	
Hücre içi basınç sensörünün kapasitesi	0 - 10 kg/cm ²
Yük hücresi kapasitesi	0 - 2000 kg
LVDT kapasitesi (Düşey/Yatay)	(±5 / ±15) mm
Elektronik Sensör Besleme Voltajı	12 - 24 Volt DC
Kontrol Sistemi	
Deney Programı Arayüzü	MATLAB
Kontrol Kartı	Bilgisayara bağlı AD/DA Çevirici
Örnekleme Hızı	1000 kS/s
Çözünürlük	16 bit
Çıktılar	Yatay ve düşey şekil değiştirmeler, yük büyüklüğü, hücre basıncı



Şekil 4.1. LVDT'den alınan deformasyon verileri



Şekil 4.2. Esneklik modülü deney bulguları

Sonuç

Bu çalışma ile granüler yol malzemelerinin tekrarlı yükler altındaki mekanik özelliklerini (Esneklik modülü ve Poisson oranı) belirlemek amacıyla dinamik bir üç eksenli test cihazı geliştirilmiştir. Geliştirilen cihaz bilgisayar kontrollü olup, yüklemeler geliştirilen program ile kontrol edilmekte ve ölçülen deformasyonlar sürekli kayıt edilmektedir. Deney programı da bu çalışma esnasında ihtiyaçlar doğrultusunda hazırlandığı için, program üzerinde değişiklik yapmak, yeni veriler eklemek mümkün olmaktadır. Oysa yurtdışından satın alınan hazır kontrol yazılımlarında kullanıcı tarafından herhangi bir değişiklik yapmak mümkün değildir.

Geliştirilen deney düzeneğinde yerel imalat olanakları kullanılarak maliyetler oldukça düşürülmüştür. Kullanılan sensörler ithal ürün olması rağmen geliştirilen deney düzeneği yurtdışı kaynaklı eşdeğer deney donanımlarının yaklaşık 1/5 fiyatına imal edilmiştir.

Dinamik üç eksenli deneylerinden elde edilen bulgular, benzer çalışmalar ile karşılaştırıldığında başarı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu sayede ülkemizde analitik üstyapı tasarımı için gerekli olan malzeme özelliklerinin belirlenebileceği ortaya çıkmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, 105M019 No'lu Araştırma Projesini destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

Allen, J.J., Thompson, M.R. 1974. Resilient Response of Granular Materials Subjected to Time-Dependent Lateral Stresses. Transportation Research Record, 510, 1-13.

Anonim, 1986. Guide for Design of Pavement Structure. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D.C., 626 pp.

Anonim, 1996. LTPP Protocol P46-Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils. Long-Term Pavement Performance, Federal Highway Administration, Virginia. 77 pp.

Anonim, 1997. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D.C. 42 pp.

Barksdale, R.D., Alba, J. 1997. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design: Final Report. The National Academic Press, Washington D.C. 464 pp.

Houston, W., Houston, S., Anderson, T. 1993. Stress State Considerations for Resilient Modulus Testing of Pavement Subgrade. Transportation Research Record, 1406, 124-132.

Karashahin, M., Dawson A.R., Holden J.T. 1993. Applicability of Resilient Constitutive Models of Granular Material for Unbound Base Layers. Transportation Research Record, 1406, 89-107.

Karashahin, M., Tığdemir, M. 1998. Türkiye Koşullarında Uygun Bir Esnek Üstyapı Kalınlık Tasarım Metodu Geliştirilmesi için Yeni Bir Yaklaşım. Asfalt'98, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 238-247.

Maher, A., Bennert, T., Gucunski, N., Papp, W.J. 2000. Resilient Modulus Properties of New Jersey Subgrade Soils. FHWA 2000-01 Final Report, New Jersey Department of Transportation, U.S., 136 pp.

- Marr, W. A., Hankour, R., Werden, S. K. 2003. A Fully Automated Computer Controlled Resilient Modulus Testing System. Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437, ASTM International, West Conshohocken PA. 13 pp.
- Menzies, B., Hooker, P., Snelling, K., Sutton, J. 2004. GDS Software-Based Dynamic and Seismic Laboratory Soil Testing Systems. GDS Publication, UK. 8 pp.
- Rada, G., Witzak, M.W. 1981. Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material. Transportation Research Record, 810, 23-33.
- Shaw, P. 1980. Stres-Strain Relationships for Granular Materials Under Repeated Loading. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Nottingham-UK. 199 pp.
- Sweere, G.T.H. 1990. Unbound Granular Bases for Roads. Delft University of Technology, Delft-Netherlands, 431 pp.
- Tığdemir, M., Kardeşahin, M. Kalyoncuoğlu, S.F., 2001. Development of New Low-Cost Indirect Tensile Test Equipment for Bituminous Mixtures. Journal of Testing and Evaluation, 29, 387-392.
- Tutumluer, E., Dawson, A. 2004. Mechanical Laboratory Testing Methods for Compacted Aggregate. TRB-2004 Workshop, Describing Aggregate Behavior for Today's Pavements, Washington D.C. 57 pp.
- Uzan, J. 1985. Characterization of Granular Materials. Transportation Research Record, 1022, 52-59.
- Yılmaz, A., Kardeşahin, M. 2007. Granüler Yol Malzemeleri Üzerinde Uygulanan Dinamik Deney Yöntemleri. 15. Yıl Mühendislik Mimarlık Sempozyumu, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 188-196.