

AASHTO-86 Yöntemine Göre Üstyapı Tabakalarının Ekonomik Analizi

Baha Vural KÖK*
Necati KULOĞLU**

ÖZ

AASHTO-86 tasarım yönteminde, üst yapı sayısı (SN) taban zemini taşıma gücüne, toplam eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) sayısına, güvenilirlik seviyesine, standart sapmaya ve hizmet kabiliyeti indeksine göre tespit edilir. Üstyapı sayısının; tabaka kalınlıkları ile çarpılan izafi mukavemet ve drenaj katsayılarının toplamına eşit ve büyük olması gerektiği için bir çok kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada tasarım kriterinde yer alan parametrelerin alabileceği farklı değerlerle ortaya çıkan 441000 seçenek AASHTO-86 yöntemine göre MATLAB programı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçta, üstyapıyı oluşturan tabakaların değişik toplam eşdeğer standart dingil yükü sayılarına göre en ekonomik kalınlıkları, taban zemini taşıma gücünün üstyapı maliyetine etkisi, dingil yükü sayısı ve taban zemini taşıma gücü ile maliyet arasındaki matematiksel ilişki ile en uygun ve ekonomik temel, alttemel cinsleri tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: AASHTO-86 metot, üstyapı tabakaları, taşıma gücü, ekonomik analiz.

ABSTRACT

Economic Analysis of Pavement Layers According to AASHTO-86 Method

In AASHTO-86 design method, the structural number (SN) is determined in respect of bearing capacity of subgrade, total standard equivalent axle load, reliability level, standard deviation and serviceability index because of the structural number have to be equal and bigger than the sum of the coefficient that is multiplied with layer thickness and drainage factor a lot of combination occurs. In this study 441000 alternative occurred from the different values of parameter placed in design criterion have been analyzed according to AASHTO-86 method by using MATLAB program. In conclusion the economic thickness of layers forming pavement for different equivalent axle load number, the effect of the bearing capacity of subgrade on pavement cost, the mathematical relation between axle load number, bearing capacity and cost of pavement and the most suitable and economic base and subbase type have been determined.

Keywords: AASHTO-86 method, pavement layers, bearing capacity, economic analysis.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21.11.2005 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2007 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, bvural@firat.edu.tr

** Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, nkuloglu@firat.edu.tr

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak yaşam standartlarının yükselmesi ile insanların güvenli ve konforlu sürüş talebi artmıştır. Günümüz Türkiye'sinde ekonomik kalkınmanın ve refahın gelişmesinde büyük önemi olan karayolu taşımacılığının, ulaştırma sektörü içindeki payı giderek artan bir eğilim göstermektedir. Devlet İstatistik Enstitüsü verilerine göre Türkiye'de karayolu taşımacılığının payı 1970'de yük taşımacılığında %61, yolcu taşımacılığında %91 iken, 2003 yılında yük taşımacılığında %92, yolcu taşımacılığında %95 olmuştur. 1992'den günümüze otomobil sayısı % 154, ağır taşıt sayısı ise % 183 artmıştır [1]. Bu verilerden de anlaşılacağı üzere kentler arası yolcu ve yük taşımacılığında en büyük payı karayolu sistemi üstlenmekte ve bu pay, her geçen gün hızla artış göstermektedir.

Ekonomik gelişmenin temel dayanağı olan karayolu uzunluğunda dünya 13'üncüsü olan ülkemizin bin kilometrekare başına yol uzunluğuna bakıldığında gelişmiş ülkelerin oldukça gerisinde olduğu görülmüştür. Bir ülkenin ne kadar yol uzunluğuna sahip olması gerektiği yüzölçümü, nüfus yoğunluğu, fiziki zorluk, nüfusun belirli bölgelerde yoğunlaşması, doğal şartlar gibi çok çeşitli kısıtlara bağlıdır. Bu nedenle Türkiye'nin ne kadar yolu olması gerektiğini saptamak zordur. Fakat, Türkiye'nin kendi boyutlarına ve koşullarına (yüzölçümü, nüfus yoğunluğu, doğal şartlar gibi) yakın gelişmiş ülke olan Fransa'nın oranında yol seviyesine ulaşması Türkiye için bir hedef olabilir. Bunun için Türkiye'nin karayolu uzunluğunu 3,3 katına (1 milyon 275 bin 702 kilometreye) çıkarması gerekmektedir [2].

Ülkemizdeki karayolları için bütçeden ayrılan paylara bakıldığında, yollarımızın çok kısıtlı imkanlarla yapılmaya çalışıldığı görülmektedir. Hem çok daha fazla uzunlukta yollara sahip olmamız gerektiği hem de bu yolların sağlam olması, trafiğin ve çevrenin aşındırıcı etkilerine uzun yıllar direnç gösterebilmesi gerektiğinden bu kısıtlı imkanların en ekonomik şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Ülkemizde, daha ucuz olduğu düşünüldüğü için kademeli inşaat ve sathi kaplama türü tercih edilmektedir. Ancak 20 yıllık bir periyot içerisinde yapılan bakım ve onarım harcamaları dikkate alındığında sathi kaplamalı bir yolun beklendiği kadar ucuza mal olmadığı, hatta bitümlü sıcak karışımli bir yol tipinden daha fazla harcama yapıldığı görülmektedir [3].

Kaplama tabakası olarak bitümlü sıcak karışımın seçilmesi elbette ki temel ve alt temel kalınlıklarının ve tipinin de, kaplaması sathi kaplama olan yollardakinden farklı olmasına neden olacaktır. Kaplama, temel ve alt temel kalınlıklarının, temel ve alt temel cinslerinin, zeminin taşıma gücünün, trafik miktarının farklı olabilmesi uygun bir üst yapı tasarımı için binlerce kombinasyonu oluşturmaktadır. Tabaka kalınlıklarının ve tipinin belirlenmesi esnek kaplama tasarımının son amacıdır. Tabaka kalınlıklarının fazla veya az öngörülmesi negatif ekonomik etkiler ve üstyapının geri kalan ömründe azalmaya neden olmaktadır. Ülkemizde esnek kaplama tasarımı olarak ampirik bir yöntem olan AASHO-72 yöntemi kullanılmaktadır. Yakın bir zamanda AASHTO-86 yöntemine geçilecektir. Bu çalışmada binlerce kombinasyon içinden bütün seçenekler dikkate alınarak en ekonomik çözüm bulunmaya çalışılmıştır.

2 . ÜSTYAPI TASARIMI

Yollar, bölgenin sosyo-ekonomik durumuna bağlı olarak ihtiyaç ve talepleri karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır. Yol kullanıcısı olarak sürücüler, düzgün, konforlu, kayma direnci yüksek, hızlı erişimli, ulaşım maliyeti ve gürültü seviyesi düşük yollar talep ederken, yol otoriteleri, dayanıklı minimum bakım gerektiren, kalıcı deformasyonlara karşı dirençli, aşınma direnci yüksek, uzun ömürlü yolları hedeflemektedirler [4].

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından esnek üstyapıların tasarımında kullanılan projelendirme metodu, AASHO-1972 Geçici Rehberinde verilen esnek üstyapı projelendirme yöntemi olup yakın zamanda daha gerçekçi sonuçlar veren AASHTO-86 yönteminin kullanımına geçilecektir.

2.1. AASHTO-1986 Tasarım Yöntemi

Bu tasarım yönteminde yapısal tasarım (tabaka kalınlıkları ve cinsi) yükleme (dingil yükü ve tekrür sayısı) ve drenaj, şartlarının kaplamaya olan etkilerinin analizleri ve kaplama performansının yük tekrürleri, zemindeki şişme ve donma özellikleri altındaki değişimi esas alınmaktadır. Kaplama kalınlığını veren formül AASHTO yol testlerindeki gözlem ve ölçümlere dayandırılarak elde edilmiştir.

Bir kaplamanın performansı, uzun süre taşıtların emniyetli ve konforlu olarak seyahat edebilmelerinin bir göstergesidir. Bu tasarım yönteminde kaplamanın performansı “servis yeteneği” kavramı ile tanımlanmaktadır. AASHTO yol testinde kaplamanın başlangıçta sahip olduğu ve belirli bir kullanım sonunda azalan servis yeteneğine göre kaplamanın performansının nasıl değiştiği saptanmaya çalışılmış ve buna göre tasarım formülleri geliştirilmiştir. Mevcut servis yeteneği indeksi (PSI_T) formül 1 ile belirlenmektedir.

$$PSI_T = 5,03 - 1,91 \log(1 + \overline{SV}) - 1,38 \overline{RD}^2 - 0,01 \sqrt{C + P} \quad (1)$$

Burada \overline{RD} , her iki tekerlek izindeki ortalama derinliği (inç), \overline{SV} , ortalama eğim değişimini (10^6), C, çatlakları (her 1000 ft²'de çatlakların alanı), P, yamaları (her 1000 ft²'de yapılan yama alanı) ifade etmektedir.

Servis yeteneği indeksi 0 ile 5 arasında bir değer olup yolu kullanan ama kaplama tasarımcısı olmayan kişilerin verdiği değerler, ölçüm sonuçları ile kullanıcıların verdiği değerler arasında yapılan korelasyonlar ve mekanik cihazlarla yapılan ölçüm sonuçlarına göre belirlenmektedir. PSI değeri yol kullanıldıkça ve zaman geçtikçe azalmaktadır. Yapılan gözlemlerde $PSI=1,5$ olduğunda kaplamanın kullanılamayacak olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla kaplamanın trafikten ötürü servis yeteneği kaybı $\Delta PSI_T = P_0 - P_t$ olmaktadır. Burada P_0 , kaplamanın trafiğe açıldığı andaki PSI değeri, P_t ise kaplamayı rehabilite edileceği andaki son PSI değeridir. AASHTO-86 yönteminde zemindeki şişme ve donma özelliklerinin etkisinden kaynaklanan servis yeteneği kaybı da dikkate alınmaktadır. Şişmeye duyarlı zeminler artan su içeriği ile şişme göstererek kaplamada ek gerilmeler yaratmaktadır. Bu ek gerilmelerden ötürü kaplamanın servis yeteneğindeki azalma (ΔPSI_S) miktarının tayini için formül 2 kullanılmaktadır.

AASHTO-86 Yöntemine Göre Üstyapı Tabakalarının Ekonomik Analizi

$$\Delta\text{PSI}_{\text{ş}} = 0,00335 V_R P_{\text{ş}} (1 - e^{-\theta \cdot t}) \quad (2)$$

Burada V_R , potansiyel düşey yükselme olup laboratuvar testleri ile belirlenebilmektedir. θ , şişme oranı sabiti olup 0 ile 0,2 arasında değerler almaktadır. Eğer taban zemini suyla fazla temas halinde ise θ değeri yüksek olmaktadır. $P_{\text{ş}}$, şişme olasılığı olup şişmeye duyarlı zeminlerin yol boyunca sahip oldukları uzunlukların, toplam yol uzunluğuna oranının yüzde cinsinden değeridir. t ise yıl olarak zamanı ifade etmektedir.

Donma kabarmasından ötürü servis yeteneğindeki azalma (ΔPSI_D) formül 3 ile tespit edilmektedir.

$$\Delta\text{PSI}_D = 0,01 P_{DK} \Delta\text{PSI}_{\text{max}} [1 - e^{-(0,02\phi \cdot t)}] \quad (3)$$

Burada P_{DK} , donma kabarma olasılığı olup drenajın kalitesi, donma çözülme periyotlarının sayısı ve don penetrasyon derinliği gibi faktörler göz önüne alınarak yolun toplam uzunluğunun ne kadar kısmında donma olayı olabileceği görüşüne bağlıdır. $\Delta\text{PSI}_{\text{max}}$, don kabarmasından dolayı maksimum hizmet kabiliyeti kaybı olup, don penetrasyon derinliği ve drenaj kalitesine bağlı olarak 0 ile 5 arasında değişmektedir. ϕ ise donma kabarması oranı olup mm/gün olarak hacimsel artış oranını ifade etmektedir.

Trafik, zeminde şişme ve donma kabarmasından ötürü servis yeteneğindeki toplam kayıp formül 4 ile tespit edilmektedir.

$$\Sigma\Delta\text{PSI} = \Delta\text{PSI}_T + \Delta\text{PSI}_{\text{ş}} + \Delta\text{PSI}_D \quad (4)$$

Üstyapı sayısı (SN) formül 5 ile belirlenmektedir.

$$\text{SN} = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (5)$$

Burada a_i , her bir tabakanın izafi mukavemet katsayısı, D_i , kaplama, temel ve alt temel tabaka kalınlıkları, m_i ise drenaj faktörü olup kaplamanın doygunluk seviyesine yakın su içeriğine maruz kaldığı sürenin yıl içindeki yüzdesine bağlı olarak değişmektedir .

AASHTO yol testlerinin sonuçları trafik yükleri, malzemenin özellikleri, tabaka kalınlıkları, iklim koşulları ve zemin şartlarının etkileri regresyon analizleri ile irdelenmiştir. Esnek kaplamaların tasarımı için 1986 tasarım rehberinde formül 6 kullanılmıştır [5].

$$\text{Log}W_{8,2t}=Z_R S_0+9,36\log(SN+1)-0,20+\frac{\log[(\Delta PSI)/(4,2-1,5)]}{0,40+[1094/(SN+1)^{5,19}]}+2,32\log M_R - 8,07 \quad (6)$$

Burada,

$W_{8,2t}$: 8,2 ton tek dingil yükünün üstyapının son servis yeteneğine düşmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı,

Z_R : Güvenilirliğin yüzdesine bağlı olarak tespit edilen standart normal sapma değeri,

S_0 : Standart sapma,

M_R : Üstyapının üzerine oturduğu taban zemininin taşıma gücü.

AASHTO tasarım yönteminde sırasıyla şu işlemler yapılır: Üst yapısı hesaplanacak yolun oturacağı taban zemininin AASHTO 274 ile M_R değeri tespit edilmektedir. Zeminin CBR değeri ile M_R değeri arasında Psi cinsinden $M_R = 1500$ CBR gibi bir ilişki mevcut olduğundan dolayı taban zemininin CBR değeri bilinmesi halinde M_R değeri yaklaşık olarak tayin edilebilir. Proje trafiği belirlenir. Hizmet ve işletme periyodu sonundaki trafik belirlenir. Projelendirmede kullanılacak ($W_{8,2t}$) dingil yüküne eşdeğer trafik tespit edilir. Şerit faktörü ve yolun son hizmet kabiliyeti indeksi, drenaj etkisi belirlenir. SN belirlenir. Tabaka kalınlıkları ile izafi mukavemet ve drenaj katsayılarının çarpımının en az SN değerini verecek kalınlıklar tespit edilir. Her bir tabakanın taşıma gücüne göre kalınlıkları tekrar kontrol edilir. Yetersiz olan kalınlıklar artırılır.

AASHTO tasarım yönteminin kabul görüp yaygın bir şekilde kullanılmasından sonra üstyapı sayısı ve tabakaların izafi mukavemet katsayıları tartışılmaya başlanmıştır. Coree ve White olasılık analizi sunarak SN'in belirlenmesindeki mevcut durumun uygun olmadığını belirtmişlerdir [6]. Nii, SN'in belirlenmesinde deterministik bir yöntem olan convex modeli kullanmıştır [7]. Bir başka tartışma konusu da tabakaların izafi mukavemet katsayıları hakkında olmuştur. AASHTO yol testlerinde, granüler malzemeler için CBR ile tabaka katsayıları arasındaki ilişkiyi belirlemiştir. Walter yaptığı çalışmada puzzolanik çimento ile stabilize edilmiş temellerin AASHTO yol testinde iyi bir şekilde değerlendirilmediğini ileri sürmüş ayrıca çimento stabilizasyonlu temellerin izafi mukavemet katsayılarının temel kalınlığıyla değiştiğini tespit etmiştir [8]. Kenneth yaptığı çalışmada kireç, benzer bir aktivatör yada portlant çimentosu ile stabilize edilmiş bir malzemenin izafi tabaka katsayısının nasıl bulunacağına ilişkin bir yöntem sunmuştur [9]. David yine çimento ile stabilize edilmiş temellerin tabaka katsayılarını, hazırladığı silindirik numunelerin dayanımı, kuru birim ağırlıkları ve çimento miktarları ile aralarındaki regresyon analizleri ile tespit etmiştir [10]. Yapılan çalışmalarda temel tabakasinda geogrid kullanılması durumunda bu tabakanın izafi mukavemet katsayısının, zemin CBR değerine göre 1 ile 2 kat arasında arttığı tespit edilmiş ve geosentetiklerle güçlendirilmiş üstyapı sistemleri için bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem AASHTO tasarım yönteminin modifiyesi şeklinde olmuştur. [11].

3. MATLAB PROGRAMI İLE ÜSTYAPININ EKONOMİK ANALİZİ

AASHTO tasarım yönteminde, taban zemini taşıma gücüne, toplam eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) sayısına, ve hizmet kabiliyeti indeksine göre tespit edilen üstyapı sayısı (SN), tabaka kalınlıkları ile çarpılan izafi mukavemet ve drenaj katsayılarının toplamına eşit ve büyük olması gerektiği için bir çok kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Bu seçenekleri sınırlayan parametreler ise yapım kriterleri ve ekonomidir. Bu çalışmada tasarım kriterinde yer alan parametrelerin alabileceği farklı değerlerle ortaya çıkan binlerce seçenek AASHTO-86 yöntemine göre matlab programı kullanılarak analiz edilmiş ve optimum çözümler bulunmuştur. Oluşturulan bütün seçeneklerde drenaj faktörü 1, toplam maximum hizmet kabiliyeti indeksi kaybı 1,7 olarak alınmıştır. Üstyapıda yer alacak tabakaların izafi mukavemet katsayıları Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 2’de zeminin taşıma gücü (CBR) ve ESDY değerlerine göre Tablo 3’de ise temel ve alttemel cinsinin CBR değeri ve ESDY değerlerine göre formül 6 ile bulunan SN değerleri verilmiştir. Burada ESDY ortalama standart günlük dingil yükü sayısıdır.

Tablo 1. Tabaka cinslerine göre izafi mukavemet tabaka katsayıları[5].

Tabaka	Aşınma tabakası	Binder tabakası	Bitümlü temel	Plentmix temel	Granüler temel	Kırmataş alttemel	Kumçakıl alttemel
Tabaka katsayısı	0,43	0,41	0,33	0,15	0,14	0,13	0,11

Tablo 2.CBR ve ESDY değerlerine göre SN değerleri.

ESDY	CBR					
	3	5,5	10	18	33	60
1000	13,65	11,15	8,94	7,14	5,65	4,46
2000	15,01	12,34	10,00	8,01	6,34	5,03
3000	15,82	13,10	10,66	8,56	6,79	5,38
4000	16,40	13,62	11,14	8,97	7,11	5,65
5000	16,91	14,04	11,52	9,31	7,39	5,87

Tablo 3. Üstyapıdaki tabaka cinslerine ve ESDY’ne göre SN değerleri

ESDY	Granüler temel	Plentmix temel	Kum-çakıl alttemel	Kırmataş alttemel
	(CBR=100)	(CBR=120)	(CBR=30)	(CBR=50)
1000	3,60	3,33	5,87	4,80
2000	4,09	3,79	6,58	5,40
3000	4,39	4,07	7,04	5,78
4000	4,62	4,29	7,38	6,06
5000	4,80	4,46	7,66	6,29

Tablo 4. Tabaka cinslerine göre birim maliyetler.

Poz No	Tanım	Birimi	Maliyet (Y.T.L)	1 m ² , 1 cm maliyeti (Y.T.L)
6401/M	4 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	3,62	0,905
6400/M	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	4,47	0,894
6304/M	6 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	5,28	0,880
6300/M	7 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	6,13	0,875
6308/M	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	6,98	0,872
6200/M	14 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	11,41	0,815
6202/M	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	9,81	0,817
6203/M	11 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	9,2	0,836
6205/M	10 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	8,22	0,822
6206/M	9 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	7,41	0,823
6207/M	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	6,60	0,825
6040	Temel yapılması (granüler temel 1 inç kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ³	22,33	0,223
6100/3	Plentmix temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) Not: Kaplama yoğunluğu 2,4 gr/cm ³	ton	20,02	0,480
6010	Elenmiş çakıllı malzeme ile alttemel yapılması (kum-çakıl alttemel)	m ³	3,93	0,039
6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	18,07	0,180
	Ortalama aşınma tabakası maliyeti (1m ² 1 cm) = 0,899	=	0,899	Y.T.L
	Ortalama binder tabakası maliyeti (1m ² 1 cm) = 0,875	=	0,875	Y.T.L
	Ortalama bitümlü sıcak temel tabakası maliyeti (m ² / cm)	=	0,823	Y.T.L

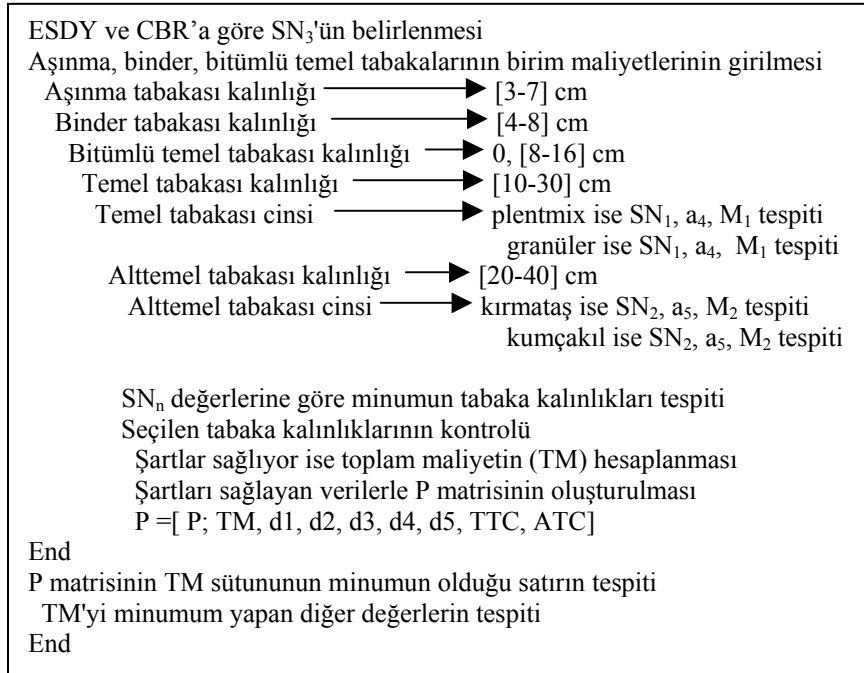
Daha önce de değinildiği üzere oluşacak kombinasyonları sınırlayacak parametreler yapım kriterleri ve ekonomidir. Her bir tabaka kalınlığının alt ve üst limitleri bulunmaktadır. Genel olarak bir defada serilip sıkıştırılmış bitümlü karışımların tabaka kalınlığı, karışımdaki en büyük dane boyutunun 1,5 ile 3 katı arasında, temel ve alttemel tabakaları için ise bu değer 20 cm olmalıdır [12].

AASHTO-86 Yöntemine Göre Üstyapı Tabakalarının Ekonomik Analizi

Bu çalışmada, aşınma tabakası 3-7 cm, binder tabakası (beton asfalt) 4-8 cm, bitümlü sıcak temel tabakası 8-16 cm, temel tabakası 10-30 cm ve alttemel tabakası 20-40 cm arasında alınmıştır. Böylece, aşınma tabakası için 5, binder tabakası için 5, bitümlü temel tabakası için 9, temel tabakası için 21, alttemel tabakası için 21 farklı kalınlık değeri, 2 farklı temel ve 2 farklı alttemel cinsi ile 396900 kombinasyon oluşturulmuştur. Tasarımda temel tabakasında ilave olarak bitümlü sıcak temelin olmaması durumu için ise 44100 kombinasyon oluşturulmuş olup toplam 441000 alternatif analize tabi tutulmuştur.

2005 yılı Karayolları Genel Müdürlüğü birim fiyatlarında, aşınma, binder ve bitümlü sıcak temel tabakaları için farklı kalınlıklardaki $1m^2$ maliyetleri, temel ve alttemel tabakaları için ise m^3 ve ton maliyetleri verilmiştir. Bu çalışmada, tabaka kalınlıklarına göre verilen maliyet değerleri, tabaka kalınlıklarına bölünerek m^2/cm miktarının maliyeti bulunmuş ve bu değerlerin de ortalaması alınmıştır. Tablo 4'de analizde kullanılacak birim maliyetler verilmiştir [13].

Hazırlanan program, bütün seçenekleri AASHTO-86 yöntemine göre analiz edip, tabaka kalınlıklarını, cinslerini ve maliyetini içeren satırlar şeklinde bir matrisin içine atmaktadır. Bu matrisin maliyet sütununun en düşük değerini içeren satır, program çıktısı olarak alınmaktadır. Şekil 1'de programın akışı verilmiştir. Tablo 5-9'da zemin taşıma gücüne ve ESDY'ye göre bulunan optimum tabaka kalınlıkları, temel tabakasında ilave olarak bitümlü temel olması ve olmaması durumları için verilmiştir.



Şekil 1. Program akış şeması.

M_1 : Temel tabakası maliyeti
 M_2 : Alttemel tabakası maliyeti
 a_4 : Temel tabakası izafi mukavemet katsayısı
 a_5 : Alttemel tabakası izafi mukavemet katsayısı
 d_n : Tabaka kalınlıkları
TTC : Temel tabakası cinsi
ATC : Alttemel tabakası cinsi

Tablo 5. $ESDY=5000$ için optimum tabaka kalınlıkları.

CBR	Aşınma t. (cm)	Binder t. (cm)	Bitümlü temel t. (cm)	Temel t. (cm)	Temel cinsi	Alttemel t. (cm)	Alttemel cinsi	Maliyet (Y.T.L)
3	6	8	8	29	Granüler	40	Kumçakıl	27,36
	-	-	0	-	-	-	-	-
5,5	3	4	8	30	Granüler	39	Kumçakıl	21,33
	6	7	0	30	Granüler	40	Kumçakıl	20,12
10	3	4	8	15	Granüler	36	Kumçakıl	17,84
	5	7	0	19	Granüler	35	Kumçakıl	16,53
18	3	4	8	15	Granüler	20	Kumçakıl	17,08
	5	7	0	19	Granüler	20	Kumçakıl	15,81
33	3	4	8	15	Granüler	20	Kumçakıl	17,08
	5	7	0	19	Granüler	20	Kumçakıl	15,81
60	3	4	8	15	Granüler	20	Kumçakıl	17,08
	5	7	0	19	Granüler	20	Kumçakıl	15,81

Tablo 6. $ESDY=4000$ için optimum tabaka kalınlıkları.

CBR	Aşınma t. (cm)	Binder t. (cm)	Bitümlü temel t. (cm)	Temel t. (cm)	Temel cinsi	Alttemel t. (cm)	Alttemel cinsi	Maliyet (Y.T.L)
3	6	7	8	28	Granüler	40	Kumçakıl	26,26
	-	-	0	-	-	-	-	-
5,5	3	4	8	27	Granüler	39	Kumçakıl	20,66
	6	6	0	30	Granüler	40	Kumçakıl	19,25
10	3	4	8	13	Granüler	35	Kumçakıl	17,35
	6	5	0	20	Granüler	34	Kumçakıl	15,85
18	3	4	8	13	Granüler	20	Kumçakıl	16,63
	6	5	0	20	Granüler	20	Kumçakıl	15,18
33	3	4	8	13	Granüler	20	Kumçakıl	16,63
	6	5	0	20	Granüler	20	Kumçakıl	15,18
60	3	4	8	13	Granüler	20	Kumçakıl	16,63
	6	5	0	20	Granüler	20	Kumçakıl	15,18

AASHTO-86 Yöntemine Göre Üstyapı Tabakalarının Ekonomik Analizi

Tablo 7. ESDY=3000 için optimum tabaka kalınlıkları.

CBR	Aşınma t. (cm)	Binder t. (cm)	Bitümlü temel t. (cm)	Temel t. (cm)	Temel cinsi	Alttemel t. (cm)	Alttemel cinsi	Maliyet (Y.T.L)
3	4	7	8	30	Ganüler	40	Kumçakıl	24,90
	7	8	0	29	Plentmix	40	Kırmataş	34,41
5,5	3	4	8	23	Ganüler	40	Kumçakıl	19,82
	7	4	0	29	Ganüler	40	Kumçakıl	18,17
10	3	4	8	11	Ganüler	33	Kumçakıl	16,81
	3	8	0	18	Ganüler	33	Kumçakıl	15,28
18	3	4	8	11	Ganüler	20	Kumçakıl	16,19
	3	8	0	18	Ganüler	20	Kumçakıl	14,66
33	3	4	8	11	Ganüler	20	Kumçakıl	16,19
	3	8	0	18	Ganüler	20	Kumçakıl	14,66
60	3	4	8	11	Ganüler	20	Kumçakıl	16,19
	3	8	0	18	Ganüler	20	Kumçakıl	14,66

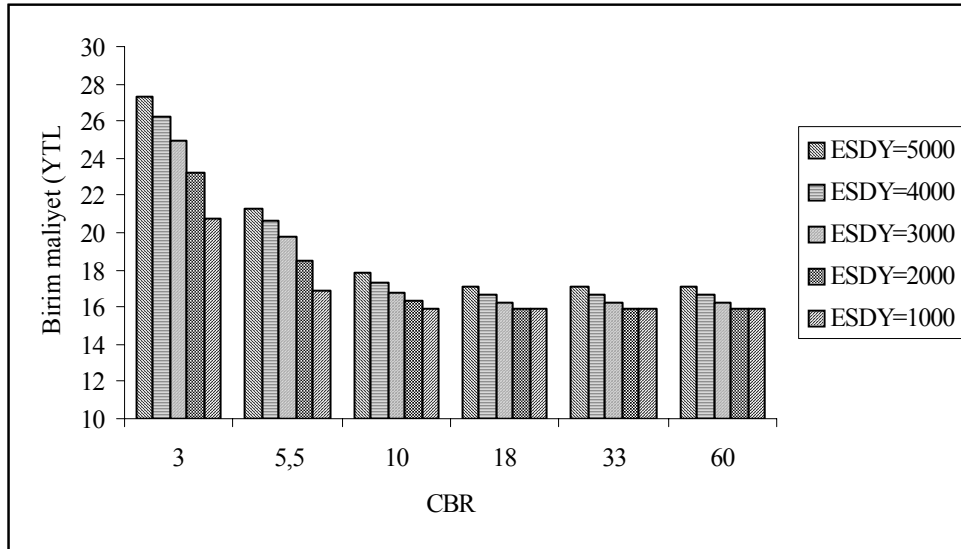
Tablo 8. ESDY=2000 için optimum tabaka kalınlıkları.

CBR	Aşınma t. (cm)	Binder t. (cm)	Bitümlü temel t. (cm)	Temel t. (cm)	Temel cinsi	Alttemel t. (cm)	Alttemel cinsi	Maliyet (Y.T.L)
3	5	4	8	30	Ganüler	40	Kumçakıl	23,18
	7	7	0	30	Ganüler	38	Kırmataş	25,95
5,5	3	4	8	17	Ganüler	40	Kumçakıl	18,48
	4	6	0	27	Ganüler	40	Kumçakıl	16,78
10	3	4	8	10	Ganüler	28	Kumçakıl	16,35
	6	4	0	17	Ganüler	31	Kumçakıl	14,17
18	3	4	8	10	Ganüler	20	Kumçakıl	15,96
	6	4	0	17	Ganüler	20	Kumçakıl	13,64
33	3	4	8	10	Ganüler	20	Kumçakıl	15,96
	6	4	0	17	Ganüler	20	Kumçakıl	13,64
60	3	4	8	10	Ganüler	20	Kumçakıl	15,96
	6	4	0	17	Ganüler	20	Kumçakıl	13,64

Tablo 9. ESDY=1000 için optimum tabaka kalınlıkları.

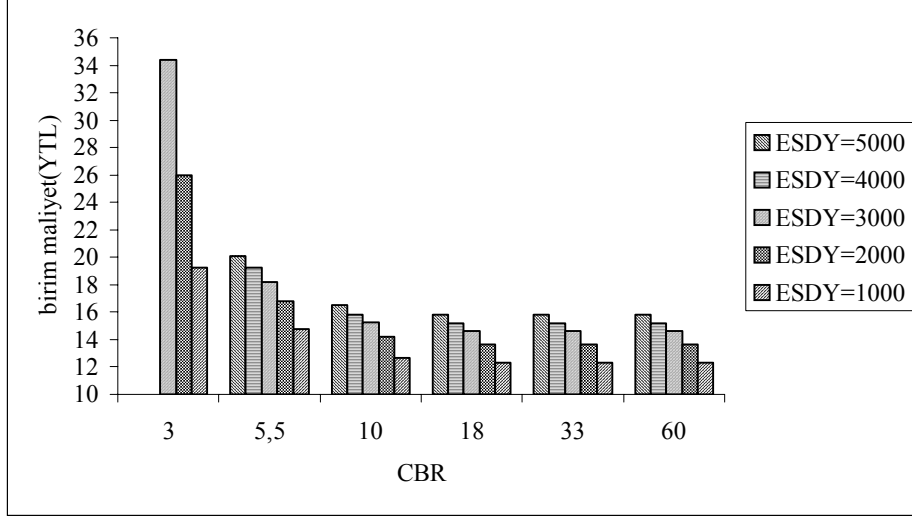
CBR	Aşınma t. (cm)	Binder t. (cm)	Bitümlü temel t. (cm)	Temel t. (cm)	Temel cinsi	Alttemel t. (cm)	Alttemel cinsi	Maliyet (Y.T.L)
3	3	4	8	27	Ganüler	40	Kumçakıl	20,71
	7	5	0	30	Ganüler	40	Kumçakıl	19,27
5,5	3	4	8	10	Ganüler	39	Kumçakıl	16,87
	3	6	0	22	Ganüler	40	Kumçakıl	14,76
10	3	4	8	10	Ganüler	20	Kumçakıl	15,96
	5	4	0	15	Ganüler	28	Kumçakıl	12,68
18	3	4	8	10	Ganüler	20	Kumçakıl	15,96
	5	4	0	15	Ganüler	20	Kumçakıl	12,29
33	3	4	8	10	Ganüler	20	Kumçakıl	15,96
	5	4	0	15	Ganüler	20	Kumçakıl	12,29
60	3	4	8	10	Ganüler	20	Kumçakıl	15,96
	5	4	0	15	Ganüler	20	Kumçakıl	12,29

Şekil 2'de temel tabakasında ilave olarak bitümlü temel tabakasının bulunması durumunda Şekil 3'de ise bitümlü temel tabakasının bulunmaması durumunda CBR ve ESDY'nin üstyapı maliyetine etkisi grafiksel olarak verilmiştir.



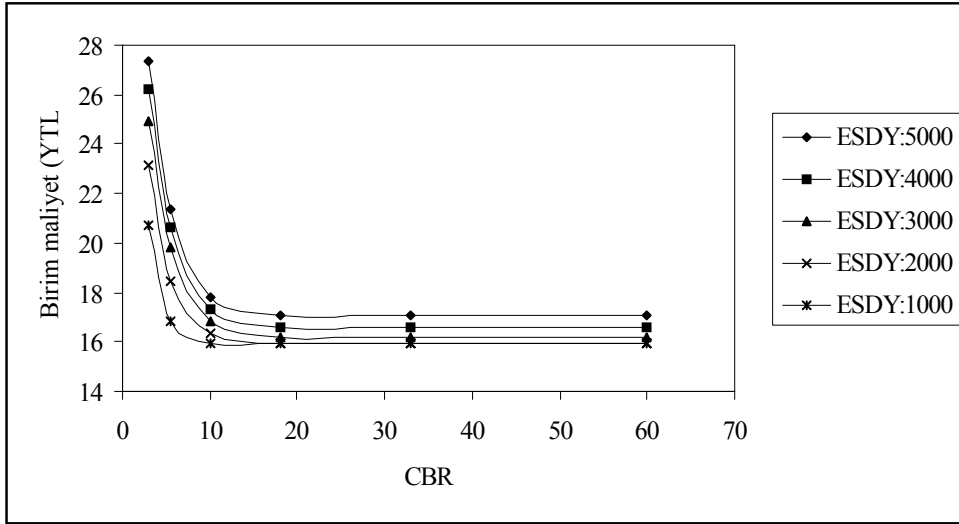
Şekil 2. CBR ve ESDY değerleri ile birim maliyet ilişkisi (bitümlü temel tabakası bulunmaması hali).

AASHTO-86 Yöntemine Göre Üstyapı Tabakalarının Ekonomik Analizi



Şekil 3. CBR ve ESDY değerleri ile birim maliyet ilişkisi (bitümlü temel tabakası bulunması hali).

Şekil 4’de farklı ESDY değerlerine göre birim maliyet ve CBR’ın matematiksel ilişkisi (bitümlü temel tabakası bulunması durumunda) yüksek belirlilik katsayılarına sahip eğriler uydurularak tespit edilmiş ve formül 7’de bu ilişkiler verilmiştir.



Şekil 4. CBR ve ESDY değerleri ile birim maliyet ilişkisi (bitümlü temel tabakası bulunması hali)

$$\begin{aligned} \text{ESDY} = 5000 \text{ için } y &= 81. x^{-1,879} + 17,08 \\ \text{ESDY} = 4000 \text{ için } y &= 78. x^{-1,904} + 16,63 \\ \text{ESDY} = 3000 \text{ için } y &= 71. x^{-1,910} + 16,19 \\ \text{ESDY} = 2000 \text{ için } y &= 62. x^{-1,957} + 15,96 \\ \text{ESDY} = 1000 \text{ için } y &= 95. x^{-2,727} + 15,96 \end{aligned} \quad (7)$$

Burada, $x > 0$ koşulu ile, y birim maliyeti (YTL/m²), x ise taban zemininin CBR değeridir. Temel tabakasında ilave olarak bitümlü temel bulunmaması, CBR değerinin %3 olması durumunda ESDY = 4000 ve 5000 için belirlenen aralıkta kalınlıklar yeterli olmadığından bu şartlardaki maliyet ilişkisi kurulamamıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada üstyapıyı oluşturan tabakaların optimum kalınlıkları, 441000 seçenek arasından AASHTO-86 yöntemine göre analiz edilerek tespit edilmiştir. Aynı zamanda iki farklı temel ve alttemel cinsleri arasından en ekonomik ve uygun temel cinsi, granüler temel, en uygun ve ekonomik alttemel cinsi ise kum-çakıl alttemel olarak tespit edilmiştir. Şekil 2 ve 3'de görüldüğü üzere ESDY'nin bütün değerleri için zemin taşıma gücü azaldıkça üstyapının birim maliyeti artmaktadır. Bu artış CBR değerinin 10'dan küçük değerleri için daha fazla olmaktadır. Dolayısı ile zemin taşıma gücünü arttırmak için yapılacak iyileştirmeler CBR > 10 durumunda ekonomik olmayacaktır. CBR < 10 olması durumunda zemin iyileştirilmesi için yapılacak maliyetin, üstyapıda meydana gelecek maliyet azalması ile karşılaştırılması gerekmektedir. Temel tabakasında ilave olarak bitümlü temel kullanılması durumunda maliyetler açısından çok az bir artış olmaktadır. Üstyapıda bitümlü temel kullanılması halinde temel ve alttemel kalınlıkları fazla değişmezken aşınma ve binder tabakası kalınlıkları %50 oranında azalmaktadır. Yapılan çalışmada ESDY'nin 4000'den büyük ve zemin taşıma gücünün %3 gibi düşük değerlerde olması halinde temel tabakasında ilave olarak bitümlü temel kullanılması zorunluluğu olduğu, ESDY'nin 2000 ile 4000 değerleri arasında ve yine zemin taşıma gücünün düşük olduğu durumlarda ise bitümlü temel kullanılmamasının temel cinsi olarak granüler yerine plentmix, alttemel olarak da kum-çakıl yerine kırmataş gerektirmesinden dolayı ekonomik olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre zemin taşıma gücü artarken alttemel kalınlığı sürekli olarak azalmakta ve alt limit değerine ulaşmakta fakat temel kalınlığı alt limite ulaşmadan belli değerlerde sabit kalmaktadır.

Semboller

- \overline{RD} : Her iki teker izindeki ortalama derinliği
 \overline{SV} : Ortalama eğim değişimini
 θ : Şişme oranı sabiti
 ϕ : Donma kabarması oranı
 ΔPSI_D : Donma kabarmasından ötürü servis yeteneğindeki azalma
 ΔPSI_S : Şişmeden dolayı servis yeteneğindeki azalma
 a_i : Her bir tabakanın izafi mukavemet katsayısı

AASHTO-86 Yöntemine Göre Üstyapı Tabakalarının Ekonomik Analizi

C	: Çatlaklar
Di	: Kaplama, temel ve alt temel tabaka kalınlıkları
ESDY	: Eşdeğer standart dingil yükü
M _R	: Zemin taşıma gücü
P	: Yamalar
P ₀	: İlk servis yeteneği
P _{DK}	: Donma kabarma olasılığı
PSI _T	: Mevcut servis yeteneği indeksi
P _ş	: Şişme olasılığı
P _t	: Nihai servis yeteneği indeksi
S ₀	: Standart sapma
SN	: Üstyapı sayısı
V _R	: Potansiyel düşey yükselme
W _{8,2t}	: 8,2 ton tek dingil yükünün nihai servis yeteneğine erişmesi için gerekli toplam tekerrür sayısı
Z _R	: Güvenilirlik seviyesi

Kaynaklar

- [1] <http://www.die.gov.tr>
- [2] http://www.gap-dogu-kalkinma.com/ulasim/6_Karayollariz.htm
- [3] Dikicioğlu, A.E., Ülkemizdeki Sathi Kaplamalı ve Sıcak Karışım Kaplamalı Yollarda Ömür-Maliyet İlişkisine Genel Bakış. 4.Ulusal Asfalt Sempozyumu, 149-153, 2004.
- [4] Önal M.A, Temren, Z., Türkiye İle Bazı Avrupa Ülkelerinin Esnek Üstyapı Tasarımlarının Karşılaştırılması. 4.Ulusal Asfalt Sempozyumu 224-243,2004.
- [5] Argun.T., Kaplama Mühendisliği Ve Uygulamaları. Ankara, 2004.
- [6] Coree J.B, White T.D. AASHTO Flexible Pavement Design Method: Fact or Fiction. Transportation Research Record, no. 1286. National Research Council, 206–216, 1990.
- [7] Nii O, Uncertainty Analysis İn Structural Number Determination İn Flexible Pavement Design-a Convex Model Approach. Construction and Building Materials 16,67-71,2002.
- [8] Morris, W. L. Design Guidelines for Pozzolanic Pavements. Pozzolanic Soil Stabilization Workshop, Council Bluffs, Iowa,
- [9] Kenneth L. Bergeson and Andrew G. Barnes, Iowa Thickness Design Guide for Low Volume Roads Using Reclaimed Hydrated Class C Fly Ash Bases.Ttransportation Conference Proceedings, 1998.
- [10] David N. Richardson, AASHTO Layer Coefficients for Cement-Stabilized Soil Bases. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 83-87, 1996.
- [11] http://www.tenax.net/geosynthetics/tech_doc/tds001.pdf
- [12] Karayolları genel Müdürlüğü, Yollar Fenni Şartnamesi, 170/2, 1989.
- [13] <http://www.birimfiyat.net>