

Karayolu Kaplamalarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizinde Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi

Investigation of Finite Element Method Parameters Affecting the Displacement Behaviour of Highway Pavements

Murat BOSTANCIOĞLU*

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, TÜRKİYE

• Geliş tarihi / Received: 08.06.2018 • Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 27.09.2018 • Kabul tarihi / Accepted: 01.10.2018

Öz

Esnek kaplamalar bitüm ve granüler malzemeler ile inşa edilen bir üst yapı türüdür. Esnek üst yapıların projelendirilmesinde kullanılan yöntemler; ampirik yöntemler, kayma göçmesi sınırlama yöntemi, deplasman sınırlama yöntemi, regresyon yöntemi ve mekanistik ampirik yöntemler olarak beş kategoriye ayrılabilir. Bu yöntemler arasında geleneksel ampirik yöntemlerden mekanistik ampirik dizayn yöntemlerine doğru bir yönelme söz konusudur. Kaplama tabakalarının heterojenliği, dinamik ve tekrarlı yükleme koşulları gibi sebeplerle araştırmacılar çalışmalarını sonlu elemanlar yöntemi ile yapmayı tercih etmektedir ancak sonlu elemanlar modelinin 2 veya 3 boyutlu olarak tanımlanması, yükleme koşulları, tabakalar arası temas durumları ve formülasyonları, ızgara boyutları, sınır koşulları ve model boyutları gibi parametreler sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada kaplama, temel ve alt temel tabakalarından oluşan geleneksel bir üst yapı kesiti üzerinde statik yükleme koşulları altında kaplama tepkilerini etkileyen parametreler incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Esnek üst yapılar, Kaplama tepkileri, Mekanistik-ampirik dizayn, Sonlu elemanlar yöntemi

Abstract

Flexible pavements are a type of superstructure constructed using bitumen and granular materials. The methods used in the design of flexible pavements can be examined in five categories. Empirical methods, limiting shear failure methods, limiting deflection methods, regression methods and mechanistic-empirical methods. There has been a dramatic change in the design methods for flexible pavements from the early purely empirical methods to the modern mechanistic-empirical methods. Due to the heterogeneous pavement layers and dynamic and cycling loading instead of static loading, researchers diverted their research to the finite element method, which provides a better solution in the dynamic analysis of pavements while considering the heterogeneity. However, in finite element method, parameters such as the definition of the model as 2D or 3D, the loading condition, the types and formulation of contact between layers, size of mesh, boundary conditions and dimensions of the model have a significant effect on the results. In this study, finite element model parameters affecting the pavement responses under static loading were investigated on a typical superstructure configuration consists pavement, base and subgrade layers.

Keywords: Flexible pavements, Pavement responses, Mechanistic-empirical design, Finite element model

*Murat BOSTANCIOĞLU, bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr, Tel: (0346) 219 10 10; orcid.org/0000-0001-6820-2213

1. Giriş

Esnek kaplamalar bitüm ve granüler malzemeler kullanılarak inşa edilen bir üst yapı tipidir. Esnek üst yapıların tasarımında kullanılan yöntemler beş kategoride incelenebilir. Bunlar; kaplama kalınlığını tabakaların Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) ile ilişkilendiren ampirik yöntemler, kaplama kalınlığı hesabında kayma göçmesini ve taban zemini veya yüzey deplasmanını sınırlamayı prensip olarak alan “kayma göçmesi sınırlama” ve “deplasman sınırlama” yöntemleri, ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından esnek üst yapıların projelendirilmesinde kullanılan AASHTO yönteminin de içinde yer aldığı kaplama performansına veya yol testlerine bağlı regresyon yöntemleri ve mekanistik-ampirik yöntemler olarak sıralanabilir. Günümüzde kaplama tasarımında, sadece sınırlı sayıda malzeme, yük ve çevresel etkiler ile yapılan yol testlerinden elde edilen verileri kullanan ampirik yöntemlerden mevcut trafik ve çevre etkileri altındaki kaplamanın tepkilerini (gerilme, şekil değiştirme, deplasman) mekanik teoriler ile hesaplayan mekanistik-ampirik yöntemlere bir yönelme söz konusudur (Huang, 2004; Zheng vd., 2012; Lu vd., 2014; Ahmed ve Erlingsson, 2016).

Burmister’in elastik teorisi mekanistik-ampirik yöntemler arasında en pratik ve sıklıkla kullanılan yöntem olarak bilinmektedir. Bu teorinin amacı kaplama tabakası altındaki yatay çekme birim şekil değiştirmelerini ve taban zemini üzerindeki düşey basınç birim şekil değiştirmelerini sınırlamaktır (Huang, 2004; Ahmed ve Erlingsson, 2016). Yöntemde tabakaların sabit bir elastisite modülü (E) ve poisson oranına sahip (ν) homojen, izotropik ve lineer elastik olduğu, malzemelerin ağırlıksız, tabakaların en alt tabaka hariç sonlu kalınlıkta (en alt tabaka yarı sonsuz) ve yükün dairesel bir alana uniform olarak etki ettiği kabulleri yapılmaktadır. Burmister yöntemi modifiye edilerek viskoelastik veya non-lineer elastik malzemelerden oluşan tabakalı yapıların analizinde de kullanılmaktadır (Huang, 2004; Zheng vd., 2012).

Karayolu üst yapı tabakalarının idealden uzak heterojen davranışları, trafik yüklerinin dairesel yerine farklı geometrideki temas yüzeyleri üzerine etki etmesi ve bu yüklerin statik yerine dinamik ve tekrarlı olması, dikdörtgensel kesitler yerine daha kompleks geometriler ve sınır koşulları ile çalışma zorunlulukları ve gelişen ve hızlanan bilgisayar teknolojisinin bir sonucu olarak, sonlu elemanlar metodu (SEM) son dönemde kaplama tepkilerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir (Hadi ve Bodhinayake,

2003; Abd Alla, 2006; Yoo vd., 2006; Ambassa vd., 2013; Beskou vd., 2016; Sarkar, 2016).

SEM metodu 2 ve 3 boyutlu üst yapı modellerinin statik ve dinamik analizlerinde, lineer elastik ve viskoelastik olarak tanımlanan malzeme tiplerinde, farklı yükleme hızlarında, tek veya çift tekerlek yükü ve tekil, tandem, tridem aks yükleri altında, geogrid ile güçlendirilmiş kaplamaların analizlerinde başarıyla uygulanmıştır (Al-Azzawi, 2012; Beskou vd., 2016; Ahmed ve Erlingsson, 2016; Sarkar, 2016; Ahirwar ve Mandal, 2017). Ancak SEM metodunda modelin 2 boyutlu veya 3 boyutlu olarak tanımlanması, yükleme durumu, tabakalar arasındaki yüzeylerin temas tipleri, sonlu eleman ızgarasının sıklığı (mesh) ve oluşturulan modelin boyutları gibi parametreler sonuca önemli ölçüde etki etmekte ve metodun etkin kullanımı için uygun bir şekilde düzenlenmelidir.

Bu çalışmada taban zemini, temel ve kaplama tabakalarından oluşan tipik bir esnek üst yapı kesiti SEM metodu ile modellenmiş ve modelin kaplama tepkilerini doğru tahmin etmesi için gerekli değişkenlerin optimize edilmesi sağlanmıştır. Modelleme için ticari ANSYS 18.2 Workbench yazılımı kullanılmıştır. Hesaplanan gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerine göre dönüşüm fonksiyonları yardımıyla yol ömrü hesabı yapılarak SEM metodu değişkenlerinin bir esnek üst yapının ömrüne olan etkisi de ayrıca incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

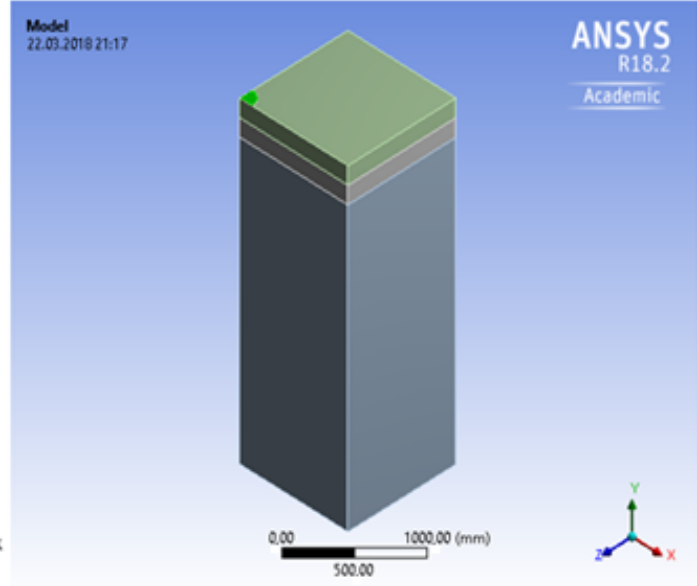
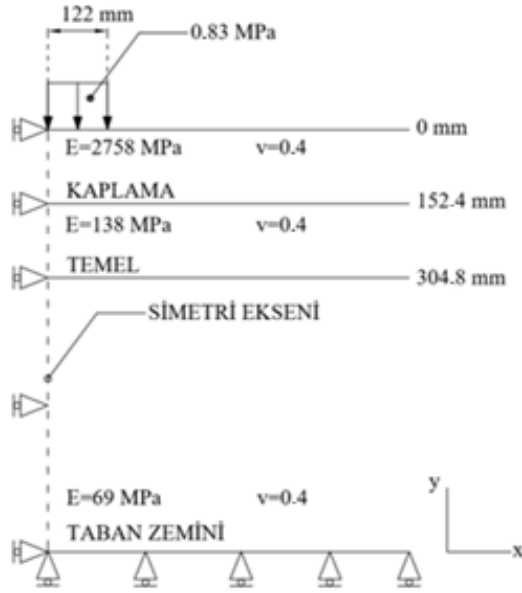
2.1. Model Geometrisi ve Sınır Koşulları

Çalışmada eksenel simetrik geometride, taban zemini, temel ve kaplama tabakalarından oluşan bir üst yapı kesiti seçilmiştir (Huang, 2004). Malzemeler lineer elastik olarak tanımlanmış ve özellikleri Şekil 1-a’da verilmiştir. Kaplama yüzeyine etki eden yük 122 mm yarıçapında dairesel bir alan üzerine 0.83 MPa tekerlek iç basıncı ile uniform olarak etki etmektedir. 3 boyutlu modelde simetriden dolayı $\frac{1}{4}$ dairesel alan üzerine yükleme yapılarak analizler çalıştırılmıştır (Şekil 1-b). Kesiti oluşturan tüm tabakalar için herhangi bir süreksizlik olmadığı (çatlaksız tabaka) ve tabaka ara yüzeylerinin tamamen yapışık (bonded) olduğu değerlendirilmiştir (Hadi ve Bodhinayake, 2003).

Modelin sınır koşullarının tanımlanmasında aşağıdaki koşullar dikkate alınmıştır (Şekil 2’ye referansla);

- Taban düzlemindeki (bcde) düğüm noktalarının düşey deplasmanları engellenmiştir
- (abcf) düzlemi, simetri düzlemi olduğu için yüke dik doğrultulardaki deplasmanlar engellenmiş, düşey deplasmanlar serbest bırakılmıştır.

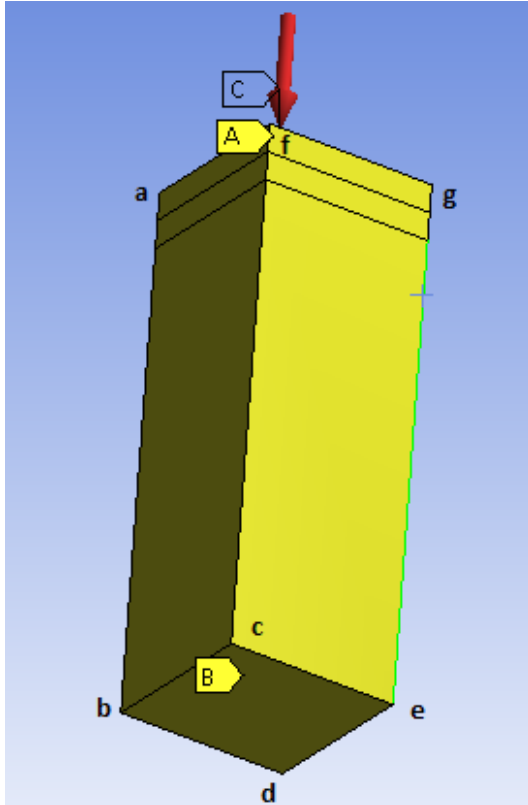
- (cefg) düzlemi tekerleğin tam ortasından geçen düşey düzlem olduğundan yüke dik doğrultulardaki deplasmanlar engellenmiş, düşey deplasmanlar serbest bırakılmıştır (Hadi ve Bodhinayake, 2003).



(a)

(b)

Şekil 1. (a) Üst yapı en kesiti, (b) 3 boyutlu model ve yükleme alanı



Şekil 2. Sınır koşulları

Modelden elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla Huang (2004) tarafından geliştirilen ve mekanistik-ampirik kaplama analizlerinde referans kabul edilen (Muniandy vd., 2013; Sarkar, 2016; Chegenizadeh vd., 2016; Hafeez vd., 2017) Kenlayer paket programı kullanılmıştır. Belirlenen kesitin Kenlayer ile çözümünde kaplama tabakası üst yüzeyi için elde edilen deplasman değeri (0.56 mm) oluşturulan modelde plan boyutları 950x950 mm ve taban zemini derinliği 2540 mm olarak seçildiğinde 0.55 mm olarak bulunmuş ve %98 oranında bir uyumluluk elde edilmiştir.

2.2. Yol Hizmet Ömrünün Tahmin Edilmesi

Mekanistik-ampirik dizayn yöntemlerinin kullanılabilmesi için elde edilen gerilme, birim şekil değiştirme veya deplasman değerlerinin kaplama davranışını (çatlama, tekerlek izinde oturma, pürüzlülük vd.) yansıtan bir parametreye dönüştürülmesi gerekmektedir (Ekwulo ve Eme, 2009). Yorulma çatlakları kaplamada tekrarlı yüklemeye bağlı olarak ortaya çıkan bir bozulma tipidir. Mekanistik-ampirik dizayn yönteminde

yorulma kriteri olarak asfalt betonu tabakası altında meydana gelen çekme birim şekil değiştirmeleri kullanılmaktadır. Bu birim şekil değiştirme değerlerinin belirli bir sınırı aşması durumunda kaplamada çatlaklar meydana gelmektedir. Asfalt Enstitüsü ve Shell yöntemleri ile yorulmaya bağlı göçmeyi sağlayan yük tekrar sayısı formülleri sırasıyla aşağıda belirtilmiştir (Ekwulo ve Eme, 2009; Adhikari vd., 2009).

$$N_f = 0.0796 (\varepsilon_t)^{-3.291} (E_1)^{-0.854} \quad (1)$$

$$N_f = 0.0685 (\varepsilon_t)^{-5.671} (E_1)^{-2.363} \quad (2)$$

Formüllerde N_f göçmeyi meydana getiren yük tekrar sayısını, ε_t kaplama tabakası altındaki yatay birim şekil değiştirmeyi, E_1 ise kaplama tabakasının elastisite modülünü (psi) belirtmektedir.

Asfalt Enstitüsü ve Shell tarafından önerilen ve kaplamada meydana gelen tekerlek izinde oturmaya bağlı göçme ile taban zemini üzerindeki

düşey basınç birim şekil değiştirmesi arasındaki ilişki Formül 3 ve 4'te belirtilmiştir.

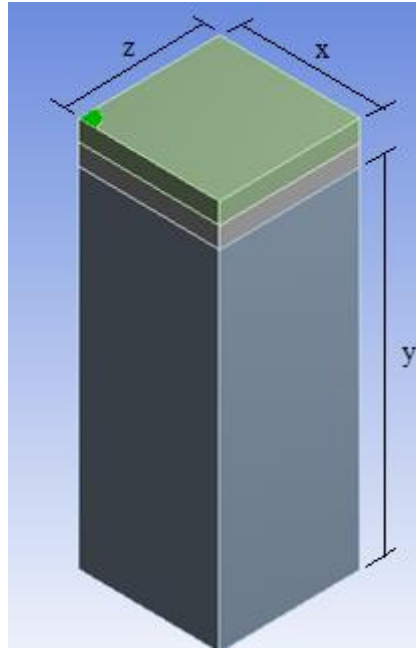
$$N_f = 1.365 \times 10^{-9} (\varepsilon_c)^{-4.477} \quad (3)$$

$$N_f = 6.15 \times 10^{-7} (\varepsilon_c)^{-4} \quad (4)$$

Formüllerde N_f tekerlek izinde oturma göçmesini meydana getiren yük tekrar sayısını, ε_c ise taban zemini üzerindeki basınç birim şekil değiştirmesini göstermektedir (Hesham ve Shiraz, 1998; Ekwulo ve Eme, 2009).

3. Bulgular ve Tartışma

Sonlu elemanlar yönteminde plan ve kesit boyutlarının (Şekil 3) seçimi sonuca önemli ölçüde etki etmektedir. Plan boyutlarının etkinliğini incelemek amacıyla farklı kenar uzunlukları için analizler yapılarak üst yapıdaki maksimum deplasman değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Model boyutları

Tablo 1. Plan boyutlarına bağlı deplasman değerleri

Yükleme yarıçapı (r)(mm)	Plan boyutları (x-z)(mm)	r/x	Maksimum deplasman (mm)
122	1350x1350	0.090	0.41
122	1100x1100	0.111	0.48
122	1050x1050	0.116	0.50
122	1000x1000	0.122	0.52
122	950x950	0.128	0.55
122	900x900	0.135	0.58

Tablo 1 incelendiğinde kenar boyutlarının artışına bağlı olarak deplasman değerlerinin düştüğü gözlenmektedir. Kenar uzunluklarındaki artışın yüklemeye noktası etrafındaki yanal desteği artırması düşen deplasman değerlerini açıklamaktadır.

Taban zemini derinliği 2540 mm sabit olmak üzere farklı plan boyutlarının yol ömrü üzerindeki etkisinin sayısal değerler ile kıyaslanmasını sağlamak amacıyla taban zemini üzerinde

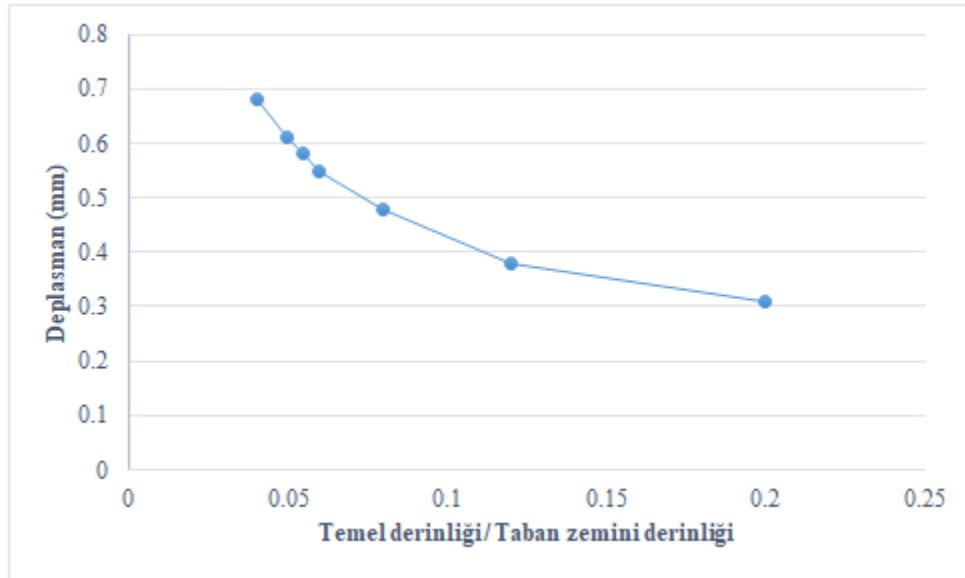
meydana gelen düşey birim şekil değiştirme (ϵ_c) ve buna bağlı Shell yöntemi ile hesaplanan yol ömrü değerleri (N_f) Tablo 2’de verilmiştir. N_f değerleri incelendiğinde plan boyutlarının artmasına bağlı olarak düşey birim şekil değiştirme değerlerinde bir azalma ve buna bağlı olarak yol ömründe yaklaşık %25 bir artış söz konusudur. Bu sonuçlara göre plan boyutlarının seçimi yol ömrüne bağlı analizlerde mutlaka göz önünde bulundurulması gereken önemli bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 2. Plan boyutlarına bağlı düşey birim şekil değiştirme ve yol ömrü değerleri

Plan boyutları (x-z)(mm)	ϵ_c	N_f
900x900	5.14×10^{-4}	8.81E+06
950x950	5.04×10^{-4}	9.53E+06
1000x1000	4.96×10^{-4}	1.02E+07
1050x1050	4.91×10^{-4}	1.06E+07
1100x1100	4.86×10^{-4}	1.10E+07

Şekil 4’te verilen ve yarı sonsuz tabaka derinliği (y) olarak adlandırılan taban zemini kalınlığı değişimine bağlı deplasman değerleri incelendiğinde taban zemini kalınlığı azaldıkça deplasman değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Plan boyutlarının 950x950 olarak belirlendiği bu analizde deplasman değerlerinin azalmasını sağlayan en önemli parametre sınır koşullarında düşey deplasmanı engellenmiş olan taban düzlemine olan mesafenin kısılmasıdır. Düşey

doğrultuda rijit davranış gösteren yüzeye olan mesafe kısaldıkça deplasman değerleri de düşmüştür. Kenlayer programı ile elde edilen deplasman değerini sağlayan temel derinliği/tabana zemini derinliği oranı grafikten 0.06 olarak okunmaktadır. Buna bağlı olarak hesaplanan taban zemini derinliği ise 2540 mm dir. Boyutsal analizden elde edilen bu değerler ışığında yarı sonsuz tabaka derinliğinin plan boyutlarına oranla 2.67 kat fazla olması gerektiği söylenebilir.



Şekil 4. Taban zemini derinliğine bağlı deplasman değişimi

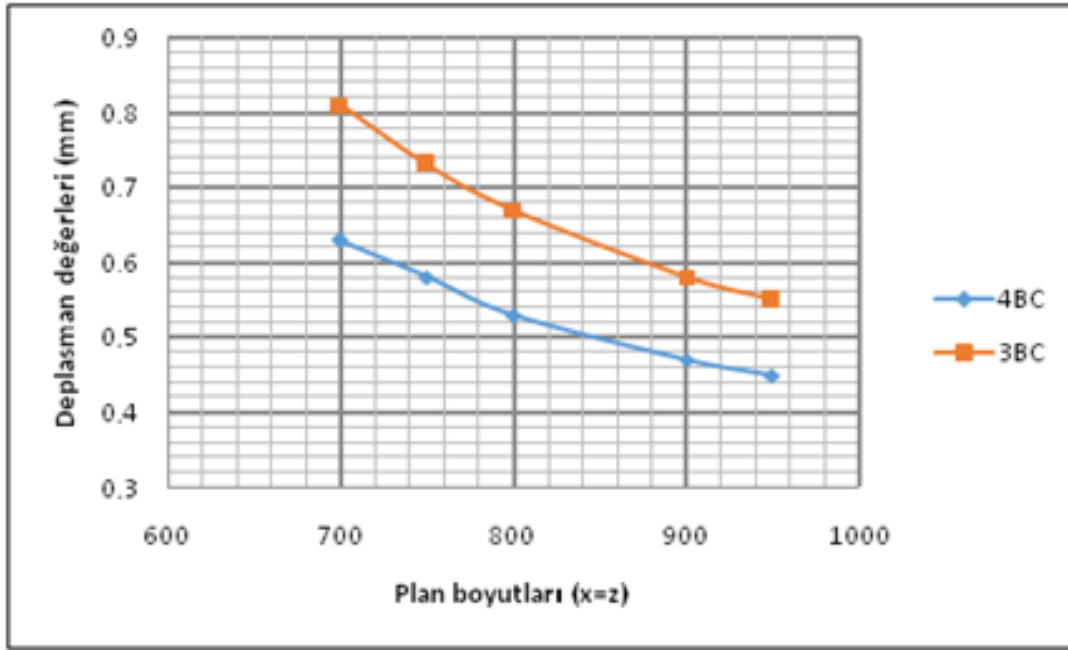
Sınır koşullarının tanımlanması sonlu elemanlar yönteminde sonuçlara etki eden bir diğer önemli parametredir, çalışmada daha önceden de tanımlandığı gibi taban düzlemi, simetri düzlemi ve tekerlek ortasından geçen düzlem düşeyde

deplasman yapmayacak şekilde tanımlanmıştır bu sınır koşullarına ilave olarak yolun trafik akış yönündeki derinliğinin fazla olması sebebiyle bu akış yönünde dikey olan düzlemin de (Şekil 2’ye referans ile (cefg) düzlemine paralel karşı düzlem)

düşey deplasmanları sınırlanarak analizler yapılmıştır. Bu kapsamda çalışmanın başlangıcındaki sınır koşulları (boundary condition) 3 düzlemi kapsadığından “3BC”, trafik doğrultusuna dik düzlemin de kısıtlanması ile oluşan yeni model “4BC” olarak tanımlanmış ve bu iki farklı durumda oluşan deplasman değerleri plan boyutlarının değişimine bağlı olarak Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5 incelendiğinde trafik doğrultusuna dik olan düzlemde ek bir sınır koşulu tanımlamak deplasman değerlerinde %18-22 arasında bir düşüşe sebep olmaktadır, rijit düğüm noktası

sayısının artması deplasman değerlerinde önemli bir fark ortaya koymaktadır ve şekilden de görüleceği gibi plan boyutlarının azalması deplasman değerlerinin daha fazla düşmesini sağlamaktadır. 3BC modeli ile 4BC modeli arasındaki farkların beton yollar gibi daha rijit kaplama tiplerinde birbirine yakın sonuçlar vereceği değerlendirilebilir. Ancak esnek kaplamalar üzerlerine gelen tekerlek iç basınçlarını beton yollara nazaran daha az bir alana yayabildikleri için 4BC modeli ile çalışmak yerine 3BC modeli ile çalışmak daha uygun bir çözüm olarak ifade edilebilir.

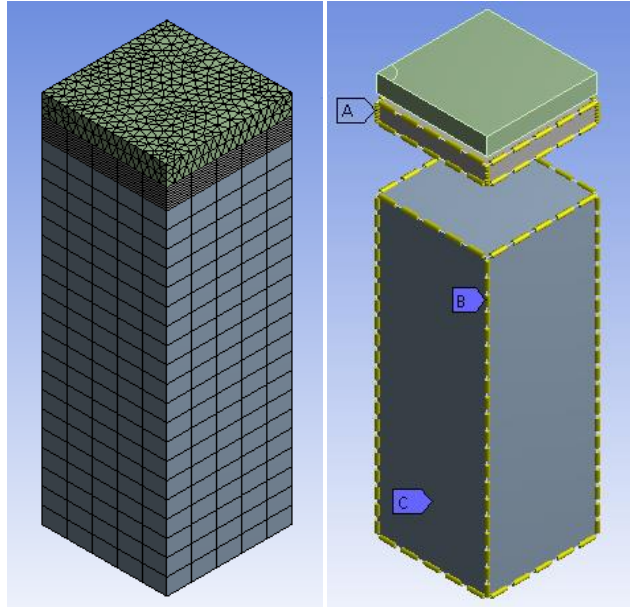


Şekil 5. Sınır koşullarına bağlı deplasman değerleri

Izgara (mesh) boyutlarının seçimi sonlu elemanlar yönteminin sonuçlara etki eden en önemli parametrelerinden birisidir, büyük ızgara boyutları yakınsak olmayan sonuçlar verirken küçülen ızgara boyutları ise çözüm süresinin oldukça uzamasına sebebiyet vermekte ve özellikle birden çok analizin yapılacağı problemlerde büyük zaman kayıplarına yol açmaktadır. Çalışmada karayolu kaplamasının deplasman değerlerine ızgara boyutlarının etkisini değerlendirmek amacıyla 3 farklı çalışma yapılmıştır (Şekil 6). Bu çalışmalarda yükün uygulandığı $\frac{1}{4}$ daire alandaki ızgara boyutları, kaplama tabakasının ızgara boyutları ve temel tabakasının ızgara boyutları üzerindeki değişimlerin sonuca etkileri araştırılmıştır. Izgara analizi yapılırken plan boyutları 950x950 mm, yarı sonsuz tabaka derinliği 2540 mm ve boyut fonksiyonu “uniform” olarak çalışılmıştır. Yük altındaki bölgede yapılan inceltme işlemine ve kaplama tabakasını oluşturan

dikdörtgen prizmanın maksimum yüzey boyutuna bağlı deplasman sonuçları Tablo 3’te, temel tabakası kalınlığının (152.4 mm) bölünme boyutuna bağlı deplasman değerleri ise Tablo 4’te özetlenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde yük altındaki bölgede ızgara boyutlarının incelenmesi sonuçlar üzerinde çok etkili değilken kaplama tabakası yüzey boyutları sonuçlar üzerinde %0.4 oranında etki göstermiştir. Yükü doğrudan almayan temel tabakasındaki ızgara boyutu değişimi ise sonuçlar hiçbir farklılık ortaya çıkartmamıştır. Bu sonuçlara göre ızgara boyutları seçiminin, çalışılan modelin etkin sonuçlar vermesi açısından birinci derece öneme sahip bir parametre olmadığı belirtilebilir.



Şekil 6. Model ızgara analizi

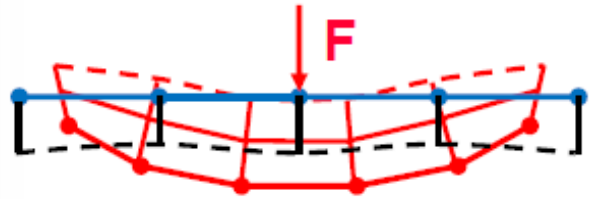
Tablo 3. Izgara boyutlarına bağlı deplasman değerleri (mm)

Analiz bölgesi	Izgara inceltme seviyesi / Maksimum yüzey boyutu (mm)								
	İnceltme 1 (Kalın)	İnceltme 2 (Orta)	İnceltme 3 (İnce)	60	50	40	30	20	10
¼ daire Kaplama	0.55049	0.55062	0.55069	0.5497	0.55023	0.55128	0.55138	0.55169	0.55198

Tablo 4. Temel tabakası kalınlığı bölme boyutuna bağlı deplasman değerleri (mm)

Analiz bölgesi	Temel tabakası kalınlığı bölme boyutu (mm)			
	50	38	4.75	9.5
Temel	0.54969	0.54969	0.5497	0.5497

Sonlu elemanlar yönteminde birbirinden farklı malzeme özelliklerine sahip yüzeyler arasında temas denklemleri kurulması gerekmektedir. Eğer uygun temas denklemi seçilmez ise yük altında, bir kütlenin kendisinden farklı mekanik özellikteki kütle içerisine girmesi/batması sonucu ortaya çıkmaktadır (Şekil 7). Bu durum üst yapı analizlerinde tekerlek-kaplama veya kaplama-temel ara yüzeylerinde gerçekleşebilir ancak fiziksel olarak mümkün olmayan bu durumun engellenmesi için ANSYS paket programında temas formülasyonu olarak “Multi Point Constraint (MPC)” seçimi yapılmalıdır. Bu formülasyon temas yüzeyleri arasında deplasmanları birbirine bağlayan kısıt denklemleri ekleyerek temas yüzeyindeki iki düğüm noktasının deplasmanlarını birbirine eşitlemektedir.



Şekil 7. Temas kütesinin hedef kütle içerisine batması

4. Sonuçlar ve Öneriler

Karayolu esnek üst yapı tabakalarının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmesinde model sonuçlarına etki eden parametrelerin incelendiği bu çalışmaya ait bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar ifade edilebilir;

- Plan boyutlarının seçimi sonlu elemanlar analizinde önemli parametrelerden bir tanesidir ve bu boyutların fazla veya eksik olarak tanımlanması elde edilen deplasman değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışmada yüklemeye yarıçapı/plan boyutu oranının optimum değeri 0.128 olarak bulunmuştur.
- Plan boyutlarının yol ömrü hesaplarına etkisini değerlendirmek amacıyla yapılan analizlerde 900x900 mm yerine 1100x1100 mm kare kesitli bir model ile çalışıldığında tekerlek izinde oturma kriterine bağlı yol ömrü değerinde %25 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar birim şekil değiştirme ve buna bağlı dönüşüm formülleri ile yol ömrü hesaplamalarında plan boyutları seçiminin çok önemli bir kriter olduğunu ortaya koymaktadır.
- Modeli oluşturan tabakalardan en altta yer alan ve yarı sonsuz tabaka olarak adlandırılan taban zemini derinliği, taban düzleminin düşey deplasmanlarının engellenmesi sebebiyle sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu tabakanın derinliğinin az seçilmesi deplasman değerlerini azaltırken fazla seçiminde ise deplasman değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Temel tabakası derinliği / taban zemini derinliği oranında optimum değerin %6 olduğu belirtilebilir.
- Kare prizma olarak tanımlanan modeli meydana getiren 6 yüzeyden 3 veya 4 tanesinde düşey sınır koşulu tanımlayarak çalıştırılan analizlerde trafik yönüne dik doğrultudaki yüzeyin de düşey deplasmanlarının sınırlandırılması elde edilen deplasman değerlerinde %18-22 arasında bir düşüşe sebep olduğu ancak bu kısıtın esnek kaplamalar yerine rijit kaplamalar için daha uygun bir sınır koşulu olacağı değerlendirilmiştir.
- Izgara boyutlarının değerlendirilmesi için yapılan çalışmalarda yüke doğrudan temas eden kaplama tabakasındaki düğüm noktası sayısının artmasının modelin yakınsaması üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş ancak yükü doğrudan almayan temel tabakasındaki ızgara boyutlarının sonuçlara bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Izgara boyutlarındaki azalmanın ve düğüm noktası sayısındaki artışın çözüm süresini de artırdığı göz önüne alındığında çok ince ızgaralar ile çalışmanın gerekli olmadığı söylenebilir.
- Kaplama analizlerinde fiziksel olarak tabakaların veya kaplama üzerindeki tekerleğin birbirleri içerisine batma durumu

düşünülmeyişinden beraber hareket eden yüzeylere ortak düğüm noktaları tanımlamayı sağlayan MPC temas formülasyonunun uygun bir analiz parametresi olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından M-682 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- Abd Alla, E.M., 2006. The rational use of finite element method in the analysis of flexible pavements. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, 34, 1185-1211.
- Adhikari, S., Shen, S. ve You, Z., 2009. Evaluation of fatigue models of hot-mix asphalt through laboratory testing. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2127, 36-42.
- Ahirwar, S.K. ve Mandal, J.N., 2017. Finite element analysis of flexible pavement with geogrids. *Procedia Engineering*, 189, 411-416.
- Ahmed, A. ve Erlingsson, S., 2016. Viscoelastic response modelling of a pavement under moving load. *Transportation Research Procedia*, 14, 748-757.
- Al-Azzawi, A.A., 2012. Finite element analysis of flexible pavements strengthened with geogrid. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7, 1295-1299.
- Ali, H.A. ve Tayabji, S.D., 1998. Mechanistic evaluation of test data from LTPP flexible pavement test sections, US Department of Transportation Federal Highway Administration, Report no. FHWA-RD-98-012
- Ambassa, Z., Allou, F., Petit, C. ve Eko, R.M., 2013. Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM. *Construction and Building Materials*, 43, 443-452.
- Beskou, N.D., Tsinopoulos, S.V. ve Theodorakopoulos, D.D., 2016. Dynamic elastic analysis of 3-D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM

treatment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 63-72.

Chegenizadeh, A., Keramatikerman, M. ve Nikraz, H., 2016. Flexible pavement modelling using Kenlayer. *EJGE*, 21, 2467-2479.

Ekwulo, E.O. ve Eme, D.B., 2009. Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3, 412-421.

Hadi, M.N.S. ve Bodhinayake, B.C., 2003. Non-linear finite element analysis of flexible pavements. *Advances in Engineering Software*, 34, 657-662.

Hafeez, I., Shan, A., Ali, A. ve Ahmed, I., 2017. Flexible pavement design evaluation using mechanistic-empirical approaches. *Technical Journal, University of Engineering and Technology*, 22, 27-33.

Huang, Y.H., 2004. *Pavement Analysis and Design*, Pearson Prentice Hall, New Jersey.

Lu, P., Bratlien, A. ve Tolliver, D., 2014. *North Dakota Implementation of Mechanistic-*

Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), Mountain-Plains Consortium, North Dakota.

Muniandy, R., Aburkaba, E. ve Thamer, N., 2013. Comparison of flexible pavement performance using Kenlayer and Chev PC software program. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7, 112-119.

Sarkar, A., 2016. Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. *International Journal of Pavement Engineering*, 17, 377-387.

Yoo, P.J., Al-Qadi, L.L., Elseifi, M.A. ve Janajreh, I., 2006. Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces. *The International Journal of Pavement Engineering*, 7, 73-86.

Zheng, L., Hai-lin, Y., Wan-ping, W. ve Ping, C., 2012. Dynamic stress and deformation of a layered road structure under vehicle traffic loads: Experimental measurements and numerical calculations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39, 100-112.