

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVAALANI ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat Aziz ÖZDEMİR

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Ulaştırma

OCAK-2010

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVAALANI ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat Aziz ÖZDEMİR

04215105

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Ocak 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2010

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Necati KULOĞLU (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU (F.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. Baha Vural KÖK (F.Ü.)

OCAK-2010

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli katkılarını esirgemeyen tez danışmanım Prof.Dr. Necati KULOĞLU'na, tecrübelerinden istifade ettiğim Yrd. Doç. Dr. Baha Vural KÖK'e, kaynak temininde önemli katkıları olan İnş.Yük.Müh. Levent MAZILIGÜNEY'e, İnş.Yük.Müh. Fatih TAHMİLCİ'ye, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve eşim Yasemin ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma öğrencinin kişisel görüşlerini içermektedir. Çalışmada sunulan bilgiler ve değerlendirmeler TSK'nın görüşlerini yansıtmamaktadır.

Murat Aziz ÖZDEMİR
ELAZIĞ-2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLOLAR LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Konusu ve Önemi.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	1
2. HAVA ULAŞIMI, HAVAALANI ve HAVAALANI MÜHENDİSLİĞİ.....	3
2.1. Ülkemizde Bulunan Havaalanları.....	4
2.2. Havaalanı Arazisinin İncelenmesi.....	8
2.3. Taban Zemini.....	8
2.3.1. Standart ve Modifiye Proktor Deneyleri.....	11
2.3.2. CBR Deneyi.....	14
2.3.3. Plaka Yükleme Deneyi.....	16
2.4. Üstyapı.....	20
2.4.1. Seçme Granüler Malzeme veya Alttemel Tabakası.....	20
2.4.2. Temel Tabakası.....	20
2.4.3. Kaplama Tabakası.....	21
2.4.3.1. Kaliteli Beton Kaplama.....	21
2.4.3.2. Asfalt Betonu.....	21
2.4.4. Üstyapı Cinsleri.....	23
2.5. Stabilizasyon.....	27
2.5.1. Kireç ile Stabilizasyon.....	28
2.5.2. Çimento ile Stabilizasyon.....	29
2.5.3. Bitüm ile Stabilizasyon.....	30

	<u>Sayfa No</u>
3. UÇAK KARAKTERİSTİKLERİ.....	31
3.1. Uçak Ağırlığı.....	31
3.2. Tekerlek ve İniş Takımı Düzeni.....	32
4. HAVAALANI ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİ.....	36
4.1. USCOE CBR Yöntemi.....	37
4.1.1. Giriş ve Tarihsel Gelişim.....	37
4.1.2. Taban Zemini.....	40
4.1.3. Seçme Granüler Malzeme veya Alttemel Tabakası.....	40
4.1.4. Temel Tabakası.....	41
4.1.5. Stabilizasyon.....	42
4.1.6. Kaplama Tabakası.....	43
4.1.7. Uçak Karakteristikleri.....	44
4.1.8. Uygulama Esasları ve Tasarım Prosedürü.....	45
4.2. FAA CBR Yöntemi.....	46
4.2.1. Giriş ve Tarihsel Gelişim.....	46
4.2.2. Taban Zemini.....	46
4.2.3. Seçme Granüler Malzeme veya Alttemel Tabakası.....	46
4.2.4. Temel Tabakası.....	48
4.2.5. Kaplama Tabakası.....	49
4.2.6. Uçak Karakteristikleri.....	49
4.2.7. Uygulama Esasları ve Tasarım Prosedürü.....	51
4.3. FAARFIELD Yöntemi.....	53
4.3.1. Giriş ve Tarihsel Gelişim.....	53
4.3.2. Taban Zemini.....	54
4.3.3. Seçme Granüler Malzeme veya Alttemel Tabakası.....	54
4.3.4. Temel Tabakası.....	55
4.3.5. Kaplama Tabakası.....	57
4.3.6. Uçak Karakteristikleri.....	58
4.3.7. Uygulama Esasları ve Tasarım Prosedürü.....	59
5. TASARIM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	62
5.1. USCOE CBR Yönteminin İncelenmesi.....	65

	<u>Sayfa No</u>
5.2. FAA CBR Yönteminin İncelenmesi.....	69
5.3. FAARFIELD Yönteminin İncelenmesi.....	73
5.4. Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	77
6. DEĞERLENDİRME ve SONUÇ.....	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ÖZET

Havaalanlarında bulunan kaplamalı sahalara rijit, kompozit ve esnek olmak üzere inşa edilmektedir. Bu sahalara hava taşıtlarının güvenliği için uygun yapısal ve yüzeysel koşullara sahip olmalıdır. Yapımı oldukça maliyetli olan ve çeşitli hava taşıtlarınca kullanılan kaplamalı sahalara iyi tasarlanması, maliyetleri çok daha fazla olan hava taşıtlarının güvenliği için büyük önem arz etmektedir.

Esnek üstyapıların matematiksel modellenmesinde güçlüklerle karşılaşıldığı için analitik yöntemlere nazaran genellikle ampirik tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ampirik tasarım yöntemlerinden olan USCOE CBR (United States Army Corps of Engineer California Bearing Ratio) ve FAA CBR (Federal Aviation Administration California Bearing Ratio) yöntemleri ile mekanistik-ampirik tasarım yöntemlerinden olan FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design) yöntemi incelenmiştir.

Aynı tasarım koşulları altında yöntemler tarafından önerilen esnek üstyapı kalınlıkları hesaplanmış ve elde edilen kalınlıklar karşılaştırılmıştır. Değerlendirme sonucunda, taban zemini taşıma gücü, uçak ağırlığı, tekerlek ve iniş takımı düzeni ve operasyon sayısı esnek üstyapı kalınlığı üzerinde etkili olduğu ve taban zemini taşıma gücü arttıkça önerilen esnek üstyapı kalınlıklarının azaldığı görülmüştür. Kalınlık azalışının yavaşladığı kritik taban zemini taşıma gücü değerlerinin; FAARFIELD yöntemi için 10 CBR, FAA CBR yöntemi için 6 CBR ve USCOE CBR yöntemi için yüksek uçak ağırlığında 6 CBR, düşük ağırlıkta 10 CBR olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havaalanı, esnek üstyapı, tasarım, CBR, FAARFIELD.

SUMMARY

COMPARISON OF FLEXIBLE AIRPORT PAVEMENT DESIGN METHODS

In airports, paved areas are constructed as rigid, composite, and flexible pavements. For the safety of the aircrafts, these pavements should satisfy structural and surface condition requirements. The design of pavements with high construction costs is an important subject while considering the aircraft costs that are much higher.

In airport pavement design, empirical design methods are utilized rather than analytical methods since it is difficult to model flexible pavements mathematically. In this study, USCOE CBR (United States Army Corps of Engineer California Bearing Ratio) and FAA CBR (Federal Aviation Administration California Bearing Ratio) which are both empirical design methods are studied with a mechanistic-empirical design method called FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design).

Under same design conditions, flexible pavement thicknesses are calculated by using design methods and the results are compared. According to evaluation of results, it is observed that subgrade bearing capacity, aircraft weight and wheel and gear arrangement affect flexible pavement thickness considerably. It is also observed that as subgrade bearing capacity becomes higher, calculated thicknesses are reduced. Critical subgrade bearing capacity at which rate of thickness reduces are determined as 10 CBR for FAARFIELD, 6 CBR for FAA CBR and 6 CBR at low weight and 10 CBR at high weight for USCOE CBR method.

Keywords: Airport, flexible pavement, design, CBR, FAARFIELD.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. İstanbul Atatürk Havalimanı hava fotoğrafı.....	6
Şekil 2.2. İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı hava fotoğrafı.....	6
Şekil 2.3. Ankara Esenboğa Havalimanı hava fotoğrafı.....	7
Şekil 2.4. Samsun Çarşamba Havalimanı hava fotoğrafı.....	7
Şekil 2.5. Tipik kuru birim ağırlık-su muhtevası eğrisi.....	13
Şekil 2.6. Proktor deney tokmağı ve silindirik metal kalıp.....	14
Şekil 2.7. CBR deneyi düzeneği.....	15
Şekil 2.8. CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi.....	17
Şekil 2.9. Plaka yükleme deneyi düzeneği.....	18
Şekil 2.10. Tipik rijit üstyapı enkesiti.....	25
Şekil 2.11. Onarılmış enine yansıma çatlağı.....	25
Şekil 2.12. Tipik esnek üstyapı enkesiti.....	26
Şekil 3.1. Standart tekerlek ve iniş takımı düzeni adlandırma sistemi.....	33
Şekil 3.2. Bazı standart tekerlek ve ana iniş takımı gösterimleri.....	34
Şekil 3.3. Bazı standart tekerlek ve ana-gövde iniş takımı gösterimleri.....	35
Şekil 4.1. FAA CBR yöntemi örnek tasarım abağı.....	52
Şekil 4.2. FAARFIELD iş tanımlama arayüzü.....	60
Şekil 4.3. FAARFIELD kesit tanımlama arayüzü.....	60
Şekil 4.4. FAARFIELD trafik hacmi tanımlama arayüzü.....	61
Şekil 4.5. FAARFIELD üstyapı tabaka kalınlığı hesaplama arayüzü.....	61
Şekil 5.1. S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip F-4E uçağı.....	63
Şekil 5.2. 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip C-130 uçağı.....	64
Şekil 5.3. 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip C-141 uçağı.....	64
Şekil 5.4. USCOE CBR yöntemi, CBR=3 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	65
Şekil 5.5. USCOE CBR yöntemi, CBR=15 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	66
Şekil 5.6. USCOE CBR yöntemi, T=1.200 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	67

Şekil 5.7. USCOE CBR yöntemi, T=25.000 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	67
Şekil 5.8. USCOE CBR yöntemi, T=25.000 için farklı ağırlıklarda taban zemini CBR değeri-üstyapı kalınlığı ilişkisi.....	68
Şekil 5.9. FAA CBR yöntemi, CBR=3 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	69
Şekil 5.10. FAA CBR yöntemi, CBR=15 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	70
Şekil 5.11. FAA CBR yöntemi, T=1.200 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	71
Şekil 5.12. FAA CBR yöntemi, T=25.000 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	71
Şekil 5.13. FAA CBR yöntemi, T=25.000 için farklı ağırlıklarda taban zemini CBR değeri-üstyapı kalınlığı ilişkisi.....	72
Şekil 5.14. FAA FAARFIELD yöntemi, CBR=3 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	73
Şekil 5.15. FAA FAARFIELD yöntemi, CBR=15 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	74
Şekil 5.16. FAA FAARFIELD yöntemi, T=1.200 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi.....	75
Şekil 5.17. FAA FAARFIELD yöntemi, T=25.000 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlıklarının üstyapı kalınlığına etkisi.....	75
Şekil 5.18. FAA FAARFIELD yöntemi, T=25.000 için farklı ağırlıklarda taban zemini CBR değeri-üstyapı kalınlığı ilişkisi.....	76
Şekil 5.19. CBR=3 ve T=25.000 için yöntemlere göre uçak ağırlığı-üstyapı kalınlığı ilişkisi.....	77
Şekil 5.20. CBR=15 ve T=25.000 için yöntemlere göre uçak ağırlığı-üstyapı kalınlığı ilişkisi.....	77

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Yıllara göre hava ulaşımında yolcu ve uçak trafiği.....	3
Tablo 2.2. Sivil hava trafiğine açık bazı havaalanlarına ait pist özellikleri.....	5
Tablo 2.3. Zemin deneyleri ve standartları	8
Tablo 2.4. USCOE yöntemi taban zemini incelemesi maksimum sondaj aralıkları...	9
Tablo 2.5. FAA yöntemi taban zemini incelemesi maksimum sondaj aralıkları.....	10
Tablo 2.6. USCS'ye göre zemin sınıflandırma sistemi	12
Tablo 2.7. Zemin sınıfları için tipik CBR değerleri.....	18
Tablo 2.8. Zemin sınıfına göre k değerleri.....	19
Tablo 4.1 . Yük tekrar katsayıları.....	39
Tablo 4.2. Gradasyon değerleri ve atterberg limitleri.....	41
Tablo 4.3. Amerikan Donanması için minimum temel tabakası kalınlıkları.....	42
Tablo 4.4. Stabilize tabakalar için minimum serbest basınç mukavemeti değerleri..	43
Tablo 4.5. Amerikan Donanması için stabilize tabaka eşdeğerlik katsayıları.....	43
Tablo 4.6. Amerikan Donanması için minimum kaplama tabakası kalınlıkları.....	44
Tablo 4.7. Amerikan Donanması için standart tasarım uçak cinsleri.....	44
Tablo 4.8. FAA CBR yöntemi için taban zemini sıkıştırma değerleri ve derinlikleri	47
Tablo 4.9. Alttemel tabakası cinsleri ve şartname numaraları.....	47
Tablo 4.10. Temel tabakası cinsleri ve şartname numaraları.....	48
Tablo 4.11. Minimum temel tabakası kalınlıkları.....	48
Tablo 4.12. Tasarım uçağına dönüşüm katsayıları.....	50
Tablo 4.13. FAARFIELD yöntemi için taban zemini sıkıştırma değerleri ve derinlikleri	55
Tablo 4.14. Temel tabakası cinsleri ve şartname numaraları.....	56
Tablo 4.15. Temel tabakası elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri.....	57
Tablo 5.1. Esnek üstyapı kalınlığı hesaplamalarında kullanılan değişkenler.....	63
Tablo 5.2. Taban zemini taşıma gücüne göre tekerlek ve iniş takımı düzeninin üstyapı kalınlığına etkisi.....	78

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CBR	: California Bearing Ratio
CDF	: Cumulative Damage Factor
DHMI	: Devlet Hava Meydanları İşletmesi
ETTY	: Eşdeğer Tek Tekerlek Yükü
FAA	: Federal Aviation Administration
FAARFIELD	: FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design
HEAŞ	: Havaalanı İşletme ve Havacılık Endüstrileri Anonim Şirketi
İHA	: İnsansız Hava Aracı
MPTOW	: Maximum Permissible Take-off Weight
MRW	: Maximum Ramp Weight
MTOW	: Maximum Take-off Weight
NATO	: North Atlantic Treaty Organization
OEW	: Operating Empty Weight
PAT	: Pist-Apron-Taksi yolu
USCOE	: United States Corps of Engineers
USCS	: Unified Soil Classification System

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Konusu ve Önemi

Tarihsel süreç içerisinde değerlendirildiğinde, ekonomik kaygılar nedeniyle hava ulaşımına nazaran diğer ulaşım türlerine talep daha fazla olmuştur. Ancak, hızla değişen ve gelişen dünyada zamanın en değerli kaynak haline gelmesi diğer ulaşım türlerine göre daha hızlı, konforlu ve güvenli ulaşım olanağı sağlayan hava ulaşımının önemini gün geçtikçe artırmaktadır. Küreselleşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte günümüzde pek çok sektörde olduğu gibi havacılık sektöründe de büyük gelişmeler yaşanmaktadır.

Yapımı oldukça maliyetli olan ve çeşitli hava taşıtlarınca kullanılan havaalanı kaplamalı sahaları üstyapısının iyi tasarlanması, maliyetleri çok daha fazla olan hava taşıtlarının emniyeti ve yolcuların can güvenliği için büyük önem arz etmektedir. Özellikle askeri havacılık faaliyetleri dikkate alındığında, söz konusu maliyetler ve kaplamalı sahaların önemi daha da artmaktadır. Bu anlamda, daha güvenli kaplamalı saha üstyapısı inşa edilmesiyle sosyal ve ekonomik alanda büyük kazançlar elde edilebilir.

Ülkemizde bulunan sivil ve askeri hizmete açık havaalanlarının büyük çoğunluğu NATO (North Atlantic Treaty Organization) bütçesiyle inşa edilmiştir. Son yıllarda ülkemiz sivil havacılığının gelişmesi ile birlikte Ulaştırma Bakanlığı tarafından özellikle havaalanı pistlerine yönelik olarak kapsamlı yenileme faaliyetleri gerçekleştirilmektedir.

Bununla birlikte, kaplamalı saha inşa ve yenileme projelerinin ekonomik olarak hazırlanması gün geçtikçe gelişen sektöre ivme kazandıracak ve ülke ekonomisine doğrudan ve dolaylı olarak katkı sağlayacaktır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Bu çalışmanın amacı, havaalanı kaplamalı sahalarında esnek üstyapı kullanımının genel olarak değerlendirilmesi, esnek üstyapı tasarımında kullanılan USCOE CBR (United States Army Corps of Engineer California Bearing Ratio), FAA CBR (Federal Aviation Administration California Bearing Ratio) ve FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design) yöntemlerinin incelenmesi ve bu yöntemler kullanılarak aynı koşullar altında elde edilen esnek üstyapı kalınlıklarının karşılaştırmalı olarak

değerlendirilmesidir. Çalışmada, yöntemlerinin tarihsel gelişimi incelenmiş, uygulama esasları ve tasarım prosedürleri açıklanmış ve önerilen üstyapı kalıklıkları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bir diğer amacı, ülkemizde akademik anlamda sınırlı olarak gerçekleştirilen havaalanı kaplamalı sahalarının üstyapı tasarımı konusunda ilgili teknik personele genel bilgi vermek ve tasarım konusunda müteakip çalışmalar için teknik sağduyu kazandırmaktır.

Esnek üstyapıda kaplama tabakası olarak kullanılan BSK (Bitümlü Sıcak Karışım) tasarımı, üstyapı tabakalarında kullanılan diğer malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile havaalanının geometrik tasarımı bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde küresel ölçekte son yıllarda hızla gelişen hava ulaşımı ve havaalanı mühendisliği ile ülkemizde bulunan sivil hava ulaşımına açık havaalanları hakkında genel bilgiler verilmektedir. Havaalanı arazisinin incelenmesi, altyapıyı oluşturan taban zemini, üstyapı, üstyapı cinsleri ve stabilizasyon yöntemleri ile ilgili esaslara yine bu bölümde değinilmektedir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde üstyapı tasarımına etki eden ağırlık, tekerlek ve iniş takımı düzeni ile trafik gibi uçak karakteristikleri anlatılmaktadır.

Dördüncü bölümde, havaalanı esnek üstyapı tasarım yöntemlerinin tarihçesi, uygulama esasları ve tasarım prosedürleri açıklanmaktadır.

Çalışmada yer alan havaalanı esnek üstyapı tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen üstyapı kalınlık hesaplamaları ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması çalışmanın beşinci bölümünü oluşturmaktadır.

Çalışmanın son bölümünde elde edilen sonuçlar değerlendirilmekte ve daha sonraki araştırmalar için önerilerde bulunmaktadır.

2. HAVA ULAŞIMI, HAVAALANI ve HAVAALANI MÜHENDİSLİĞİ

Küresel ölçekte 1970 yılından sonra hızla artan hava ulaşımı, ülkemizde de sektörün hızla büyümesini beraberinde getirmiş ve son on dört yılda yolcu trafiğinin % 186 oranında, uçak trafiğinin ise % 113 oranında artmasıyla kendini göstermiştir (Tablo 2.1.). Bu oran sosyoekonomik alandaki gelişmeyi ve kişilerin ulaşım alışkanlıklarındaki değişimi göstermektedir. Havacılık sektöründeki yaşanan rekabet bu süreçte önemli rol oynamaktadır [1, 2].

Tablo 2.1. Yıllara göre hava ulaşımında yolcu ve uçak trafiği [2].

YIL	YOLCU TRAFİĞİ			UÇAK TRAFİĞİ		
	İç Hat	Dış Hat	Toplam	İç Hat	Dış Hat	Toplam
1995	10.347.528	17.419.851	27.767.379	169.018	179.431	348.449
1996	10.862.539	19.918.123	30.780.662	176.040	196.446	372.486
1997	12.413.720	21.982.614	34.396.334	197.103	206.711	403.814
1998	13.238.832	20.960.847	34.199.679	218.155	196.830	414.985
1999	12.931.771	17.079.887	30.011.658	213.078	175.628	388.706
2000	13.339.039	21.633.495	34.972.534	200.841	190.369	391.210
2001	10.057.808	23.562.640	33.620.448	167.500	206.002	373.502
2002	8.697.864	24.927.311	33.625.175	155.353	215.389	370.742
2003	9.125.298	25.141.870	34.267.168	154.201	214.193	368.394
2004	14.427.969	30.361.101	44.789.070	192.698	247.540	440.238
2005	19.954.918	34.582.322	54.537.240	256.380	277.316	533.696
2006	28.774.657	32.880.802	61.655.459	341.262	286.139	627.401
2007	31.949.341	38.347.191	70.296.532	365.177	323.291	688.468
2008	35.832.776	43.605.513	79.438.289	385.764	356.001	741.765

Hava ulaşımında yerel ve küresel ölçekte yaşanan gelişmeye paralel olarak daha modern ve büyük hava taşıtlarının hizmete girmesiyle havaalanı mühendisliği büyük önem kazanmıştır. Havaalanı mühendisliği, hava ulaşımının başlangıç ve bitiş noktalarını oluşturan havaalanı yapılarının; planlama, tasarım, yapım ve işletme faaliyetlerini kapsayan disiplinin genel adıdır [1].

Havaalanı; karada veya suda, içerisindeki bina, tesis ve donatılar dahil uçakların iniş, kalkış ve yer operasyonlarını yapmaları amacıyla düzenlenmiş sahalardır [3]. Havaalanı faaliyetlerinin hem havada hem de karada sağlıklı olarak yürütülmesi çok farklı mühendislik dallarının bir arada çalışmasıyla sağlanmaktadır. Bu nedenle havaalanı mühendisliği çok disiplinli bir bilim dalıdır.

Havaalanı, işlev açısından *hava tarafı* ve *kara tarafı* olarak adlandırılan iki bölümden oluşmaktadır [1, 2, 3].

Hava tarafı;

- PAT (Pist-Apron-Taksi yolu) sahalarını,
- Aşma sahalarını,
- Yolcu ve yük indirme-bindirme alanlarını,
- Park-ikmal-bakım alanlarını ve benzeri yer operasyonlarının gerçekleştirildiği tesisleri kapsamaktadır.

Kara tarafı;

- Yolcu terminalini,
- Yük terminalini,
- Özel ve ticari araç park yerlerini,
- Servis ve erişim yolları türündeki tesisleri kapsamaktadır.

2.1. Ülkemizde Bulunan Havaalanları

24 Haziran 2008 tarihi itibarıyla ülkemizde sivil hava trafiğine açık toplam 67 adet havaalanı bulunmaktadır. DHMİ (Devlet Hava Meydanları İşletmesi), Batman İl Özel İdaresi, Anadolu Üniversitesi, HEAŞ (Havaalanı İşletme ve Havacılık Endüstrileri Anonim Şirketi) tarafından işletilen ve sivil hava trafiğine açık bazı havaalanlarına ait; açılış yılı ve pist özellikleri Tablo 2.2.'de verilmiştir.

Havaalanları hava tarafı ve kara tarafı olarak çok farklı şekilde tasarlanabilir. Farklı yerleşim planları ile inşa edilen ülkemiz havaalanlarından İstanbul Atatürk Havalimanı Şekil 2.1.'de, İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı Şekil 2.2.'de, Ankara Esenboğa Havalimanı Şekil 2.3.'de ve Samsun Çarşamba Havalimanı Şekil 2.4.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Sivil hava trafiğine açık bazı havaalanlarına ait pist özellikleri [1, 4, 5].

Havaalanı	Açılış Yılı	Pist Uzunluğu (m)	Pist Genişliği (m)	Pist Üstyapı Cinsi
Adana	1937	2.750	45	Kompozit
Adıyaman	1998	2.500	30	Rijit
Ağrı	1997	2.000	30	Esnek
Amasya Merzifon	2008	2.927	45	Esnek
Ankara Esenboğa	1955	3.750	60	Esnek
		3.750	45	Esnek
Antalya	1960	2.990	45	Esnek
		3.400	45	Rijit
		3.400	45	Rijit
Balıkesir Körfez	1997	2.080	30	Rijit
Batman	1998	3.048	45	Esnek
Bursa Yenişehir	2000	2.993	45	Rijit
		2.993	30	Rijit
Çanakkale	1995	1.800	30	Rijit
Denizli Çardak	1991	3.000	45	Esnek
Diyarbakır	1952	3.549	45	Rijit
Elazığ	1940	3.000	45	Rijit
		1.720	32	Esnek
Erzincan	1988	3.000	45	Rijit
Erzurum	1966	3.810	45	Rijit
		3.810	30	Rijit
Eskişehir Anadolu	1989	2.525	30	Esnek
Gaziantep	1976	3.000	48	Rijit
		3.000	30	Rijit
Hatay	2007	3.000	45	Rijit
Isparta Süleyman Demirel	1997	3.000	45	Rijit
İstanbul Atatürk	1953	3.000	45	Rijit
		3.000	45	Rijit
		2.300	60	Rijit
İstanbul Sabiha Gökçen	2001	3.000	45	Rijit
İzmir Adnan Menderes	1987	3.240	45	Kompozit
		3.240	45	Kompozit
Kahramanmaraş	1996	2.300	30	Kompozit
Kars	1988	3.500	45	Rijit
Kayseri Erkilet	1998	3.000	45	Rijit
Konya	2000	3.348	45	Rijit
		3.348	45	Esnek
Malatya	1941	3.350	45	Esnek
Mardin	1999	2.500	36	Rijit
Muğla Dalaman	1981	3.000	45	Rijit
		3.000	45	Rijit
Muğla Milas-Bodrum	1997	3.000	45	Rijit
Muş	1992	3.550	45	Kompozit
Nevşehir Kapadokya	1998	3.000	45	Rijit
Samsun Çarşamba	1998	3.000	45	Rijit
Siirt	1998	1.800	30	Rijit
Sivas	1957	3.811	45	Rijit
Şanlıurfa GAP	2007	4.000	45	Rijit
Tekirdağ Çorlu	1988	3.000	45	Rijit
Tokat	1995	1.924	30	Esnek
Trabzon	1957	2.640	45	Esnek
Uşak	1998	2.560	30	Rijit
Van Ferit Melen	1943	2.750	45	Kompozit



Şekil 2.1. İstanbul Atatürk Havalimanı hava fotoğrafı [3].



Şekil 2.2. İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı hava fotoğrafı [3].



Şekil 2.3. Ankara Esenboğa Havalimanı hava fotoğrafı [3].



Şekil 2.4. Samsun Çarşamba Havalimanı hava fotoğrafı [3].

2.2. Havaalanı Arazisinin İncelenmesi [6, 7, 8]

Havaalanı kaplamalı saha üstyapısı tasarımında, havaalanı arazisinin ve çevresinin detaylı olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır. İnceleme kapsamında hava fotoğrafları, mevcut üstyapılar, bitişik üstyapılar, önceki yapımlarla ilgili kayıtlar, zemin-jeolojik-topoğrafik haritalar ve meteorolojik veriler değerlendirilir. Tasarım ve uygulama için gerekli değerlendirmelerin yapılması amacıyla üstyapı tabakalarında kullanılacak malzemelerin temin edileceği ariyet ve taş ocakları ile ilgili veriler elde edilir ve taban zemininin mevcut durumu belirlenir. Hem tasarım ve hem de uygulama aşamasında dikkate almak üzere ariyet ve taş ocakları ile taban zemini için standart zemin mekaniği deneyleri gerçekleştirilir.

Her ne kadar zemin mekaniğinin ilgi alanına giren ve üstyapı tasarımda rol oynayan tüm esaslardan bu çalışmada detaylı olarak bahsedilmesi mümkün olmasa da havaalanı üstyapı mühendisi tarafından bilinmesi gerektiği ve daha sonraki araştırmalar için yol gösterici olacağı değerlendirilen konular bu çalışmada yer almaktadır. Bu doğrultuda, havaalanı arazisinin incelenmesi için gerekli bazı zemin mekaniği deneyleri ve ilgili standartlar Tablo 2.3.'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Zemin deneyleri ve standartları [6, 9].

Deneyin Cinsi	ASTM	TSE
Sondaj ile numune alma	Muhtelif	TS 1901
Likit limit tayini	D 4318	TS 1900-1
Plastik limit tayini	D 4318	TS 1900-1
Elek analizi	D 422	TS 1900-1
Zemin sınıflandırması	D 2487	TS 1500
Su muhtevası tayini	D 2216	TS 1900-1
Taşıma oranının tayini	C 654	TS 1900-2

2.3. Taban Zemini

Taban zemini, üstyapıya etki eden uçak yüklerinden kaynaklanan gerilmelerin dağıldığı en son tabakadır. Bu nedenle üstyapının tasarımı ve hizmet ömrü boyunca sergileyeceği

performans taban zemininin taşıma gücüyle doğrudan ilgilidir. Üstyapı inşa edilmeden önce, gerektiğinde yarma ve dolgu ile oluşturulan taban zemini, tasarlanan üstyapının ve uçak yükünün gerektirdiği mukavemeti sağlayacak şekilde hazırlanır. Sonsuz kalınlıkta olan taban zemini; doğal, iyileştirilmiş veya sıkıştırılmış zemin şeklinde üstyapıya destek verir.

Taban zemini yüzey, temel ve alttemel tabakalarına göre daha az gerilmelere maruz kalır. Zemindeki gerilmeler ise derinliğin artmasıyla birlikte azalacağından, taban zemini üzerine etki eden gerilmelerin en kritik olduğu bölge zeminin en üst kısmıdır. Bir zeminin kayma bozulmalarına karşı gösterdiği mukavemet, zeminin kuru birim ağırlığı ve su muhtevasıyla doğrudan ilgilidir. Bu nedenle, taban zemininin incelenmesi esnasında tespit edilen değişkenlikler zemin profiline işlenir [7]. Genel olarak belirtmek gerekirse, su muhtevası ve kuru birim ağırlığın çok fazla değişkenlik göstermediği kabul edilir.

Uçak yükleri, inşa edilen üstyapı aracılığıyla lastik temas alanından daha büyük bir alan üzerinde taban zeminine aktarılır. Üstyapı kalınlığı ne kadar fazla olursa altyapıyı oluşturan taban zeminine aktarılacak yükün dağıldığı alan daha büyük olur. Bir başka ifadeyle, yükün daha büyük bir alanda dağılması için zayıf taban zemini üzerinde daha fazla kalınlıkta üstyapı inşa edilir [7].

Üstyapının inşa edildiği taban zemininin incelemesi kapsamında jeolojik-topoğrafik haritalar, meteorolojik veriler, hava fotoğrafları, daha önce aynı arazide gerçekleştirilen zemin etütleri incelenir, bitişik üstyapılar ile mevcut üstyapılar değerlendirilir. Taban zeminin mevcut durumunu tespit etmek amacıyla araştırma sondaj programı gerçekleştirilir. Zemin şartlarının değişmesi ve beklenmedik gelişmelerin olması durumunda sondaj sayısını artırmak kaydıyla tavsiye edilen maksimum sondaj aralıkları Tablo 2.4. ve Tablo 2.5.'de yaklaşık olarak verilmektedir.

Tablo 2.4. USCOE yöntemi taban zemini incelemesi maksimum sondaj aralıkları [6].

Kaplamalı Sahanın Cinsi	Sondaj Aralığı ve Sayısı
Pist ve taksi yolu; genişlik ≤ 60 m	60–150 m aralıkta, değişken tarafta, bir adet
Pist ve taksi yolu; genişlik > 60 m	60–150 m aralıkta, her iki tarafta, bir adet
Apron ve bekleme sahaları	Her 2.325 m^2 için, bir adet

Tablo 2.5. FAA yöntemi taban zemini incelemesi maksimum sondaj aralıkları [7].

Kaplamalı Sahanın Cinsi	Sondaj Aralığı ve Sayısı
Pist ve taksi yolu	70 m aralıkta, değişken tarafta, bir adet
Diğer	Her 930 m ² için, bir adet

Araştırma sondaj çukurları, yarma kesitlerde tesviye yüzeyinin 3 m aşağısına kadar uzayacak şekilde açılır. Derinliği 1,8 m'den daha az olan sıkı dolgu kesitlerde yapılacak sondajlarda, sondaj derinliği tabii zemin yüzeyinden 3 m, yüksek dolgu kesitlerde ise 15 m aşağıya kadar devam eder. Açılan sondaj çukurlarından zemin tabakalarının özelliklerinin tespit edilmesi ve zeminlerin sınıflandırılması amacıyla yeteri kadar numune alınır ve zemin profili oluşturulur [6].

Taban zemininin uygunluğunun tespit edilmesi açısından önem arz eden hususlar birlikte değerlendirilir. Bu nedenle;

- Genel özellikler,
- Ana kayaya uzaklık,
- Yeraltı su seviyesine uzaklık,
- Sıkışma özellikleri,
- Kuru birim ağırlık,
- Taşıma gücü,
- Zayıf veya yumuşak zemin altı tabakaların varlığı,
- Don hassasiyeti,
- Oturma potansiyeli,
- Genleşme potansiyeli,
- Drenaj özellikleri

gibi zemine ait karakteristiklerin belirlenmesi amacıyla detaylı inceleme, araştırma ve deney faaliyetleri gerçekleştirilir. Taban zemini üzerinde belirlenecek tesviye yüzeyi için yarma-dolgu dengelemesi ve taşkın potansiyeli, mevcut malzemelerin kullanımı ve uygun taban zemini malzemesi seçimi dikkate alınır [6].

Mühendislik uygulamalarında mevcut zeminin sınıflandırılması, söz konusu zeminin taban zemini olarak kullanılması durumunda sergilenmesi beklenen performans açısından gösterge niteliği taşır. USCOE'ye göre zeminler ASTM D-2487'de belirtildiği şekilde USCS (Unified Soil Classification System)'ye uygun olarak sınıflandırılır [6].

İmalatta kullanılan veya araziden uzaklaştırılan her türlü zeminin USCS'ye göre sınıflandırılması için gerekli etütler yeterli sayıda yapılır. USCS'ye göre zemin sınıflandırması Tablo 2.6.'da verilmiştir.

Zeminin sıkışma derecesi, su muhtevası, kuru birim ağırlığı vb. özelliklerin farklı olması durumunda üstyapı kendisinden beklenen performansı sergilemeyebilir. Bu nedenle, taban zemininin davranışını doğru tahmin edebilmek için zemin sınıflandırması ile birlikte sıkışma ve mukavemet deneyleri gerçekleştirilir.

2.3.1. Standart ve Modifiye Proktor Deneyleri [7, 8, 9, 10]

Sıkıştırma işlemi; kayma mukavemetinin artırılması, su emme kapasitesinin ve geçirimsizliğinin azaltılması, tekrarlı yükler altında oturmaya karşı direncinin artırılması amacıyla zeminin tabakalar halinde serilip sıkıştırılması olarak tanımlanır. Sıkışma deneyinin amacı zeminin maksimum kuru birim ağırlığını veren su muhtevasının tespit edilmesidir.

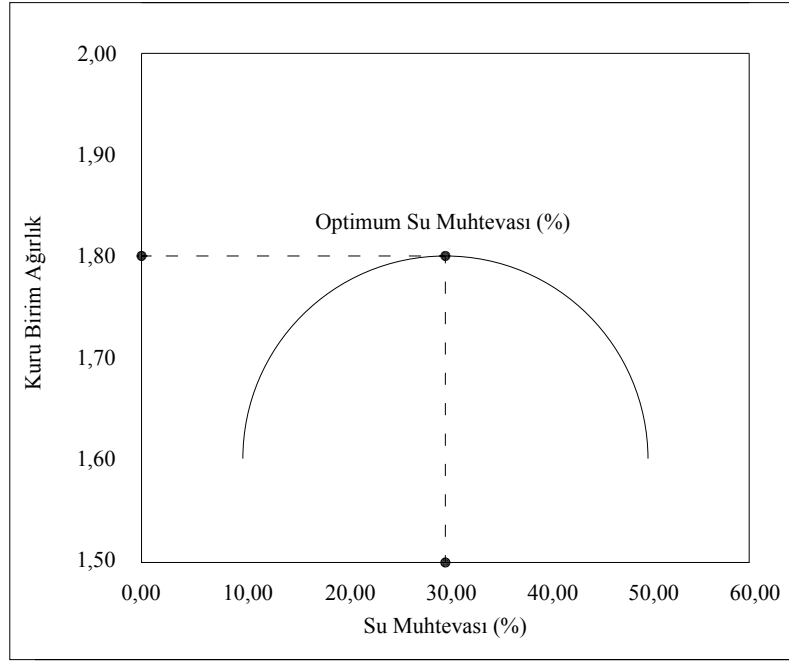
Sıkıştırma; silindiraj, vibrasyon veya tokmaklama ile sağlanır. Zemindeki havanın dışarı atılması ve hava boşluklarının hacminin azaltılması neticesinde zemini oluşturan daneler birbirlerine yaklaşır ve zeminin kuru birim ağırlığı artar. Zeminin sıkıştırılması ve kuru birim ağırlığının artırılması neticesinde kayma mukavemeti genellikle artar.

Teorik olarak, sıkıştırma işlemine tabi tutulan zeminin boşluklarında mevcut olan su-hava karışımındaki bütün hava dışarı atılır ve boşluklar tamamen suyla dolarsa zeminin yoğunluğu artar ve söz konusu zeminin doymuş hale geldiği söylenebilir. Zemin suya doymuş hale geldikten sonra su ilave edilmesi yoğunluğun azalmasına sebep olur. Bu nedenle, zeminin hangi su içeriğinde sıkıştırılması halinde maksimum kuru birim ağırlığın elde edileceğinin bilinmesi önemlidir. Maksimum kuru birim ağırlığın elde edilmesini sağlayan su muhtevası *optimum su muhtevası* olarak adlandırılır. Tipik kuru birim ağırlık-su muhtevası ilişkisi Şekil 2.5.'de verilmiştir.

Maksimum kuru birim ağırlığı veren su muhtevasının laboratuvarında belirlenmesi ile arazide gerçekleştirilecek sıkıştırma işleminde zemine karıştırılması gereken su miktarının belirlenmesi mümkün olmaktadır. Laboratuvarında elde edilen kuru birim ağırlıklar genellikle arazide elde edilen kuru birim ağırlıklardan yüksektir. Bundan dolayı arazide elde edilen kuru birim ağırlığın laboratuvarında elde edilen maksimum kuru birim ağırlığa oranının bilinmesi istenmektedir.

Tablo 2.6. USCS'ye göre zemin sınıflandırma sistemi [6, 7, 11].

ANA GRUP			SEMBOL	TİPİK TANIMLAMA
İRİ DANELİ ZEMİNLER (Malzemenin %50'sinden fazlası No:200 elek üzerinde kalan)	ÇAKILLAR (İri daneli malzemenin %50'sinden fazlası No:4 elek üzerinde kalan)	Temiz çakıllar (İnce dane az veya yok)	GW	İyi derecelenmiş çakıl, Kumlu çakıl
			GP	Kötü derecelenmiş çakıl, Kumlu çakıl
		Kirli Çakıllar (Oldukça ince dane var)	GM	Siltli çakıllar, Siltli kumlu çakıl
			GC	Killi çakıllar, Killi kumlu çakıl
	KUMLAR (İri daneli malzemenin %50'sinden fazlası No:4 elekten geçen)	Temiz Kumlar (İnce dane az veya yok)	SW	İyi derecelenmiş kum, Çakıllı kum
			SP	Kötü derecelenmiş kum, Çakıllı kum
		Kirli Kumlar (Oldukça ince dane var)	SM	Siltli kum, Siltli çakıllı kum
			SC	Killi kum, Killi çakıllı kum
İNCE TANELİ ZEMİNLER (Malzemenin %50'sinden fazlası No:200 elekten geçen)	Siltler ve Killer Likit Limit < 50		ML	Düşük plastisiteli silt Siltli veya killi ince kum
			CL	Düşük plastisiteli kil, Kumlu veya siltli kil
			OL	Düşük plastisiteli organik silt ve kil
	Siltler ve Killer Likit Limit > 50		MH	Yüksek plastisiteli silt
			CH	Yüksek plastisiteli kil
			OH	Yüksek plastisiteli organik silt ve kil
Yüksek organik maddeli zeminler			Pt	Turba veya diğer yüksek organik zemin



Şekil 2.5. Tipik kuru birim ağırlık-su muhtevası eğrisi

Sıkıştırma derecesi, laboratuvar sıkıştırma deneyi ile elde edilen maksimum kuru birim ağırlığın yüzdesi olarak ifade edilir. Sıkıştırma derinliği, sıkıştırma derecesi ve gerekli su muhtevası için ilgili şartname esasları dikkate alınır. Genellikle arazide %95 oranında sıkıştırma istenmektedir.

Zeminin kuru birim ağırlık-su muhtevası bağıntısı standart enerjili standart proktor veya yüksek enerjili modifiye proktor deneyleri ile tespit edilir.

Standart proktor deneyinde 305 mm'den serbestçe düşen 2,5 kg'lık tokmağın sağladığı mekanik iş kullanılır. İç çapı 105 mm, iç yüksekliği 115,5 mm ve iç çapı 152,4 mm, iç yüksekliği 115,5 mm olan iki farklı ebatta, silindirik biçiminde, kolayca çıkarılabilen bir taban plakası ile 50 mm yüksekliği olan bir yakası bulunan metal kalıp içine tokmağın her tabaka için 25 defa düşmesi ile zemin 3 tabaka halinde sıkıştırılır (Şekil 2.6.)

Silindirik metal kalıp üstüne takılan yaka, zeminin metal kalıp kenarında bir miktar daha yukarıdaki bir seviyeye kadar sıkıştırılmasını sağlar. Daha sonra yaka çıkarılır ve zeminin yüzü silindirik kalıp kenarı ile aynı seviyeye gelinceye kadar dikkatle tesviye edilir. Zeminle dolu metal kalıp tartılarak zeminin zahiri birim ağırlığı tespit edilir. Zemini temsil edecek şekilde bir miktar zemin numunesi alınır ve su muhtevası belirlenir. Bu değerler ile zeminin kuru birim ağırlığı tespit edilir. Deney muhtelif su içerikleri ile en az beş değer verecek şekilde tekrar edilerek, kuru birim ağırlık ile su muhtevası arasındaki

bağıntıyı gösterir eğri çizilir (Şekil 2.5.). Maksimum kuru birim ağırlığın elde edildiği su muhtevası optimum su muhtevası olarak belirlenir [11].



Şekil 2.6. Proktor deney tokmağı ve silindirik metal kalıp

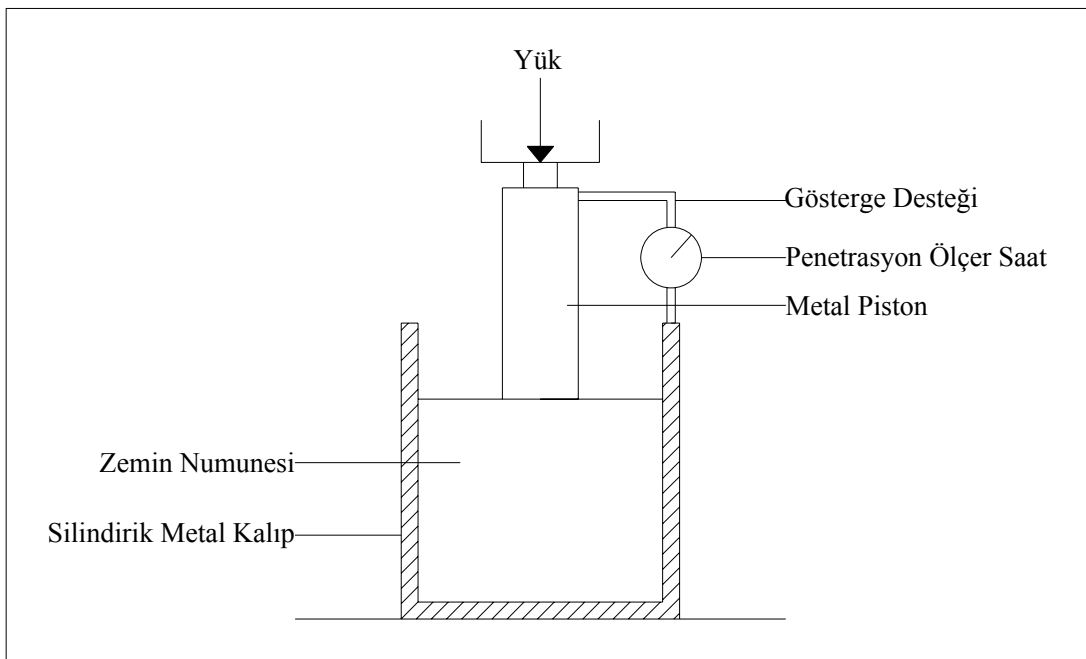
Havaalanı taban zeminlerinin daha fazla sıkıştırmaya tabi tutulması istenmekte olduğundan, modifiye proktor deneyi yapılır. Bu deneyin standart proktor deneyinden farkı; 458 mm'den serbestçe düşen 4,5 kg'lık tokmağın kullanılması ve silindirik metal kalıp içine tokmağın her tabaka için 25 defa düşmesi ile zeminin 5 tabaka halinde sıkıştırılmasıdır [11].

2.3.2. CBR Deneyi [7, 8, 10]

Zeminin kayma mukavemeti; esnek üstyapı tasarımı için CBR cinsinden tespit edilir. Taşıma oranı tayini deneyi, tasarım açısından en kritik olduğu değerlendirilen arazi durumunu temsil edeceği öngörülen zemin üzerinde gerçekleştirilir. Arazide

gerçekleştirilecek mukavemet ve kuru birim ağırlık-su muhtevası deneyleri, pist ve taksi yolları için yaklaşık 305 m aralıklı olarak, apron ve park sahalarında her 16.720 m² için bir adet yapılır. Değişen zemin şartları ve olağan dışı gelişmeler olması durumunda deney sayısı artırılır [6].

CBR deneyi, basit olarak üniform basınç altında yapılan bir penetrasyon deneyidir (Şekil2.7.). Penetrasyon pistonunun zemin numunesi içerisine 1,27 mm/dk hızla itilmesiyle elde edilen yük-penetrasyon ilişkisi kullanılarak zeminin taşıma oranının tayin edilmesi olarak tanımlanır [12].



Şekil 2.7. CBR deneyi düzeneği

Alanı 1.935 mm² olan penetrasyon pistonuna dakikada 1,27 mm deplasman yaptırmak için uygulanan kuvvetin standart kırmataş numunesinde aynı penetrasyon derinliğine ulaşmak için uygulanan kuvvete oranı, zeminin taşıma oranı diğer bir ifadeyle CBR değeri olarak adlandırılır (2.1).

$$CBR = \frac{\text{Deneyde Uygulanan Gerilme (veya yük)}}{\text{Standart Gerilme (veya yük)}} \times 100 \quad (2.1)$$

CBR sayısı standart gerilmenin yüzdesidir. Uygulamada % (yüzde sembolü) genellikle kullanılmaz ve CBR değeri 3, 6, 10 ve 15 gibi tamsayı olarak ifade edilir [10].

%100 taşıma oranı değerine karşılık gelen yük-penetrasyon eğrisi; 1,25 mm'lik penetrasyonda 8,4 kN, 2,5 mm'de 13,2 kN, 5,0 mm'de 20 kN yük ile tarif edilmektedir [12]. Söz konusu standart yük-penetrasyon eğrisi Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.

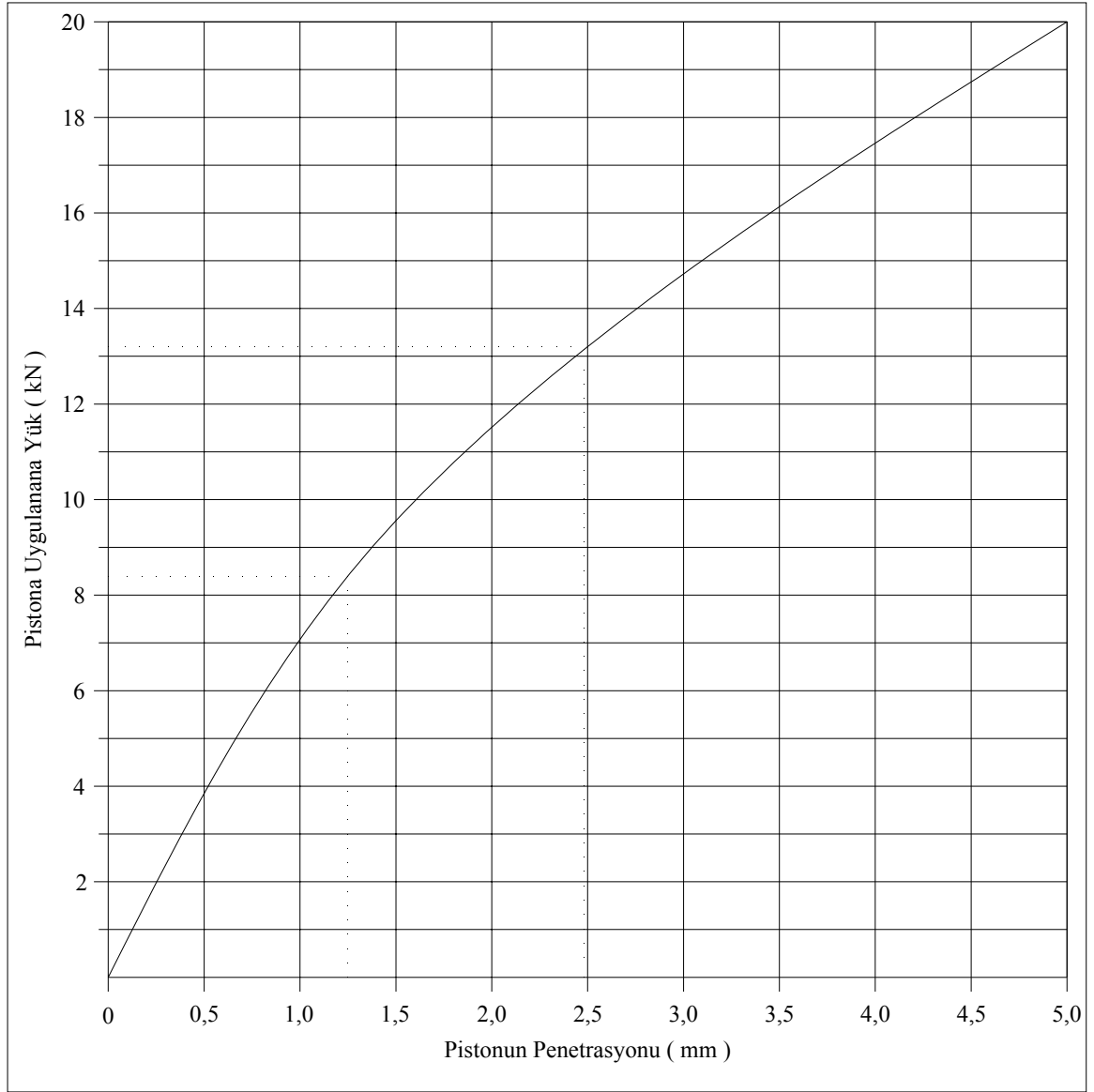
CBR deneyi, belirli bir su muhtevasında ve yoğunluktaki zeminin kayma mukavemetini tespit etmek için kullanılır. Tespit edilen CBR değeri belirli bir zemin için sabit bir değer olmayıp su muhtevasına ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Diğer bir ifadeyle, tespit edilen CBR değeri zeminin sadece mevcut su muhtevası ve yoğunluğu için geçerlidir. Deney genellikle kazı anındaki mevcut su muhtevasında gerçekleştirilir. 2,5 mm'lik ve 5,0 mm'lik penetrasyonlarda hesaplanan değerlerden yüksek olan değer zeminin CBR değeri olarak kabul edilir [12].

Deney ile elde edilen CBR değeri, karayolu ve havaalanı esnek üstyapı tasarımında, mevcut ve tasarım CBR değerleri olarak tasarım abakları ile birlikte kullanılır. Bu değer üstyapıda gerekli alttemel, temel ve kaplama tabakaları kalınlıklarının tespit edilmesine olanak sağlar [6, 10, 13]. CBR esasına dayanan havaalanı esnek üstyapı tasarım yöntemleriyle, uçak tarafından uygulanan yük altında taban zeminini göçmeden korumak için gerekli üstyapı kalınlığı tespit edilir.

Taban zemini için tasarım CBR değeri, üstyapıda hizmet ömrü boyunca etkili olacak su muhtevasına bağlı olarak seçilir. Su muhtevasının uzun dönemler için belirlenemediği durumda, laboratuvarında elde edilen yaş CBR değeri taban zemini tasarım CBR değeri olarak belirlenir [6]. USCS zemin sınıfları için tipik CBR değerleri Tablo 2.7.'de verilmiştir.

2.3.3. Plaka Yükleme Deneyi [7, 8]

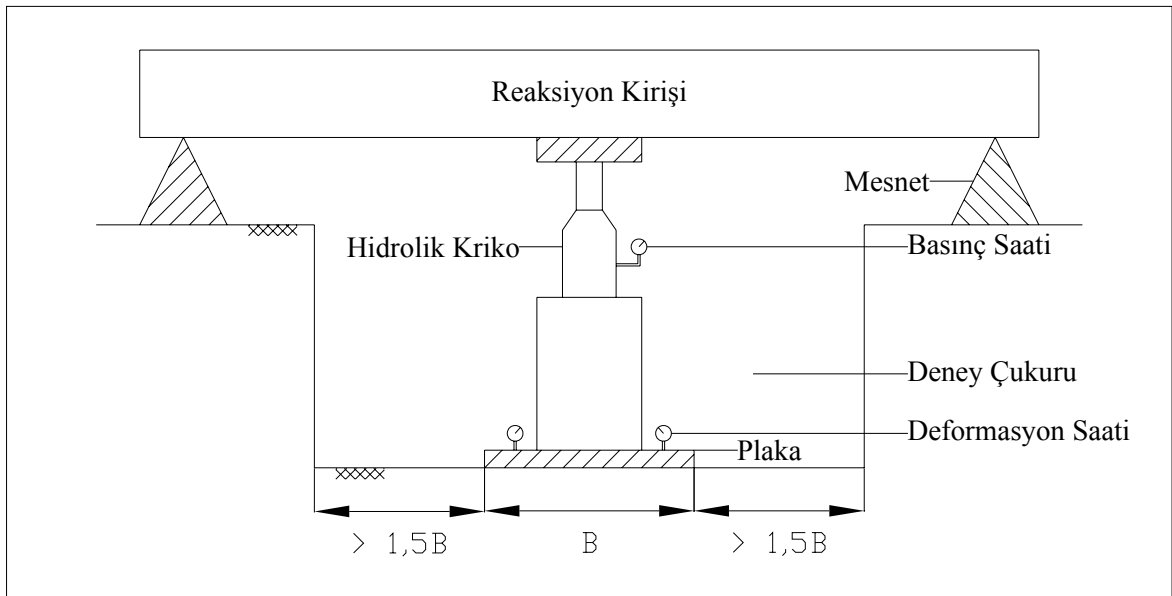
Taban zeminin taşıma gücü, rijit üstyapı tasarımında *zemin reaksiyon modülü* (k) cinsinden ifade edilir. k değeri plaka yükleme deneyi ile belirlenir. AASHTO T 222'de belirtilen esaslara göre gerçekleştirilen plaka yükleme deneyinde genellikle 762 mm çapında dairesel plaka kullanılmakla birlikte çapları 150 mm ile 762 mm arasında değişen dairesel plakalar ve kenar uzunluğu 300 mm olan kare plakalar da kullanılabilir. Şekil 2.9.'da tipik plaka yükleme deneyi düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.8. CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi

Tablo 2.7. Zemin sınıfları için tipik CBR değerleri [14].

Ana Zemin Grubu	Zemin Sınıfı	Tipik CBR Değeri
İri Daneli Zeminler	GW	40–80
	GP	30–60
	GM	20–60
	GC	20–40
	SW	20–40
	SP	10–40
	SM	10–40
	SC	5–20
İnce Daneli Zeminler	ML	≤ 15
	CL	≤ 15
	OL	≤ 5
	MH	≤ 10
	CH	≤ 15
	OH	≤ 5



Şekil 2.9. Plaka yükleme deneyi düzeneği

Deney için kullanılacak plaka zemin üzerine iyi bir temas sağlayacak biçimde yerleştirilir. Yük, krika aracılığıyla kademeli olarak artırılır ve her yükleme kademesinde oturmanın durması beklenir. Her kademedeki oturma miktarı deformasyon göstergelerinden okunur ve kaydedilir. Zeminde göçmenin başlamasıyla birlikte yük boşaltılır ve oturma miktarının kaydedilmesine benzer şekilde kabarma miktarı kaydedilir.

Plaka yükleme deneyi nispeten yüksek maliyetli bir deney olduğu için arazide genellikle iki veya üç adet deney gerçekleştirilir. Bu nedenle, k değerinin emniyetli olacak şekilde belirlenmesi önem arz eder. USCS zemin sınıfları için karakteristik ve önerilen zemin reaksiyon modülü değerleri Tablo 2.8.'de verilmiştir.

Tablo 2.8. Zemin sınıfına göre k değerleri [6].

Zeminin Cinsi	$k_{\text{karakteristik}}$ (lb/in²/in)	$k_{\text{önerilen}}$ (lb/in²/in)
OL, OH, Pt	25–100	25
CH, MH	50–150	50
CL, ML	50–200	100
SM, SC	50–250	150
SW, SP	150–400	200
GC, GM	200–500	250
GW, GP	300–500	350

Üstyapı tasarımında araziden elde edilen verilerin ve söz konusu arazi için daha önceki tecrübelerin önemli olduğu dikkate alındığında Tablo 2.8.'de önerilen k değerlerinin küçük ölçekli projelerde ve ön hesaplamalarda kullanılması daha uygundur.

FAA [8] tarafından önerilen; elastisite modülü, CBR değeri ve zemin reaksiyon modülü arasındaki yaklaşık ilişkiyi eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$E = 1500 \times \text{CBR} \quad (2.2)$$

$$E = 26 \times k^{1.284} \quad (2.3)$$

$$k = \left[\frac{1.500 \times \text{CBR}}{26} \right]^{0.7788} \quad (2.4)$$

2.4. Üstyapı

Havaalanı kaplamalı saha üstyapısı karayollarında olduğu gibi taban zemini üzerinde ve üst tabakalara doğru daha kaliteli malzemeler kullanılarak inşa edilir. Üstyapı, taban zemininden itibaren sırasıyla seçme granüler malzeme veya alttemel tabakası, temel tabakası ve kaplama tabakasından oluşur.

2.4.1. Seçme Granüler Malzeme veya Alttemel Tabakası

Esnek üstyapının temelini oluşturan taban zemini üzerinde, seçme granüler malzeme veya alttemel tabakası inşa edilir. Bu tabakanın esas görevi, don olayının olumsuz etkilerini azaltmak ve üstyapının taşıma gücünü artırmaktır. Bununla birlikte, yükleri taban zeminine iletmek, temel tabakası için uygun çalışma yüzeyi oluşturmak, yüzey altı suyunun olumsuz etkilerini azaltmak ve taban zemininden sızabilecek ince daneli malzemelerin yüksek kalitedeki üst tabakaların fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemesini engellemek bu tabakanın diğer görevleridir [15].

Seçme granüler malzeme veya alttemel tabakası, genel mühendislik ve ekonomik prensipler doğrultusunda, inşaat sahasında bulunan veya yakın bölgelerden temin edilen kullanıma elverişli malzemeler ile inşa edilebilir. Bu tabakada kullanılacak malzemeleri temin etmek amacıyla, havaalanı çevresi veya makul taşıma mesafesinde bulunan bölgeler muhtemel taş ve ariyet ocakları açısından incelenir, araştırma sondaj çukurları açılır, alınan numuneler üzerinde gerekli zemin mekaniği ve malzeme deneyleri gerçekleştirilir.

Tabaka kalınlığı için proje ve şartname gereksinimleri dikkate alınır. Genellikle, seçme granüler malzeme veya alttemel tabakası minimum 30 cm kalınlığında projelendirilir.

2.4.2. Temel Tabakası

Temel tabakası, uçak yüklerini alt tabakalara iletmek, üstyapının stabilitesini artırmak, drenajı sağlamak, alt tabakaları don olayının olumsuz etkilerinden korumak, düzgün taşıma yüzeyi elde etmek, çalışma platformu oluşturmak, üstyapının taşıma gücünü artırmak ve rijit üstyapıda pompaj hasarını önlemek amacıyla temel tabakası inşa edilir. Bu anlamda temel tabakası üstyapının yapısal anlamda başlıca tabakasıdır [7]. Bu tabakada belirli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip uygun gradasyonda, genellikle kırılmış ve işlenmiş

kaliteli malzeme kullanılır. Genellikle alttemel tabakasına göre daha yüksek birim maliyetle inşa edilen temel tabakasında kullanmak üzere havaalanı çevresinde uygun taş ocağı bulmak amacıyla inceleme yapılır. Havaalanına yakın bölgelerde tespit edilecek muhtemel taş ocakları, üretim maliyetlerinin azaltılmasında önemli rol oynar. Bu durum özellikle uzak ve üretimin az olduğu bölgelerde önem arz eder. Seçme, sert ve uzun ömürlü birçok agreganın temel tabakasında kullanılabilirliği küresel ölçekte ispat edilmiştir [7].

Yüksek lastik basıncı altında üstyapının stabilitesini sağlayan temel tabakası, bağlayıcısız olarak veya proje gereksinimi doğrultusunda bitüm, kireç, çimento veya uçucu kül gibi kimyasal katkıları kullanılarak bağlayıcı olarak inşa edilebilir.

Alttemel tabakasında olduğu gibi temel tabakası kalınlığı için proje ve şartname gereksinimleri dikkate alınır. Saha uygulamalarda temel tabakası kalınlığı genellikle 15–30 cm arasında değişmektedir.

2.4.3. Kaplama Tabakası

Uçak yüklerine, çevre ve iklim koşullarına doğrudan maruz kalan ve üstyapının en üst tabakasını oluşturan tabaka kaplama tabakasıdır. Kaplama tabakası, üstyapının cinsine göre değişmektedir.

2.4.3.1. Kaliteli Beton Kaplama

Rijit üstyapının kaplama tabakasını kaliteli beton kaplama oluşturmaktadır. Kendisine aktarılan yüklere yüksek eğilme dayanımıyla destek vermektedir. Donatılı veya donatısız olarak inşa edilebilen kaliteli beton kaplama tabakasında klasik beton uygulamalarında olduğu gibi çimento, agrega, su ve kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi katkıların kullanımı da gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

2.4.3.2. Asfalt Betonu

Günümüzün modern ve ileri teknoloji ürünü uçaklarına hizmet veren havaalanı esnek üstyapılarının kaplama tabakası asfalt betonu ile inşa edilir. Havaalanı asfalt betonu karayolundakinden çok daha yüksek yüklere maruz kalmaktadır. Bu nedenle karayolu

asfalt betonu karışımının havaalanında doğrudan kullanımı kabul edilebilir bir uygulama değildir.

Asfalt betonu ağırlıkça yaklaşık %95 iyi derecelenmiş agrega ve %5 bağlayıcı malzemeden oluşur. Bağlayıcı malzeme olarak genellikle petrolün distilasyonu sonucunda ortaya çıkan bitüm kullanılır. Sıvı asfaltlar ve katranlar yüksek kalitede inşa edilen havaalanı esnek üstyapısının kaplama tabakasında genellikle kullanılmaz. Bitüm, inşaat mühendisliği alanında günlük uygulamalarda kullanılan termoplastik ve viskoelastik davranış gösteren başlıca malzemedir. Bu karmaşık hidrokarbonun sertliği, sıcaklığın düşmesi veya yükleme hızının artmasıyla artar; sıcaklığın artması veya yükleme hızının azalmasıyla azalır. Bu durum, yapısında bulunduğu asfalt betonunun da benzer davranış sergilemesine yol açar. Soğuk hava şartlarında bitümün sertleşmesi sonucunda kırılmalar gözlenebilir. Bu durumun tekrar etmesi asfalt betonunda çatlak oluşumuna neden olur. Yakıt, yağ ve benzeri sıvılar asfalt betonu içinde bulunan bağlayıcıyı çözer. Bu nedenle bu maddelere maruz kalınması öngörülen alanlarda kaplama tabakası olarak genellikle asfalt betonu kullanılmaz.

Son yıllarda bitümün sıfırlandırılmasında viskozite ve penetrasyona dayalı sınıflandırmaya alternatif olarak performansa dayalı sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca, polimer katkıları ile bitümün modifiye edilmesi uygulamaları da gün geçtikçe artmaktadır.

Asfalt betonunun bozulmaya karşı direnci, kullanılan agreganın özelliklerine bağlıdır. Bu anlamda bağlayıcı olarak görev yapan bitümün etkisi daha azdır. Günümüzün modern sivil ve askeri uçaklarının yüksek lastik basınçlarına karşı dayanım göstermek üzere imal edilen asfalt betonunun kalitesinde, agreganın gradasyonu, dane şekli ve bu etkenlerin bütünüyle kontrolü önem taşımaktadır.

Genel olarak, asfalt betonunda sudan kaynaklanan bozulmalara neden olan olaylar soyulma olarak adlandırılır. Agrega üzerindeki bitüm tabakasının su etkisi ile ayrılması ve bitümün emülsüfiye hale gelmesi bu olayların başlıcalarıdır. Soyulmanın gerçekleşmesi için ortamda suyun mevcut olması, soyulmaya hassas agreganın bulunması ve tekrarlı yük şartları gereklidir. Soyulmayı önlemek için uygun soyulma önleyici katkı malzemeleri kullanılır. Bununla birlikte uygun agrega seçimi ve yüzey altı drenaj sistemi inşası ile soyulma hasarı sorunu ötelenebilir.

Asfalt betonu karışım tasarımı; durabilite, yüke karşı dayanıklılık ve maliyet dikkate alınarak gerçekleştirilir. Bağlayıcı miktarı az olan zayıf karışımlar yüke karşı yüksek

dayanım göstermekle birlikte daha çabuk yaşlanır ve daha çok oksidasyona maruz kalırlar. Oksidasyon sonucunda esnekliğini ve bağlayıcılığını kaybeden asfalt betonunda genellikle çatlama ve çözülme gibi hasarlar ortaya çıkar.

Havaalanı esnek üstyapısının kaplama tabakasını oluşturan yüksek kalitedeki asfalt betonunun üretimi ve işlenmesi uzmanlık gerektiren bir süreçtir. Bu süreçte; asfalt betonunu oluşturan agrega ve bitümün asfalt plentinde uygun ısıda karıştırılması, üretilen asfaltın segregasyona uğramadan ve ısınısını kaybetmeden sahaya nakliyesi, uygun hava sıcaklığında asfalt finişeri ile serim yapılması, boyuna derz imalatının hassasiyetle gerçekleştirilmesi ve tabakanın yeterli iş makinesi ile sıkıştırılması yüksek kalitede asfalt betonu imalatı için gereklidir.

2.4.4. Üstyapı Cinsleri

PAT ve benzeri sahaları içeren havaalanı kaplamalı sahaları, operasyonel anlamda havaalanı kolaylık tesislerinin en önemlileridir. PAT sahalarından herhangi birinin günlük operasyonlar sırasında uzun süreli kapalı kalması hem yerde hem de havada gecikmelere neden olur. Bu durum uçuş ve yer emniyeti açısından tehlike arz eder.

Uçağın inişi ve kalkışı için inşa edilen *pist*; kaymaya karşı dirençli olmalı ve iyi frenleme değerleri için iyi drenaj şartlarını sağlamalıdır. Ayrıca, modern ve büyük uçaklarda bulunan hassas elektronik cihazların zarar görmemesi ve yolcu konforu için yüzey düzgünlüğüne sahip olmalıdır. Trafiğin daha yavaş seyrettiği, statik ve dinamik yüklerin etkilerinin daha fazla hissedildiği *apron*; yolcu ve yük indirme-bindirme işlemleri ile yakıt dolum hizmetlerinin verildiği sahadır. *Taksi yolu* ise uçağın pist ile apron arasındaki ulaşımını sağlar. Söz konusu sahaların üstyapılarının tasarımındaki ana gereksinim, uçakların yüksek tekerlek yüklerine ve lastik basınçlarına karşı dayanıklı olmasıdır. Yakıt ikmal ve bakım alanları gibi sahalar, uçakların ve bakım araçlarının tekerlek yüklerine karşı yeterli dayanımı gösterecek şekilde inşa edilir. Bu sahaların tasarımında kimyasal madde, yağ ve yakıt sızıntılarının olumsuz etkilerine karşı dayanım da dikkate alınır [16].

Havaalanı üstyapısı, modern ve büyük uçakların, helikopter ve İHA (İnsansız Hava Aracı) vb. hava taşıtlarının yüklerini emniyetle taşıyacak dayanımda, kapalı ve açık alanlarda inşa edilebilen, üstyapı tabanı üzerindeki tüm tabakaları kapsayan yapıdır [6]. Horonjeff [13]'e göre üstyapı, düzgün ve her hava koşulunda güvenli sürüşü ve konfor

koşullarını sağlayacak şekilde inşa edilir. Üstyapıyı oluşturan her tabakanın kalınlığı uygulanan yüklerden dolayı aynı veya farklı tabakalarda, kopma ve kırılmaya sebebiyet vermeyecek şekilde yeterli kalınlıkta tasarlanır. Çok tabakalı bir sistem olarak projelendirilen üstyapının tasarımında, hizmet ömrü boyunca tasarım trafiği yüklerinin emniyetli ve ekonomik olarak taşınması esas alınır.

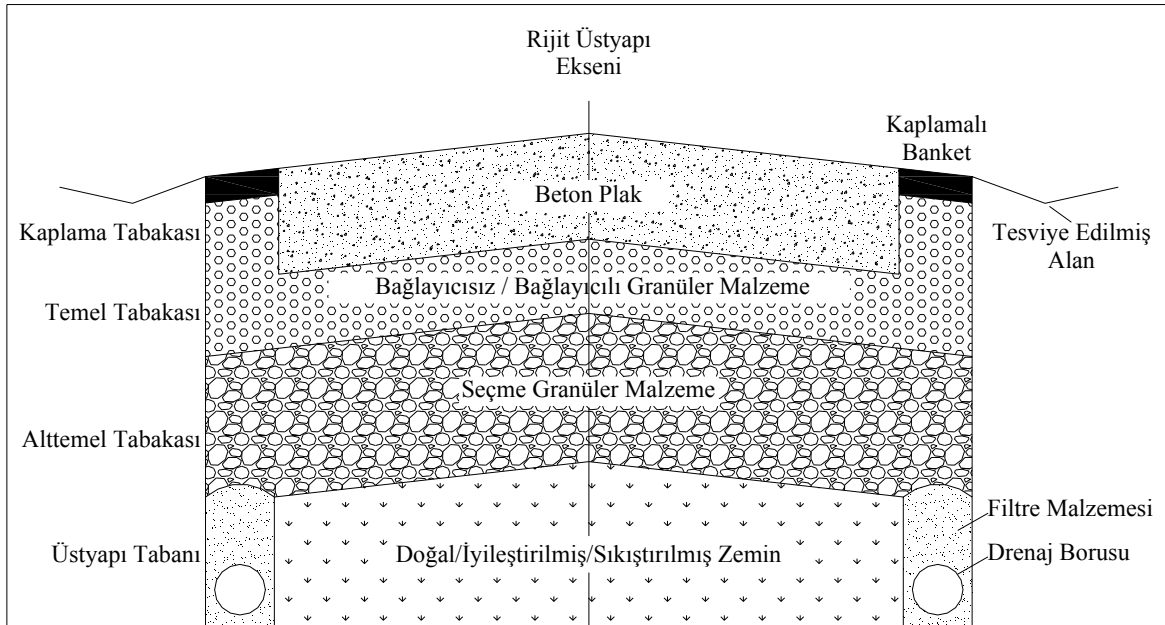
Havaalanı üstyapısı karayolu üstyapı sistemlerine benzer şekilde, yapım yöntemlerine ve kaplama tabakasında kullanılan malzemenin özelliğine göre;

- Rijit üstyapı (Kaliteli beton kaplamalı),
- Kompozit üstyapı,
- Esnek üstyapı (Asfalt betonu kaplamalı) olarak sınıflandırılmaktadır [17].

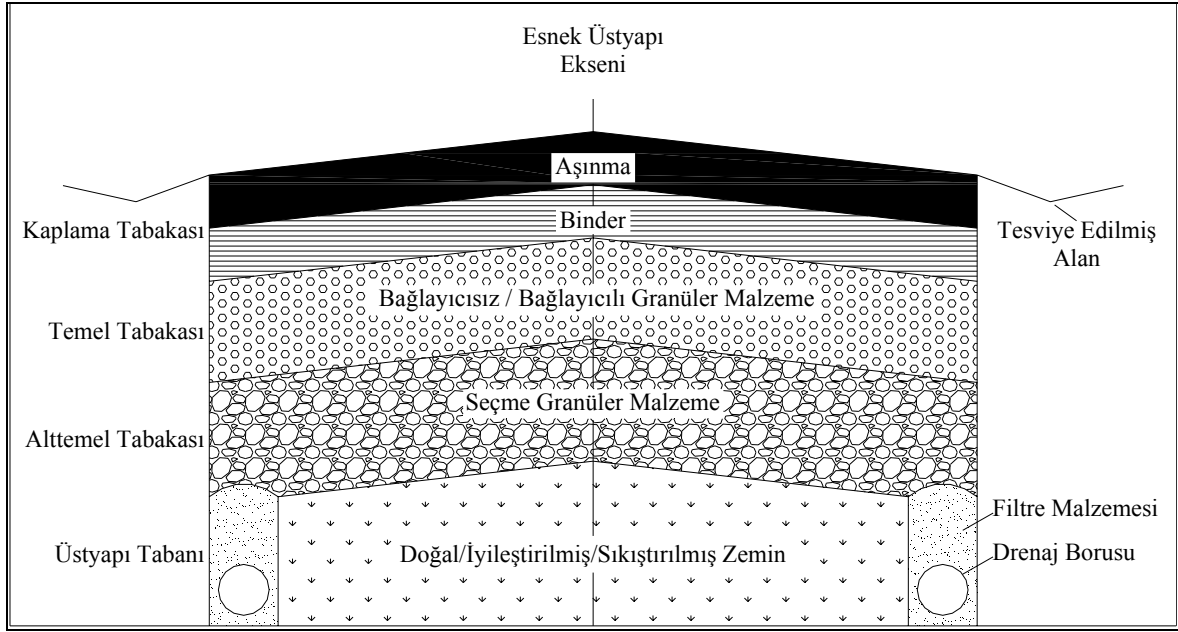
Rijit üstyapı, kaplama tabakasını çimento bağlayıcılı kaliteli beton veya betonarme plakların oluşturduğu üstyapı tipidir. Yapısal ana elemanlar beton veya betonarme plaktan oluşan kaplama tabakası, bağlayıcısız veya bağlayıcılı granüler malzemeden oluşan temel tabakası, seçme granüler malzemeden oluşan alttemel tabakasıdır. Üstyapının altında taban zemini bulunur. Tipik rijit üstyapı enkesiti Şekil 2.10.'da verilmiştir. Enkesitte gösterilen temel ve alttemel tabakaları aynı zamanda drenaj tabakası ve ayırıcı tabaka olarak hizmet vermektedir [6].

NATO rijit üstyapıyı, kaplama tabakasına uygulanan yükleri yüksek eğilme dayanımıyla dağıtarak taban zeminine ileten, inşaat ve büzülme derzleri ile plaklara bölünmüş yüksek kaliteli beton kaplamanın oluşturduğu üstyapı tipi olarak tanımlamaktadır. Beton plağın görevi, uçak yüklerini yüksek eğilme dayanımıyla dağıtmak ve böylece taban zemininin bozulmasını önlemektir. Rijit üstyapının yük altındaki davranışı; beton kaplama, temel ve alttemel tabakaları ile üstyapının oturduğu taban zemininin özelliklerine bağlı olduğundan tasarımında tabakalar ve tabakaları oluşturan malzemelerin özellikleri dikkate alınır.

Kompozit üstyapı, hasarlı rijit üstyapı üzerine asfalt betonu kaplama veya hasarlı esnek üstyapı üzerine kaliteli beton kaplama inşa edilmesiyle oluşan üstyapı tipidir. Kompozit üstyapıda eski beton plak yüzeyinde bulunan inşaat ve büzülme derzlerinden dolayı asfalt kaplama yüzeyinde yansıma çatlakları meydana gelebilir (Şekil 2.11.). Yansıma çatlağı oluşumunu engellemek veya ötelemek için ilave tedbirler alınabilir.



Esnek üstyapı; tekerlek yükleri altında elastik davranış sergileyebilen, küçük ölçekli deformasyonlara olanak sağlayan, yükleri yapısında bulunan bitüm bağlayıcılı kaplama tabakası (asfalt betonu), temel ve alttemel tabakaları aracılığıyla taban zeminine ileten üstyapı tipidir. Tipik esnek üstyapı enkesiti Şekil 2.12.'de verilmiştir [6]. Tipik olarak verilen enkesit tasarıma ve proje gereksinimlerine göre farklılık gösterebilir.



Şekil 2.12. Tipik esnek üstyapı enkesiti [6].

Asfalt betonu kaplamalı üstyapı olarak da adlandırılan esnek üstyapı, taban zeminini ile iyi temas halinde olacak şekilde, taban zemininden kaplama tabakasına doğru daha kaliteli malzemeler kullanılarak inşa edilir. Kaplamanın stabilitesi; adezyon kuvveti, sürtünme ve kohezyon gibi agrega özelliklerine ve petrol türevi olan bitümün niteliklerine bağlıdır. Üstyapının en üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, uçağın iniş takımlarında bulunan tekerleklerden iletilen ağır yüklere doğrudan maruz kalmaktadır. Bu nedenle diğer tabakalara göre çok daha yüksek elastisite modülüne sahip olması gerekmektedir. Üstyapının stabilitesi ve durabilitesini sağlayan bitümlü kaplama tabakası, genellikle aşınma ve binder tabakalarından oluşur.

Aşınma tabakası, emniyetli ve konforlu trafik seyri için uygun pürüzlülükte düzgün sürtünme ve yuvarlanma yüzeyi sağlar. Trafik, çevre ve iklim gibi faktörlerin aşındırıcı etkisine karşı direnç gösterir. Ayrıca, üstyapıya sızabilecek yüzeysel sularına karşı geçirimsizlik sağlar. Üstyapının yüzey altı ve yüzey sularının zararlı etkilerinden

korunması ve suyun araziden hızla uzaklaştırılması amacıyla rijit üstyapıdakine benzer şekilde drenaj sistemi tesis edilir.

Havaalanlarında esnek üstyapının;

- Ağır jet blastının,
- Yakıt ve yağ sızıntısının,
- Hava taşıtıdan kaynaklanan ağır yüklerin zararlı etkilerine maruz kalınmayacağı

öngörülen kaplamalı sahalarda kullanımı daha uygundur.

Jet blastından kaynaklanan ve aynı bölgeye uzun süre etkiyen yoğun ısı, esnek üstyapının kaplama tabakasını oluşturan asfalt betonunda bağlayıcı olarak bulunan bitümün karbonize olmasına ve kaplama tabakasının yıpranmasına sebep olmaktadır.

Yakıt ve yağ sızıntısı durumunda ise bitüm yumuşar. Küçük ölçekli sızıntılarda yumuşama önemli oranda olmayabilir. Ancak sızıntı aynı leke çevresinde sıklıkla tekrar ettiğinde, yumuşama kaplama tabakasının bölgesel olarak bozulmasına neden olur. Bu nedenle esnek üstyapının rijit üstyapı gerektirmeyen kaplamalı sahalarda kullanımı daha uygundur [6, 16, 18].

2.5. Stabilizasyon

Taşıma gücünün yetersiz, gradasyon ve drenaj özelliklerinin zayıf olduğu, negatif yüzey drenajının bulunduğu, don etkisinin hissedildiği, uygun çalışma platformuna ihtiyaç duyulduğu, yüksek plastisite ve şişme-büzülme gibi istenmeyen özelliklerin bulunduğu ve oturma koşullarının sağlanmadığı durumlarda sorunun çözümü için farklı hareket tarzları uygulanabilir. Bu hareket tarzları;

- Özellikleri uygun olmayan zeminin geçilerek uygun zemin üzerinde inşaatın gerçekleştirilmesi,
- Dikey inşaatla kullanılan temel yapılarının zayıf zemin durumu dikkate alınarak projelendirilmesi,
- Uygun olmayan zeminin kaldırılması ve yerine kaliteli malzeme doldurulması,
- Kaldırılan zeminin stabilize edilerek tekrar yerine doldurulması,
- Yerinde yapılan işlemlerle zeminin amaca uygun hale getirilmesi olarak sınıflandırılabilir.

Stabilizasyon, zeminin kayma direncini ve taşıma gücünü artıran, geçirimsizlik ve hacimsel değişim özelliklerini azaltan her türlü işlem olarak tanımlanır [10]. Havaalanı üstyapısının inşasında taban zemini, alttemel ve temel tabakalarında mekanik veya kimyasal stabilizasyon gerçekleştirilir. Ayırma amaçlı jeosentetik malzeme kullanımı, kalın blokaj tabakası serimi, sıkıştırma ve drenaj uygulamaları mekanik stabilizasyon yöntemleridir. Uygun özelliklere sahip olmayan zeminler bu yöntemler kullanılarak herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmeksizin stabilize edilebilirler. Mekanik stabilizasyonun yeterli olmadığı ya da uygulanmadığı durumlarda kimyasal stabilizasyon uygulanır. Kimyasal stabilizasyonda; kireç, çimento, bitüm veya uçucu kül gibi kimyasal katkıları kullanılarak zemin stabilize edilir [7, 8, 10].

Stabilizasyon; işlenebilirliğin artırılmasında, rijit üstyapıda görülebilen pompaj hasarının azaltılmasında, şişen zeminlerin hacimsel değişikliğinden kaynaklanan olumsuz etkilerin sınırlandırılmasında, inşaat işlerinin hızlandırılması ve kolaylaştırılması için çalışma platformu oluşturulmasında, inşaat sırasında iklim şartlarının olumsuz etkilerinin azaltılmasında etkilidir. Bu uygulama sonucunda genellikle üstyapı kalınlığı azalır, uygun mukavemet değerleri kazanılır ve malzemelerin fiziksel-mekanik özellikleri iyileştirilir.

Stabilizasyon kapsamında gerçekleştirilen karıştırma işlemi proje gereksinimine ve ilgili şartnameye göre sahada veya tesiste gerçekleştirilir. Tesiste gerçekleştirilen karıştırma işlemiyle daha yüksek kalitede malzeme imal edilir. Sahada karıştırma ile tesiste gerçekleştirilen karıştırmada elde edilen malzemenin kalitesine ulaşmak oldukça zordur.

2.5.1. Kireç ile Stabilizasyon

Zemin kireç ile karıştırıldığında hızlıca kurur ve dane yapısı irileşir. Bunun sonucunda işlenebilirlik artar; plastisite, su ile temas sonucunda meydana gelen mukavemet kaybı ve büzülme-şişme davranışı azalır.

Kireç ile stabilizasyonda; sönmüş kireç (Ca(OH)_2), sönmemiş kireç (CaO) veya bu kireçlerin çeşitleri kullanılır. Tarımsal kireç adı altında piyasada bulunan kalsiyum karbonat (CaCO_3) stabilizasyon için uygun değildir.

28 günlük kür neticesinde kazanılan puzolanik mukavemet ile taban zemini taşıma gücü önemli oranda artar. Esnek üstyapıda kullanılacak stabilize alttemel tabakası için gerekli taşıma gücü değerleri kireç stabilizasyonu ile sağlanabilir. Ancak, stabilize temel tabakası için gerekli taşıma gücü değerlerini sadece kireç stabilizasyonu ile elde etmek

oldukça zordur. Bu nedenle, temel tabakasında stabilizasyon için kireç ile birlikte çimentonun kullanılması gerekli olabilir.

Kireç ile stabilizasyon sadece taşıma gücünün artırılmasında değil aynı zamanda plastik killi zemin gibi sorunlu zeminlerin stabilizasyonunda oldukça etkilidir.

2.5.2. Çimento ile Stabilizasyon

Çimento ile stabilizasyon, çimentonun zemin veya agrega ile karıştırılması işlemi olarak tanımlanır. İşlem sonucunda elde edilen kohezyonlu malzeme zayıf beton olarak adlandırılır.

Kullanılan çimento miktarına ve zemin özelliklerine göre, elde edilen basınç dayanımı önemli oranda değişir. Bu tip yüksek çimento içerikli ve basınç dayanımlı stabilize malzemede çimento miktarı genellikle 134–223 kg/m³ aralığında seçilir. Üretim, yerleştirme ve kütleme faaliyetleri klasik beton uygulamalarında olduğu gibidir.

Çimentonun reaksiyon hızı puzolanlara göre daha yüksektir. Bu sebeple, çimento ile stabilizasyonda karşılaşılabilecek en büyük tehlike kaplama tabakalarına yansısı muhtemel büzülme çatlaklarının oluşumudur. Genellikle bu durum esnek üstyapının kaplama tabakasını oluşturan asfalt betonunun altında çimento ile stabilize edilmiş temel tabakasının inşa edilmesi durumunda önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Benzer tehlike çimento ile stabilize edilmiş tabakaların üzerine inşa edilen yüksek dayanımlı kaliteli beton kaplama için de mevcuttur. Amerikan Hava Kuvvetleri, büzülme çatlağından kaynaklanacak yansıma çatlağı oluşumunu minimum seviyede tutmak amacıyla esnek üstyapıda kullanılacak çimento ile stabilize edilmiş temel tabakası için çimento miktarını %4 ile sınırlamaktadır [6].

Çimento ile stabilizasyon için en ekonomik ve uygun zeminler, iyi derecelenmiş kumlu çakıl veya çakıllı kumlardır. İnce daneli, iri daneli ve zayıf derecelenmiş zeminler ile uygun taşıma gücü değerlerine ulaşılması için genellikle daha yüksek çimento içeriği gerektirmektedir. Bu nedenle söz konusu zeminlerin çimento ile stabilizasyonu ekonomik değildir. Yağlı killi, organik zeminler ve bazı asidik kumlar da çimento ile stabilizasyona zayıf tepki vermektedir.

2.5.3. Bitüm ile Stabilizasyon

Bitüm, asfalt emülsiyonu ve katbek asfalt ile zeminin veya agregaların karıştırılması işlemi sonucunda, suya dayanıklı ve belirli kohezyon değerine sahip stabilize edilmiş zemin elde edilir. Bağımsız daneler bitümün bağlayıcı özelliği ile birbirine kenetlenir ve böylece geçirimsizlik önemli oranda azalır.

Havaalanları için alttemel ve temel tabakalarında kullanılacak bitüm ile stabilize edilmiş malzemenin karışım tasarımı klasik marshall karışımı ile hazırlanır. Bitüm ile yüksek kaliteli agrega asfalt plentinde karıştırılır ve yapısal açıdan yüksek kaliteli alttemel ve temel malzemeleri imal edilir. Taban zemininin stabilizasyonunda kullanılacak bitüm miktarı ise genellikle ampirik denklemlere göre belirlenir. Daha sonra saha şartlarında arzu edilen mukavemet değerlerine ulaşmak için gerekli düzenlemeler yapılır.

Asfalt emülsiyonu ve katbek asfalt kullanılarak asfalt plentinde benzer karıştırma işlemleri de gerçekleştirilebilir. Ancak bu malzemeler genellikle yükün daha az kritik olduğu durumlarda taban zemini ve alttemel tabakalarında kullanılır.

3. UÇAK KARAKTERİSTİKLERİ

Havaalanı kaplamalı sahaları üstyapı tasarımında zeminin mukavemeti ve üstyapı tabakalarında kullanılacak malzemelerin özellikleri ile birlikte;

- Uçak ağırlığı,
- Tekerlek ve iniş takımı düzeni,
- Trafik gibi faktörler önemli rol oynamaktadır.

3.1. Uçak Ağırlığı

Üstyapı tasarımında ağırlık önemli bir faktördür. Tasarımda *MTOW (Maximum Take-Off Weight)* yani *maksimum kalkış ağırlığı* dikkate alınır. Genellikle bu ağırlığın %95'inin ana iniş takımları, % 5'inin burun iniş takımı tarafından taşındığı kabul edilir. Havacılıkta MTOW ile birlikte *OEW (Operating Empty Weight)* ve *MRW (Maximum Ramp Weight)* terimleri de sıklıkla kullanılmaktadır.

OEW, uçağın sabit *boş işletme ağırlığı* olarak tanımlanır. Ticari olarak taşınan yolcu, kargo ve yakıt ağırlıkları dahil değildir. Ana gövde, motor, motor için gerekli yağ, soğutucu vb. sıvılar ve mürettebat ağırlıkları dahildir.

MTOW, boş işletme ağırlığı ile ticari olarak taşınan yolcu ve yük ağırlıkları ile yakıt ağırlığı kombinasyonundan oluşan toplam ağırlıktır. Kalkış anındaki maksimum kalkış ağırlığı olarak tanımlanır. Bir uçak için MTOW sabittir. Havanın sıcaklığı, havaalanı rakımı ve pist uzunluğu ile bu ağırlık değişmemektedir. Değişken durumlar için *MPTOW (Maximum Permissible Take-off Weight)* yani *maksimum izin verilebilir kalkış ağırlığı* terimi kullanılır.

MRW (Maximum Ramp Weight), uçağın kalkıştan önce motor çalıştırma, taksi yapma, bekleme vb. yer operasyonlarını gerçekleştirdiği durumlarda harcadığı yakıt ağırlığı dahil olmak üzere toplam ağırlıktır. MRW *maksimum apron ağırlığı* olarak tanımlanır. MRW'nin MTOW'dan biraz daha yüksek olması kaçınılmazdır.

3.2. Tekerlek ve İniş Takımı Düzeni

Tekerlek ve iniş takımı düzeni, uçak yükünün üstyapıya aktarılma şeklini ifade etmektedir. Dolayısıyla üstyapı tabakalarında oluşacak gerilmeler bu geometriye bağlı olarak değişmektedir.

1980’li yılların sonuna kadar sivil ve askeri hava taşıtlarının çoğunda üç temel tekerlek ve iniş takımı düzeni kullanılmaktaydı. Bunlar;

- Tek tekerlek (Her dikmede tek tekerlek),
- İki tekerlek (Her dikmede yan yana duran iki tekerlek),
- İki tandem tekerlek (Her dikmede iki sıra, yan yana duran iki tekerlek) şeklindeydi.

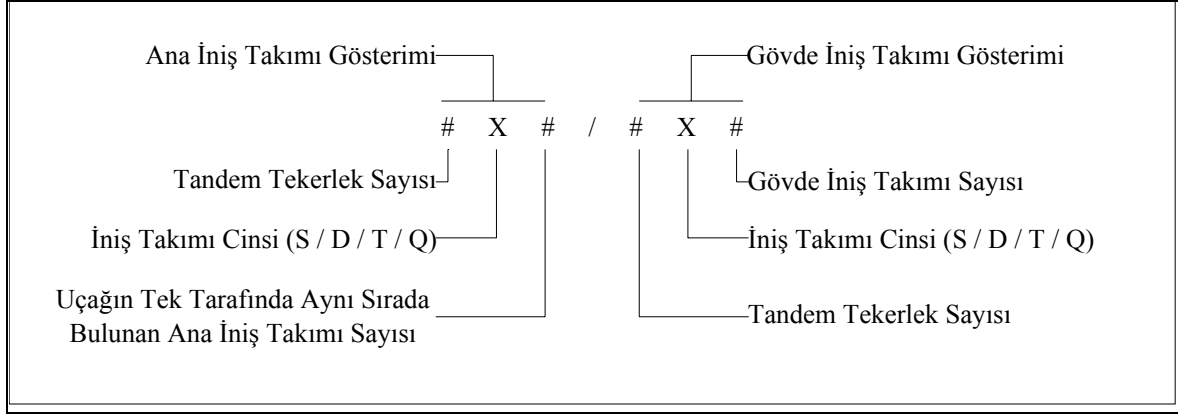
Zaman içerisinde artan uçak ağırlıklarının yüksek gerilmelere sebep olarak havaalanı üstyapılarına zarar vermesini engellemek amacıyla uçak üreticileri tarafından toplam tekerlek sayısının artırılması çözüm yolu olarak benimsenmiştir. Bu amaçla uçaklara dikmeler ilave edilmiştir. Örnek olarak; McDonnell Douglas firması tarafından aslında iki dikmeli ve iki tandem tekerlek düzenine sahip olarak üretilen DC10 uçağının daha ağır olan DC10-30 modeli üretildiğinde uçak gövdesinin merkezine iki tekerlek düzenine sahip bir adet ilave dikme yerleştirilmiştir.

Zaman içerisinde, karmaşık hale gelen tekerlek ve iniş takımı düzenleri ve yeni hava taşıtlarının sahip oldukları özgün geometrilerin üç temel düzen ile tanımlanması olanaksız hale gelmiştir. Bu nedenle; FAA ve Amerikan Ordusu tarafından birbirleri ile tam olarak uyumlu olmayan ayrı adlandırma sistemleri geliştirilmiştir.

Günümüz modern hava taşıtlarının sahip oldukları tekerlek ve iniş takımı düzenleri dahil olmak üzere ortak isimlendirmenin kullanılabilmesi amacıyla FAA tarafından standart adlandırma sistemi geliştirilerek 2005 yılında yayınlanmıştır [19]. Standart adlandırma sistemi ile pilotların ve havaalanı yetkililerinin farklı adlandırma sistemlerini öğrenme gereksinimleri ortadan kalkmış ve tüm sivil ve askeri faaliyetlerde ortak adlandırmanın kullanılabilmesi sağlanmıştır. FAA’nın yeni adlandırma sistemine geçişinin ardından Amerikan Ordusu tarafından söz konusu sistemin kullanılması planlanmıştır.

Standart adlandırma sistemde kullanılan *ana iniş takımı* terimi; uçak gövdesine en uzak ve uçak eksenini boyunca her iki tarafta simetrik olarak bulunan iniş takımı şeklinde tanımlanmaktadır. Ana iniş takımları arasında ve uçağın ortasında bulunan ilave iniş takım veya takımları ise *gövde iniş takımı* olarak adlandırılır. Gövde iniş takımı ana iniş takımından farklı düzende ve asimetrik olabilir.

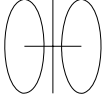
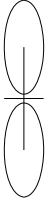
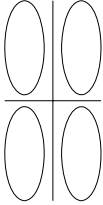
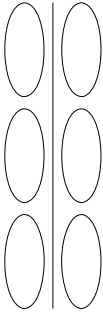
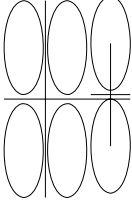
FAA [19] tarafından önerilen standart adlandırma sisteminde tekerlek ve iniş takımı düzeni kodlu olarak belirtilir (Şekil 3.1.)



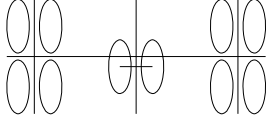
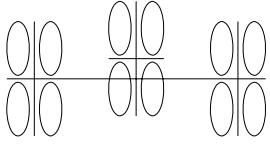
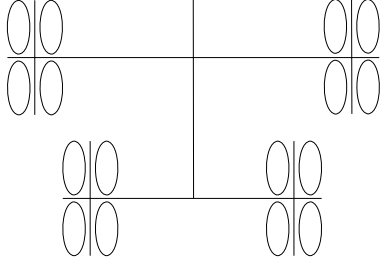
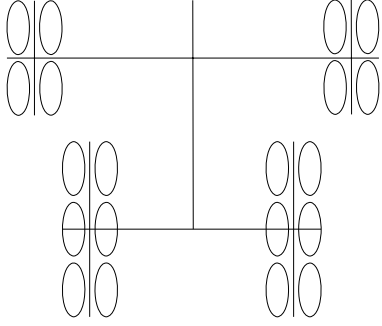
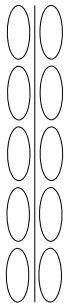
Şekil 3.1. Standart tekerlek ve iniş takımı düzeni adlandırma sistemi [19].

Bu sistemde; tek tekerlekli iniş takımı için “S”, iki tekerlekli iniş takımı için “D”, üç tekerlekli iniş takımı için “T” ve dört tekerlekli iniş takımı için “Q” kodu kullanılır. Ana iniş takımı gösteriminde “1” değeri kullanılmaz. Gövde iniş takımı gösteriminde, gövdede bulunan iniş takımı sayısını belirtmek amacıyla “1” kullanılabilir.

Standart adlandırma sistemi ile C-5 Galaxy uçağının tekerlek ve iniş takımı geometrisini tanımlamak oldukça zordur. Ayrıca C-17, An-124 ve Il-76 gibi bazı uçakların sahip oldukları tekerlek ve iniş takımı geometrilerini söz konusu sistemde tanımlamak karmaşık bir prosedürdür. Bu nedenle bazı kabuller ile geometriyi en doğru şekilde temsil ettiği değerlendirilen gösterimler kabul edilmiştir. Bunlar C-17 için “2D”, An-124 için “5D” ve Il-76 uçağı için “Q2”dir. Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.’te bazı tekerlek ve iniş takımı düzenleri için standart gösterimler örnek uçak cinsleri ile birlikte verilmiştir.

Standart Gösterim	Tekerlek ve İniş Takımı Düzeni	Örnek Uçak Cinsi
S		Sngl Whl-45
D		B737-100
2S		C-130
2D		B767-200
3D		B777-200
2T		C-17A

Şekil 3.2. Bazı standart tekerlek ve ana iniş takımı gösterimleri [19].

Standart Gösterim	Tekerlek ve İniş Takımı Düzeni	Uçak Cinsi
2D/D1		DC10-30/40
2D/2D1		A340-600 std
2D/2D2		B747-400
2D/3D2		A380-800
5D		An-124

Şekil 3.3. Bazı standart tekerlek ve ana-gövde iniş takımı gösterimleri [19].

4. HAVAALANI ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİ

Havaalanı esnek üstyapı tasarımında USCOE CBR, FAA CBR ve FAARFIELD vb. tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Esnek üstyapı tasarımında kullanılan yöntemler ampirik, mekanistik ve mekanistik-ampirik olmak üzere üç grupta toplanmaktadır.

Ampirik tasarım yöntemleri, saha tecrübelerinin ve deneysel sonuçların istatistiksel olarak düzenlenmesi ile geliştirilmiştir. Uçak yükleri altında esnek üstyapının sergilediği performansı yansıtan tekerlek izinde oluklanma, çatlama, oturma vb. hasarlar incelenmiş ve yapılan deneyler sonucunda elde edilen bilgiler çeşitli istatistiksel yöntemlerle düzenlenmiştir.

Tecrübe ve deneye dayalı olarak geliştirilen ampirik tasarım yöntemleri, üstyapıyı oluşturan tabakalarda kullanılan malzemelerin özellikleri ile bu malzemelerin yük, iklim ve çevre koşulları altında sergiledikleri davranışların nedenlerinden daha çok davranışın kendisi, diğer bir ifadeyle üstyapının gösterdiği performansla ilgilenmektedir. Saha tecrübesi ve deney sonuçları neticesinde, benzer üstyapı taban zemini, üstyapı tabakaları, trafik ve iklim koşulları için makul ve tutarlı sonuçlar verebilen ampirik yöntemler, farklı koşullar için aynı tutarlılığı göstermeyebilir. Bu nedenle, ampirik yöntemlerin saha şartları ve deney koşulları ile sınırlı olduğu göz ardı edilmemelidir. USCOE CBR ve FAA CBR yöntemleri ampirik yöntemlerdir.

Mekanistik tasarım yöntemleri, ampirik tasarım yöntemlerinin aksine, mekaniğin temel prensiplerini kullanır. Malzeme özellikleriyle birlikte iklim, trafik ve çevre koşullarının dikkate alındığı mekanistik yöntemler ampirik yöntemlere göre daha teorik esastır.

Ampirik ve mekanistik tasarım yöntemleri gerçekçi esnek üstyapı tasarımı için yeterli olmamaktadır. Mekanistik yöntemler, mekanik prensipleri kullanıp geniş bir aralıkta ekstrapolasyona imkan verip teorik olarak doğru sonuçlar vermektedir. Ancak, teorik olarak geliştirilen üstyapının sahada uygulanması ve beklenen performansın elde edilmesi oldukça zordur. Diğer taraftan ampirik yöntemler bir çok belirsizlik bulundurmakla birlikte saha mühendisliği açısından uygulama kolaylığı bulunmaktadır.

Birçok araştırmacı tarafından, havaalanı esnek üstyapı tasarımında uygun yöntem olarak savunulan *mekanistik-ampirik* yaklaşım ampirik tasarımın uygulama kolaylığı ile mekanistik çözümlerin teori esaslı prensiplerini birleştirmektedir. Bu çalışmada anlatılan FAARFIELD yöntemi mekanistik-ampirik bir yöntemdir.

ASCE'nin 1989 yılında yapmış olduğu bir araştırma ampirik yöntemlerden olan CBR yönteminin en çok tercih edilen yöntem olduğunu göstermiştir.

4.1. USCOE CBR Yöntemi [6]

4.1.1. Giriş ve Tarihsel Gelişim [13, 20]

Karayollarında kullanılan CBR yöntemi 1928 yılında geliştirilmiştir. Yük altında farklı üstyapıların sergiledikleri performans dikkate alınarak başarılı ve başarısız üstyapılardan alınan zemin numuneleri CBR deneylerine tabi tutulmuş ve CBR tasarım abakları oluşturulmuştur. Yöntem, İkinci Dünya Savaşı'nın başlamasından hemen sonra askeri havaalanlarında kullanılmak üzere USCOE tarafından uyarlanmıştır.

İkinci Dünya Savaşı'nın aniden başlaması havaalanı üstyapısına yönelik olarak geliştirilmiş herhangi bir tasarım yöntemi bulunmamasından dolayı havaalanı üstyapısının tasarımında kullanılacak yöntem hakkında hızla karar verilmesini gerektirmiştir. Bununla birlikte, savaş koşulları dikkate alındığında geliştirilecek tasarım yönteminin zaman kısıtlamasından dolayı işlevsel olmayacağı öngörülmüştür. Bu nedenle, karayolu üstyapı tasarımında kullanılan tüm yöntemlerin gözden geçirilmesi ve havaalanı üstyapısında kullanılabilecek olan yöntemin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Seçimde birçok kıstas dikkate alınmış;

- Taban zemininin ve üstyapı tabakalarında kullanılan malzemenin kolaylıkla test edilebilirliği,
- Kayıt altına alınmış tecrübelerin mevcut olması,
- Havaalanı üstyapı tasarımına kısa sürede uyarlanabilmesi kıstasları ön plana çıkmıştı.

Havaalanı üstyapı tasarımı için önerilen yöntemlerin incelenmesinin ardından CBR yöntemi geçici olarak kullanılmaya başlanmıştır. CBR yöntemi ile kısmen basit bir zemin mekaniği deneyi gerçekleştirilerek havaalanı üstyapı tabaka kalınlıkları tasarım eğrileri ile tespit edilmesi sağlanmıştır.

USCOE, 1950'li yıllar boyunca havaalanı üstyapısı ile ilgili tam-ölçekli deneyler gerçekleştirmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve hizmette olan üstyapıların performans çalışmaları, TTY (Tek Tekerlek Yüğü) için CBR tasarım kıstasının, başarılı veya başarısız üstyapılar için;

- $\frac{\text{Kalınlık}}{\sqrt{\text{Temas alanı}}}$
- $\frac{\text{CBR}}{\text{Lastik basıncı}}$

parametreleri ile ifade edilebileceğini göstermiştir. Yaklaşık 5.000 geçiş için bu parametrelerin oluşturduğu eğri;

$$t = \sqrt{\left[\frac{P}{8.1(CBR)} - \frac{A}{\pi} \right]} \quad (4.1)$$

matematiksel eşitlik ile ifade edilmektedir.

Eşitlikte;

t : Tasarım kalınlığı (in)

P : Tek tekerlek yükü, TTY (lb)

A : Ölçülen lastik temas alanı (in²)

1959 yılında, yük tekrarları ve çoklu tekerlek ve iniş takımı düzenleri değerlendirilerek Eşitlik 4.2. geliştirilmiştir. Yeni eşitlikte eşdeğer tek tekerlek yükü (ETTY) kullanılmıştır.

$$t = f \sqrt{\left[\frac{ETTY}{8.1(CBR)} - \frac{A}{\pi} \right]} \quad (4.2)$$

Eşitlikte;

f : Tasarım kalınlığı yüzdesi ($0.23 \log c + 0.15$)

ETTY : Eşdeğer tek tekerlek yükü (lb)

c : Maksimum gerilmedeki geçiş sayısı

1960'lı yılların sonuna doğru USCOE, çoklu tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip ağır uçaklara yönelik olarak gerekli üstyapı kalınlığı üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu uçaklar C-5A ve B-747 gibi brüt ağırlıkları 600.000 lb'yi (272.169 kg) aşan uçaklardır. Yapılan araştırmalar Eşitlik 4.2.'nin düşük trafik hacminde tüm tekerlek ve iniş takımı düzenleri için yeterli olduğunu ortaya koymuş, ancak yüksek trafik hacminde çok fazla üstyapı kalınlığının elde edildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle Eşitlik 4.3. geliştirilmiştir.

$$t = \alpha i \sqrt{\left[\frac{ETTY}{8.1(CBR)} - \frac{A}{\pi} \right]} \quad (4.3)$$

Eşitlikte;

αi : Yük tekrar katsayısı

Daha önceki eşitliklerde trafik hacminin etkisi maksimum gerilmedeki geçiş sayısı olarak yer alırken, Eşitlik 4.3.'te bu etki uçağın geçiş sayısı olarak yer almıştır. Farklı trafik hacimleri için yük tekrar katsayıları Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Yük tekrar katsayıları [20].

Trafik Hacmi	ETTY Hesaplamasında Kullanılan Tekerlek Sayısı				
	1	2	4	12	24
1.000	0,72	0,70	0,68	0,65	0,64
5.000	0,83	0,77	0,73	0,69	0,67
10.000	0,88	0,81	0,76	0,70	0,68
100.000	1,03	0,88	0,79	0,72	0,69

Bu eşitlik CBR 15 veya daha az olduğu taban zemini için önerilmektedir. 15'den büyük CBR değerlerinin hesaplamalara dahil edileceği durumlarda üstyapı kalınlığı, durabilite ve uzun hizmet ömrü dikkate alınarak tespit edilir. Düzenlenmiş eşitliğin kullanılmasıyla herhangi bir uçak için CBR-Üstyapı Kalınlığı eğrisi çizilebilir.

Bu uyarlamadan sonra zaman içerisinde; yüksek lastik basıncı, farklı yükleme koşulları, tekli-ikili-çoklu tekerlek ve iniş takımı düzenleri, değişken üstyapı enkesitleri, uçak sapma ve patern etkisi dikkate alınarak ampirik ve teorik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda üstyapı kalınlığı, tekerlek yükü, lastik temas alanı ve taban zemini CBR değeri arasında istatistiksel bağıntı geliştirilmiştir (4.4).

$$t = \alpha_i \left\{ \sqrt{A} \left[\begin{array}{l} -0.0481 - 1.1562 \cdot \left(\log \frac{\text{CBR}}{p_e} \right) \\ -0.6414 \cdot \left(\log \frac{\text{CBR}}{p_e} \right)^2 - 0.4730 \cdot \left(\log \frac{\text{CBR}}{p_e} \right)^3 \end{array} \right] \right\} \quad (4.4)$$

4.1.2. Taban Zemini

USCOE CBR yöntemiyle esnek üstyapı tasarımında taban zemininin taşıma gücü CBR cinsinden ifade edilir. Tasarım CBR değeri olarak genellikle 20 ve daha küçük değerler seçilir. 20'den büyük tasarım CBR değerinin kullanılmasına ancak taban zemininin alttemel tabakasının özelliklerini taşıması durumunda izin verilebilir.

Taban zemini için tasarım CBR değeri, üstyapıya hizmet ömrü boyunca etki edecek su muhtevası dikkate alınarak seçilir. Zeminin su muhtevasının uzun bir dönem için tespit edilemediği durumda, laboratuvarda elde edilen yaş CBR değeri taban zemini tasarım CBR değeri olarak belirlenir.

4.1.3. Seçme Granüler Malzeme ve Alttemel Tabakası

USCOE CBR yönteminde seçme granüler malzeme ve alttemel tabakası, tasarım CBR değerinin 20'den büyük olduğu durumda alttemel tabakası, 20 ve daha küçük olduğu durumda seçme granüler malzeme tabakası olarak adlandırılır.

USCOE CBR yönteminde minimum kaplama ve temel tabakaları kalınlıkları, alttemel tabakası tasarım CBR değerini 50'den daha büyük gerektirmeyecek şekilde tespit edilir.

Taban zemini tasarım CBR değeri, zemine herhangi bir işlem uygulamadan 20 ile 50 arasında olması durumunda, seçme granüler malzeme ve alttemel tabakasına ihtiyaç olmayabilir. Ancak, taban zemini tasarım CBR değerinin 20'den büyük olarak belirlenmesi için daha önce belirtildiği gibi taban zemininin alttemel tabakasının gradasyon ve plastisite özelliklerini karşılaması gerekmektedir. Plastisite özelliklerini karşılayan ancak gradasyon özelliklerini karşılamayan zemin kireçtaşı, kum vb. katkıları ile stabilize edilir.

Seçme granüler malzeme tabakası için genellikle havaalanı çevresinde mevcut iri daneli zeminler kullanılır. Sıkıştırma için taban zemini sıkıştırma değerleri dikkate alınır.

Sıkışma derecesi kohezyonsuz malzemeler için %95, kohezyonlu malzemeler için %90 olarak uygulanır.

Alttemel tabakasında olarak iri daneli zeminlerle birlikte işlenmiş ve stabilize edilmiş malzemeler kullanılabilir. CBR kalıbında %3 veya daha fazla şişme gösteren zeminler alttemel tabakasında kullanılmaz. Alttemel tabakasında kullanılan zemin maksimum kuru birim ağırlığa kadar sıkıştırılır.

Seçme granüler malzeme ve alttemel tabakası için tasarım CBR değerini tespit etmek taban zeminindeki gibi karmaşık değildir. Bunun esas nedeni, bu tabakanın taban zemininin aksine daha üniform yapı sergilemesidir. Tasarım CBR değerini belirlemek için genellikle yaş CBR deneyleri gerçekleştirilir. Yapılan çalışmalar, laboratuvar da gerçekleştirilen CBR deneylerinin çakıllı zeminler için arazi CBR değerlerinden daha yüksek değerler verebildiğini göstermektedir. CBR deney kalıbının numune üzerindeki sınırlayıcı etkisi bu duruma neden olmaktadır. CBR deneyine ilave olarak bu tabaka için gerekli gradasyon değerleri ve atterberg limitleri Tablo 4.2.'de verilmiştir. Buna göre, alttemel tabakasında kullanılan malzemelerin seçme granüler malzeme tabakasında kullanılanlara göre şartname gereği daha kaliteli olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2. Gradasyon değerleri ve atterberg limitleri [6].

Tabakanın Cinsi	Maksimum		Maksimum İzin Verilen			
			%Geçen		Atterberg	
	Tasarım CBR Değeri	Maksimum Dane Çapı	2,0 mm	0,075 mm	LL	PI
Alttemel	50	75	50	15	25	5
Alttemel	40	75	80	15	25	5
Alttemel	30	75	100	15	25	5
Seçme Granüler Malzeme	20	75	-	25	35	12

4.1.4. Temel Tabakası

Alttemel tabakasına göre daha yüksek kalitede malzeme kullanılarak inşa edilen temel tabakasında; derecelenmiş kırmataş agregası, kırmataş mekanik stabilize agregası, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı, stabilize malzeme, kırılmış ve geri kazanılmış beton vb. malzemeler ilgili

şartname gereksinimleri sağlandığında kullanılabilir. Temel tabakası bazı durumlarda granüler malzemenin çimento, kireç, bitüm ve uçucu kül katkısı ile stabilize edilmesi şeklinde inşa edilir.

Temel tabakasının taşıma gücü, alttemel tabakasında olduğu gibi laboratuvar CBR deneyleri ile belirlenmez. Bunun temel nedeni, laboratuvar deneyleri için numune alma işlemi ve deney kalıbının sınırlayıcı etkisidir. Laboratuvarda gerçekleştirilen CBR deneyi ile taşıma gücünün tespit edilmesi yerine önceden belirlenmiş tasarım CBR değerleri kullanılır. Bu değerler, hizmet altındaki üstyapıların performanslarına ait kayıtlar ve trafiğe maruz bölgelerde yapılan saha deneyleri sonucunda belirlenmiş standart değerlerdir. İlgili şartnamede belirtilen gereksinimleri sağlayan derecelenmiş kırmataş agrega 80–100 CBR değerini ve kırmataş mekanik stabilize agrega 80 CBR değerini sağlamaktadır.

Daha önce belirtildiği gibi, minimum kaplama ve temel tabakaları kalınlıkları, alttemel tabakası için gerekli CBR değeri 50 veya daha az olacak şekilde belirlenir. Amerikan Donanması tarafından esnek üstyapıda kullanılan minimum temel tabakası kalınlıkları Tablo 4.3.'de verilmiştir. Temel tabakası, USCOE CBR yönteminde alttemel tabakasına benzer şekilde maksimum kuru birim ağırlığa kadar sıkıştırılır.

Tablo 4.3. Amerikan Donanması için minimum temel tabakası kalınlıkları [6].

Uçak Brüt Ağırlığı (kg)	Lastik Basıncı (MPa)	Kalınlık (in)
		80 CBR
< 5.440	Sınırsız	6
5.440 – 13.600	< 1,38	6
5.440 – 13.600	≥ 1,38	8
> 13.600	Sınırsız	8

4.1.5. Stabilizasyon

Tabaka kalınlığı tasarımında, üstyapı tabakalarının stabilize edilmiş olarak dikkate alınması için gerekli olan minimum serbest basınç mukavemeti değerleri Tablo 4.4.'te verilmiştir. Taban zemini, seçme granüler malzeme, alttemel ve temel tabakalarının çimento, kireç, bitüm veya uçucu kül ile stabilizasyonu sonucunda Tablo 4.4.'te verilen değerlerin sağlanması şartı aranır.

Tablo 4.4. Stabilize tabakalar için minimum serbest basınç mukavemet değerleri [6].

Tabakanın Cinsi	Mukavemet (psi)
Taban zemini	250
Seçme granüler malzeme	250
Alttemel	250
Temel	750

Tablo 4.4.'te verilen minimum serbest basınç mukavemeti değerleri, çimento ile stabilizasyonunda 7 günlük, diğer katkıları ile stabilizasyonda 28 günlük olarak elde edilen değerlerdir. Stabilize edilmiş malzeme kullanılarak inşa edilen üstyapı tabakaları için USCOE CBR yöntemine göre Amerikan Donanması tarafından kullanılan eşdeğerlik katsayıları Tablo 4.5.'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Amerikan Donanması için stabilize tabaka eşdeğerlik katsayıları [6].

Malzemenin Cinsi	Eşdeğeri
1,0 mm kireç stabilize alttemel	1,2 mm alttemel
1,0 mm çimento stabilize alttemel	1,2 mm alttemel
1,0 mm çimento stabilize temel	1,5 mm temel
1,0 mm bitüm stabilize temel	1,5 mm temel

4.1.6. Kaplama Tabakası

USCOE CBR yönteminde esnek üstyapı kaplama tabakasında asfalt betonu kullanılır. Amerikan Donanması tarafından önerilen minimum kaplama tabakası kalınlıkları Tablo 4.6.'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Amerikan Donanması için minimum kaplama tabakası kalınlıkları [6].

Uçak Brüt Ağırlığı (kg)	Lastik Basıncı (MPa)	Kalınlık (in)
< 5.440	Sınırsız	2
5.440 – 13.600	< 1,38	3
5.440 – 13.600	≥ 1,38	4
> 13.600	Sınırsız	4

4.1.7. Uçak Karakteristikleri

Amerikan Donanması tarafından üstyapı kalınlık tasarımında kullanılan öntanımlı trafik alanları; trafik dağılımı, uçak ağırlığı ve her iki fonksiyon dikkate alınarak üç grupta sınıflandırılmaktadır. Bu gruplar; birincil trafik alanı, ikincil trafik alanı ve destek alanlarıdır.

USCOE CBR yönteminde tekerlek ve iniş takımı düzeni dikkate alınır. Yöntemde bulunan tasarım abaklarını kullanmak için uçak brüt ağırlığının (MTOW) %95'inin ana iniş takımları tarafından üstyapıya aktarıldığı kabul edilir. Ana pist banketi ve aşma sahaları gibi normal koşullarda maksimum ağırlık ile yüklenmeyeceği öngörülen sahaların tasarımı için uçak için verilen brüt ağırlıklardan farklı ağırlıklar da kullanılabilir.

Havaalanına özgü trafik hacmi verileri temin edilemediği durumda, tasarımda kullanmak üzere öntanımlı standart tasarım uçak cinsleri ve trafik hacimleri mevcuttur. Söz konusu standart tasarım uçak cinsleri, uçak karakteristikleri ve proje trafik hacimleri Tablo 4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Amerikan Donanması için standart tasarım uçak cinsleri [6].

Tekerlek ve İniş Takımı Düzeni	Tasarım Uçağı	Lastik Basıncı (MPa)	Tasarım İniş Takımı Yüğü (kg)	Proje Trafığı
Tek tekerlek	F-14	1,65	13.608	300.000
İki tekerlek	P-3	1,31	30.845	100.000
Tek tandem tekerlek	C-130	0,65	38.100	50.000
İki tandem tekerlek	C-141	1,24	70.310	25.000

USCOE CBR yönteminde havaalanı kaplamalı saha esnek üstyapı tasarımı minimum 20 yıllık hizmet ömrü boyunca beklenen trafik dikkate alınarak gerçekleştirilir. Trafik hacminin belirlenmesinde sadece kalkışlar dikkate alınır.

4.1.8. Uygulama Esasları ve Tasarım Prosedürü

USCOE CBR yönteminde, askeri havaalanları esnek üstyapı tasarımı için grafiksel tasarım abakları kullanılır. Yöntemde, Amerikan Kara, Hava ve Deniz Kuvvetlerine ait havaalanları için, farklı askeri kullanım alanları ve tekerlek ve iniş takımları düzenleri dikkate alınarak toplam 33 adet abaktan faydalanılır. Tasarım abakları USCOE tarafından 2001 yılında yayınlanmıştır [6]. Yöntemde; taban zemini tasarım CBR değeri uygun abağa girilir ve uçak brüt ağırlığı ile trafik hacmi kullanılarak belirli bir durum için inşa edilmesi gereken toplam üstyapı kalınlığı belirlenir.

Tasarımda öncelikle taban zemini için tasarım CBR değeri belirlenir. CBR değeri uygun abağa girilerek düşeyde brüt ağırlık eğrisi ve yatayda trafik hacmi (yıllık kalkış sayısı) eğrisi ile kesişim noktası belirlenir. Kesişim noktasından aşağıya inilerek taban zemini üzerinde gerekli toplam üstyapı kalınlığı okunur.

Daha sonra bir üst tabaka olan alttemel tabakasının tasarım CBR değeri belirlenir. Alttemel tabakası tasarım CBR değeri aynı abağa girilir ve daha önce belirtildiği şekilde alttemel tabakası üzerinde gerekli temel ve kaplama tabakalarının toplam kalınlığı okunur. Tablo 4.3. ve 4.6. yardımı ile temel ve kaplama tabakalarının minimum toplam kalınlığı belirlenir. Okunan değer minimum değer ile karşılaştırılır. Okunan değer düşük olması durumunda minimum temel ve kaplama tabakası kalınlıkları kullanılır.

Alttemel tabakası kalınlığını belirlemek için taban zemini üzerinde gerekli toplam üstyapı kalınlığından temel ve kaplama tabakalarının toplam kalınlığı çıkarılır. Alttemel tabakası kalınlığı 150 mm'den az olarak hesaplanması durumunda temel tabakası kalınlığının artırılması değerlendirilir. Tasarımda stabilize tabakaların kullanılması durumunda, araştırma ve saha tecrübesi sonucunda elde edilen kalınlık eşdeğerlik katsayıları kullanılır (Tablo 4.5.).

Havaalanı arazisinin genelinde mevcut taban zemini CBR değerinin 3 ve daha az olması durumunda, söz konusu arazinin kaplamalı saha inşaatı için uygun olmadığı değerlendirilir. USCOE CBR yönteminde kullanılan tasarım eğrilerinde 3 ve daha az CBR değerleri, kısmi zayıf bölgelerde gerekli üstyapı kalınlığının tespit edilmesi için

verilmektedir. Tasarımda dikkate alınması gereken diğer önemli konu don olayıdır. Dona maruz arazilerde üstyapı tabakaları dona hassas olmayan malzemeler ile don derinliği dikkate alınarak inşa edilir.

4.2. FAA CBR Yöntemi [7]

4.2.1. Giriş ve Tarihsel Gelişim

FAA tarafından havaalanı kaplamalı sahaları esnek üstyapı tasarımında ilk olarak, taban zeminin sınıflandırılması esası kullanılmıştır. Taban zemininin sınıflandırılması; zeminin sınıfı, drenaj şartları ve don durumu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

1978 yılında FAA tarafından havaalanı esnek üstyapı tasarımında CBR yöntemi benimsenmiştir. FAA CBR yöntemi, içinde Boeing-777 trafiğinin olmadığı ve brüt ağırlıkları 13.000 kg'dan fazla olan uçaklara hizmet veren havaalanları için esnek üstyapı tasarımında kullanılmaktadır.

4.2.2. Taban Zemini

FAA CBR yönteminde; taban zemini tasarım CBR değeri elde edilen tüm CBR değerlerinin % 85'i veya daha düşük değer olarak seçilir. Bazı zeminlerin farklı tabakalarda taşıma gücü değerlerinin oldukça değişken olabileceği tasarım CBR değerinin belirlenmesinde dikkate alınır.

FAA CBR yönteminde taban zemini için gerekli sıkıştırma değerleri kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için tasarım uçağının brüt ağırlığına göre Tablo 4.8.'de verilmiştir.

4.2.3. Seçme Granüler Malzeme ve Alttemel Tabakası

FAA CBR yönteminde, alttemel tabakası tasarım CBR değeri olarak minimum 20 CBR değeri kullanılır. Bütün esnek üstyapılarda, seçme granüler malzeme ve alttemel tabakası inşa edilir. CBR değeri 20 ve daha büyük olan GW ve GP sınıfı taban zemini üzerine inşa edilecek üstyapılarda bu tabakanın inşa edilip edilmeyeceğine saha tecrübesi

doğrultusunda karar verilir. Yöntemde kullanılan bazı alttemel tabakası cinsleri için ilgili şartname numaraları Tablo 4.9.'da verilmiştir.

Tablo 4.8. FAA CBR yöntemi için taban zemini sıkıştırma değerleri ve derinlikleri [7].

Tasarım Uçağı	Brüt Ağırlık (lb)	Kohezyonsuz Zeminler (in)				Kohezyonlu Zeminler (in)			
		%100	%95	%90	%85	%95	%90	%85	%80
Tek Tekerlek	30.000	8	8–18	18–32	32–44	6	6–9	9–12	12–17
	50.000	10	10–24	24–36	36–48	6	6–9	9–16	16–20
	75.000	12	12–30	30–40	40–52	6	6–12	12–19	19–25
İki Tekerlek	50.000	12	12–28	28–38	38–50	6	6–10	10–17	17–22
	100.000	17	17–30	30–42	42–55	6	6–12	12–19	19–25
	150.000	19	19–32	32–46	46–60	7	7–14	14–21	21–28
	200.000	21	21–37	37–53	53–69	9	8–16	16–24	24–32
İki Tandem Tekerlek	100.000	14	14–26	26–38	38–49	6	6–10	10–17	17–22
	200.000	17	17–30	30–43	43–56	6	6–12	12–18	18–26
	300.000	20	20–34	34–48	48–63	7	7–14	14–22	22–29
	400.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36
DC–10, L1011, 747	400.000	21	21–36	36–55	55–70	8	8–15	15–20	20–38
	600.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36
	800.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36

Tablo 4.9. Alttemel tabakası cinsleri ve şartname numaraları [7].

Alttemel Tabakası Cinsi	Şartname Nu.
Alttemel	P–154
Kalış temel	P–210
Kum-kil temel	P–213
Zemin-çimento temel	P–301

Don etkisinin alttemel tabakasına kadar ulaşması beklenen durumlarda P–213 ve P–301 şartname numaralı alttemel tabakalarının kullanılmaması önerilir.

4.2.4. Temel Tabakası

FAA CBR yöntemi ile tasarımında temel tabakası tasarım CBR değeri olarak minimum 80 CBR değeri kullanılır. Çeşitli temel tabakası cinsleri için ilgili şartname numaraları Tablo 4.10.'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Temel tabakası cinsleri ve şartname numaraları [7].

Temel Tabakası Cinsi	Şartname Nu.
Agrega temel	P-208
Kırmataş agrega temel	P-209
Kireçtaşı temel	P-211
Çimento stabilize temel	P-304
Zayıf beton alttemel	P-306
Bitümlü sıcak karışım	P-401

P-208 agrega temel tabakası, brüt ağırlıkları 60.000 lb ve daha az olan uçaklar için kullanılır. Ayrıca, esnek üstyapı tasarımında kullanılması önerilen minimum temel tabakası kalınlıkları Tablo 4.11.'de verilmiştir.

Tablo 4.11. Minimum temel tabakası kalınlıkları [7].

Tasarım Uçağı	Tasarım Ağırlığı (kg)	Kalınlık (mm)
Tek tekerlek	13.600–22.700	100
Tek tekerlek	22.700–34.000	150
İki tekerlek	22.700–45.000	150
İki tekerlek	45.000–90.700	200
İki tandem tekerlek	45.000–113.400	150
İki tandem tekerlek	113.400–181.000	200
B-757, B-767	90.700–181.000	150
DC-10, L-1011	181.000–272.000	200
B-747	181.000–272.000	150
	272.000–385.700	200
C-130	34.000–56.700	100
	56.700–79.400	150

4.2.5. Kaplama Tabakası

FAA CBR yönteminde esnek üstyapı kaplama tabakasında, asfalt plentinde üretilen, yoğun gradasyonlu ve P-401 şartname numaralı asfalt betonu kullanılır. Yoğun gradasyonlu asfalt betonu,

- Yüzey suyunun temel tabakasına nüfuz etmesini engeller,
- Düzgün, iyi kenetlenmiş ve serbest malzemeden arınmış yüzey oluşturur,
- Uçak yüklerinin neden olduğu kayma gerilmelerine direnç gösterir,
- Kaygan olmayan yüzey dokusu sağlar.

4.2.6. Uçak Karakteristikleri

FAA CBR yönteminde, tasarımda önemli rol oynayan faktörlerden biri olan yük için MTOW değeri dikkate alınır. Her uçak cinsi için ayrı tasarım abaklarının geliştirilmesi uygulanabilir olmadığından çeşitli tekerlek ve iniş takımı düzenleri için ayrı tasarım abakları oluşturulmuştur. Ancak, tekerlek ve iniş takımı düzenleri ile ilgili bazı makul kabuller yapılarak üstyapı tasarımında kullanılan değişken sayısının azaltılması amaçlanmıştır. Bu kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- “S” tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip uçaklar için herhangi bir kabul bulunmamaktadır.
- “D” tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip uçaklar için tekerlek eksenleri arasındaki mesafe hafif uçaklar için 0,51 m, ağır uçaklar için 0,86 m olarak kabul edilmektedir.
- “2D” tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip uçaklar için; hafif uçaklarda tekerlek eksenleri arası mesafe 0,51 m ve tandem arası mesafe 1,14 m, ağır uçaklarda tekerlek eksenleri arası mesafe 0,76 m ve tandem arası mesafe 1,40 m olarak kabul edilmektedir.
- B-747, B-767, DC10, L-1011 vb. geniş gövdeli uçaklar her ne kadar 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip olsalar da, ağırlık ve iniş takımı geometrisinden kaynaklanan farklılıklardan dolayı ayrı tasarım abakları mevcuttur.
- Üçlü (Triple) çift tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip B-777 ve A-380 gibi uçaklar üç sıra iki tandem tekerlek düzenine sahiptirler.

- Lastik basıncı, tekerlek ve iniş takımı düzeni ve uçağın ağırlığına göre 515 kPa–1.380 kPa arasında değişmektedir. Bu değer 1.380 kPa olarak kabul edilmiştir.

Yük, tekerlek ve iniş takımı düzeni, lastik basıncı gibi tasarımda kullanılan bir diğer faktör trafik hacmidir. Havaalanları genellikle çok değişik cinsten ve sayıda uçaklar tarafından kullanılmaktadır. Bu nedenle, her uçak cinsi için yıllık trafik hacminin belirlenmesi veya tahmin edilmesi gereklidir. Trafik hacmi tahmin edilirken yalnız kalkışlar dikkate alınmaktadır.

Her tip uçağın yıllık kalkış sayısının ayrı ayrı belirlenmesi veya tahmin edilmesinden sonra tasarım uçağı tespit edilir. Uygun tasarım abağının kullanılması ve kalkış sayısının abağa girilebilmesi için havaalanını kullanan uçaklar seçilen tek bir tasarım uçağı türünden ifade edilir. Tasarım uçağı en ağır değil, en fazla üstyapı kalınlığı gerektiren uçak cinsidir. Bu nedenle, tasarım uçağı deneme-yanılma yoluyla saptanır.

Tasarım uçağı cinsinden yıllık eşdeğer kalkış sayısının belirlenmesi için öncelikle üstyapıyı kullanacak tüm uçakların tasarım uçağının sahip olduğu tekerlek ve iniş takımı düzenine dönüştürülmesi gereklidir. Dönüşüm katsayıları Tablo 4.12.'de verilmiştir. Farklı üstyapı cinsi ve kalınlığı için daha gerçekçi katsayılar geliştirilebilir. Ancak bu durumda iterasyon ve uyarlamaların hesaplamalara dahil edilmesi gerekli olacağından basit hesaplama imkanının ortadan kalkacağı değerlendirilmiştir.

Tablo 4.12. Tasarım uçağına dönüşüm katsayıları [7].

Tekerlek ve İniş Takımı Düzeninden	Tekerlek ve İniş Takımı Düzenine	x Kalkış Sayısı
S	D	0,8
S	2D	0,5
D	S	1,3
D	2D	0,6
2D	S	2,0
2D	D	1,7
Çift ikili tandem	2D	1,0
Çift ikili tandem	D	1,7

Üstyapıyı kullanan uçaklar tekerlek ve iniş takımı açısından tasarım uçağına dönüştürüldükten sonra kalkış sayıları da tasarım uçağı cinsinden yıllık kalkış sayısına dönüştürülür. Bu amaçla Eşitlik 4.5. kullanılır.

$$\text{Log}R_1 = \text{Log}R_2 \times \sqrt{\frac{W_2}{W_1}} \quad (4.5)$$

Eşitlikte;

R_1 : Tasarım uçağının eşdeğer yıllık kalkış sayısı

R_2 : Tasarım uçağına dönüştürülecek uçağın yıllık kalkış sayısı

W_1 : Tasarım uçağının tekerlek yükü

W_2 : Tasarım uçağına dönüştürülecek uçağın tekerlek yükü

Hesaplama uçağın brüt ağırlığının %95'inin ana iniş takımları tarafından üstyapıya aktarıldığı kabul edilir. Geniş gövdeli uçakların tekerlek ve iniş takımı düzenleri diğer uçaklara göre farklılık gösterir. Bu nedenle her tasarım durumunda geniş gövdeli uçakların 136.100 kg ağırlıkta ve 2D tekerlek ve iniş takımı düzeninde oldukları kabul edilir.

4.2.7. Uygulama Esasları ve Tasarım Prosedürü

FAA CBR yöntemi tasarım felsefesi açısından USCOE CBR yöntemi ile büyük benzerlikler göstermektedir. CBR yöntemi her ne kadar ampirik bir yöntem olsa da yarım asırdan daha uzun bir süredir gerçekleştirilen yoğun araştırma ve inceleme faaliyetleri sonucunda güvenilir bağıntılar geliştirilmiş ve çeşitli tasarım abakları oluşturulmuştur.

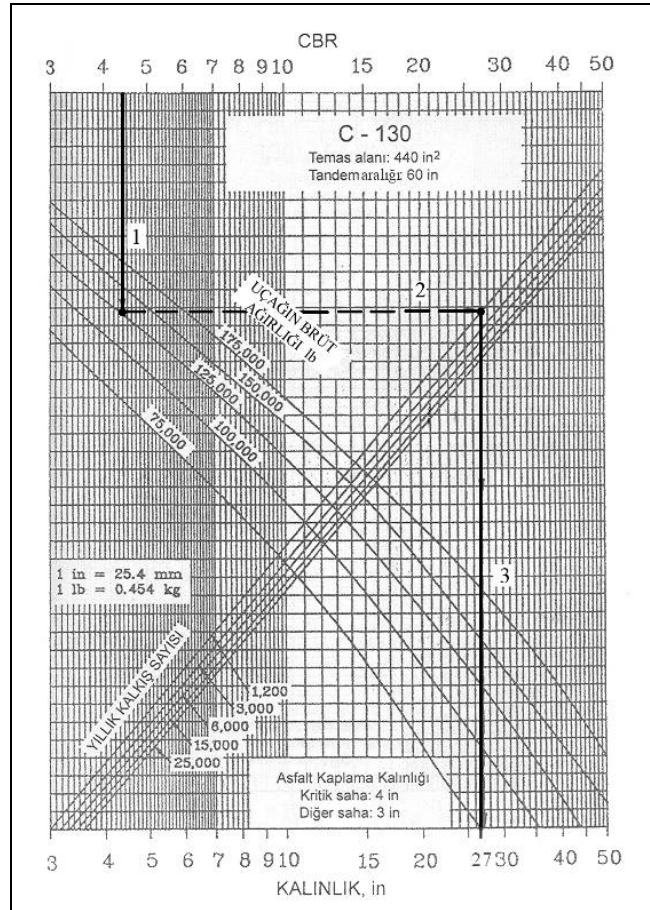
Havaalanı üstyapısı ve bu üstyapı üzerinde taksi yapan uçaklar, tasarımda yer alması gereken interaktif bir sistemi temsil eder. Uygun ve gerçekçi üstyapı tasarımı için uçak ve zemin ile ilgili verilerin temin edilmesi önem arz eder.

FAA CBR yöntemi ile yapılan tasarımda üstyapı için dikkate alınan hizmet ömrü, beklenen trafik hacminde ve uçak yüklerinde büyük değişiklik olmayacağı değerlendirilen durumlarda 20 yıldır. Ancak iklim koşulları ve kullanımdan kaynaklanan bozulma sonucunda sürtünme ve frenleme karakteristiklerinin iyileştirilmesi amacıyla 20 yıldan daha önceki bir dönemde kaplama tabakasının yenilenmesi planlanabilir.

Bu yöntemde her üstyapı tabakası daha önce belirtildiği gibi şartname numarası ile tanımlanmıştır. Bu kapsamda, esnek üstyapının kaplama tabakasını oluşturan asfalt betonu

kaplama, P-401 olarak numaralandırılan ve asfalt plentinde üretilen malzeme ile oluşturulduğunda kendisinden beklenen performansı yeterince sağlar.

FAA CBR yöntemi ile esnek üstyapı tasarımı USCOE CBR yöntemine benzer şekilde gerçekleştirilir. Belirlenen taban zemini tasarım CBR değeri tasarım uçağına ait abağa girilir. Uçak brüt ağırlığı ve yıllık toplam kalkış sayısı kullanılarak taban zemini üzerinde inşa edilmesi gerekli olan toplam üstyapı kalınlığı belirlenir. Benzer şekilde alttemel tasarım CBR değeri abağa girilerek temel ve kaplama tabakalarının toplam kalınlığı tespit edilir. Ancak her bir tabakanın kalınlığı minimum kalınlık şartlarını sağlayacak şekilde belirlenir. Minimum temel tabakası kalınlığı tasarım uçağı cinsine ve ağırlığına göre Tablo 4.11.'de verilmiştir. Tasarım abaklarında minimum kaplama kalınlıkları da verilmektedir. Don etkisi ve stabilize malzeme kullanımı tasarımda ayrıca değerlendirilir. Şekil 4.1.'de örnek tasarım abağı verilmiştir.



4.3. FAARFIELD Yöntemi [8]

4.3.1. Giriş ve Tarihsel Gelişim

FAA tarafından 1958 yılında, ABD’de bulunan havaalanları üstyapılarının 350.000 lb (158.757 kg) ağırlığında ve DC8–50 uçağının tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip bir uçak için tasarlanması ilkesi benimsenmiştir. Bu ilke ile, 1958 yılından sonra kullanılacak farklı tekerlek ve iniş takımı düzenlerinin üstyapı üzerinde söz konusu tasarım uçağından daha çok gerilme oluşturmayaçağının kesinleştirilmesi amaçlanmıştır.

20’nci yüzyıl boyunca uçak üreticileri 1958 yılında belirlenen üstyapıyı sınırlayıcı tasarım uçak ilkesini benimsemiş ve bu ilke doğrultusunda uçaklarını üretmişlerdir. Uçak ağırlıkları 350.000 lb (158.757 kg) ve daha fazla olduğu durumlarda tekerlek ve iniş takımı düzenleri sınırlayıcı ilkeye göre tasarlanmıştır. Bu nedenle, yüksek uçak ağırlıkları için iniş takımındaki tekerlek sayısı ve tekerlek aralıkları artırılmış, uçak ağırlıklarının artmasından kaynaklanacak ilave gerilmelerin azaltılması sağlanmıştır.

Havacılığın gün geçtikçe gelişmesi ve çok daha ağır uçakların hizmete girmesi nedeniyle 1958 yılında benimsenen ve tekerlek sayısı ile aralıklarının artırılmasını gerektiren sınırlayıcı tasarım uçağı ilkesi uçak üreticileri tarafından uçak efektifliği açısından uygun bulunmamıştır. Bu nedenle, uçak efektifliğini artırmak amacıyla yeni tekerlek ve iniş takımı düzenleri tasarlanmıştır. Bu durum, havaalanı üstyapılarının gün geçtikçe artan uçak ağırlığı ve yeni geliştirilen tekerlek ve iniş takımı düzenlerine göre tasarlanmasını gerektirmiştir.

Daha önce bahsedilen FAA CBR yöntemi, ampirik araştırma ve saha tecrübesi sonuçlarının istatistiksel olarak düzenlenmesi esasına dayanmaktadır. Her ne kadar FAA CBR yönteminin artan uçak ağırlıkları ve yeni tekerlek ve iniş takımı düzenlerine göre geliştirilmesi mümkün olsa bile bu bölümde gelişen şartlara daha uygun olduğu değerlendirilen ve esnek üstyapı tasarımı için geliştirilen elastik tabaka teorisini kullanan FAARFIELD bahsedilecektir. Bu yöntem, tasarım esasları değişmeden ileriki yıllarda geliştirilmesi muhtemel tekerlek ve iniş takımları düzenleri için de geçerlidir.

FAA CBR ile FAARFIELD yöntemleri arasındaki temel farklılık tasarım felsefesidir. FAA CBR yöntemi ampirik esaslara dayanmaktadır. FAARFIELD yöntemi ise mekanistik-ampirik bir yöntemdir.

4.3.2. Taban Zemini

Tasarımda taban zemininin kalınlığı sonsuz olarak kabul edilir. Taban zemini, elastisite modülü veya CBR değeri ile tanımlanır. Genellikle CBR değeri tespit edildikten sonra Eşitlik 2.2. kullanılarak elastisite modülü tespit edilir. Eşitlik 2.2. aynı zamanda FAA CBR yöntemine uyumlu şekilde tasarım yapılmasına olanak sağlar.

Taban zemini için gerekli sıkıştırma derinliği ve sıkışma yüzdesi değerleri, artan uçak brüt ağırlığı ve geliştirilen tekerlek ve iniş takımı düzenlerine göre kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için Tablo 4.13.'te verilmiştir. Sıkıştırma işlemi karışık trafik hacmi dikkate alınarak gerçekleştirilir. Operasyon sayısı göz ardı edilerek maksimum sıkıştırma derinliği gerektiren uçağa göre gerekli sıkıştırma özellikleri uygulanır.

Sıkıştırma özelliklerinin belirlenmesinde PI (Plastisite İndisi) değeri 3'ten küçük olan zeminler kohezyonsuz zemin olarak kabul edilir. Sıkıştırma derinliği tesviye yüzeyinden itibaren hesaplanır. Tablo 4.13. kullanılarak ara değerler için sıkıştırma özellikleri belirlenebilir. Gerekli sıkışma özellikleri belirlendikten sonra mevcut zeminin sıkışma özellikleri ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucuna göre sıkıştırma işlemi uygulanır.

4.3.3. Seçme Granüler Malzeme ve Alttemel Tabakası

Seçme granüler malzeme ve alttemel tabakası, agrega veya stabilize malzeme ile inşa edilir. Tabaka kalınlığı minimum 4 in olarak projelendirilir. Ancak sahada uygulanabilirlik açısından kalınlığı daha fazla ve birden fazla tabakalar gerekli olabilir. Bu tabakada kullanılan malzemelerle ilgili şartname numaraları FAA CBR yönteminde olduğu gibidir (Tablo 4.9).

P-301 numaralı malzeme donma-çözülme etkilerine maruz kalınmayacağı öngörülen durumlarda kullanılır. Stabilize temel tabakası uygulanması gerektiği durumlarda, daha kaliteli alttemel tabakasının inşa edilmesi ve P-208 veya P-209 tabakalarının kullanılması önerilmektedir.

Tablo 4.13. FAARFIELD yöntemi taban zemini sıkıştırma değerleri ve derinlikleri [8].

İniş Takımı Düzeni	Brüt Ağırlık (lb)	Kohezyonsuz Zeminler (in)				Kohezyonlu Zeminler (in)			
		%100	%95	%90	%85	%95	%90	%85	%80
S	30.000	8	8–18	18–32	32–44	6	6–9	9–12	12–17
	50.000	10	10–24	24–36	36–48	6	6–9	9–16	16–20
	75.000	12	12–30	30–40	40–52	6	6–12	12–19	19–25
D, 2S	50.000	12	12–28	28–38	38–50	6	6–10	10–17	17–22
	100.000	17	17–30	30–42	42–55	6	6–12	12–19	19–25
	150.000	19	19–32	32–46	46–60	7	7–14	14–21	21–28
	200.000	21	21–37	37–53	53–69	9	9–16	16–24	24–32
2D (757, 767, A300, DC–10–10, L1011)	100.000	14	14–26	26–38	38–49	6	6–10	10–17	17–22
	200.000	17	17–30	30–43	43–56	6	6–12	12–18	18–26
	300.000	20	20–34	34–48	48–63	7	7–14	14–22	22–29
	400.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36
	600.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36
2D/D1, 2D/2D1 (MD11, A340, DC10–30/40 dahil)	500.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36
	800.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36
2D/2D2 (747 dahil)	800.000	23	23–41	41–59	59–76	9	9–18	18–27	27–36
	975.000	24	24–44	44–62	62–78	10	10–20	20–28	28–37
3D (777 dahil)	550.000	20	20–36	35–52	52–67	6	6–14	14–21	21–29
	650.000	22	22–39	39–56	56–70	7	7–16	16–22	22–30
	750.000	24	24–42	42–57	57–71	8	8–17	17–23	23–30
2D/3D2 (A380 dahil)	1.250.000	24	24–42	42–61	61–78	9	9–18	18–27	27–36
	1.350.000	25	25–44	44–64	64–81	10	10–20	20–29	29–38

4.3.4. Temel Tabakası

Üstyapının yapısal anlamda en önemli tabakalarından olan temel tabakası FAARFIELD yönteminde hesaplamaya FAA CBR yöntemine benzer şekilde dahil edilir. Bu yöntemde temel tabakası için FAA CBR yönteminde tanımlı olan malzemelere ilave olarak P-219 Geri Kazanılmış Beton Agrega Temel ve P-403 BSK Temel malzemeleri

tanımlanmıştır. Temel tabakasında kullanılabilecek malzemeler için ilgili şartname numaraları Tablo 4.14.'te verilmiştir.

Tablo 4.14. Temel tabakası cinsleri ve şartname numaraları [8].

Temel Tabakası Cinsi	Şartname Nu.
Agrega temel	P-208
Kırmataş agrega temel	P-209
Kireçtaşı temel	P-211
Geri kazanılmış beton agrega temel	P-219
Çimento stabilize temel	P-304
Zayıf beton alttemel	P-306
Plentmiks bitüm kaplama	P-401
BSK temel	P-403

P-208 Agrega Temel Tabakası brüt ağırlığı 60.000 lb (27.217 kg) ve daha düşük olan uçaklar için kullanılır. Temel tabakası olarak P-208 kullanıldığında BSK kaplama tabakası minimum 5 in kalınlığında projelendirilir.

P-209 Kırmataş Agregat Temel Tabakası brüt ağırlığı 100.000 lb (45.359 kg) ve daha düşük olan uçaklar için kullanılır. P-211, P-304, P-306, P-401 ve P-403 ile inşa edilen temel tabakaları stabilize temel olarak adlandırılır.

FAARFIELD, stabilize temel tabakalarını esnek ve rijit olarak sınıflandırmaktadır. P-401 ve P-403 esnek stabilize temel tabakaları olarak tanımlanır. Bu malzemelerin elastisite modülü 400.000 psi (2.760 MPa) olarak öntanımlıdır. Ayrıca, elastisite modülü 150.000–400.000 psi (1.035–3.760 MPa) aralığında değişken esnek stabilize temel tabakaları tanımlanabilir.

Rijit stabilize temel tabakaları olarak P-304 ve P-306 kullanılır. P-301 zemin-çimento temel tabakasının esnek üstyapıda temel tabakası olarak kullanılmaması önerilir. Çeşitli temel tabakası cinsleri için elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri Tablo 4.15.'te verilmiştir.

Tablo 4.15. Temel tabakası elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri [8].

Esnek Stabilize		
Temel Tabakası Cinsi	Elastisite Modülü (psi–Mpa)	Poisson oranı
Değişken (Minimum)	150.000–1.035	0,35
Değişken (Maksimum)	400.000–2.760	
P–401, P–403 asfalt	400.000–2.760	
Rijit Stabilize		
Temel Tabakası Cinsi	Elastisite Modülü (psi–Mpa)	Poisson oranı
Değişken (Minimum)	250.000–1.720	0,20
Değişken (Maksimum)	700.000–4.830	
P–304 Çimento Stabilize Temel	500.000–3.450	
P–306 Zayıf Beton	700.000–4.830	

Tablo 4.15.'te verilen değerler FAA CBR yöntemi ile uyumludur. Bu nedenle, stabilize malzemelerin özelliklerini belirlemek ve FAARFIELD programında kullanmak üzere laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmez. 150.000 psi (1.035 MPa) olarak verilen minimum elastisite modülü FAA CBR yönteminde temel tabakası için verilen 1,2 eşdeğerlik katsayısına, 400.000 psi (2.760 MPa) elastisite modülü ise aynı yöntemde 1,6 eşdeğerlik katsayısına denktir. Eşdeğerlik katsayısı, P–208 olarak tanımlanan standart agregta temel tabakası kalınlığının stabilize temel tabakasının kalınlığına oranıdır. Temel tabakası için belirlenen elastisite modülü üstyapının toplam kalınlığına önemli oranda etki etmektedir.

FAARFIELD ile esnek üstyapı tasarımında standart temel tabakası P–209 Kırmataş Agregta Temel Tabakasıdır. P–208 Agregta tabakasının temel tabakası olarak kullanılmaması önerilir.

4.3.5. Kaplama Tabakası

FAARFIELD yönteminde, FAA CBR yönteminde olduğu gibi esnek üstyapının kaplama tabakasında, asfalt plentinde üretilen, yoğun gradasyonlu ve P–401 şartname numaralı asfalt betonu kullanılır.

4.3.6. Uçak Karakteristikleri

Programın iç kütüphanesinde bulunan uçaklar;

- Jenerik,
- Airbus,
- Boeing,
- Diğer ticari,
- Genel havacılık,
- Askeri

olmak üzere altı grupta sınıflandırılmaktadır.

Her grupta bulunan uçaklar için öntanımlı karakteristikler mevcuttur. Diğer yöntemlerde olduğu gibi FAARFIELD ile üstyapı tasarımı, uçağın brüt ağırlığına (MTOW) göre gerçekleştirilir ve bu ağırlığın % 95'inin ana iniş takımları, % 5'inin ise burun iniş takımı tarafından taşındığı kabul edilir. Program, tasarım mühendisine uçak ağırlıklarının seçilmesinde ve yıllık trafik hacminin belirlenmesinde serbestlik imkanı tanımaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi FAA CBR yönteminde karışık trafik tasarım uçağına çevrilmekte ve her uçak cinsinin yıllık kalkış sayısı tasarım uçağı kalkış sayısı cinsinden hesaplanmaktaydı. Tasarım uçağı, brüt ağırlık ve her bir uçak cinsi için kalkış sayısı dikkate alınarak üstyapıya en çok hasar vereceği tahmin edilen uçak olarak tespit edilirdi. FAARFIELD programında ise karışık trafik hacmi doğrudan değerlendirilir ve uçak trafiği tasarım uçağına dönüştürülmez. Program, her uçak cinsinin üstyapıya vereceği hasarın analizi yapılır ve toplam kümülatif hasar için üstyapı kalınlığı hesaplanır. FAARFIELD programı ile tasarımda, FAA CBR yönteminde kullanılan tasarım uçağı kavramı terk edilerek CDF (Cumulative Damage Factor–Kümülatif Hasar Katsayısı) kavramı cinsinden yorulma hasarına göre tasarım kavramı geliştirilmiştir. Kullanılmakta olan üstyapının yapısal yorulma ömrü CDF olarak ifade edilir. CDF, uygulanan yük tekrarlarının göçmeye kadar izin verilen yük tekrarlarına oranıdır.

Üstyapıyı kullanması beklenen her uçak cinsi için yıllık trafik hacmi tahmini yapılır ve yalnızca kalkışlar dikkate alınır. FAARFIELD yöntemi ile yapılan tasarım çalışmalarında 20 yıllık hizmet ömrü öngörülmektedir. Program daha farklı hizmet ömrü için kullanılmasına imkan tanımaktadır.

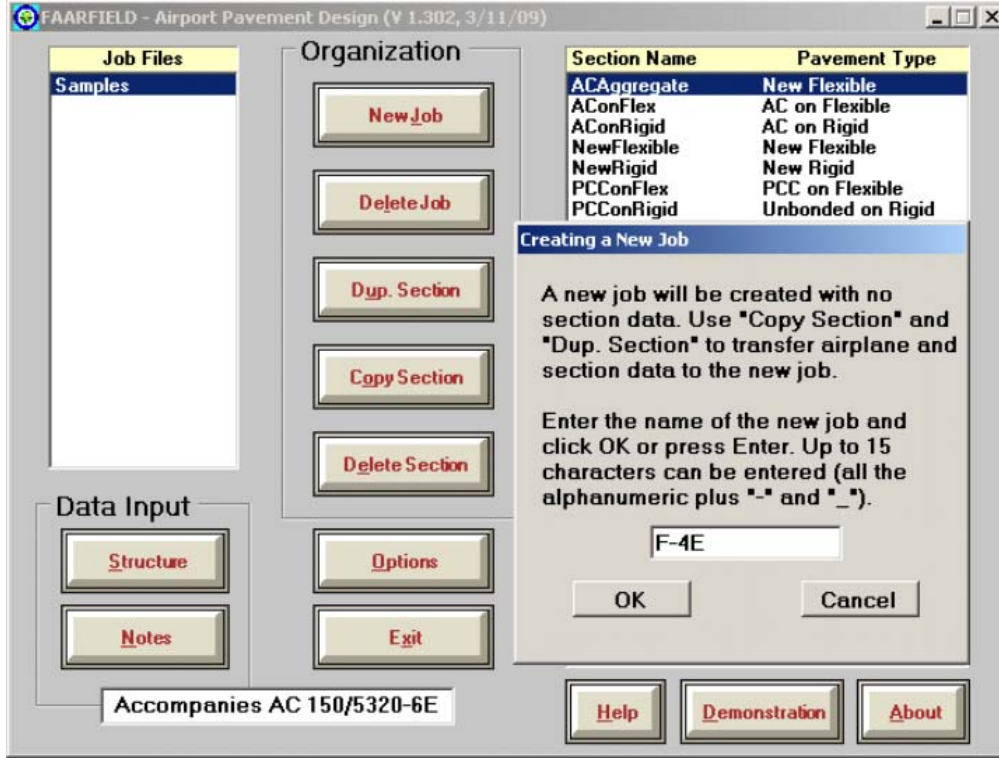
4.3.7. Uygulama Esasları ve Tasarım Prosedürü

Bu yöntemle, FAA CBR yönteminde olduğu gibi brüt ağırlığı 30.000 lb (13.608 kg) ve daha büyük olan uçaklara hizmet verecek esnek üstyapı tasarımı gerçekleştirilmektedir. FAARFIELD programında mekanistik-ampirik üstyapı tasarımı uygulanmakta ve elastik tabaka teorisi kullanılmaktadır. Üstyapının yapısal ömrünü tahmin etmek için taban zemininin üst kısmındaki maksimum düşey deformasyon ile asfalt kaplama tabakası altındaki maksimum yatay şekil değiştirme belirteç olarak kullanır. Program yardımıyla belirli bir taban zemini üzerinde karışık trafik için gerekli üstyapı tabakalarının kalınlıkları hesaplanmaktadır.

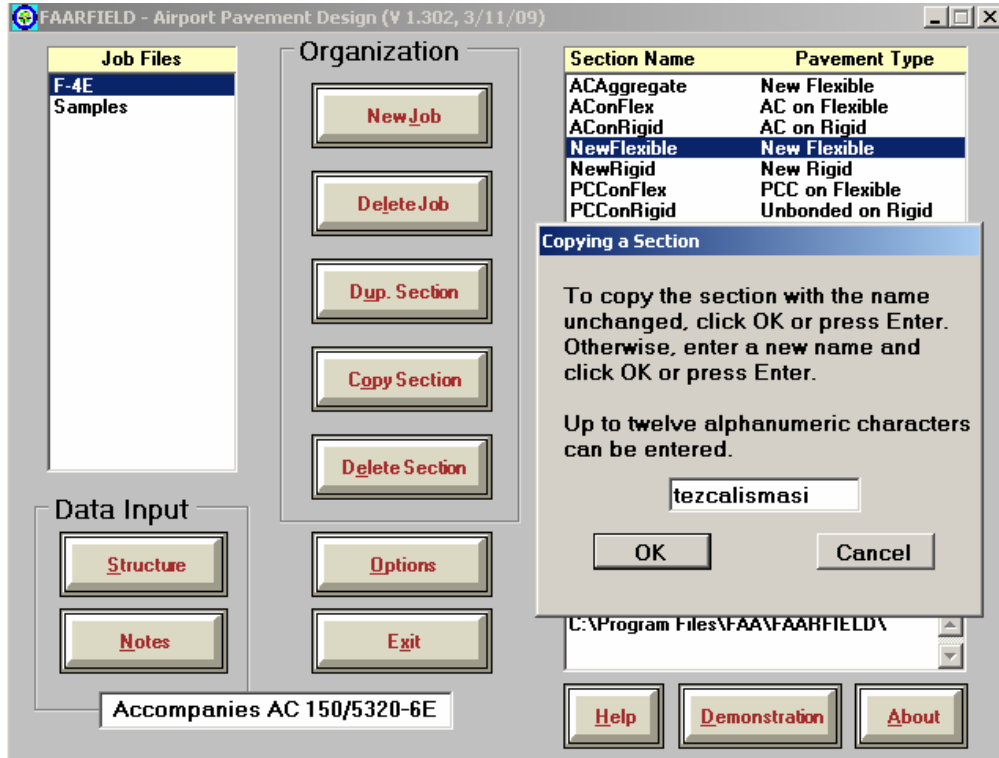
Daha önce belirtildiği gibi, taban zemini üzerinde belirli trafik hacmi için gerekli üstyapı kalınlığını belirlemek karmaşık bir mühendislik problemidir. Gerçekçi bir tasarım için birbiri ile bağlantılı ve nicelikleri tam olarak tespit edilemeyen birçok değişkenin belirlenmesi önem arz eder. Konuyla ilgili birçok araştırma yapılmasına rağmen tabaka kalınlıkları için doğrudan matematiksel çözüm geliştirmek mümkün değildir. Bu nedenle kaplama mühendislerince kalınlık hesaplamalarında; üstyapı ve taban zeminine intikal eden yüklerin teorik analizi, deneysel üstyapı verileri ve mevcut hizmet şartları altında üstyapı performansı çalışmaları dikkate alınır. FAARFIELD programı, 1940'lı yıllardan bugüne kadar gerçekleştirilen tam-ölçekli deneylerin sonucunda elde edilen kırılma modelleri kullanılarak, yoğun hesaplamalar içeren elastik tabaka teorisine dayanan tasarım yönteminin kullanılmasında havaalanı kaplama mühendislerine yardım amacıyla FAA tarafından geliştirilmiştir.

FAARFIELD, karışık trafik hacmi tarafından verilen toplam hasarın her bir uçak için analiz edilmesini içeren CDF kavramını esas almaktadır. Programında esnek üstyapı için yapısal hesaplamalar LEAF adlı alt program ile gerçekleştirilir. LEAF Visual Basic™ 2005 programı ile yazılmış, Microsoft Windows dinamik link kütüphanesi uygulaması olan elastik tabaka programıdır.

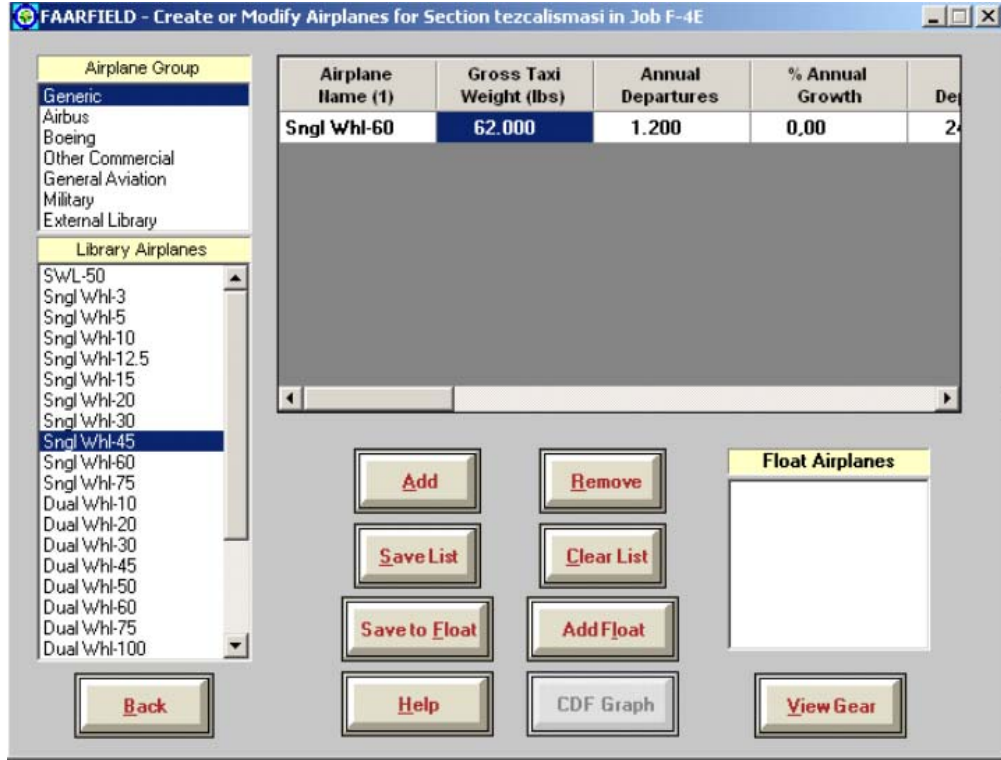
FAARFIELD programı, 30 Eylül 2009 tarihinde onaylanan FAA AC 150/5320-6E, Airport Pavement Design and Evaluation adlı dokümanda yer almakta ve bu dokümanda bulunan esaslar doğrultusunda kullanılmaktadır. Programa ait arayüzler Şekil 4.3.-4.6. olarak verilmiştir.



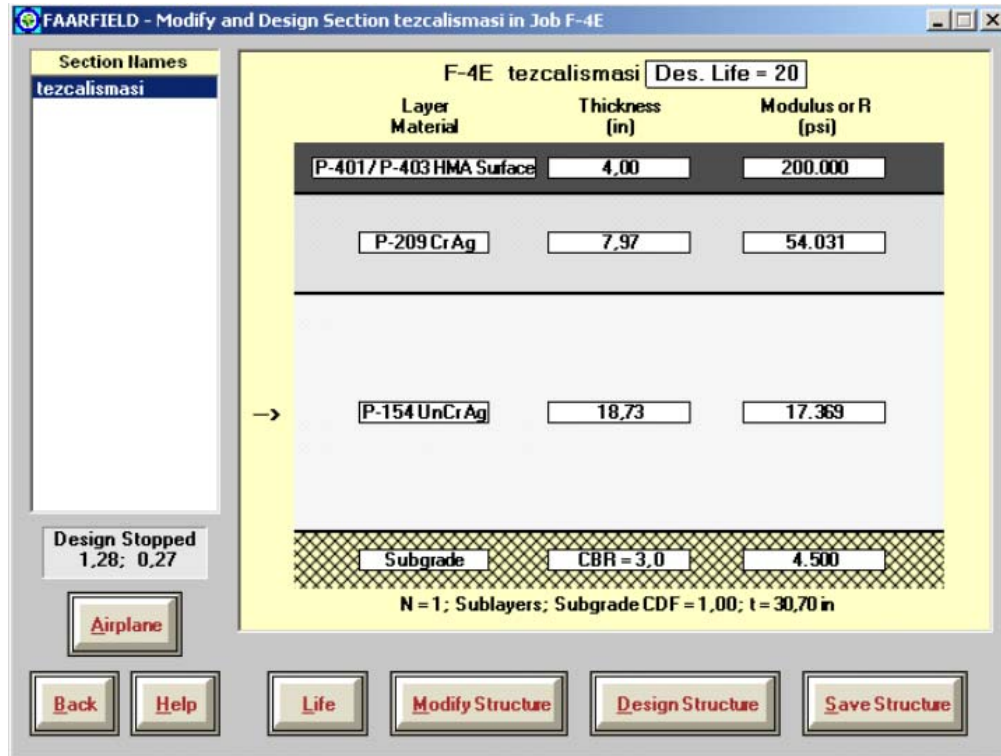
Şekil 4.2. FAARFIELD iş tanımlama arayüzü [8].



Şekil 4.3. FAARFIELD kesit tanımlama arayüzü [8].



Şekil 4.4. FAARFIELD trafik hacmi tanımlama arayüzü [8].



Şekil 4.5. FAARFIELD üstyapı tabaka kalınlığı hesaplama arayüzü [8].

5. TASARIM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmada, havaalanı esnek üstyapı tasarımında kullanılan USCOE CBR, FAA CBR ve FAARFIELD yöntemleri, üstyapı kalınlığına önemli oranda etki eden;

- Tekerlek ve iniş takımı düzeni,
- Uçak ağırlığı,
- Taban zemini taşıma gücü,
- Trafik hacmi

faktörleri açısından incelenmiştir.

Hesaplamalarda; USCOE CBR ve FAA CBR için tasarım abakları, FAARFIELD yöntemi için FAARFIELD programı kullanılmıştır. Değerlendirmede kullanılan değişkenler Tablo 5.1.'de verilmiştir. S, 2S ve 2D olmak üzere üç farklı tekerlek ve iniş takımı düzeni için tipik uçak cinsi belirlenmiştir. Bu uçaklar sırasıyla F-4E, C-130 ve C-141 uçaklarıdır (Şekil 5.1.-5.3.). Belirlenen her uçak için, farklı yükleme özelliklerinin temsil edilmesi amacıyla üç farklı ağırlık dikkate alınmıştır. Bu ağırlıklardan en fazla olanı her uçak için MTOW değeridir.

Taban zemini taşıma gücü hesaplamalara dört ayrı kategoride dahil edilmiştir. 3, 6, 10 ve 15 CBR değerleri tasarım CBR değerleri olarak alınmıştır. Bu değerlerin seçiminde, 3'den küçük tasarım CBR değerine sahip zeminlerde havaalanı esnek üstyapı inşaatının uygun olmayacağı ve 20'den büyük tasarım CBR değerine sahip zeminlerde seçme granüler malzeme veya alttemel tabakası inşa edilmesinin gerekli olmayacağı durumları dikkate alınmıştır.

Hesaplamalarda trafik hacmi olarak yıllık 1.200, 3.000, 6.000, 15.000 ve 25.000 operasyon sayıları kullanılmıştır.

Her üç yöntemde alttemel ve temel tabakası için tasarım CBR değerleri sırasıyla 20 ve 80 olarak belirlenmiştir. Kaplama tabakası kalınlığı her üç yöntem ile yapılan hesaplamalara 4 in olarak dahil edilmiştir.

Her bir yöntem için 180 adet olmak üzere toplamda 540 adet esnek üstyapı kalınlığı hesaplanmıştır.

Tablo 5.1. Esnek üstyapı kalınlığı hesaplamalarında kullanılan değişkenler

Tekerlek ve İniş Takımı Düzeni (Tipik Uçak Cinsi)	Uçak Ağırlığı (lb)	Taban Zemini (CBR)	Trafik Hacmi (Yıllık)	Alttemel Tabakası (CBR)	Temel Tabakası (CBR)
S (F-4E)	36.000	3	1.200	20	80
	45.000				
	62.000				
2S (C-130)	100.000				
	150.000				
	175.000				
2D (C-141)	220.000				
	300.000				
	345.000				



Şekil 5.1. S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip F-4E uçağı [22].



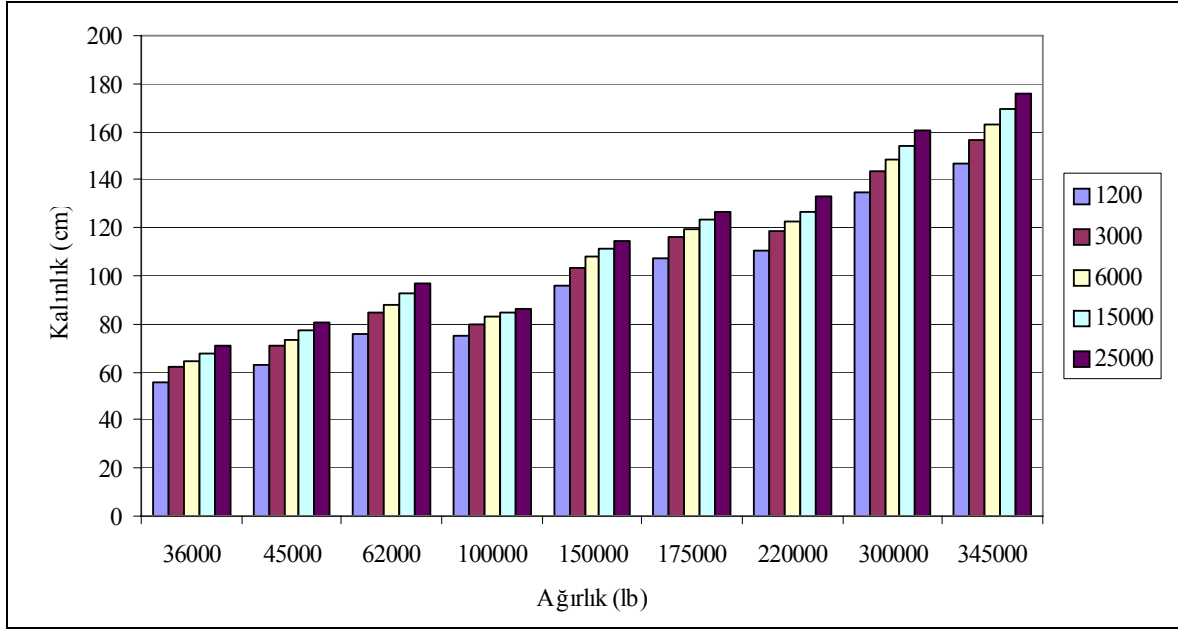
Şekil 5.2. 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip C-130 uçağı [23].



Şekil 5.3. 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip C-141 uçağı [24].

5.1. USCOE CBR Yönteminin İncelenmesi

USCOE CBR yöntemine göre; farklı operasyon sayılarında uçak ağırlıklarının tasarım CBR değeri 3 olan taban zemini için üstyapı kalınlığına etkisi Şekil 5.4.'te verilmiştir.

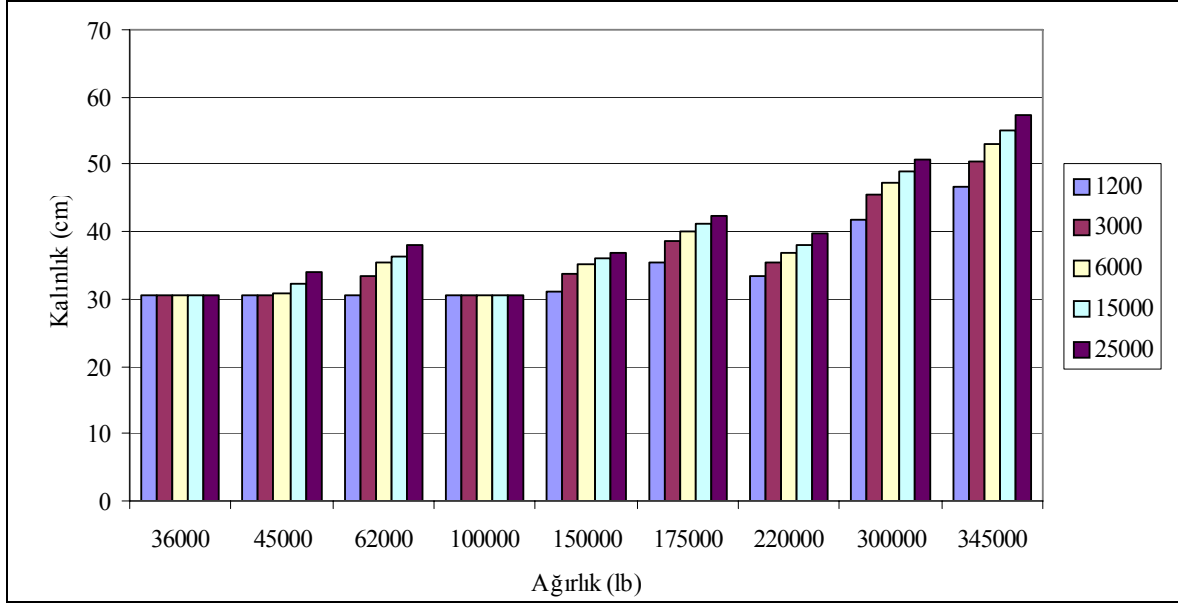


Şekil 5.4. USCOE CBR yöntemi, CBR=3 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Şekil 5.4., 5.5., 5.6., 5.7., 5.9., 5.10., 5.11., 5.12., 5.14., 5.15., 5.16., 5.17., 5.19. ve 5.20.'de yatay ekseninde bulunan ilk üç ağırlık S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip F-4E uçağının ağırlıklarını, 4, 5 ve 6'ncı ağırlıklar 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip C-130 uçağının ağırlıklarını, 7, 8 ve 9'uncu ağırlıklar 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip C-141 uçağının ağırlıklarını göstermektedir.

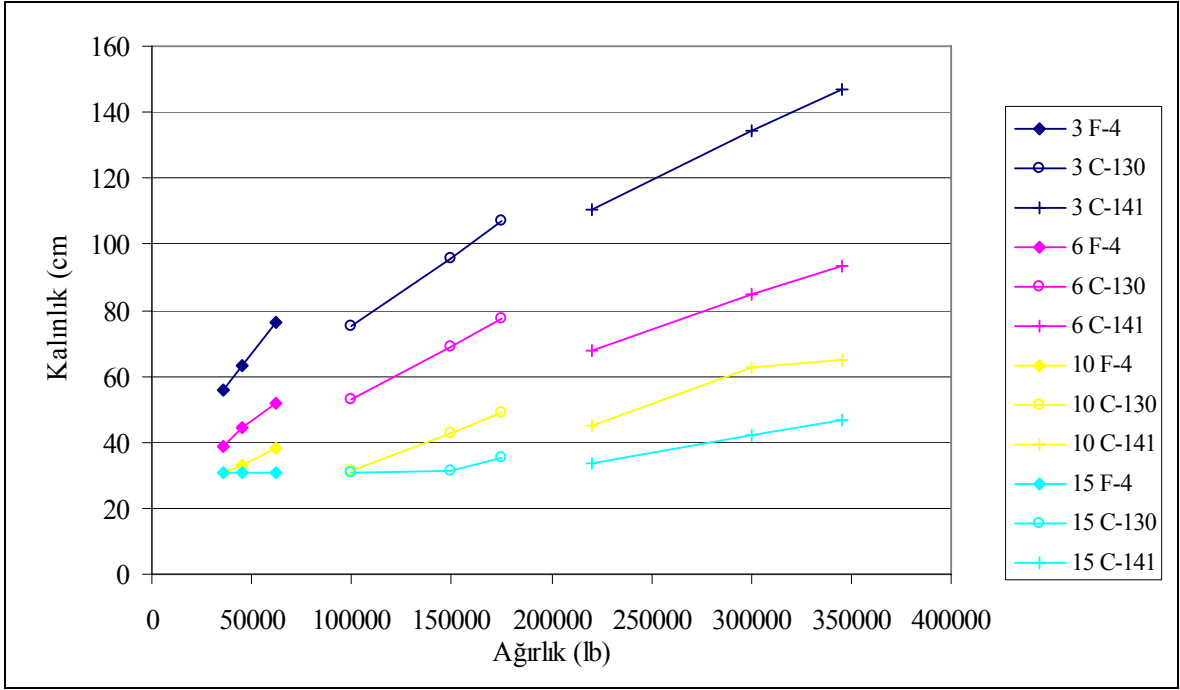
Uçak ağırlığının artması ile üstyapı kalınlığı genel olarak artmaktadır. Üstyapı kalınlığının 100.000 lb ağırlıktaki azalışı S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine geçişten kaynaklanmaktadır. Burada ağırlığın artmasıyla birlikte tekerlek ve iniş takımı düzeninin değişmesinden dolayı üstyapıya aktarılan yük daha az olmakta ve yöntem daha az üstyapı kalınlığı sunmaktadır. 2S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine geçişte ise üstyapı kalınlığı düzenli sayılabilecek şekilde artmaya devam etmiştir.

Her bir ağırlık için üstyapı kalınlığı operasyon sayısının artması ile artmaktadır. 36.000 lb ağırlıkta 25.000 operasyon için gerekli üstyapı kalınlığı, 1.200 operasyon için gerekli üstyapı kalınlığından %27,86 daha fazladır. Bu oran 345.000 lb ağırlıkta da fazla değişmeden %19,74 olmaktadır. 25.000 operasyon için ağırlığın 36.000 lb'den 345.000 lb'ye çıkması (9,58 kat) üstyapı kalınlığını 2,47 kat artırmaktadır.

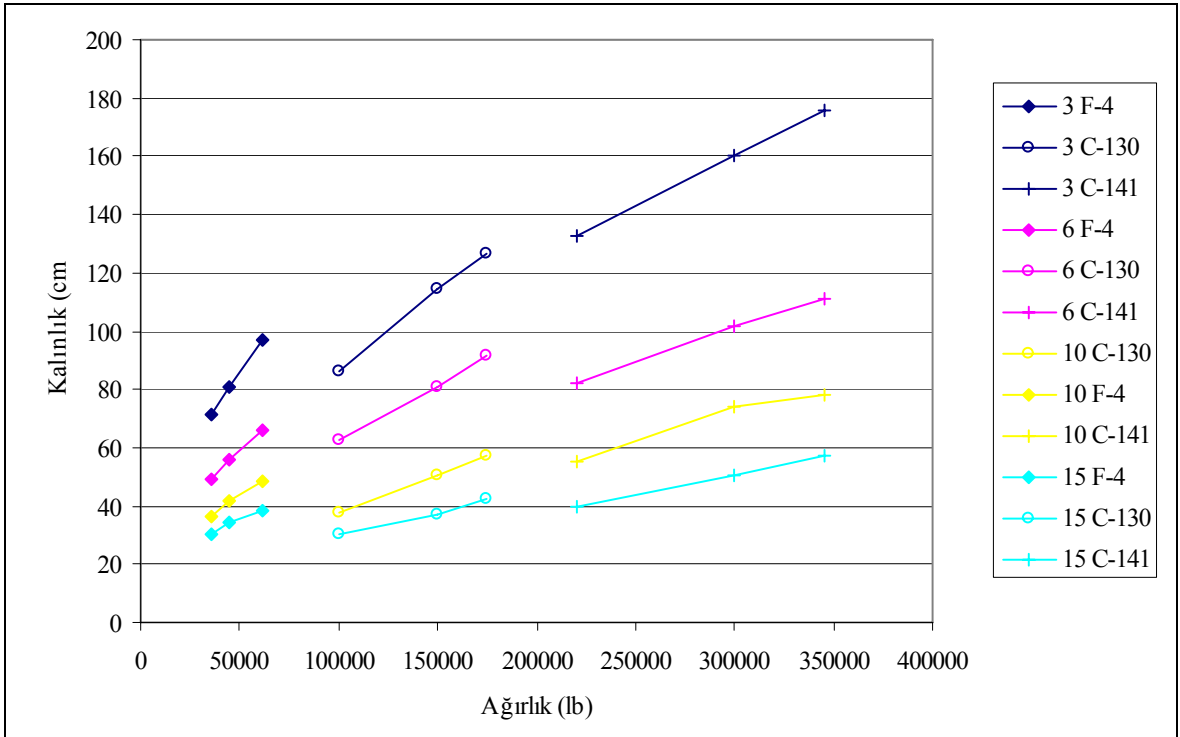


Şekil 5.5. USCOE CBR yöntemi, CBR=15 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Şekil 5.5.'te görüldüğü üzere sağlam taban zemininde 36.000 lb ve 100.000 lb ağırlıkta bütün operasyon sayıları ve 45.000 lb ile 60.000 lb ağırlıkta düşük operasyon sayıları için hesaplanan üstyapı kalınlığı bu yöntemde minimum değer olan 30,48 cm olarak hesaplanmıştır. Sağlam taban zemini için S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine ve 2S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine geçişler dikkate alındığında gerekli üstyapı kalınlıklarının azaldığı görülmektedir.

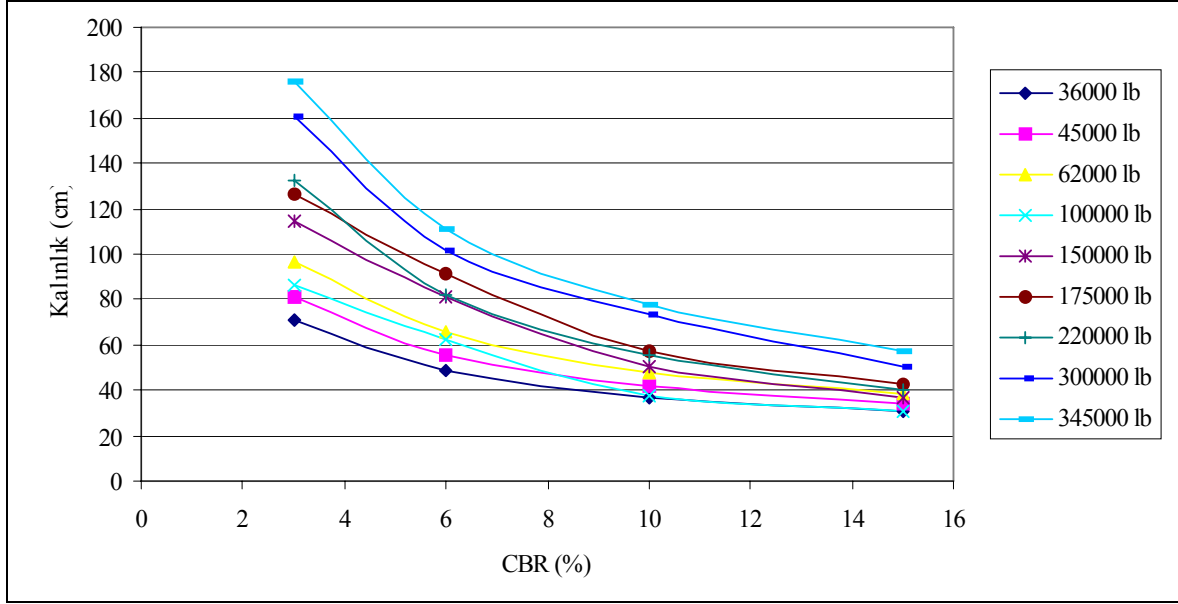


Şekil 5.6. USCOE CBR yöntemi, T=1.200 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi



Şekil 5.7. USCOE CBR yöntemi, T=25.000 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Şekil 5.6. ve 5.7.'de görüldüğü üzere operasyon sayısındaki artış üstyapı kalınlığının artış oranları üzerinde etkili olmaktadır. Her iki operasyon sayısında da S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip uçaklar için ağırlığın artması ile üstyapı kalınlığında meydana gelen artış oranının yüksek olduğu ve sağlam taban zemininde uçak ağırlığının artışı ile gerekli üstyapı kalınlığındaki artışın en az olduğu görülmektedir.

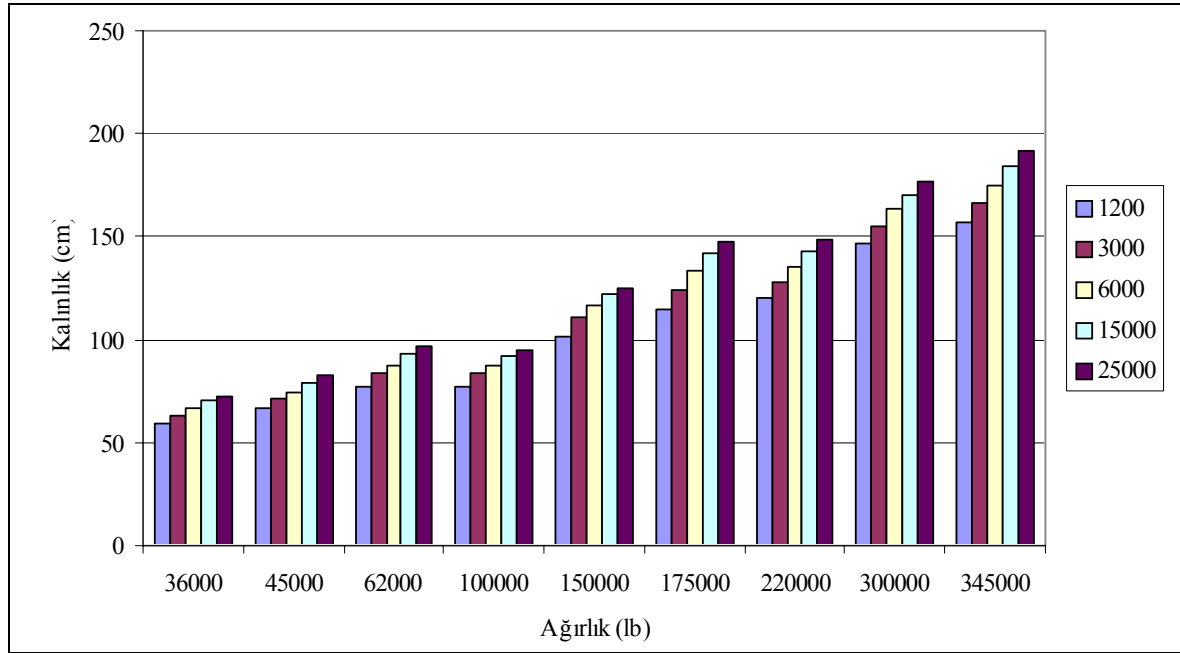


Şekil 5.8. USCOE CBR yöntemi, T=25.000 için farklı ağırlıklarda taban zemini CBR değeri-üstyapı kalınlığı ilişkisi

Şekil 5.8.'de görüldüğü üzere taban zemini taşıma gücünün artması ile üstyapı kalınlığı önemli ölçüde azalmaktadır. Üstyapı kalınlığındaki artışın kritik değeri, 220.000 lb, 300.000 lb ve 345.000 lb gibi yüksek uçak ağırlıkları için taban zemini CBR değerinin 6 olduğu durumdur. Daha düşük uçak ağırlıkları için kritik bir değerin olmadığı, CBR değerindeki azalmayla birlikte kalınlık artışının düzenli olarak devam ettiği görülmektedir. Ağırlığın 36.000 lb'den 345.000 lb'ye çıkması sonucu üstyapı kalınlığında meydana gelen artış, 3 ve 15 CBR arasında 1,88 ve 2,47 kat arasında değişmektedir. Buna karşılık, taban zemini CBR değerinin 3'ten 15'e artması sonucu üstyapı kalınlığında meydana gelen azalış, minimum ve maksimum ağırlıklar arasında 2,33 ile 3,33 kat olmaktadır. Bu durum USCOE CBR yönteminde taban zemini taşıma gücünün uçak ağırlığından daha önemli bir parametre olabileceğini göstermektedir.

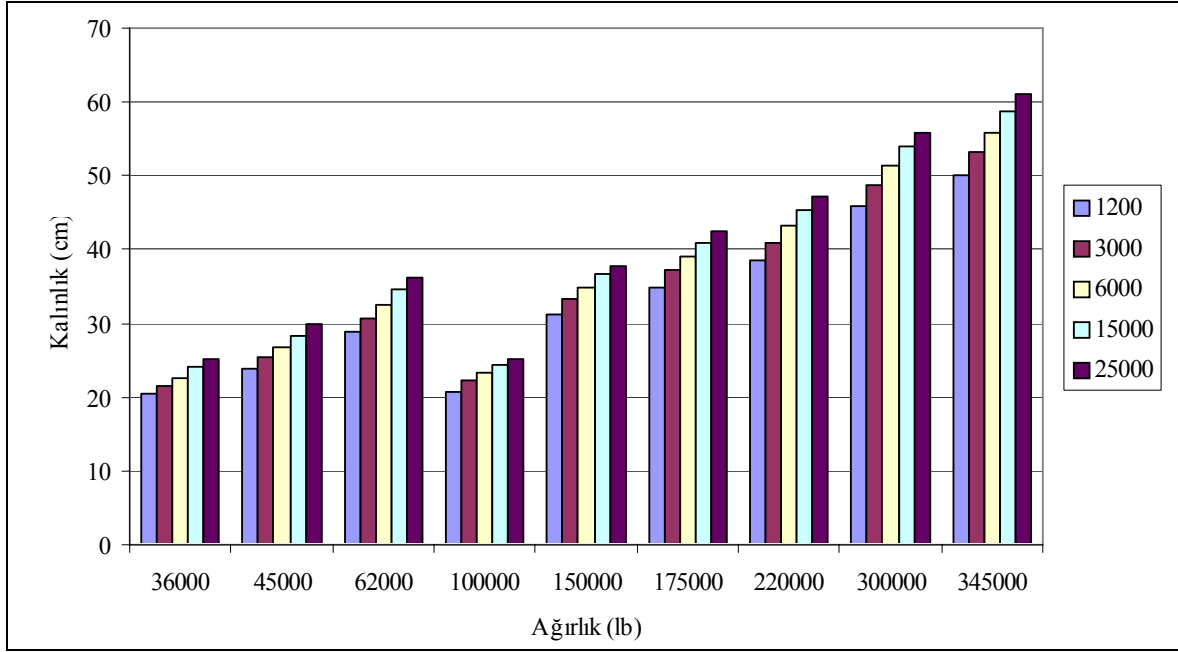
5.2. FAA CBR Yönteminin İncelenmesi

FAA CBR yöntemine göre; farklı operasyon sayılarında uçak ağırlıklarının tasarım CBR değeri 3 olan taban zemini için üstyapı kalınlığına etkisi Şekil 5.9.'da verilmiştir.



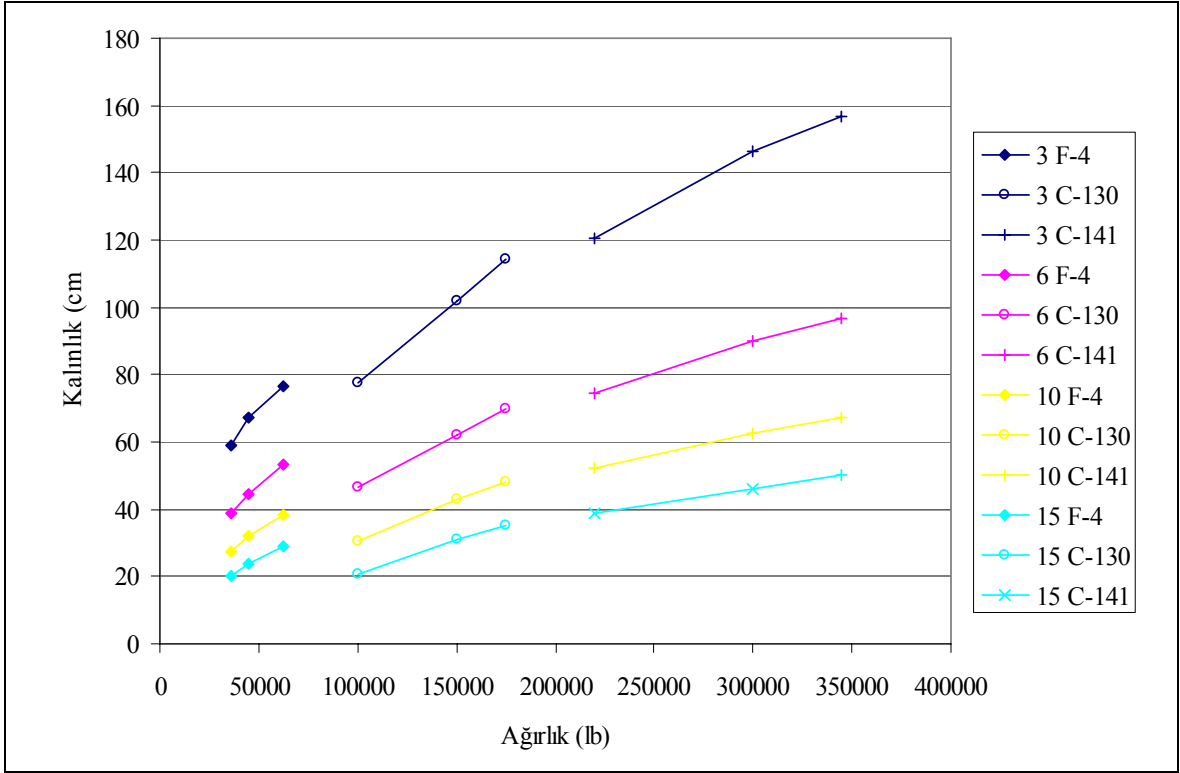
Şekil 5.9. FAA CBR yöntemi, CBR=3 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

36.000 lb ve 345.000 lb ağırlıkta 25.000 operasyon için gerekli üstyapı kalınlığı, 1.200 operasyon için gerekli üstyapı kalınlığından sırasıyla %23,24 ve %22,30 daha fazla olmaktadır. Operasyon sayısındaki artışın üstyapı kalınlığındaki artışa etkisi bütün uçak ağırlıkları için aynı oranda olmaktadır. S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine geçişteki kalınlık azalması burada da görülmektedir. 25.000 trafik hacmi için ağırlığın 36.000 lb'den 345.000 lb'ye çıkması (9,58 kat), üstyapı kalınlığını 2,64 kat artırmaktadır.

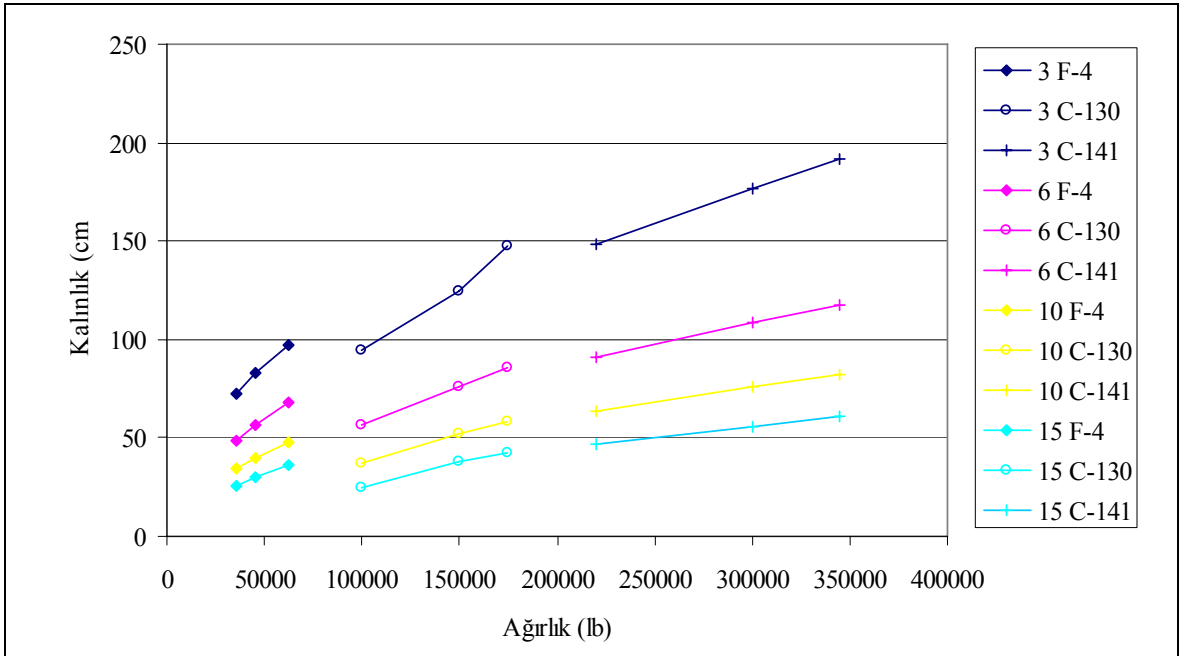


Şekil 5.10. FAA CBR yöntemi, CBR=15 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Uçak ağırlıkları ve trafik hacmine göre sağlam taban zeminine oturan üstyapı için gerekli kalınlık, S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine geçerken önemli ölçüde azalmaktadır. 100.000 lb ağırlık ve 25.000 operasyon için gerekli üstyapı kalınlığı, daha düşük bir ağırlık olan 62.000 lb için aynı operasyon sayısında gerekli üstyapı kalınlığından %30,33 daha az olmaktadır. Bu sonuçtan, FAACBR yönteminde S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip uçakların üstyapıya aşırı derecede gerilme uyguladıkları ya da 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip uçakların S tekerlek ve iniş takımı düzenine göre önemli derecede düşük gerilme uyguladıklarının elde edildiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, 2S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine geçerken kalınlık artışının lineer olarak devam etmesi, FAA CBR yöntemi için sağlam taban zemininde bu tekerlek ve iniş takımı düzenlerinin kalınlık artışına önemli etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır.

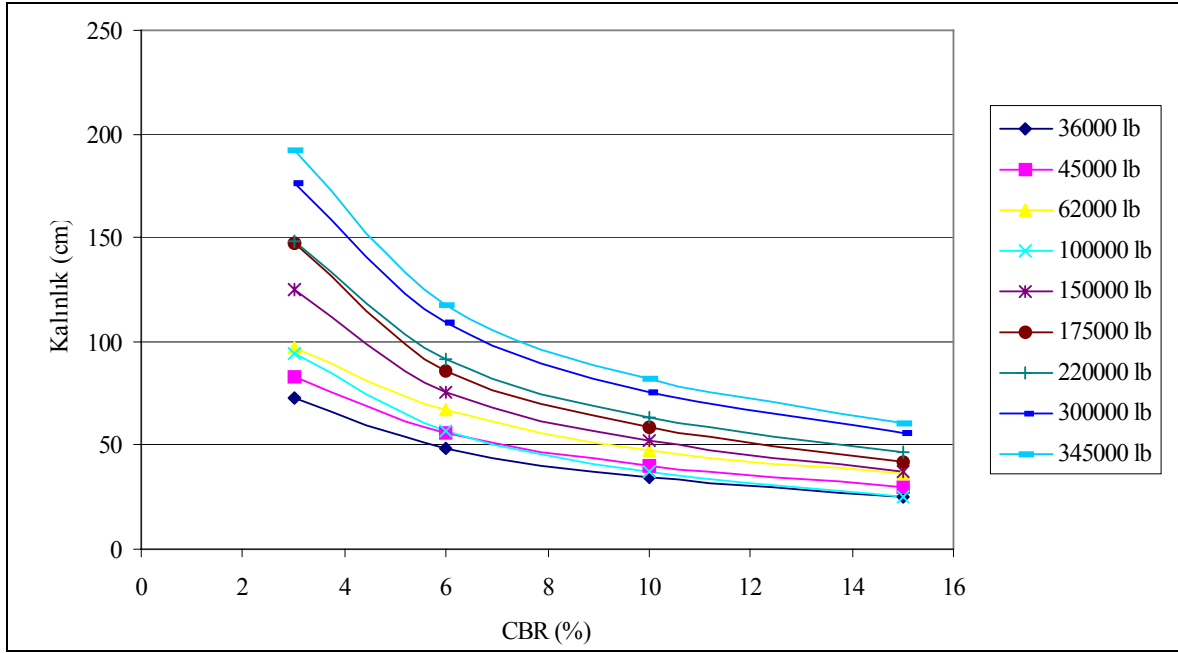


Şekil 5.11. FAA CBR yöntemi, T=1.200 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi



Şekil 5.12. FAA CBR yöntemi, T=25.000 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Şekil 5.11. ve 5.12.'de görüldüğü üzere trafik hacmindeki artış üstyapı kalınlığının artış oranları üzerinde etkili olmaktadır. Her iki şekilde de S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip uçaklar için ağırlığın artması ile üstyapı kalınlığında meydana gelen artış oranının yüksek olduğu, düşük taban zemini CBR değerindeki kalınlık artış hızının daha fazla olduğu görülmektedir.

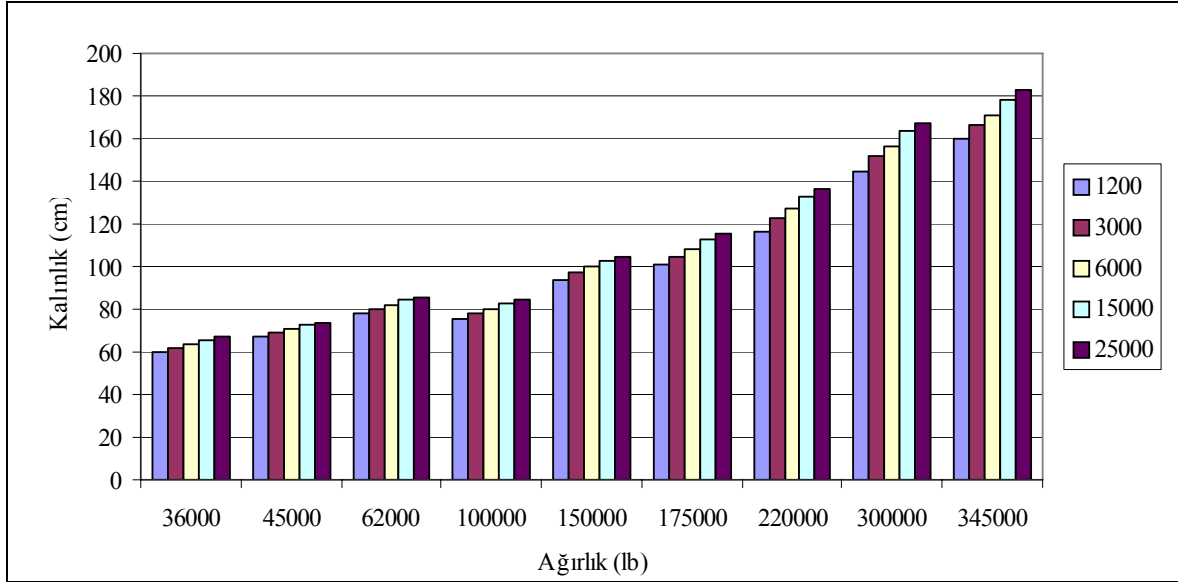


Şekil 5.13. FAA CBR yöntemi, T=25.000 için farklı ağırlıklarda taban zemini CBR değeri-üstyapı kalınlığı ilişkisi

Şekil 5.13.'de görüldüğü üzere taban zemini taşıma gücünün artması ile üstyapı kalınlığı önemli ölçüde azalmaktadır. Bütün uçak ağırlıkları için bu azalma eğilimindeki kritik değerin, taban zemini taşıma gücünün 6 CBR olduğu görülmektedir. Bu değerin altında grafikteki eğrilerin hızlı bir şekilde yükseldiği, 6 CBR'ın üzerinde ise eğrilerin yatıklaşma eğilimine girdiği görülmektedir. Ağırlığın 36.000 lb'den 345.000 lb'ye çıkması sonucu üstyapı kalınlığında meydana gelen artış, 3 ve 15 CBR değerleri arasında 2,38 ve 2,64 kat arasında değişmektedir. Buna karşılık, taban zemini CBR değerinin 3'ten 15'e artması sonucu üstyapı kalınlığında meydana gelen azalış, minimum ve maksimum ağırlıklar arasında 2,68 ile 3,76 kat olmaktadır. Bu durum USCOE CBR yöntemindeki duruma benzer şekilde taban zemini taşıma gücünün belirli durum için uçak ağırlığından daha önemli bir parametre olabileceğine işaret etmektedir.

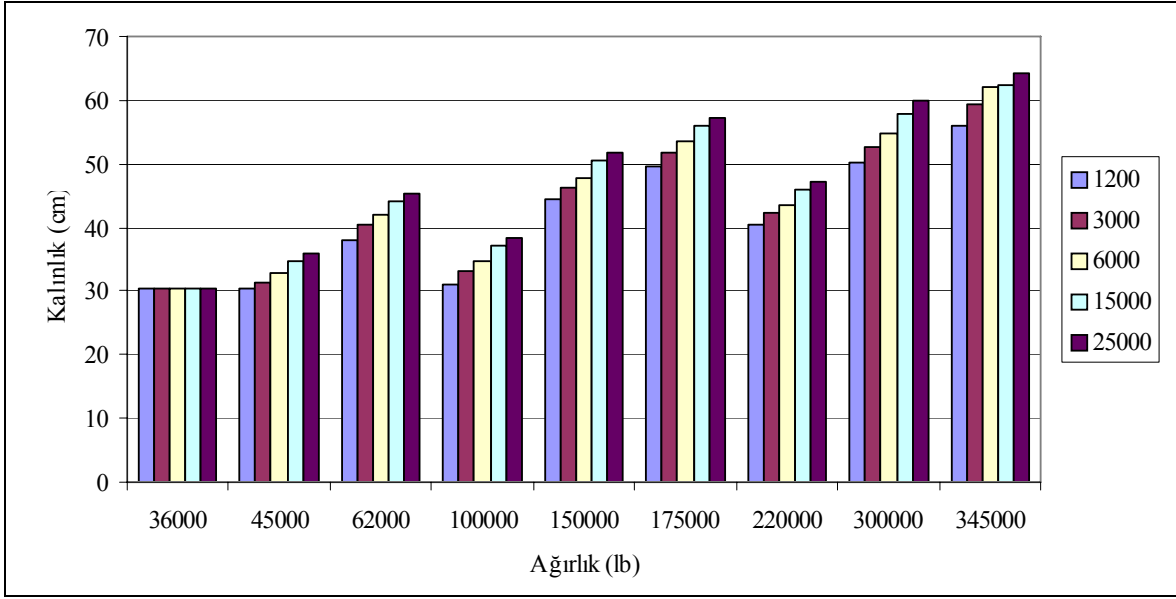
5.3. FAARFIELD Yönteminin İncelenmesi

FAARFIELD yöntemine göre; farklı operasyon sayılarında uçak ağırlıklarının tasarım CBR değeri 3 olan taban zemini için üstyapı kalınlığına etkisi Şekil 5.11.'de verilmiştir.



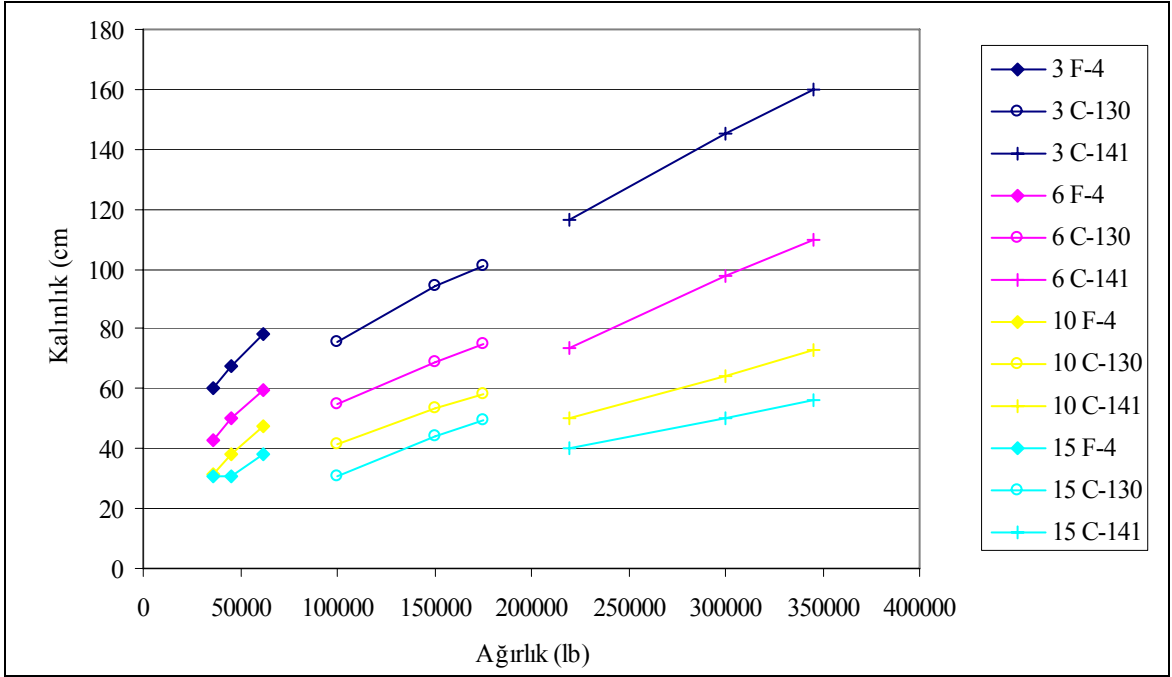
Şekil 5.14. FAARFIELD yöntemi, CBR=3 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Şekil 5.14'te görüldüğü üzere her bir ağırlık için üstyapı kalınlığı, operasyon sayısının artması ile artmaktadır. 36.000 lb ağırlıkta 25.000 operasyon için gerekli üstyapı kalınlığı, 1.200 operasyon için gerekli üstyapı kalınlığından %10,64 daha fazla iken bu oran 345.000 lb ağırlıkta da çok fazla değişmeden %14,20 olmaktadır. Bu durum operasyon sayısının üstyapı kalınlığı üzerinde etkisinin diğer parametrelere göre daha az olduğunu, herhangi bir ağırlık için düşük operasyon sayısında hesaplanan üstyapı kalınlığının %10–14 arasında artırılması ile çok yüksek operasyon sayılarında hizmet verecek üstyapı kalınlıklarının elde edilebileceğine işaret etmektedir. 25.000 operasyon için ağırlığın 36.000 lb'den 345.000 lb'ye çıkması (9,58 kat), üstyapı kalınlığını 2,67 kat artırmaktadır.

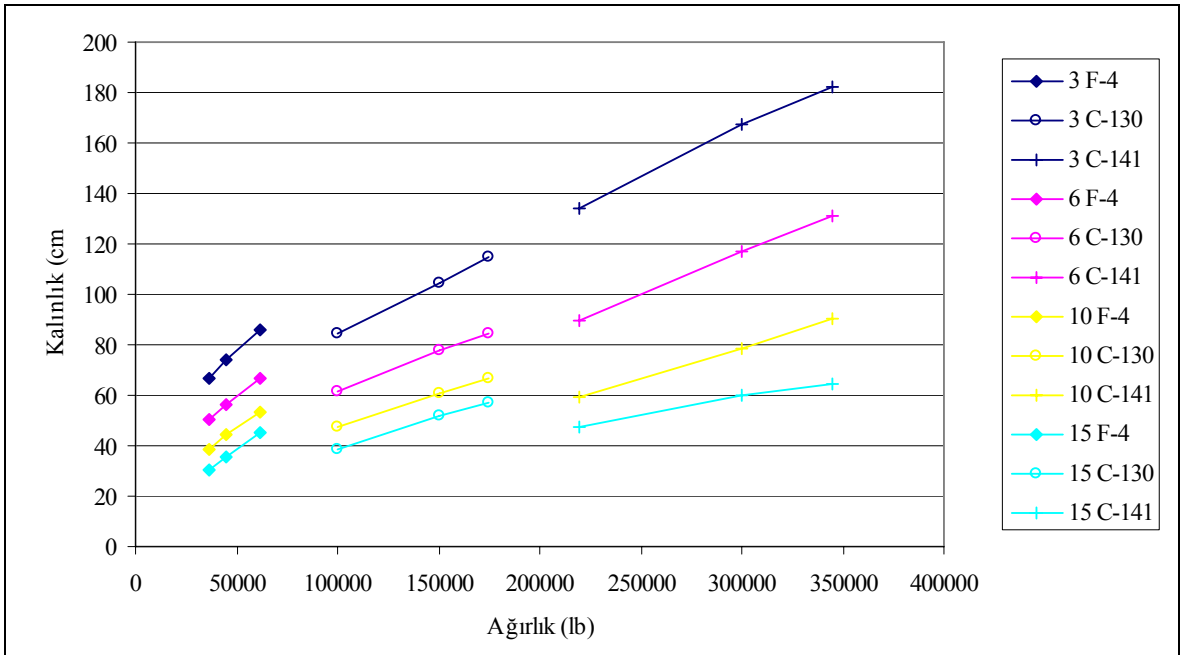


Şekil 5.15. FAARFIELD yöntemi, CBR=15 için farklı operasyon sayılarında uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Şekil 5.15.'te gerekli üstyapı kalınlığının sağlam taban zemini ve 36.000 lb ağırlıkta operasyon sayısına bağlı olarak değişmediği ve sabit olduğu görülmektedir. Sağlam taban zemini üzerine inşa edilecek üstyapılar için tekerlek ve iniş takımı düzeni etkisi ön plana çıkmaktadır. 3 CBR için 62.000 lb'den 100.000 lb'ye geçerken (S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine) gerekli üstyapı kalınlığında görülen azalış 15 CBR için de görülmektedir. Ayrıca 2S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2D tekerlek ve iniş takımı düzenine geçerken de gerekli üstyapı kalınlığında önemli bir azalmanın meydana geldiği ve dolayısıyla sağlam taban zemini için tekerlek ve iniş takımı düzeninin daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Sağlam taban zemininde, zayıf taban zemininde olduğu gibi operasyon sayısının üstyapı kalınlığı üzerindeki etkisinin daha az olduğu görülmektedir. 25.000 operasyon için ağırlığın 36.000 lb'den 345.000 lb'ye çıkması (9,58 kat), üstyapı kalınlığını 2,11 kat artırmakta, dolayısıyla sağlam taban zemininde ağırlığın artması ile üstyapı kalınlığında meydana gelen artışın zayıf taban zeminine göre daha az olduğu anlaşılmaktadır.



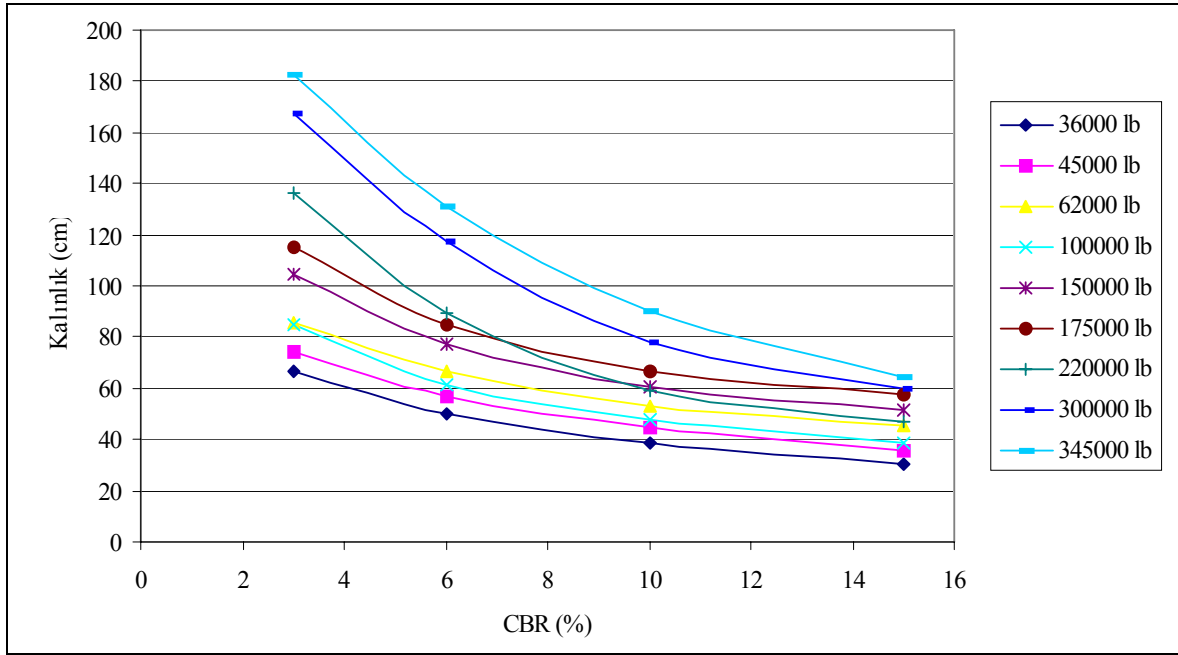
Şekil 5.16. FAARFIELD yöntemi, T=1.200 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi



Şekil 5.17. FAARFIELD yöntemi, T=25.000 için farklı taban zemini CBR değerlerinde uçak ağırlığının üstyapı kalınlığına etkisi

Şekil 5.16. ve 5.17.'e görüldüğü üzere üstyapı kalınlığındaki artışın şekli, düşük ile yüksek operasyon sayısı için farklılık göstermemektedir. Her iki operasyon sayısı için

düşük uçak ağırlığı durumunda üstyapı kalınlığı zeminin taşıma gücünden fazla etkilenmezken yüksek ağırlık durumunda taban zemini taşıma gücü daha etkili olmaktadır. Örnek olarak; $T=1.200$ için, 36.000 lb ağırlıkta zayıf taban zemini 60,43 cm, sağlam taban zemini 30,48 cm üstyapı kalınlığı gerektirirken, 345.000 lb'de sırasıyla bu değerler 159,62 cm ve 56,01 cm olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, taban zemini CBR değerinin 3'ten 15'e artması üstyapı kalınlığını düşük ağırlıkta 1,98 kat, yüksek ağırlıkta ise 2,85 kat azaltmaktadır.

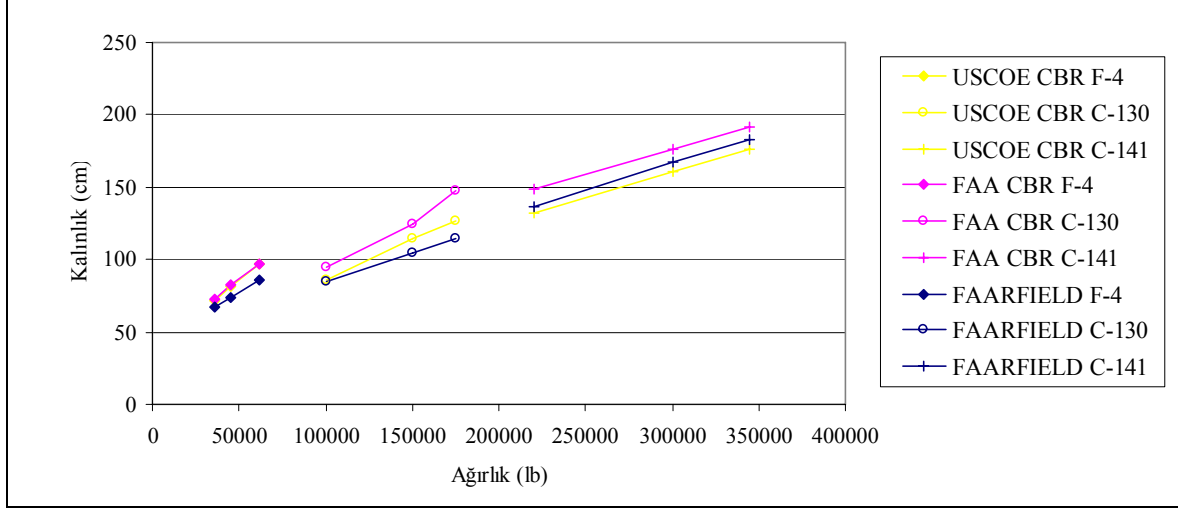


Şekil 5.18. FAARFIELD yöntemi, $T=25.000$ için farklı ağırlıklarda taban zemini CBR değeri-üstyapı kalınlığı ilişkisi

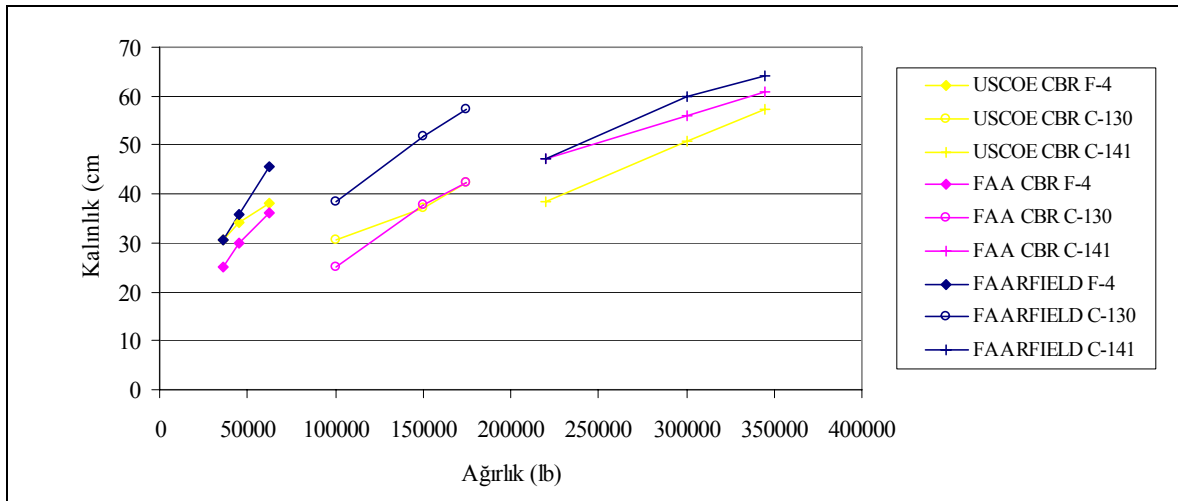
Şekil 5.18'de görüldüğü üzere USCOE CBR ve FAA CBR yöntemlerine benzer şekilde taban zemini taşıma gücünün artması ile üstyapı kalınlığı önemli ölçüde azalmaktadır. Bütün uçak ağırlıkları için bu azalmanın kritik değeri taban zemini taşıma gücünün 10 CBR olduğu durumdur. Bu değer altında grafikteki eğrilerin hızlı bir şekilde yükseldiği, bu değer üzerinde ise eğrilerin yatıklaşma eğilimine girdiği görülmektedir. S tekerlek ve iniş takımı düzenine sahip 36.000 lb, 45.000 lb ve 62.000 lb ağırlıklar için üstyapı kalınlığındaki artış oranı taban zeminin bütün taşıma gücü değerleri için hemen hemen sabit iken yüksek ağırlıklarda artış oranlarının taban zeminin taşıma gücüne göre farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. 345.000 lb ağırlık için gerekli üstyapı kalınlığı 36.000 lb için gerekli üstyapı kalınlığından 3 CBR değerinde 2,73 kat, 15 CBR değerinde

ise 2,11 kat daha fazladır. Taban zemini taşıma gücünün 5 kat artması üstyapı kalınlığının 36.000 lb’de 2,19 kat, 345.000 lb’de ise 2,84 kat azalmasını sağlamaktadır.

5.4. Yöntemlerin Karşılaştırılması



Şekil 5.19. CBR=3 ve T=25.000 için yöntemlere göre uçak ağırlığı-üstyapı kalınlığı ilişkisi



Şekil 5.20. CBR=15 ve T=25.000 için yöntemlere göre uçak ağırlığı-üstyapı kalınlığı ilişkisi

Şekil 5.19. ve 5.20.’de görüldüğü üzere, yöntemlerin sunduğu üstyapı kalınlıkları zayıf ve sağlam taban zeminlerinde çok farklı olmaktadır. Zayıf taban zemininde en fazla kalınlıkları bütün ağırlıklar için FAA CBR yöntemi verirken, sağlam taban zemininde

175.000 lb ağırlığa kadar en az kalınlık değerlerini vermektedir. Sağlam taban zemininde en yüksek kalınlık değerlerini FAARFIELD yöntemi vermektedir. USCOE CBR yöntemi her iki taban zemini tipinde 175.000 lb ağırlığa kadar diğer yöntemlerin arasında kalacak şekilde, bu ağırlıktan sonra en düşük kalınlık değerleri vermiştir. Bütün yöntemlerde ağırlığın artması ile üstyapı kalınlığındaki artış oranı S tekerlek ve iniş takımı düzeninde diğer ağırlıktaki artışlara göre daha fazladır.

Tekerlek ve iniş takımı düzenlerinin zayıf ve sağlam taban zeminlerindeki etkisi yöntemlere göre Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Taban zemini taşıma gücüne göre tekerlek ve iniş takımı düzeninin üstyapı kalınlığına etkisi

Yöntem	Zayıf Zemin (CBR 3)		Sağlam Zemin (CBR 15)	
	S'den 2S'ye	2S'den 2D'ye	S'den 2S'ye	2S'den 2D'ye
USCOE CBR	Çok etkili	Etkili	Çok etkili	Çok etkili
FAA CBR	Etkili	Etkili	Çok etkili	Etkisiz
FAARFIELD	Etkili	Etkisiz	Çok etkili	Çok etkili

Elde edilen veriler, bütün yöntemler için taban zemini CBR değerinin 3 olduğu durumda S tekerlek ve iniş takımı düzeninden 2S tekerlek ve iniş takımı düzenine geçişin etkili, 15 olduğu durumda ise çok etkili olduğunu göstermektedir. Taban zemini CBR değerinin 3'ten 15'e artması durumunda 2S'den 2D'ye geçiş FAARFIELD yöntemi için etkisiz durumdan etkili duruma gelirken, FAA CBR yöntemi için bu durumun tersi meydana gelmektedir. USCOE CBR yönteminde ise tekerlek ve iniş takımı düzeninin zayıf ve sağlam taban zeminleri için önemli olduğu görülmektedir.

Taban zemini taşıma gücünün üstyapı kalınlıkları üzerindeki etkisini gösteren Şekil 5.8., 5.13. ve 5.18. birlikte değerlendirildiğinde; üstyapı kalınlık artışının hızlandığı kritik değerin FAARFIELD yöntemi için 10 CBR, FAA CBR yöntemi için 6 CBR, USCOE CBR yöntemi için yüksek ağırlıklarda 6, düşük ağırlıklarda 10 CBR olduğu tespit edilmiştir.

6. DEĞERLENDİRME ve SONUÇ

USCOE CBR, FAA CBR ve FAARFIELD yöntemleri kullanılarak aynı tasarım koşulları altında hesaplanan esnek üstyapı kalınlıklarının incelenmesi ve karşılaştırılması sonucunda yapılan değerlendirme aşağıda belirtilmiştir.

- Taban zemini taşıma gücü, uçak ağırlığı, tekerlek ve iniş takımı düzeni ve operasyon sayısı esnek üstyapı kalınlığı üzerinde oldukça etkilidir.

- Taban zemini taşıma gücü arttıkça önerilen esnek üstyapı kalınlıkları azalmaktadır. Kalınlık azalışının yavaşladığı kritik taban zemini taşıma gücü değerleri; *FAARFIELD* yöntemi için 10 CBR, *FAA CBR* yöntemi için 6 CBR ve *USCOE CBR* yöntemi için yüksek uçak ağırlığında 6 CBR ve düşük ağırlıkta 10 CBR olmaktadır.

- Mekanistik-ampirik bir yöntem olan ve 2009 yılında FAA tarafından önerilen *FAARFIELD* yöntemi taban zemini taşıma gücünün düşük olduğu durumlarda genellikle daha az üstyapı kalınlığı önermektedir. Aynı idare tarafından 1995 yılında önerilen, *FAARFIELD* yönteminden önce kullanılan ve ampirik bir yöntem olan *FAA CBR* yönteminin düşük taşıma gücü durumunda en yüksek üstyapı kalınlıkları önerdiği görülmektedir. Bu durum, düşük taşıma gücü değerlerinde ampirik yöntemlerde genel olarak bulunduğu öngörülen emniyet katsayısı yüksek tasarımlara neden olmaktadır.

- Havaalanı esnek üstyapıları için kritik durum olarak kabul edilen düşük taban zemini taşıma gücü ve yüksek operasyon sayısında (CBR=3 ve T=25.000), *FAARFIELD* yöntemi *FAA CBR* yöntemine göre F-4, C-130 ve C-141 uçakları için sırasıyla %11,43, %21,84 ve %4,96 daha az kalınlıkta esnek üstyapı önermektedir. Aynı durum için *FAARFIELD* yöntemi *USCOE CBR* yöntemine göre F-4 ve C-130 uçakları için sırasıyla %11,36 ve %9,08 daha az kalınlıkta esnek üstyapı önermektedir. Ancak C-141 uçağı için *FAARFIELD* yöntemi %3,64 daha fazla kalınlıkta esnek üstyapı önermektedir. Buna göre, trafiğin ve taban zemini özelliklerinin gerçekçi olarak belirlendiği durumlarda uygun tasarım yönteminin kullanılması durumunda daha az kalınlıkta esnek üstyapıların gerekli olacağı ve inşaat maliyetinin önemli oranda azalacağı değerlendirilmektedir.

- *FAA CBR* yönteminin 1995, *USCOE CBR* yönteminin 2001 ve *FAARFIELD* yönteminin 2009 yılında ilgili idareler tarafından önerildiği ve bu yöntemler kullanılarak elde edilen veriler genel olarak değerlendirildiğinde; geliştirilen tasarım yöntemlerinin artan trafik hacmi ve uçak ağırlıklarına rağmen daha az kalınlıkta esnek üstyapılar önerdiği

görülmektedir. Ampirik tasarım yöntemlerine ait korelasyonların geliştirilmesi ve mekanistik-ampirik tasarım çalışmalarında malzeme özellikleri ile yükleme koşulları daha gerçekçi olarak hesaplamalara dahil edildiği durumda ihtiyaca cevap veren, emniyetli ve aynı zamanda daha ekonomik çözümler üretilebileceği değerlendirilmektedir.

- Her uçak cinsi (tekerlek ve iniş takımı düzeni) için uçak ağırlığının ve operasyon sayısının artırılması sonucunda elde edilen üstyapı kalınlıklarının düzenli olarak artmakta olduğu görülmektedir. Uçak ağırlıklarının üstyapıya aktarılma şeklini oluşturan tekerlek ve iniş takımı düzeninin önerilen üstyapı kalınlıkları üzerinde etkili olduğu değerlendirilmektedir. Tekerlek sayısının artırılması ve iniş takımı geometrisinin değiştirilmesiyle artan uçak ağırlıklarının üstyapı üzerine etkisinin azaltılabileceği ve böylece daha az kalınlıkta üstyapıların gerekli olabileceği görülmektedir.

Daha sonraki araştırmalarda LCN ve ACN/PCN gibi ampirik, Asfalt Enstitüsü ve PCASE gibi mekanistik-ampirik yöntemlerin esnek üstyapı kalınlık hesaplamalarına dahil edilmesi ve karışık trafik hacminin dikkate alınması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Tunç, A.**, 2003, Havaalanı Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- [2] www.dhmi.gov.tr/dhmitatistik/istatistik.aspx.
- [3] www.shgm.gov.tr.
- [4] www.dhmi.gov.tr/dosyalar/limanvemeydanlar/limanvemeydanlar.asp.
- [5] www.shgm.gov.tr/index2.html.
- [6] **USCOE**, Unified Facilities Criteria 3-260-02, Washington, DC., 2001.
- [7] **FAA**, Airport Pavement Design and Evaluation AC 150/5320-6D, 1995.
- [8] **FAA**, Airport Pavement Design and Evaluation AC 150/5320-6E, 2009.
- [9] www.tse.gov.tr.
- [10] **Aytekin, M.**, 2004, Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara.
- [11] **TS 1500**, 2000, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [12] **TS 1900-2**, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [13] **Horonjeff, R.**, 1975, Planning and Design of Airports, McGraw-Hill.
- [14] training.ce.washington.edu/WSDOT/modules/04_design_parameters/04-2_body.htm.
- [15] **DoE**, A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation, United Kingdom, 1989.
- [16] **EAPA**, Airfield Uses of Asphalt, Breukelen, 2003.
- [17] **Tunç, A.**, 2004, Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- [18] **DoE**, Design and Evaluation of Aircraft Pavements, United Kingdom, 1971.
- [19] **FAA**, Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations Order 5300.7, 2005
- [20] **Ashford, N.**, Wright, P.H., 1992, Airport Engineering, John Wiley&Sons.
- [21] www.tayyareci.com/ucakfoto/photo/F-4-5.jpg.

[22] simflight.com/wp-content/uploads/2008/07/captain-sim-legendary-c130.jpg.

[23] richard-seaman.com/Aircraft/AirShows/Riverside2005/Highlights/C141WheelsDown.jpg.

ÖZGEÇMİŞ

05.11.1979 tarihinde İzmir’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bafra’da tamamladı. 1997 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2001 yılında aynı bölümden İnşaat Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. 2003 yılından itibaren Hava Kuvvetleri Komutanlığında Subay-İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Çok iyi derecede İngilizce, başlangıç seviyesinde Fransızca bilmektedir. Evlidir.