

GRANÜLER YOL TABAKALARININ YERİNDE DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ: DİNAMİK KONİ PENETROMETRE (DCP) TESTİ

Volkan Emre UZ*, Mehmet SALTAN

ÖZET

Ülkemizde granüler üstyapı tabakalarının (taban zemini, alttemel ve temel) sahada kalite kontrol ve değerlendirme süreçleri halen, bu tabaka malzemelerinin yerinde klasik yoğunluk ve su muhtevası ölçümlerine dayanmaktadır. Üstyapı tasarımında ampirik yöntemlerden mekanistik-ampirik yöntemlere geçilmesi ile birlikte granüler yol tabakalarının, kalite kontrol ve değerlendirilmesinde yoğunluk ölçüm yöntemlerinden tabaka dayanım ölçümlerine geçilmesi gerekliliği son yıllarda artan bir araştırma konusu olmuştur. Yoğunluk ve su muhtevası bilgileri granüler tabakaların mühendislik özellikleri hakkında yeterli bilgiyi vermemekte dolayısıyla tasarım ile kalite kontrol arasında kuvvetli bir bağ oluşturulamamaktadır. Dinamik Koni Penetrometre (DCP) testi, taban zemini ve granüler üstyapı tabakalarının yerinde dayanımlarını belirlemede kullanılan tahribatsız, etkili, hızlı ve güvenilir bir test yöntemidir. Bu çalışmada, DCP cihazının özellikleri, testlerin uygulanması ve sonuçlarının değerlendirilmesi ile ilgili bilgilere yer verilmiş ve bu test ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ülkemizde bu konu ile ilgili oldukça az araştırma yapıldığı görülmüştür. DCP gibi yerinde dayanım ölçen test yöntemlerinin ülkemiz kalite kontrol şartnamelerine adaptasyonu, üstyapı tasarım ve bakım onarım mühendislerinin granüler yol tabakalarının mekanik özellikleri hakkında daha fazla bilgi sahibi olmalarını sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: DCP, tahribatsız testler, granüler yol tabakaları

INSITU EVALUATION METHODS OF GRANULAR PAVEMENT LAYERS: DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP) TEST

ABSTRACT

In our country, in-situ quality control/quality assurance (Q_C/Q_A) of granular pavement layers (subgrade, subbase and base) still relies on their density and moisture measurements. With the coming changes from an empirical to mechanistic-empirical pavement design methods, it becomes essential to move towards changing the QC/QA procedures of compacted granular materials from a unit weight-based criterion to a stiffness/strength based criterion. Unit weight criteria unable to provide sufficient information about the engineering properties of granular layers, thus a missing link occurs between the design process and construction quality control. Dynamic Cone Penetrometer (DCP) is a non-destructive, effective, fast and reliable testing method which is used to determine the stiffness/strength of granular pavement layers and subgrade. In this study, information about the DCP test device, implementation and evaluation of the test results are given, and studies are summarized in the literature. It is seen that very limited research has been done in our country on this subject. Adaptation of in-situ stiffness/strength measuring test device such as DCP to quality control/quality assurance specifications of our country will make it possible to provide more information about the mechanical properties of the granular pavement layers for the pavement design and maintenance engineers.

Keywords: DCP, nondestructive tests, granular pavement layers

* Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 66100, Yozgat. Eposta: yemreuz@gmail.com

1. Giriş

Ülkemizde taban zemini ve granüler üstyapı tabakalarının (alttemel ve temel) sahada kalite kontrol ve değerlendirme süreçleri halen, bu tabaka malzemelerinin yerinde klasik yoğunluk ve su muhtevası ölçümlerine dayanmaktadır. Sahada ölçülen bu kuru birim ağırlık değerleri laboratuvar ortamında belirlenen maksimum kuru birim ağırlık ile karşılaştırılmakta ve tabakaların sıklık dereceleri belirlenmektedir. Ülkemizin de içinde bulunduğu birçok gelişmekte olan ülke ve bunların karayolu kurumları üstyapı tabakalarının kalite kontrol şartnamelerinde bu sıklık derecelerine yer vermekte ve laboratuvar testlerinde kullanılan sıkıştırma yöntemine göre sahada elde edilmesi gereken minimum sıklık değerleri bu şartnamelerde tanımlanmaktadır. Granüler yol tabakalarının yerinde yoğunluk ölçümü için kullanılan birçok yöntem olmasına karşın hızlı ölçüm yapabilme yetisi sayesinde nükleer yoğunluk ölçer en çok kullanılan cihazdır. Bu cihazın, operatörü için sağlık riski taşımasının yanı sıra sonuçlarının da her zaman güvenilir olmadığı belirtilmektedir (Oman, 2004; Hossain and Apeagyei, 2010).

Taban zemininin taşıma gücü üstyapı performansını direkt olarak etkileyen ve üstyapı tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde rol oynayan en önemli faktördür. Zeminin ve granüler yol malzemelerinin taşıma gücü Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) veya Esneklik Modülü (M_R) ile ifade edilir. CBR, bir zeminin dikkatle kontrol edilen yoğunluk ve rutubet şartları altında daneler arası kayma direncinin bir ölçüsüdür. Belli boyutları olan bir pistonun özel olarak sıkıştırılarak hazırlanmış numuneye belli bir derinliğe kadar batma için gerekli basıncın, aynı pistonun düzgün bir gradasyonu olan kırmataştan hazırlanmış bir numunede aynı batmayı sağlayan basınca oranı olarak tanımlanan ve yüzde olarak ifade edilen bir değerdir. CBR yönteminin, gerçekte malzemelerin maruz kaldığı, tekrarlı trafik yükleri altındaki malzeme davranışını temsil edememesi nedeniyle, üstyapı malzemelerinin statik yüklemekten ziyade tekrarlı (dinamik) yükler altındaki davranışının tanımlandığı, elastik teorinin bir uygulaması olan, esneklik modülü kavramı geliştirilmiştir. Bu yöntemde malzemelerin doğrudan mukavemeti yerine tekrarlı yüklemeler altındaki elastisite modülü tayin edilmektedir. Granüler üstyapı malzemelerinin esneklik modülleri laboratuvar ve arazi deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bununla birlikte laboratuvar deney yöntemlerinin oldukça karmaşık ve hassas olması, konu ile ilgili derin bilgi ve tecrübeye sahip donanımlı personel ihtiyacı, deney aletlerinin pahalı ve merkezi bir laboratuvar ortamı gerektiriyor olması gibi uygulama zorlukları nedeniyle malzemelerin fiziksel (indeks) özelliklerinden ve/veya alternatif test yöntemlerinden yararlanılarak da esneklik modülünün tahmin edilebilmesi için son yıllarda oldukça fazla sayıda araştırma yapılmış ve ampirik korelasyonlar geliştirilmeye çalışılmıştır.

Üstyapı tasarımında ampirik yöntemlerden mekanistik-ampirik yöntemlere geçilmesi ile birlikte yol tabakalarının, kalite kontrol ve değerlendirilmesinde yoğunluk ölçüm yöntemlerinden tabaka dayanım ölçümlerine geçilmesi gerekliliği son yıllarda artan bir araştırma konusu olmuştur. Zira yoğunluk ve su muhtevası değerleri, mekanistik-ampirik üstyapı tasarımında veya üstyapı değerlendirme ve iyileştirme çalışmalarında kullanılan tabaka mühendislik özellikleri hakkında yeterli bilgiyi vermemekte ve tasarım ile kalite kontrol arasında kuvvetli bir bağ oluşturulamamaktadır (Nazzal, 2003; Gudishala, 2004).

Üstyapı tabakalarının yerinde direkt olarak tabaka (esneklik) modüllerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Zira bu tabaka modülü, kendisinden üstteki tabaka(lara) sağlamış oldukları dayanak ve alt tabaka(lara) iletilmiş oldukları gerilmelerin tahmin edilmesinde kullanılmakta ve tabakaların gerilme şekil değiştirme ilişkileri bu parametreler ile ifade edilmektedir. Yerinde ölçüm yapan cihazların gelişmesiyle birlikte gerek inşaat sırasında gerekse

performans takibi aşamalarında tabaka modüllerinin direkt ölçümü mümkün olabilmektedir. Dinamik yük uygulayabilme ve pratiklik gibi özellikleri sayesinde bu cihazların yakın bir zamanda CBR testi gibi statik yükleme testlerinin yerini almaya başlaması beklenmektedir (Fleming et al., 2000; Asli et al., 2011).

Bir yolun bakım ve iyileştirme çalışmaları mevcut tabaka kalınlıkları ve tabaka dayanımları hakkında fikir sahibi olmayı gerektirir. Bu durum, üstyapıda kalıcı bozulmaların gözlemlendiği durumlarda çok daha fazla öneme sahiptir. Bir üstyapının tabaka kalınlıklarının ve dayanımlarının belirlenmesinin en hızlı ve kolay yolu tasarım ve inşaat kayıtlarını incelemektir. Ancak bu kayıtlar yolun servise açılmasından sonra üstyapıda meydana gelen bozulmalar ve değişimler hakkında bilgi vermemektedir. Bu nedenle mevcut üstyapı koşulları bir takım tahribatlı veya tahribatsız test yöntemleri kullanılarak araştırılmalıdır. Tahribatlı test yöntemlerinde genellikle üstyapıdan uygun aralıklar ile karot numuneler alınır. Bu sayede üstyapı tabaka kalınlıkları ölçülebilir ve malzemeler laboratuvarda test edilerek fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılabilir. Ancak üstyapının mevcut koşullarını değerlendirmek için yapılan tahribatlı test yöntemi pahalı ve zaman alıcı bir yöntemdir. Tahribatsız test yöntemleri ile yapılan değerlendirmeler daha ucuz ve daha çabuk bir değerlendirme yapmaya imkan vermektedir. Ayrıca tahribatlı testlere nazaran daha yakın aralıklar ile testler gerçekleştirilebilir. Tahribatsız test yöntemlerinden birisi de yaygın olarak kullanılan ve etkinliği yapılan birçok çalışma ile kanıtlanmış Dinamik Koni Penetrometre (DCP) testidir. Bu çalışmada, DCP test cihazının özellikleri ve deneylerin yapılışı anlatılmış ve konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmaların özetlendiği bir derleme yapılmıştır.

2. DCP Test Cihazının Özellikleri

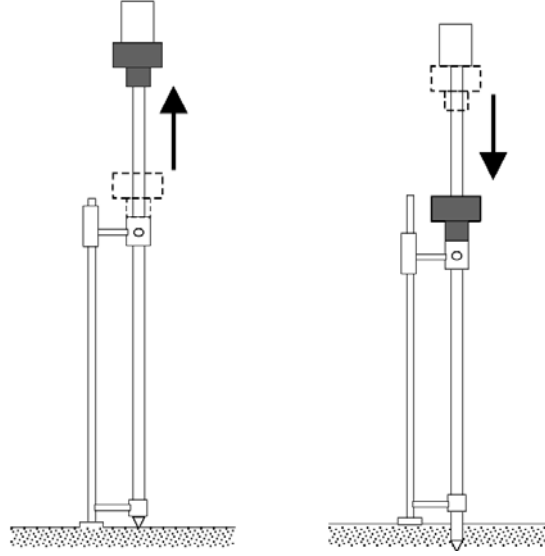
DCP cihazı ilk olarak Güney Afrika'da üstyapıların yerinde dayanımlarının belirlenebilmesi amacıyla geliştirilmiş bir cihazdır (Kleyn, 1975). Daha sonra, Güney Afrika, İngiltere, Avustralya, Yeni Zelanda ve ABD'nin bazı eyaletlerinde taban zemini ve yol üstyapı tabakalarının yerinde dayanımlarının ve tabaka mühendislik özelliklerinin tespiti için kullanılmıştır. DCP, üstyapıların kalite kontrol ve değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan ve etkinliği, yapılan birçok çalışma ile kanıtlanmış tahribatsız bir test yöntemidir (Nazzal, 2003).

DCP, basit çalışma prensibi, ekonomik, az bakım gerektiren, kolay taşınabilen ve sahada tekrarlı ölçümlere imkân sağlayan yapısı itibarıyla oldukça kullanışlı bir cihazdır. Yerinde yapılan CBR testinde, dayanımı belirlenecek üstyapı tabakasının üzerindeki tabakaların kaldırılması gerekmektedir. DCP testinde buna ihtiyaç yoktur ve DCP testi bir kere yapıldığında test edilen derinlik boyunca tüm tabakaların dayanımları belirlenebilir. DCP testinin asfalt veya beton kaplamaların dayanımının belirlenmesinde kullanılması uygun değildir. Bu nedenle, eğer bu tabakalar incelenecek kesimde varsa, uygun bir matkapla bu tabakaların derinlikleri boyunca delinmesi gerekmektedir (Chen et al., 2001).

DCP test cihazı şu elamanlardan oluşmaktadır;

1. 8 kg ağırlığındaki düşen kütle (DCP çekici),
2. Çekicinin 575 mm sabit yükseklikten serbest düşmesine olanak sağlayan üst çubuk,
3. Ucunda 60°'lik konik uç bulunan ve 20 mm çapındaki alt çubuk,
4. Batma derinliklerinin okunacağı cm ve mm ölçeklerine ayrılmış cetvel,
5. Ve tutma aparatı.

DCP test cihazına ait şematik çizim ve çalışma prensibi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. DCP testinin şematik gösterimi ve çalışma prensibi

3. DCP Deneyinin Yapılışı

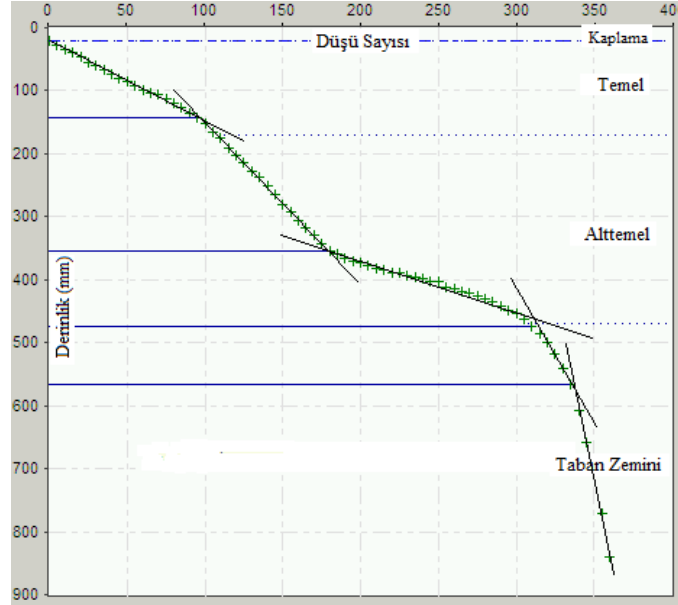
DCP cihazı montajı yapıldıktan sonra dayanım testi yapılacak kesimde (asfalt veya beton kaplama tabakası var ise bu tabakalar uygun bir matkap ile derinlikleri boyunca delinmelidir) ölçüm noktasına yerleştirilir ve ilk cetvel okuması (sıfır okuması) yapılarak kaydedilir. Çekiç, tutma aparatına kadar kaldırılır (575 mm yüksekliğe) ve serbest bırakılır. Bu şekilde bir düşüş yapılmış olur. Uygulanan bu dinamik etki neticesinde konik uç zemine batar. Her düşüş sonrasında veya istenilen düşüş adedinden sonra cetvel okuması yapılarak okumalar kaydedilir. Test, alt çubuk uzunluğu boyunca, yani 1 metre derinliğe kadar olan tabakaları test etmeye imkân verir. Eğer istenilirse ilave çubuklar takılarak daha derindeki tabakalar da test edilebilir. Testler sırasında cihaz dikey pozisyonda tutulmalı ve penetrasyon çubuğunun tabakalara dik olarak girmesi sağlanmalıdır. Konik ucun kaybedilmesine veya cihazın zarar görmesine yol açabileceğinden çekicini yukarıya kaldırılması sırasında tutma aparatına sert bir şekilde vurmasından kaçınılmalıdır. Test sırasında tüm cetvel okumalarının aynı noktadan yapılması sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Test verilerinin kaydedildiği veri föyünde proje (test lokasyonu, istasyon vb.) ve üstyapı (en kesit, malzeme tipi, malzeme sınıfı, gradasyon, yoğunluk, su muhtevası vb.) bilgilerine yer verilmelidir.

4. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

DCP testi yapılarak istenilen derinlikte penetrasyon tamamlandıktan ve her düşüşe karşılık gelen toplam batma derinlikleri kaydedildikten sonra batma indeksinin (BI) belirlenmesi işlemine geçilir. Bunun için düşüş sayısı ile batma derinliğinin değişimini gösteren grafikler çizilir (Şekil 2). Batma indeksi (batma derecesi diye de adlandırılır), çizilen birikmiş batma derinliği ve düşüş sayısı grafiğinde belirli bir derinlikteki doğrunun eğimidir. Başka bir deyişle bir düşüşe karşılık gelen ortalama batma derinliğidir. İlk birkaç düşüşte elde edilen batma miktarları takip eden düşüşlere göre daha yüksektir. Bunun nedeni, yüzeyde ve yüzeye yakın kesimlerde çevre basıncının az olmasıdır. Bu nedenle batma indeksi hesaplanmasında, ilk 2-3 düşüşte elde edilen batma değerlerinin dikkate alınmaması tavsiye edilmektedir. Batma indeksinin hesaplanmasında farklı yöntemler de kullanılmaktadır. Bunlardan birisi de, ilk 3

oturma düşüşünü takip eden ilk ve ikinci beş düşüşte meydana gelen batma derinliklerinin ortalamalarının alınmasıdır (Siekmeier et al., 2009).

DCP testi ile elde edilen batma indeksi (BI) değeri üstyapı tabakalarının dayanımları hakkında bilgi veren en önemli saha verilerindedir. DCP testi sonuçları diğer dayanım ölçen cihazların test sonuçları ile ilişkilendirilerek tabaka modüllerinin tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır. Ayrıca tekrarlanan DCP testleriyle üstyapı tabakalarının sıkışma dereceleri ve üniformluğu belirlenebilir. Buna ilave olarak, çizilen grafiklerde derinlik boyunca batma indeksinin değişiminden yararlanılarak tabaka kalınlıkları belirlenebilir. Bu özellikleri DCP testini, oldukça iyi bir kalite kontrol ve değerlendirme testi yapmaktadır.



Şekil 2. Düşü sayısı ile batma derinliğinin değişimini gösteren örnek bir grafik

DCP testinin avantaj ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

Avantajları;

- Üstyapıyı oluşturan tabakaların dayanımları tek bir testle ayrı ayrı belirlenebilir,
- Çizilen grafiklerde yataya yakın eğimler sağlam tabakaları, daha dik eğimler daha zayıf tabakaları gösterir,
- Çizilen grafikteki eğim değişimleri tabakalar arasındaki geçişi gösterir ve bu şekilde tabaka kalınlıkları belirlenebilir veya doğrulanabilir,
- Üstyapıda oldukça az seviyede tahribat yapar,
- Daha alt seviyelerdeki tabakaların dayanımları üzerindeki tabakaları kaldırmadan belirlenebilir,
- Farklı özelliklerdeki (kırma taş, kum, kil, silt vb.) tabakaların bir seferde test edilmesine imkân verir,
- Zamana veya iklime bağlı değişimlerin gözlemlenmesine imkân verir.
- Güvenilir ve ekonomik bir testtir,
- Korelasyonlardan yararlanılarak, CBR veya tabaka modülü gibi tabaka mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Dezavantajları;

- Büyük kaya dolguların ve asfalt veya beton kaplamaların dayanımlarını belirlemede kullanılamaz,
- Su muhtevası veya yoğunluk ölçümlerinde kullanılamaz, yalnızca dayanımların belirlenmesinde kullanılabilir.

5. DCP Testi ile İlgili Literatürde Yer Alan Çalışmalar

Son yıllarda DCP testi sonuçları, CBR, granüler malzemelerin kesme dayanımı, taban zemini esneklik modülü, tabaka elastisite modülü, tabaka katsayıları ve zemin sınıfları gibi pek çok üstyapı mühendislik özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Buna ilave olarak DCP batma indeksi ile yerinde sıkışma yoğunluğu arasında kabul edilebilir bir ilişki olup olmadığını belirleyebilmek için birçok çalışma yapılmıştır. Seçme granüler malzemeler ile kohezyonlu zeminler arasında oldukça farklı korelasyonlar elde edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde 25 yılı aşkın bir süredir bir araştırma, kalite kontrol ve kalite değerlendirme testi olarak kullanılan bu cihaz ile ilgili literatürde yer alan araştırmalar özetlenmiş ve Tablo 1 ve 2’de DCP test sonuçları ile diğer test yöntemleri arasında geliştirilmiş korelasyonlara yer verilmiştir.

Kleyn (1975), laboratuvarında 2000 örnek üzerine yapmış olduğu DCP ve CBR testleri neticesinde CBR ve DCP testi batma indeksi (BI) değerleri arasında bir korelasyon geliştirmiş ve arazide uygulanan DCP testi ile tabakaların yerinde taşıma güçlerinin belirlenebileceğini belirtmiştir. Sıkışma derecesi sabit tutularak farklı su muhtevalarında gerçekleştirilen CBR ve DCP deneylerinde su muhtevanın değişimiyle test sonuçlarının her iki deneyde de benzer şekilde değiştiği belirtilmiştir.

Harrison (1987), killi zemin, iyi derecelenmiş kum ve çakıl zeminler üzerinde yapmış olduğu çalışmada her bir zemin türü için DCP BI ile CBR arasında logaritmik formda güçlü bir ilişki olduğunu belirlemiş ve bu ilişkinin su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değişiminden etkilenmediğini belirtmiştir. Granüler ve kohezyonlu zeminler için ayrı ayrı olmak üzere, batma indeksi ile CBR arasında korelasyonlar geliştirmiştir.

Livneh (1987), arazi CBR testleri ve DCP batma indeksi arasında bir ilişki kurabilmek için örselenmemiş ve laboratuvar ortamında sıkıştırılmış doymuş ve doymuş olmayan ince taneli zeminler üzerinde DCP ve CBR testleri yapmıştır. Sıkıştırılmış granüler malzemeler farklı yanal basınçlar altında teste tabi tutulmuş ve arazi testleri farklı üstyapı tabakaları ve taban zemini malzemeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ölü toprak basıncı ve sürtünmenin DCP test sonuçlarına etkisinin ihmal edilebilir bir seviyede olduğu belirtilmiştir.

Huntley (1990), İngiltere’nin Herfordshire kentinde taban zemini üzerinde yapılan DCP testi sonuçlarına göre zeminlerin batma dirençlerine dayanan bir zemin sınıflandırma sistemi geliştirmiştir. Taban zeminlerini önce taneli (kum ve çakıllı kum) ve kohezyonlu olarak iki sınıfa ayırmış ve DCP cihazı konik ucunun 100 mm batması için gereken düşü sayılarına bağlı olarak taban zeminlerini çok gevşekten çok sıkıya değişen 5 farklı sıklık seviyesinde sınıflandırmıştır.

Tablo 1. DCP testi kullanarak Granüler zeminler için tavsiye edilen sınıflandırma sistemi (Huntley,1990)

Sınıflandırma	100 mm batma için gerekli düşü sayısı (n)	
	Kum	Kum - Çakıl
Çok Gevşek	<1	<3
Gevşek	2-3	3-7
Orta Yoğun	4-10	8-20
Yoğun	11-17	21-33
Çok Yoğun	>17	>33

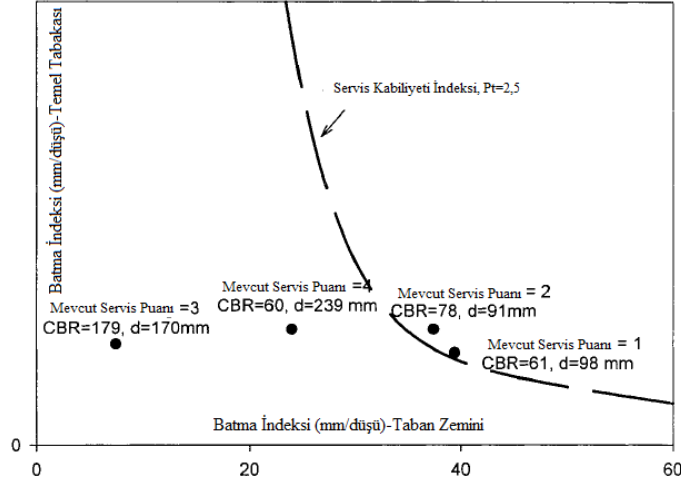
Tablo 2. DCP testi kullanarak kohezyonlu zeminler için tavsiye edilen sınıflandırma sistemi (Huntley,1990)

Sınıflandırma	100 mm batma için gerekli düşü sayısı (n)
Çok Yumuşak	<1
Yumuşak	1-2
Sıkı	3-4
Sert	5-8
Çok Sert	>8

Livneh (1991), yapmış olduğu çalışmada DCP testinden elde edilen sonuçların arazi CBR testi sonuçları ile iyi bir ilişkiye sahip olduğunu belirlemiş ve DCP testleriyle belirlenen tabaka kalınlıklarının alınan karotlar ile belirlenen tabaka kalınlıkları ile örtüştüğünü belirtmiştir. Ayrıca DCP testinin üstyapı değerlendirilmesinde kullanılabilecek alternatif ve güvenilir bir test yöntemi olduğuna vurgu yapılmıştır.

Ese et al. (1995), Norveç'te DCP testinin üstyapı iyileştirme ve takviye tabakası tasarım çalışmalarında kullanılabilirliği üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Granüler temel tabakası dayanımı ve DCP batma indeksi arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Granüler temel tabakası batma indeksi değeri için 2,6 mm/düşü değerini bir sınır değer olarak belirlemişler ve bu değer altındaki değerler için granüler temel tabakasının stabilite açısından iyi bir performans sergilediğini belirtmişlerdir.

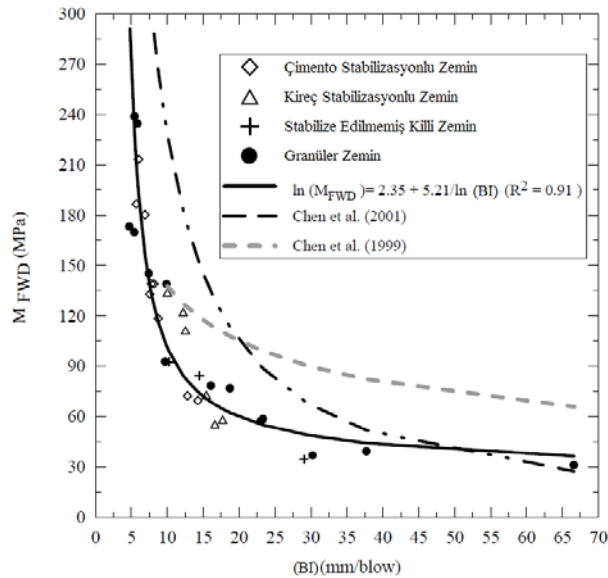
Gabr et al. (2000), üstyapı bozulma derecelerinin DCP testi ile belirlenebilme potansiyeli üzerine bir araştırma yapmışlardır. Taban zemini ve granüler temel tabakası batma indekslerini kullanarak üstyapı bozulma seviyelerini (Servis kabiliyeti indeksi) tahmin eden bir model kurmayı amaçlamışlardır. Mevcut servis indeksi çok iyi ile kötü (4 ila 1) arasında değişen 4 farklı gözlem yolunda DCP ve CBR testleri yapılmış ayrıca bu yollardan alınan granüler temel tabakası malzemeleri üzerlerinde, laboratuvar ortamında CBR kalıpları içerisinde farklı sıklık derecelerinde ve su muhtevalarında sıkıştırılarak, sırasıyla CBR ve DCP testleri yapılmıştır. Geliştirilen model 4 farklı test kesiminden elde edilen saha verileriyle doğrulanmaya çalışılmıştır. İyi durumdaki (Servis kabiliyeti indeksi-Pt- > 2,5) test kesimlerinde temel tabakası kalınlığının 152 mm'den fazla olması durumunda temel tabakası batma indeksi değeri 4 mm/düşüden, taban zemini batma indeksi değeri ise 25 mm/düşüden küçük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Temel tabakası ve Taban zemini batma indeksinin fonksiyonu olarak mevcut servis indeksinin değişimi (Gabr et al., 2000)

Chen et al. (2001), asfalt tabaka kalınlığının 75 mm' den az olduğu veya sağlam kaya yatağının yüzeye yakın oluşu üstyapılarda FWD testinden yararlanarak geri hesaplanmış tabaka modüllerinin doğru sonuçlar vermediğini ve bu gibi durumlarda DCP testinden yararlanılmasının faydalı olabileceğini belirtmişlerdir.

Nazzal (2003), üstyapı kalite kontrol ve değerlendirmesinde DCP, LWD (Leight Weight Deflectometer) ve Geogauge gibi tahribatsız testlerin yol tabakalarının dayanımlarının belirlenmesinde kullanılmasının avantajlarına vurgu yapmıştır. Bu testlerden elde edilen sonuçların daha güvenilir ve anlaşılabilir olabilmesi için, arazi ve laboratuvar ortamında gerçekleştirdiği test sonuçlarını FWD, plaka yükleme testi ve CBR testi gibi standart test sonuçları ile karşılaştırmış ve istatistiksel analizler yaparak bu test cihazları sonuçları ile standart testlerin sonuçları arasında ilişkiler kurmaya çalışmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. M_{FWD} ve DCP-BI ilişkisi (Nazzal, 2003)

Oman (2004), Minnesota eyaletinde granüler temel tabakası inşaatlarının kalite kontrolünde yoğunluk ölçüm metodu kullanılmasının dezavantajlarına vurgu yapmış ve kalite kontrol testi

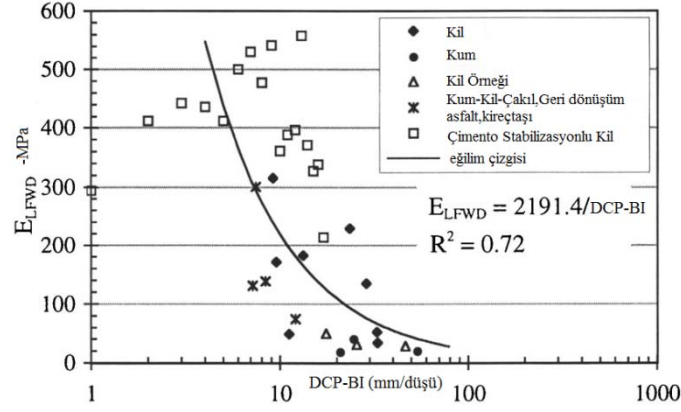
olarak DCP testinin kullanılmasının sağlayacağı avantajları belirtmiştir. Araştırmacı, eyalet genelinde yaygın olarak kullanılan DCP testinin tabaka dayanımı hakkında önemli bilgiler vermesine karşın, şartname limitleri konusunda eksikliğe vurgu yapmıştır. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla yapmış olduğu çalışmada, DCP testi sonuçlarına etki eden en önemli parametrelerin temel tabakası gradasyonu ve su muhtevası olduğunu belirtmiştir. Farklı gradasyonlarda ve su muhtevalarındaki temel tabakaları üzerinde yapılan test sonuçlarına göre temel tabakasının gradasyon numarası (malzemelerin tane boyutu dağılımına göre belirlenen bir gösterge) ve su muhtevasına bağlı olarak izin verilmesi gereken maksimum batma indeksi değerlerini belirlemiştir.

Gudishala (2004), çalışmasında temel tabakası ve taban zemini esneklik modüllerinin yerinde yapılan tahribatsız testler ile tahmin edilebilmesi için bir takım modeller kurmaya çalışmıştır. Saha çalışmasında tahribatsız test yöntemleri olarak Geogauge, LWD ve DCP test cihazlarını kullanmıştır. Saha çalışmasından elde ettiği sonuçları laboratuvarında yaptığı dinamik üç eksenli deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Standart dinamik üç eksenli test yönteminde malzemenin esneklik modülünün bulunabilmesi için 15 farklı gerilme seviyesinde malzemenin test edilmesi gerekirken, araştırmacı tipik bir esnek üstyapıda standart dingil yükü altında temel ve taban zemini üzerinde oluşabilecek düşey ve yanal gerilmeyi tahmin ederek, testleri tek bir gerilme seviyesinde gerçekleştirmiştir. Çalışmasında iki farklı taban zemini (kohezyonlu) ve üç farklı granüler temel tabakası malzemesi kullanmıştır. Testleri, malzemelerin farklı su muhtevası ve farklı kuru birim hacim ağırlıklarında gerçekleştirmiş ve sonuçları istatistiksel analize tabi tutarak tabakaların elastisite modülünü tahribatsız testler ile tahmin eden modeller kurmuştur.

Tablo 3. granüler malzemeler için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin değer kümeleri (Gudishala, 2004).

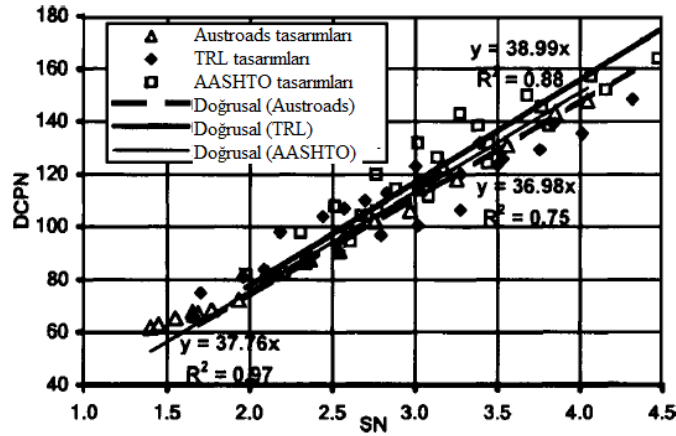
Değişken Tipi	Açıklama	Değer Kümesi
Bağımlı	Esneklik Modülü- M_R -MPa	143-298
Bağımsız	DCP Batma İndeksi-mm/düşü	8,8-66,67
	0,075 mm elek altı malzeme yüzdesi- $P_{0,075}$ -%	0,2-13
	4,75 mm elek altı malzeme yüzdesi- $P_{4,75}$ -%	50-99
	Kuru birim hacim ağırlık- γ_d -KN/m ³	15,8-21,1
	Su muhtevası- ω -%	2-13,3

Alshibli et al. (2005), çalışmalarında taban zemini, temel tabakası ve dolguların kalite kontrol ve değerlendirilmesinde Geogauge ve LWD gibi tahribatsız test cihazlarının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı malzemelerden elde edilmiş sıkışmış tabakaları laboratuvar ortamında testlere tabi tutmuşlardır. Çalışmalarında killi silt, siltli kil, çimento stabilizasyonlu kil, kum, çakıl, geri dönüşüm asfalt kaplama ve kireçtaşı agregaları kullanmışlardır. Hazırladıkları numuneler üzerinde Geogauge, LWD, plaka yükleme ve DCP testleri yapmışlardır. Geogauge testinden elde edilen elastik modülü ve LWD testinden geri hesaplanan dinamik modülü, plaka yükleme ve DCP testlerinden elde edilen elastisite modül değerleri ile korale etmişlerdir.



Şekil 5. DCP-BI ile LWD modülü arasındaki ilişki (Alshibli et al., 2005)

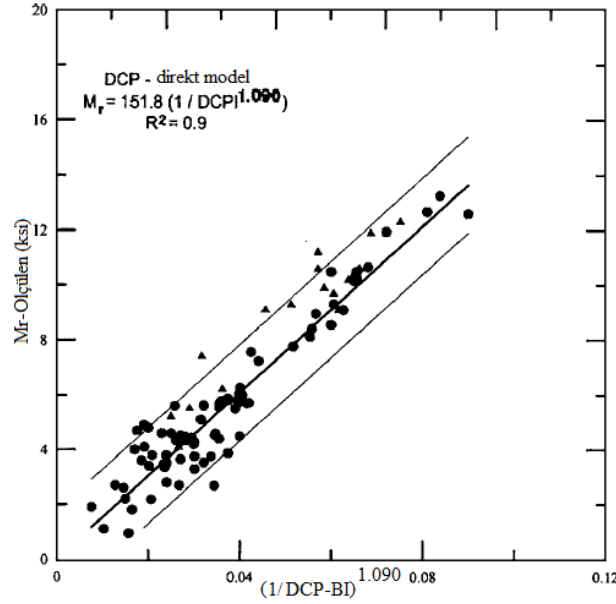
Roy (2007), granüler tabaka ve taban zemini mühendislik özelliklerinin sahada DCP testi ile belirlenmesinin basit ancak etkili bir yöntem olduğunu vurgulamıştır. Yazar, DCP testinden elde edilen sonuçların genellikle tabakaların taşıma gücü (CBR) ve esneklik modülünü (MR) tahmin etmekte kullanıldığını belirtmiştir. DCP batma indeksi değerlerinin bu şekilde dolaylı tasarım parametrelerine ulaşılmasında kullanılması yerine AASHTO 1993 tasarım yönteminde kullanılan yapısal sayının (Structural Number, SN) tahmin edilmesinde kullanılabileceğini savunmuştur. SN, tabaka katsayıları ve tabaka kalınlıklarını dikkate alarak hesaplanan ve üstyapının dayanımını ifade eden bir göstergedir. DCP testinin asfalt kaplamalarda kullanılmamasından yola çıkarak farklı trafik hacmi değerleri için sathi kaplamalı esnek üstyapı tasarımları yapmış ve literatürde kullanılan DCP BI - CBR ve MR tahmin modellerinden yararlanarak üstyapıların yapısal sayılarını DCP testi batma indeksi değerlerinden tahmin eden bir bağıntı geliştirmiştir.



Şekil 6. Sathi Kaplamalı 24 üstyapı konfigürasyonu için SN-DCPN ilişkisi (Roy, 2007).

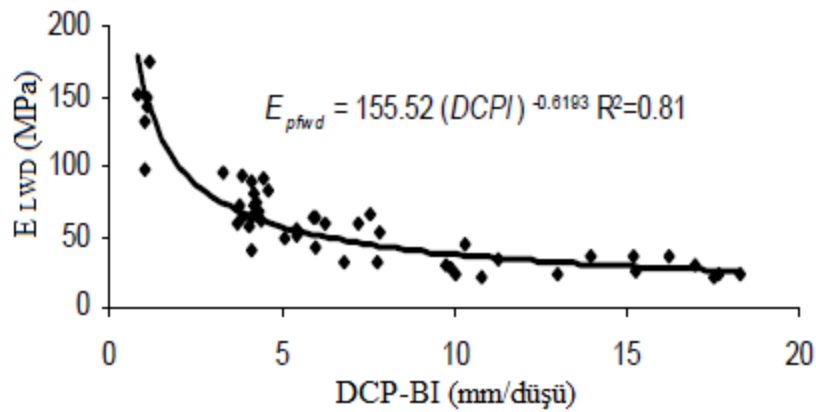
Mohammad et al. (2007), kohezyonlu taban zeminlerin esneklik modülünü DCP test sonuçlarından tahmin edebilecek bir model geliştirmek için saha ve laboratuvar ortamında çalışmalar yapmışlardır. Modelin geliştirilebilmesi için 4 farklı zemin sınıfına (A-4, A-6, A-7-5, A-7-6) ait kohezyonlu zeminleri kullanmışlardır. DCP testlerinin yapıldığı kesimlerden aldıkları örselenmiş ve örselenmemiş zemin örneklerini laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyine tabi tutarak zeminlerin esneklik modülü değerlerini belirlemişlerdir. Laboratuvarında elde edilen esneklik modülü değerlerini sahadan elde edilen DCP BI değerleri ile ilişkilendirilerek kohezyonlu taban zeminlerinin esneklik modülünü DCP test sonuçlarından tahmin edebilen iki model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modellerden birincisi taban zemini

esneklik modülünü yalnızca DCP testi batma indeksi değerini kullanarak tahmin ederken, ikinci model hem batma indeksi değerini hem de zeminlerin kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası değerlerini kullanmaktadır. Geliştirilen her iki modelin de yüksek korelasyona sahip olduğu vurgulanmıştır.



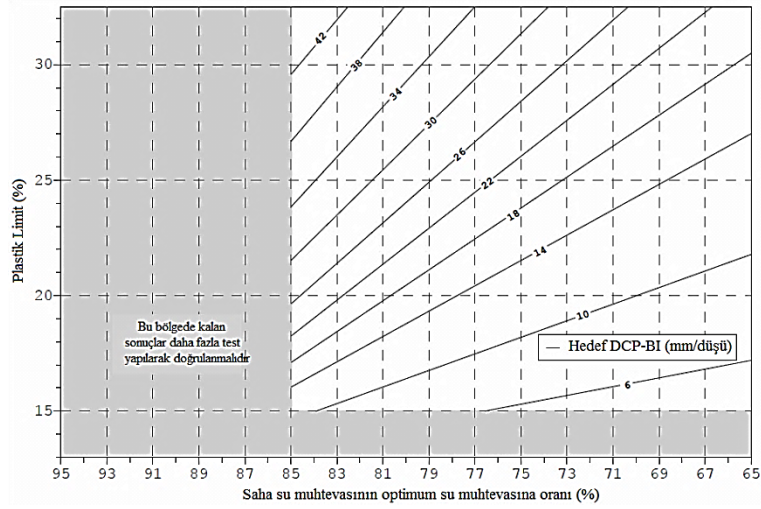
Şekil 7. Mr - DCP-BI direkt tahmin modeli (Mohammad et al., 2007).

Nageshwar et al. (2008), üstyapı performansının büyük ölçüde taban zemini dayanımına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yerinde taban zemini dayanımının belirlenmesinde farklı yöntemlerin bulunduğunu belirten yazarlar, son yıllarda LWD testi ile taban zemini dayanımının belirlenmesinin popülerite kazandığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle bu yöntemle belirlenen taban zemini elastisite modülü değerlerinin CBR ve DCP gibi diğer test yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmesine ihtiyaç duyulduğunu vurgulamışlardır. Hindistan'ın Karnataka eyaletinin değişik bölgelerindeki taban zeminleri üzerinde yaptıkları DCP, CBR ve LWD testlerinden elde ettikleri sonuçları regresyon analizine tabi tutmuşlar, LWD-CBR ve LWD-DCP BI arasındaki ilişkileri tahmin eden modeller kurmuşlardır. Elde ettikleri modellerin sonuçlarını literatürde yer alan diğer modeller ile karşılaştırmışlar ve elde ettikleri modellerin yüksek korelasyon katsayılarına (R^2) sahip olduğunu belirtmişlerdir.



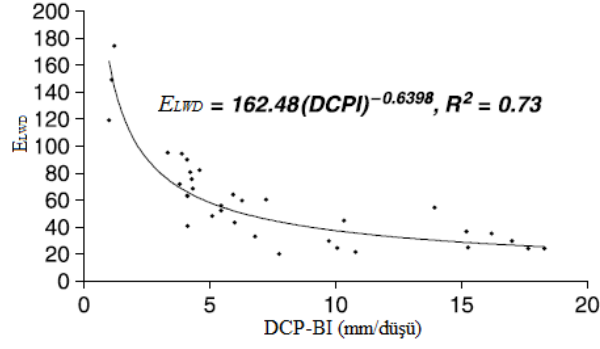
Şekil 8. LWD modülü ile DCP-BI arasındaki ilişki (Nageshwar et al., 2008).

Siekmeier et al. (2009), Minnesota eyaletinde granüler tabakalar ve taban zemini üzerinde kalite kontrol testi olarak kullanılan DCP ve LWD testlerinin sonuçlarına, malzemelerin su muhtevası ve gradasyon numaralarının nasıl etki ettiğinin daha iyi anlaşılabilmesi için laboratuvar ortamında testler yapmışlardır. Testlerde üç farklı tane boyutu dağılımına sahip granüler temel malzemeleri ve farklı mühendislik özelliklere sahip 4 farklı taban zemini kullanmışlardır. Seçilen malzemeler farklı su muhtevasında (optimum, optimumun üzeri ve altı) sıkıştırılarak üzerlerinde DCP ve LWD testleri yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar neticesinde, tabakaların su muhtevası ve gradasyon numaralarının (GN) test sonuçlarına etki ettiğini belirlemişlerdir. Kalite kontrolü yapılacak tabakaların GN ve mevcut su muhtevası değerlerine göre DCP testinden elde edilen maksimum batma indeksi değerlerinin ve LWD testinden elde edilen minimum elastisite modüllerinin ne olması gerektiği, granüler tabakalar ve taban zemini için ayrı ayrı olmak üzere, çalışmanın sonuçlar kısmında verilmiştir.



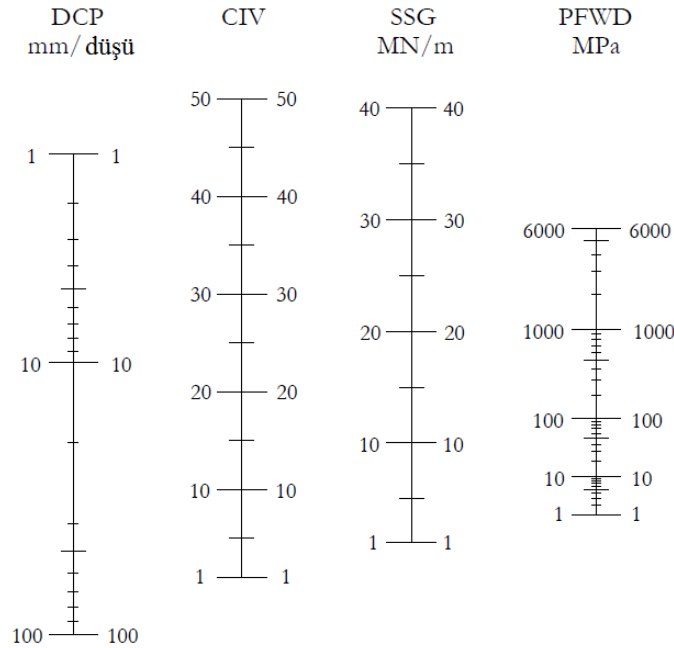
Şekil 9. İnce taneli zeminler için su muhtevası ve plastik limit değerlerine göre elde edilmesi gereken minimum batma indeksi değerleri (Siekmeier et al., 2009)

Varghese et al. (2009), Hindistan'daki killi taban zemini indeks özellikleri (tane boyutu dağılımı, kuru birim ağırlık, su muhtevası ve boşluk oranı) ile DCP-BI arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. İki farklı bölgeden alınan killi, siltli ve bunların 3 farklı (%25, 50 ve 75) oranda karışımından elde edilen zemin numuneleri özgül ağırlık, Atterberg limitleri, tane boyutu dağılımı, standart Proktor testlerine tabi tutulmuştur. Bir silindirik kalıp (450x450 mm) içerisinde 3 farklı su muhtevası (ω_{opt} , $\omega_{opt} - 3$, $\omega_{opt} + 3$) ve maksimum kuru birim ağırlık değerlerinde hazırlanan numunelere DCP testi uygulanmıştır. Testlerden elde edilen batma indeksi değerleri zeminlerin kuru birim ağırlık, su muhtevası, boşluk oranı ve kumçakıl miktarları ile ilişkilendirilmiştir. Sonuçta, ince malzeme miktarındaki artışın maksimum kuru birim ağırlık değerinin azalmasına ve optimum su muhtevası ile DCP batma indeksi değerlerinde artmaya neden olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 10. DCP-BI ve E_{LWD} arasındaki ilişki (Varghese et al., 2009)

Thompson and Guthrie (2009), taban zemini ve granüler üstyapı tabakalarının dayanımlarını belirlemede kullanılan dinamik koni penetrometre, Clegg zemin test çekici (Clegg impatc soil tester), zemin dayanım ölçer (soil stiffness gauge) ve LWD cihazlarının sonuçları arasında sayısal bağlantıları gösteren bir çizelge (nomograph) oluşturabilmek için çalışma yapmışlardır. Bu amaçla, Birleşik Devletlerin farklı eyaletlerinde gerçekleştirilmiş ölçümlerden elde edilmiş verileri iki yönlü istatistiksel analize tabi tutarak bir çizelge geliştirmişlerdir. Kullanılan bu veriler, 41 farklı test kesiminde taban zemini, alttemel ve temel tabakası gibi farklı tabakalarda ve 15 farklı malzeme üzerinde yapılan testlerin sonuçlarını içermektedir. Geliştirilen bu çizelge (Şekil 11) sayesinde üstyapı mühendislerine, farklı çalışma prensiplerine sahip bu test cihazlarından elde edilen dayanım parametrelerini karşılaştırma imkanı sağlandığı vurgulanmıştır.

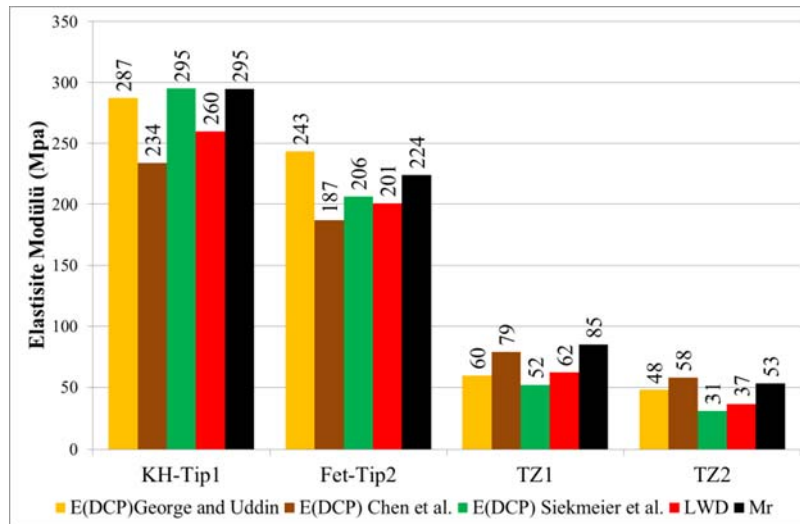


Şekil 11. Dayanım ölçen farklı testlerden elde edilen sonuçların ilişkileri (Thompson and Guthrie, 2009).

Boutet et al. (2011), Quebec eyaletinde karşılaşılan farklı zeminlerin dayanım ve esneklik özelliklerini belirleyebilmek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarını 5 iri taneli (SP, GP, SM, SG), 10 ince taneli ve Laval Üniversitesinde inşa edilen test yolunda kullanılan 4 taban zemini malzemesi üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Her bir zeminin mekanik (DCP PI, LWD,

vane tester) ve indeks özellikleri (tane boyutu dağılımı, Plastisite İndeksi, yoğunluk su muhtevası ilişkileri) belirlenmiştir. 1,2 m çap ve 1,3 m yükseklikteki bir varil içerisinde hazırlanan numuneler 4 farklı koşulda testlere tabi tutulmuştur. Bu koşullar gevşek-doygun, gevşek-drenajlı, sıkı-doygun ve sıkı-drenajlı koşullardır. Doymun zemin hazırlamak için numune varil içerisindeki su seviyesi yüzeyden 75 mm altta olacak şekilde 24 saat süre ile kür edilmiştir. Varilin altında drenaj tabakası olarak 0,2 m kalınlığında geotekstil ile kaplanmış temiz çakıl ve su seviyesini ölçmek için piezometre kullanılmıştır. Malzemeler 15 veya 20 cm'lik tabakalar halinde 10 cm çapında elektrikli bir çekiç ile sıkıştırılmıştır. LWD testleri 300 mm çaplı yükleme plağı kullanılarak 30, 50, 70 ve 100 kPa gerilme seviyelerinde yapılmıştır. Hazırlanan zeminler önce doymun halde sonra drenajlı halde test edilmiştir. İnce taneli zeminler için bağımlı değişken LWD gerihasaplanmış modül ve drenajsız kesme dayanımı, bağımsız değişkenler ise DCP BI, w , γ_k , γ_n , LL, PL, PI ve No200 elekten geçen malzeme miktarı olarak belirlenmiştir. 200-600 mm derinliğe karşılık gelen DCP BI ve 50 kPa gerilme seviyesinde gerçekleştirilen LWD testi verileri ile geri hesaplanan modül zeminin indeks özellikleri kullanılarak ve kullanılmadan ilişkilendirilmiştir. Zemin indeks özelliklerinin de dikkate alındığı bağıntılar oldukça yüksek korelasyona sahiptir.

Uz (2012), iki farklı taban zemini, temel gradasyonu ve temel tabakası kalınlığı kullanarak laboratuvar ortamında 1x1,4 m ebatlarında ve 0,75 m derinliğindeki çelik kalıplar içerisinde hazırladığı temsili üstyapılar üzerinde, hareketli tekerlek yükü uygulayan bir simülatör ile, kalıcı deformasyon testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini tanımlamak için laboratuvar ortamında deneyler yapılmıştır. Taban zemini ve temel malzemelerinin esneklik modülleri Dinamik Üç Eksenli (DÜE) test cihazı ile gerçekleştirilen esneklik modülü deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca temsili üstyapılar üzerinde DCP ve LWD tahribatsız testleri yapılarak malzemelerin yerinde esneklik modülleri belirlenmiştir. DCP-BI değerlerinden malzemelerin esneklik modüllerini hesaplamak için literatürde yer alan mevcut DCP batma indeksi - esneklik modülü modellerinden yararlanılmıştır. Çalışmada, kullanılan farklı taban zemini (TZ1ve2) ve temel (KH-Tip1 ve Fet-Tip2) malzemelerinin bu üç farklı deney yönteminden elde edilen esneklik modülü değerleri karşılaştırmalı olarak grafikler halinde verilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. DCP, LWD ve esneklik modülü deney sonuçlarının karşılaştırması (Uz, 2012)

6. DCP Testinin Sonuçlarına Etki Eden Parametreler

Yapılan çalışmalar incelendiğinde DCP test sonuçlarına zeminin türü, indeks özellikleri, su muhtevası, sıklık durumu ve tane boyutu dağılımı gibi birçok parametrenin etki ettiği açıkça görülmektedir. Literatürde yer alan DCP batma indeksi – Esneklik modülü tahmin modellerinin bazılarında bu parametrelere yer verildiği bazılarında ise DCP-BI esneklik modülü ile direkt olarak ilişkilendirildiği görülmektedir. Aynı zemin koşullarında gerçekleştirilen DCP ve CBR testlerinde DCP BI ile CBR arasında logaritmik formda güçlü bir ilişki olduğu belirtilmiş ve bu ilişkinin su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değişiminden etkilenmediğini belirtmiştir. Genellikle ince taneli ve granüler zeminler için ayrı ayrı modeller geliştirilmiş ve literatür araştırmalarında karşılaşılan modeller Tablo 4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 4. DCP batma indeksi ile elastisite/esneklik modülü arasında elde edilmiş korelasyonlar

Yazar	İlişki	Açıklama
De Beer (1990)	$\log(E_s) = 3,05 - 1,07 \log(BI)$ veya $E_s = 1176(BI)^{-1,082}$	E_s : Taban zemini elastisite modülü (MPa), BI : Batma indeksi (mm/düşü)
Hassan (1996)	$M_R = 7013,065 - 2040,783 \ln(BI)$	M_R : Optimum su muhtevasındaki ince taneli zeminler için esneklik modülü (psi) BI : inç/düşü
Chai and Roslie (1998)	$E_{(back)} = 2224(BI)^{-0,996}$ $E = 17,6(269/B I)^{0,64}$	$E_{(back)}$: FWD testi verilerinden geri hesaplanmış taban zemini elastisite modülü
Chen et al. (1999)	$M_{FWD} = 338,5(BI)^{-0,38}$	M_{FWD} : $10 < BI < 60$ olan zeminler için FWD testi verilerinden geri hesaplanmış taban zemini esneklik modülü (Mpa)
Jianzhou et al. (1999)	$E_{(back)} = 338(BI)^{-0,39}$	$E_{(back)}$: FWD testi verilerinden geri hesaplanmış taban zemini elastisite modülü
Gerorge and Uddin (2000)	$M_R = 532,1(BI)^{-0,492}$ $M_R = 235,3(BI)^{-0,475}$	İnce taneli zeminler Granüler malzemeler
George and Uddin (2000)	$M_R = 27,86(BI)^{-0,114} (\gamma_r^{7,82} + (LL/\omega_c)^{1,925})$ $M_R = 90,68(BI/\log C_u)^{-0,305} (\omega_r^{-0,935} + \gamma_r^{0,674})$	M_R : İnce taneli zeminler için Esneklik Modülü (Mpa) BI: Batma İndeksi (mm/düşü) LL: Likit Limit ω_r : W/W_{opt} γ_r : γ_k/γ_{kmax} Granüler malzemeler için; M_R : Esneklik Modülü (Mpa) C_u : Uniformluluk katsayısı
Pandey et al. (2003)	$M_R = 357,87(BI)^{-0,6445}$	M_R = FWD testinden elde edilen taban zemini esneklik modülü (Mpa)
Nazzal (2003)	$\ln(FWD) = 2,35 + 5,21/\ln(BI)$	[4,81 < BI < 66,67]
Gudishala (2004)	$M_R = 1100[BI^{-0,44}/\omega] + 2,39\gamma_d$ $M_R = 415,4(BI)^{-0,25}$	Kohezyonlu malzemeler Granüler malzemeler
Alshibli et al. (2005)	$E_{LWD} = 2191,4/(BI)$	E_{LWD} : LWD verilerinden geri hesaplanmış tabaka elastisite modülü (Mpa)
Lavoie (2005)	$M_R = 348,3(BI)^{-0,64}$	M_R : Taban zemini elastisite modülü (Mpa)
Chen et al. (2005)	$E_s = 537,8(BI)^{-0,664}$	E_s : Tabaka elastisite modülü (Mpa)
Mohammad et al. (2007)	$M_R = 151,8/(BI)^{1,096}$ $M_R = 165,5(1/(BI)^{1,147}) + 0,0966(\gamma_d/\omega)$	M_R : Taban zemini esneklik modülü (MPa) γ_d : kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³) ω : su muhtevası (%)
Nazzal et al. (2007)	$E_{LWD} = 5301,54/(8,31 + BI^{1,44})$	E_{LWD} : LWD verilerinden geri hesaplanmış tabaka elastisite modülü (MPa)
Nageshwar et al. (2008)	$E_{LWD} = 155,52(BI)^{-0,6193}$	E_{LWD} : LWD verilerinden geri hesaplanmış tabaka elastisite modülü (MPa)
Siekmeier et al. (2009)	$E_{BI} = 10^{3,04758 - [1,06166 \log(BI)]}$	E_{BI} : Batma indeksi değerlerine göre tabaka elastisite modülü (MPa)

Tablo 5. DCP batma indeksi ve CBR arasında geliştirilmiş ilişkiler

Yazar	İlişki	Saha/Lab. Çalışması	Test Edilen Malzemeler
Kylen (1975)	$\log CBR = 2,62 - 1,27 \log BI$	Lab.	Bilinmiyor
Smith and Pratt (1983)	$\log CBR = 2,555 - 1,145 \log BI$	Lab.	Taban Zemini
Harison (1987)	$\log CBR = 2,56 - 1,16 \log BI$ [PI>10 (mm/düşü)]	Lab.	Kohezyonlu
Harison (1987)	$\log CBR = 2,70 - 1,12 \log BI$ [PI<10 (mm/düşü)]	Lab.	Granüler
Ese et al. (1994)	$\log CBR = 2,44 - 1,07 \log BI$	Saha/Lab.	Granüler
NCDOT (1998)	$\log CBR = 2,60 - 1,07 \log BI$	Saha/Lab.	Granüler ve Kohezyonlu
Coonse (1999)	$\log CBR = 2,53 - 1,14 \log BI$	Lab.	Taban Zemini
Gabr et al. (2000)	$\log CBR = 1,40 - 0,55 \log BI$	Saha/Lab.	Granüler Temel
Webster et al.(1992); Livneh (1995); Siekmeier et al. (2000); Chen et al. (2001)	$\log CBR = 2,465 - 1,12 (\log BI)$ veya $CBR = 292/BI^{1,12}$	Saha/Lab.	Granüler ve Kohezyonlu
Nazzal (2003)	$CBR = 2559,44/(7,35 + BI^{1,84})+1,04$ [6,31<BI<66,67]	Saha/Lab.	Kohezyonlu ve Granüler Zeminler

CBR = Kaliforniya Taşıma Oranı (%) ; BI = Batma İndeksi (mm/düşü)

7. Sonuçlar

Granüler yol tabakalarının yerinde kalite kontrolünün hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılması son derece önemlidir. Mekanistik-ampirik tasarım yöntemlerinde dayanım parametreleri (esneklik modülü) ile ifade edilen taban zemini ve üst yapı tabakalarının kalite kontrolünde aranması gereken kriter yine bu dayanım değerlerinin sağlanıp sağlanmadığı olmalıdır. Dolayısıyla klasik yoğunluk ve su muhtevası ölçümlerine dayanan kalite kontrol şartnamelerinin, yerinde dayanım ölçen hızlı ve güvenilir test yöntemlerine de yer vererek, güncellenmesi tasarım ile kalite kontrol arasında kuvvetli bir bağ oluşmasını sağlayacaktır. Ayrıca bu durum bakım onarım çalışmalarının planlandığı mevcut üst yapı tabakalarının değerlendirme süreçlerinde avantaj olacaktır. Bu çalışmada, yerinde dayanım ölçen test yöntemlerinden DCP cihazının özellikleri, testlerin uygulanması ve sonuçlarının değerlendirilmesi ile ilgili bilgilere yer verilmiş ve bu test ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. DCP batma indeksi değerlerinden granüler yol tabakalarının CBR ve esneklik modülü değerlerini tahmin etmek için geliştirilen oldukça fazla sayıda model olduğu görülmektedir. Geliştirilen bu modellerin farklı eğilimlere sahip olmasının nedeni model kurmada kullanılan malzemelerin farklılık (zemin cinsi, tane boyutu dağılımı gibi) göstermesidir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ülkemizde bu konu ile ilgili oldukça az araştırma yapıldığı görülmektedir. Ülkemizde granüler yol tabakası inşaatında kullanılan potansiyel malzemeler ve karşılaşılan ortalama taban zemini türlerini de içine alacak kapsamlı bir çalışmanın yapılması ve elde edilecek sonuçlara göre kalite kontrol şartnamelerine DCP test yönteminin adaptasyonu ülkemiz ekonomisine büyük katkı sağlayacaktır.

8. Kaynaklar

- Alshibli, K.A., Abu-Farsakh M., Seyman, E. (2005). Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 560-569.
- Apeageyi, A.K., Hossain, M.S. (2010). Stiffness-Based Evaluation of Base and Subgrade Quality Using Three Portable Devices. 88th Transportation Research Board Annual Meeting, 10-1721, 19p., Washington, DC.
- Asli, C., Feng, Z.Q., Porcher, G., Rincen, J.J. (2011). Back-calculation of elastic modulus of soil and subgrade from portable falling weight deflectometer measurements. *Engineering Structures*, 34, 1-7.
- Boutet, M., Dore, G., Bilodeau, J.P., Pierre, P. (2011). Development of models for the interpretation of the dynamic cone penetrometer data. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(3), 201-214.
- Chen, D.H., Wang, J.N., Bilyeu, J. (2001). Application of dynamic cone penetrometer in evaluation of base and subgrade layers. *Transportation Research Record*, 1764, 1-10.
- Chen, J., Hossain M., Latorella T.M. (1999). Use of Falling Weight Deflectometer and Dynamic Cone Penetrometer in Pavement Evaluation. *Transportation Research Record*, 1655, 145-151.
- Coonse, J. (1999). 'Estimating California bearing ratio of cohesive piedmont residual soil using the Scala dynamic cone penetrometre. North Carolina State University, Master's thesis, Raleigh, N.C.
- Davich, P., Camargo, F., Larsen, B., Roberson, R., Siekmeier, J. (2006). Validation of DCP and LWD Moisture Specifications for Granular Materials. Minnesota Department of Transportation, MN/RC-2006-20, St. Paul.
- De Beer, M. (1990). Use of dynamic cone penetrometer in the design of road structures. *Geotechniques in African Environment*. Rotterdam: Balkema, 167-176.
- Ese, D., Myre, J., Noss, P.M., Vaernes, E. (1994). The use of dynamic cone penetrometer (DCP) for road strengthening design in Norway. *International Conference on Bearing Capacity of Road and Airfield*, 3-22.
- Fleming, P.R., Frost, M.W., Rogers, C.D.F. (2000). Comparison of Devices for Measuring Stiffness In Situ. 5th International Conference on Unbound Aggregate In Roads, Nottingham.
- Gabr, M.A., Hopkins, K., Coonse, J., Hearne, T. (2000). DCP Criteria for Performance Evaluation of Pavement Layers. *Journal of Performance and Constructed Facilities*, 14(4), 141-148.
- George, K.P., Uddin, W., 2000. Subgrade Characterization for Highway Pavement Design. Mississippi Department of Transportation, FHWA/MS-DOT-RD-00-131, Mississippi, 261p.
- George, V., Nageshwar R., Shivashankar R. (2009). Effect of Soil Parameters on Dynamic Cone Penetration Indices of Laterite Sub-grade Soils from India. *Geotech Geol Eng.*, 27, 585-593.
- Gudishala, R. (2004). Development Of Resilient Modulus Prediction Models For Base And Subgrade Pavement Layers From In Situ Devices Test Results. Louisiana State University, Master of Science, 133p, Baton Rouge.
- Harison, I.R. (1987). Correlation between California bearing ratio and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils. *Proceedings of institution of civil engineers*, 83-87.

- Hassan, A. (1996). The Effect of Material Parameters on Dynamic Cone Penetrometer Results for Fine-grained Soils and Granular Materials. Oklahoma State University, Ph.D Dissertation, Stillwater.
- Hossain, M.S., Apeagyei, A.K. (2010). Evaluation of the Lightweight Deflectometer for In-Situ Determination of Pavement Layer Moduli. Federal Highway Administration, FHWA/VTRC10-R6, Richmond, VA, 38p.
- Jianzhou, C., Mustaque, H., Latorella, T.M. (1999). Use of Falling Weight Deflectometer and Dynamic Cone Penetrometer in Pavement Evaluation. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Kim, H., Lee, M.S., Balunaini, U., Prezzi, M., Siddiki, N.Z. (2010). Compaction Quality Control of Fly Ash and Bottom Ash Mixture Embankment Using Dynamic Cone Penetrometer and Lightweight Deflectometer. 88th Transportation Research Board Annual Meeting, 10-2784, Washington, DC., 21p.
- Kleyn, E.G. (1975). 'The use of the dynamic cone penetrometer (DCP). Transvaal Roads Department, Rep. No. 2/74, South Africa.
- Livneh, M. (1987). Validation of correlations between a number of penetration tests and in situ California bearing ratio tests. Transportation Research Record 1219, 56-67.
- Livneh, M. (1991). Verification of CBR and Elastic Modulus Values Derived from Local DCP Tests. 9th Southeast Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, Bangkok, pp 45-50.
- Mohammad, L.N., Herath, A., Abu-Farsakh, M.Y., Gaspard, K., Gudishala, R. (2007). Prediction of Resilient Modulus of Cohesive Subgrade Soils from Dynamic Cone Penetrometer Test Parameters. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(11), 986-992.
- Nageshwar, R., Varghese G., Shivashankar R. (2008). PFWD, CBR and DCP Evaluation of Lateritic Subgrades of Dakshina Kannada, India. 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, 4417-4423.
- Nazzal, M. (2003). Field evaluation of in situ test technology for QC/QA procedures during construction of pavement layers and embankments. Louisiana State University, Master of Science, Baton Rouge.
- Oman, M. (2004). Advancement of Grading & Base Material Testing. Office of Materials, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 30p.
- Pandey B.B., Srinivasa K.R., Sudhakar R.K. (2003). Regression Models for Estimation of In Situ Subgrade Moduli from DCP Tests. Indian Highways, 5-19.
- Roy, B.K. (2007). New Look at DCP Test with a Link to AASHTO SN Concept. Journal of Transportation Engineering, 133(4), 264-274.
- Siekmeier, J., Pinta, C., Merth, S., Jensen, J., Davich, P., Camargo, F., Beyer, M. (2009). Using the Dynamic Cone Penetrometer and Light Weight Deflectometer for Construction Quality Assurance. Minnesota Department of Transportation, MN/RC 2009-12, Minnesota, 244p.
- Siekmeier, J. A., Young, I., Beberg, D. (2000). Comparison of the Dynamic Cone Penetrometer with Other Tests During Subgrade and Granular Base Characterization in Minnesota. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: 3, ASTM STP 1375, 14p.
- Uz, V.E. (2012). Sathi Kaplamalardaki Kalıcı Deformasyona Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 207 s., Isparta.

- Varghese, G., Nageshwar, R., Shivashankar, R. (2009). PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(3), 189–199.
- Webster, S.L., Grau, R.H., Williams, R.P. (1992). Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Instruction Rep., No. GL-92-3.