

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



HAVALİMANI TASARIMLARI VE HAVALİMANI KAPLAMALARI
YAPILIRKEN DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Muhammed Nur KAÇMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL

TUNCELİ-2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HAVALİMANI TASARIMLARI VE HAVALİMANI KAPLAMALARI
YAPILIRKEN DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Muhammed Nur KAÇMAZ
210150003

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL

TUNCELİ-2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HAVALİMANI TASARIMLARI VE HAVALİMANI KAPLAMALARI
YAPILIRKEN DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR**

**Muhammed Nur KAÇMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 04/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Mehmet KARATAŞ
Munzur Üniversitesi

BAŞKAN

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Selim
CEMALGİL
Munzur Üniversitesi

DANIŞMAN

İmza

Prof. Dr. Onur ONAT
İnönü Üniversitesi

ÜYE

Bu tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Muhammed Nur KAÇMAZ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda bilgisi ve tecrübesiyle desteğini benden esirgemeyen çok kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte her anlamda bana destek olana Aileme sevgilerimi sunarım.

Muhammed Nur KAÇMAZ
TUNCELİ-2025



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
TABLolar LİSTESİ	V
RESİMLER LİSTESİ	VI
SEMBOLLER LİSTESİ	VII
KISALTMALAR LİSTESİ	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Havaalanı Tanımı	1
1.2. PAT (Pist, Apron ve Taksi Yolları) Sahası	2
2. MATERYAL VE METOT	6
2.1. Havalimanı Üstyapı Tasarım Metotlarının Tarihsel Gelişimi	6
2.2. Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemleri	7
2.3. Havaalanlarında Esnek Üstyapı Tasarımı.....	8
2.4. Havaalanlarında Rijit Üstyapı Tasarımı	10
2.5. Havaalanı Tasarımında Kazı İşlemleri	11
2.5.1. Havaalanı kazı işlemleri esnasında yapılan deneyler	11
2.5.1.1. Likit limit deneyi	12
2.5.1.2. Plastik indeksi deneyi	13
2.5.1.3. Standart proktor deneyi	14
2.6. Havaalanları Dolgu İşlemleri.....	14
2.7. Havaalanında PAT Sahası ve Çevre Drenajı	16
2.8. PAT Sahaları Temel Altı ve Temel Tabakası.....	16
2.8.1. Temel altı ve temel tabakası deneyleri	18
2.8.1.1. Elek analizi deneyi	18
2.8.1.2. Los Angeles deneyi ve şişme yüzdesi deneyi.....	19
2.8.1.3. K reaksiyon modülü deneyi.....	21
2.9. Havaalanları Yapıştırma Tabakaları	22
2.10. Bitümlü Temel Tabakası	23
2.10.1. Özgül ağırlık ve su emme deneyi	24
2.10.2. Çöktürme deneyi metodu	25
2.11. Beton Asfalt Binder ve Aşınma (Satıh) Tabakası	26
2.11.1. Modifiye bitüm malzemesi.....	26
2.11.2. Binder ve aşınma tabakaları karıştırma, serim işlemleri	27
2.11.3. Binder ve satıh tabakaları arazi ölçüm işlemleri	29
2.12. Beton Kaplama	29
2.12.1. Beton kaplama agregası.....	30
2.12.1.1. Beton kaplama kaba agregası	31
2.12.1.2. Beton kaplama ince agregası	32
2.12.2. Havaalanı beton agrega deneyleri.....	33
2.12.2.1. Kil toprakları oranı deneyi	33
2.12.2.2. Yumuşak parçalar, kömür, linyit ve şist deneyi	34
2.12.2.3. İğnesellik sınırı	34
2.12.2.4. Yapraksallık sınırı	34
2.12.2.5. Organik madde oranı	35

2.12.3. Beton kaplama çimentosu.....	35
2.12.4. Beton kaplama karma suyu.....	36
2.12.5. Beton kaplamada boşluk oranı ve kimyasal katkı maddesi	36
2.12.6. Beton kaplama derz dolgu malzemesi	37
2.12.7. Beton kaplama tabakası dayanım değeri	38
2.12.8. Beton kaplama karışım oranları.....	39
2.12.9. Beton kaplama slump deneyi.....	39
2.12.10. Beton kaplama dökümü	40
2.12.11. Beton kaplama kalınlık ve mukavemet kriterleri	42
2.12.12. Beton kaplama sathının pürüzlülük ve çatlak kriterleri.....	42
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
3.1. Airbus A330-300 Uçak Tipi İçin Esnek ve Rijit Kaplama Tayini	44
3.1.1. Esnek üst yapı tasarımı	44
3.1.2. Rijit üst yapı tasarımı.....	54
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
5. KAYNAKLAR.....	65

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. Toprak dolgu malzemeleri özellikleri	15
Tablo 2. 2. Temel altı ve temel tabakaları malzeme deneyleri	17
Tablo 2. 3. Bitümlü malzeme tipleri ve kullanılacak bölgeler listesi	26
Tablo 2. 4. Laboratuvar yoğunluk ve karışım formül değerleri farkı tablosu	29
Tablo 2. 5. Harç çubuklarının hızlandırılmış genleşme deneyi değerleri	31
Tablo 2. 6. Beton kaplama kaba agregasının fiziksel özellikleri	32
Tablo 2. 7. Beton kaplama ince agregasının fiziksel özellikleri	33
Tablo 2. 8. Beton kaplama tabakasında önerilen hava içeriği miktarı	37
Tablo 2. 9. Laboratuvarda hazırlanan numunelerin dayanım değerleri	38
Tablo 2. 10. Şantiye ortamında hazırlanmış numunelerin dayanım değerleri	39
Tablo 3. 1. Airbus A330-300 uçağı teknik özellikleri	44
Tablo 3. 2. CBR 6 değeri üzerinden tabaka kalınlıkları	48
Tablo 3. 3. CBR 10 değeri üzerinden tabaka kalınlıkları	52
Tablo 3. 4. Tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması	53
Tablo 3. 5. Zemin tipine göre k değeri tayini	54
Tablo 3. 6. Uçak tiplerine göre eğilme dayanımı değerleri	55
Tablo 3. 7. Alt temel ve temel tabakası için malzemeye göre k değerleri	59

RESİMLER LİSTESİ

Resim 1. 1.	Çukurova havalimanı pist ve taksi yolunun görünümü	3
Resim 1. 2.	Pist kaplamalı saha gereksinimi	3
Resim 1. 3.	Çukurova havalimanı apron sahası görünümü	5
Resim 2. 1.	Casagrande likit limit cihazı	12
Resim 2. 2.	Plastik indeks deneyi	13
Resim 2. 3.	Standart proktor deneyi	14
Resim 2. 4.	Elek analizi deneyi görünümü	19
Resim 2. 5.	Los Angeles deney cihazı	20
Resim 2. 6.	K reaksiyon modülü deneyi	21
Resim 2. 7.	Bitümlü yapıştırıcı tabaka serimi	22
Resim 2. 8.	Soyulma deneyi	24
Resim 2. 9.	Özgül ağırlık deneyi	25
Resim 2. 10.	Hİ-LO dedektör	28
Resim 2. 11.	Pürüzlülük ölçüm cihazı	28
Resim 2. 12.	Beton kaplama dökümü	40
Resim 2. 13.	Beton kaplama dökümü sonrası tesviye işlemi	41
Resim 2. 14.	Beton kaplama dökümü tesviye işlemi	41
Resim 3. 1.	CBR 6 değeri üzerinden toplam kalınlık tayini	46
Resim 3. 2.	Alt temel kalınlık tayini	47
Resim 3. 3.	Esnek kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü	48
Resim 3. 4.	CBR 10 değeri üzerinden toplam kalınlık tayini	50
Resim 3. 5.	Alt temel kalınlık tayini	51
Resim 3. 6.	Esnek kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü	52
Resim 3. 7.	Beton kaplama kalınlığı tayini	56
Resim 3. 8.	Rijit kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü (31 cm).....	57
Resim 3. 9.	Beton kaplama kalınlığı tayini	57
Resim 3. 10.	Rijit kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü (36 cm).....	58
Resim 3. 11.	Temel tabakası kalınlık tayini	60
Resim 3. 12.	Alt temel tabakası kalınlık tayini	61

SEMBOLLER LİSTESİ

$\emptyset$	:Çap
$<$	:Küçüktür
$>$	:Büyüktür
$\leq$	:Küçük eşit
$\geq$	:Büyük eşit
$^{\circ}\text{C}$	:Santigrat
$\%$	:Yüzde



KISALTMALAR LİSTESİ

AASHTO	:Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği
ACN	:Uçak Sınıflandırma Numarası
AIP	:Havacılık Bilgi Yayınları
ASTM	:Amerikan Test ve Malzeme Derneği
AYGM	:UAB, Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü
CBR	:Kaliforniya Taşıma Oranı
CDOT	:Kanada Ulaştırma Bakanlığı
DHMI	:Devlet Hava Meydanları İşletmesi
DLH	:Demiryollar, Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü
DLHİGM	:Demiryollar, Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü
ESWL	:Eşdeğer tek tekerlek yükü
FAA	:Federal Havacılık İdaresi
ICAO	:Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
LCG	:Yük sınıflandırma grubu
LCN	:Yük sınıflandırma numarası
LCS	:Zayıf beton tabaka
PAT	:Pist, Apron, Taksi yolu
PCA	:Portland Çimento Birliği
PCC	:Portland Çimento Betonu
PCN	:Kaplama Sınıflandırma Numarası
PI	:Plastik İndeksi
RESA	:Pist Sonu Emniyet Alanı
TS	:Türk Standartları
UAB	:T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı
HCl	:Hidroklorik Asit

ÖZET

Bu çalışma, havaalanı üstyapı tasarım süreçlerinde dikkate alınması gereken temel mühendislik prensiplerini, zemin özelliklerini ve kaplama sistemlerini kapsamlı bir biçimde ele almaktadır. Artan hava trafiği ve gelişen uçak teknolojileri, PAT (Pist, Apron ve Taksi Yolları) sahaları için yüksek taşıma kapasiteli ve uzun ömürlü kaplama çözümlerini zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, esnek, rijit ve kompozit kaplama sistemleri; tabaka yapıları, yük dağıtım mekanizmaları, iklim dayanımı ve bakım gereksinimleri açısından detaylı şekilde karşılaştırılmıştır. Her kaplama sisteminin temel amacı, uçaklardan kaynaklanan yoğun ve tekrarlı yükleri alt tabakalara etkin biçimde aktarmaktır.

Üstyapı sistemlerinde; temel tabakası, alt temel tabakası ve taban zemini gibi farklı mühendislik katmanlarının özellikleri, yapının taşıma gücünü ve performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, zemin sınıflandırmaları, likit limit, plastisite indeksi, şişme yüzdesi ve CBR (California Taşıma Oranı) gibi zemin parametreleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Kaplama tabakalarında kullanılacak malzemelerin granülometri, aşınma direnci, don dayanımı ve su geçirgenliği gibi fiziksel ve mekanik özellikleri, ulusal ve uluslararası teknik şartnamelere TS (Türk Standartları), AASHTO (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği), ASTM (Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu), FAA (Federal Havacılık İdaresi) 'ya uygun olarak analiz edilmiştir.

Ayrıca, drenaj sistemleri, yeraltı su seviyesi, dolgu kalitesi ve sıkışma kriterleri, kaplama ömrünü doğrudan etkileyen faktörler olarak ele alınmıştır. FAA, CBR ve ACN/PCN (Uçak Sınıflandırma Numarası/Yol Sınıflandırma Numarası) gibi uluslararası kabul görmüş tasarım yöntemleri ile üstyapı kapasitesinin belirlenmesi ve uçak-yüzey uyumunun sağlanması hedeflenmiştir.

Bu tez çalışması, havaalanı üstyapılarının tasarımında kullanılan yapı malzemelerinin mühendislik uygulamalarıyla bütünleşmesini kapsamlı şekilde ele almaktadır. Tezde, esnek (katmanlı/asfalt türü) ve rijit (betonarme) kaplama türlerinin tasarım kuralları, yük taşıma biçimleri ve dış etkenler altındaki dayanım özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, üstyapı katmanlarında kullanılacak yapı malzemelerinin teknik nitelikleri; sıvı sınırı, plastiklik oranı, CBR, Proktor sıkıştırma deneyi, zemin taşıma katsayısı gibi çeşitli deneysel yöntemlerle analiz edilmiştir.

Çalışmada ayrıca ulusal ve uluslararası standartlar (AASHTO, CBR, ACN/PCN, FAA, TS vb.) esas alınarak esnek ve rijit üst yapılar üzerinde A330-300 uçak tipi için tabaka kalınlıkları hesaplanmıştır. Böylece kaplamalara dair veriler elde edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma; havaalanı üstyapılarında kullanılacak malzemelerin seçimine bilimsel ve mühendislik temelli bir bakış açısı kazandırmakta, yapı ömrünü uzatmayı, güvenliğini artırmayı ve sürdürülebilir altyapı oluşturmayı amaçlayan malzeme kullanımının ve tabaka kalınlığının stratejik önemini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Havaalanı üstyapısı, yapı malzemeleri, havaalanı tasarım ilkeleri

ABSTRACT

Considerations in Airport Design and Pavement Construction

This study comprehensively examines the fundamental engineering principles, soil characteristics, and pavement systems that must be considered during the design processes of airport superstructures. The increasing air traffic and evolving aircraft technologies have made it essential to develop high load-bearing and long-lasting pavement solutions for airside facilities such as runways, taxiways, and aprons (PAT areas). In this context, flexible, rigid, and composite pavement systems are compared in detail with respect to their layer configurations, load distribution mechanisms, climate resistance, and maintenance requirements. The primary objective of each pavement system is to effectively transfer the heavy and repetitive loads generated by aircraft to the underlying layers.

In superstructure systems, the engineering characteristics of various structural layers—such as the base course, subbase course, and subgrade—directly affect the load-bearing capacity and performance of the structure. Accordingly, soil classification systems, liquid limit, plasticity index, swell percentage, and CBR (California Bearing Ratio) values are evaluated in detail. The physical and mechanical properties of materials to be used in pavement layers—such as gradation, abrasion resistance, frost durability, and permeability—are analyzed in accordance with national and international technical specifications including TS (Turkish Standards), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing and Materials), and FAA (Federal Aviation Administration) standards.

Furthermore, drainage systems, groundwater level, fill material quality, and compaction criteria are addressed as factors that directly impact pavement lifespan. Pavement capacity and aircraft–pavement compatibility are assessed using internationally recognized design methods such as FAA guidelines, CBR methodology, and the ACN/PCN (Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number) system.

This thesis extensively addresses the integration of construction materials used in airport superstructures with practical engineering applications. The design principles, load-bearing behavior, and resistance characteristics of flexible (layered/asphalt-type) and rigid (reinforced concrete) pavements under external effects are evaluated through comparative analysis. In addition, the technical specifications of the structural materials to be used in the pavement layers are examined through various experimental methods, including liquid limit, plasticity index, CBR, Proctor compaction test, and modulus of subgrade reaction.

Moreover, based on national and international standards (AASHTO, CBR, ACN/PCN, FAA, TS, etc.), pavement layer thicknesses were calculated for the A330-300 aircraft type for both flexible and rigid pavement designs, and corresponding performance data were obtained.

In conclusion, this study provides a scientific and engineering-based perspective on the selection of construction materials to be used in airport pavements. It emphasizes the strategic importance of appropriate material selection and layer thickness in extending service life, enhancing operational safety, and achieving sustainable airport infrastructure.

Keywords: Airport superstructure, building materials, airport design principles

1. GİRİŞ

1.1. Havaalanı Tanımı

Havaalanı; hava araçlarının güvenli iniş ve kalkışını, yolcu ve yük taşımacılığıyla birlikte bakım, ikmal ve park faaliyetlerinin yürütülmesini sağlayan, çeşitli yer ve hava yapılarından oluşan karmaşık bir altyapı sistemidir. Bu yapılar yalnızca uçak operasyonlarına hizmet etmekle kalmaz; terminal binaları, pistler, taksi yolları, apronlar, yer hizmetleri birimleri, hava trafik kontrol tesisleri ve ulaşım bağlantılarını da içeren bütüncül bir sistemi temsil eder (Horonjeff ve ark., 2010).

Günümüzde teknolojik gelişmeler ve yaşam kalitesinin artması, bireylerin ulaşım araçlarına erişimini kolaylaştırmıştır. Bu durum, havayolu taşımacılığını modern ulaşım sistemleri içinde en hızlı ve güvenli seçeneklerden biri haline getirmiştir. Uçakla seyahat; zaman tasarrufu, güvenlik ve konfor açısından önemli avantajlar sunarak küresel ölçekte yaygınlık kazanmıştır.

Özellikle Birinci ve İkinci Dünya Savaşları sonrasında havacılık sektörü, teknolojik ilerlemelerle büyük bir ivme kazanmıştır. Başlangıçta askeri amaçlarla geliştirilen havacılık teknolojisi, zamanla sivil havacılığı da kapsayacak şekilde genişlemiş ve bu dönüşüm sektörel büyümeyi hızlandırmıştır. Savaş dönemlerinde birçok devlet, uçakların etkinliğini fark ederek savaş sonrasında havacılık yatırımlarına yönelmiştir. Bu kapsamda, uçakların güvenli iniş-kalkış yapabileceği altyapıların geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütülmüş; özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrasında ABD başta olmak üzere birçok ülkede havaalanı üstyapı tasarımlarına yönelik ciddi bütçeler ayrılmıştır.

Başlangıçta kullanılan hafif uçaklar ve basit hava sahası altyapıları, zamanla daha ağır ve karmaşık uçaklara geçişle yetersiz hale gelmiştir. Bu doğrultuda, karayolu kaplama tekniklerinin havaalanlarında uygulanabilirliği üzerine çeşitli mühendislik çalışmaları yapılmış; zemin özellikleri, çevresel koşullar ve hâkim rüzgâr yönleri gibi faktörler değerlendirilerek grafiksel analiz ve standartlaştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Modern uçakların artan ağırlıkları ve iniş-kalkış frekansları, zemin-yük etkileşiminin mühendislik tasarımında öncelikli bir parametre haline gelmesine neden olmuştur. Bu durum, özellikle üstyapı sistemlerinde katman dayanımı ve deformasyon kontrolünün hassas biçimde değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Ayrıca, havaalanları yalnızca birer ulaşım noktası değil; aynı zamanda ekonomik kalkınma, uluslararası ticaret ve turizm hareketliliği açısından da stratejik altyapı unsurlarıdır. Bu nedenle, havaalanı tasarımında mühendislik yeterliliği kadar bölgesel planlama, iklim uyumu ve uzun vadeli altyapı yönetimi de büyük önem taşımaktadır.

Zemin kaplama malzemelerinin dayanım ömrü, yük aktarım performansı ve çevresel koşullara karşı dayanıklılığı üzerine yapılan kapsamlı çalışmalar, uçak teknolojisindeki gelişmelerle havaalanı altyapısı arasındaki uyum sorunlarını da ortaya koymuştur. Araştırmalar, hava aracı teknolojisinin hızlı gelişmesine karşın, havaalanı üstyapı sistemlerinin bu ilerlemeyi aynı ölçüde karşılayamadığını göstermektedir (Yoder ve Witczak, 1975).

Son yıllarda havaalanı üstyapı tasarımlarında sürdürülebilirlik kavramı da giderek önem kazanmaktadır. Malzeme seçimi, bakım sıklığı, karbon salınımı ve çevresel etki gibi unsurlar, kaplama sistemlerinin yalnızca yapısal değil, çevresel performans açısından da değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Bu doğrultuda ICAO, FAA ve AASHTO gibi uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen teknik standartlar, havaalanı kaplamalarının evrensel kriterlere uygun şekilde tasarlanmasını ve uygulama farklılıklarının ortadan kaldırılmasını amaçlamaktadır.

1.2. PAT (Pist, Apron ve Taksi Yolları) Sahası

Pist, havalimanlarında hava araçlarının güvenli bir şekilde iniş ve kalkışlarını gerçekleştirmesine olanak sağlayan, dikdörtgen biçiminde ve yük taşıma kapasitesine sahip kaplamalı bir yapıdır. Pist sistemleri, uçakların tekerlek yüklerini güvenli biçimde zemine aktaracak şekilde tasarlanır ve bu kapsamda kaplama kalınlıkları ve yapı özellikleri mühendislik esaslarına göre belirlenir (ICAO, 2018).

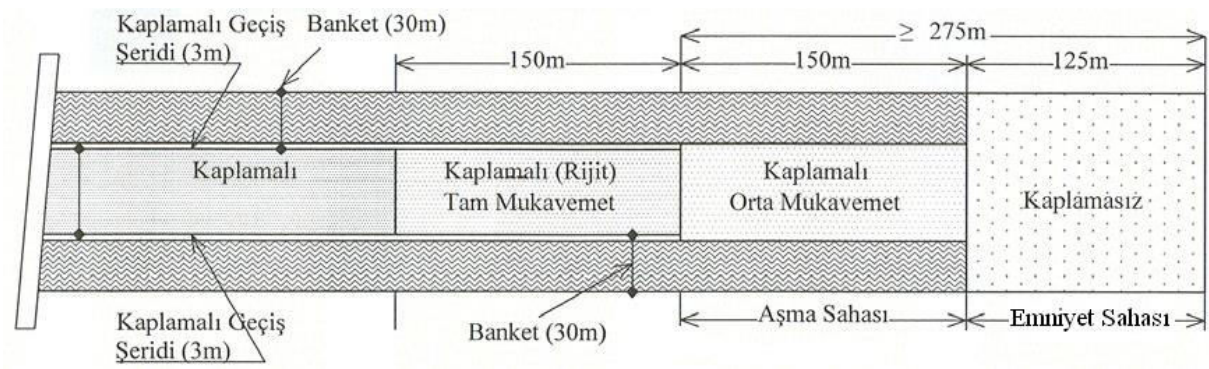
Pist yapısı sadece kaplamadan ibaret olmayıp, banketler, düzleştirilmiş alan ve yeterli drenaj sistemi ile birlikte bir bütün olarak planlanmalıdır. Bu yapı, olağan dışı durumlarda yangın söndürme, kurtarma ve karla mücadele ekiplerinin görev yapabileceği şekilde boyutlandırılmalı ve uçak sapmalarında da destek sağlayabilmelidir (ICAO, 1983).

Pist sonlarına yakın bölgelerde, sürekli veya tekrarlı jet balastı etkilerine karşı erozyonu azaltmak amacıyla tasarlanmış rüzgâr yastıkları (blast pads) yer alır. Bu alanlar kaplamalı veya çimle kaplanmış yüzeyler olabilir; uçağın operasyonel kullanımı için değil, pistin yapısal bütünlüğünü korumak amacıyla kullanılır (ICAO, 2009).

Uçuş güvenliği açısından, pistlerin her iki ucunda yer alması gereken Pist Sonu Emniyet Alanları RESA (Runway End Safety Area), olası acil durumlarda uçakların güvenli duruşunu sağlamak ve kazaları önlemek amacıyla oluşturulmuş alanlardır. RESA alanları, uluslararası standartlara göre boyutlandırılır ve genellikle kaplamalı ya da stabilize yüzeylerden oluşur. Resim 1.1’de Çukurova Havalimanı pisti ve RESA alanı gösterilmiştir. Resim 1.2’de banket ve emniyet sahasından oluşan rijit kaplama kesitleri gösterilmiştir (ICAO, 2010; T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı [UAB], 2016).



Resim 1. 1. Çukurova havalimanı pist ve taksi yolunun görünümü (URL-1, 2025)



Resim 1. 2. Pist kaplamalı saha gereksinimi (Kuloğlu ve ark., 2007)

Havalimanlarında hava araçlarının park edilmesi, akaryakıt ikmali, yolcu, yük, posta ve kargo operasyonlarının gerçekleştirilmesi ile bakım ve yer hizmetlerinin sunulması amacıyla tasarlanan alanlara apron adı verilmektedir. Apron alanları, havalimanı operasyonlarının güvenli, düzenli ve hızlı şekilde yürütülmesini sağlayan temel yapı bileşenleri arasında yer almaktadır.

Apronlar, kullanım amaçlarına göre farklı kategorilere ayrılmaktadır. Bunlar arasında:

- Yolcu Apronu
- Park Apronu
- Kargo Apronu
- Bekleme (Stand-by) Apronu
- Helikopter Apronu gibi türler yer almaktadır. Her havalimanında bu apron türlerinin tamamı bulunmayabilir. Apron yapılarının türü ve sayısı, havaalanının kapasitesi, jeopolitik konumu, şehrin nüfusu ve hizmet profili gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmektedir (UAB, 2016).

Apronlar yalnızca uçakların parklandığı alanlarla sınırlı değildir. Bu yapılar;

- Apron taksi rutları (taxi-lane),
- Apron servis yolları,
- Yer hizmetleri kuruluşlarının ekipman park alanları,
- Bakım ve onarım hizmetlerinin yürütüleceği özel bölümler gibi yapı unsurlarını da kapsar. Dolayısıyla apron sistemleri hem hava aracı operasyonlarının verimliliği hem de havaalanı zemin trafiğinin güvenliği açısından bütüncül şekilde planlanmalıdır (UAB, 2016). Resim 1.3'te Ülkemizde son dönemde inşa edilen Çukurova Havalimanına ait apron sahası yer almaktadır.



Resim 1. 3. Çukurova havalimanı apron sahası görünümü (URL-2, 2025)

Uçakların taksi yapmaları için hazırlanmış ve havalimanında bulunan apron bölgesi ile pist bölgesi arasındaki bağlantıyı sağlayan yapılardır. Taksi Yolu sahaları da pist ve apron sahalarının yapısal özelliklerini taşımaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde Türkiye’de yapılan veya yapılması planlanan herhangi bir havalimanı tasarımına ait tasarım yöntemi ve bu tasarım için gerekli olacak gerekli olacak kazı işlemlerinden başlayıp en üst tabaka serimine kadar sahada yapılacak inşaat işlemleri ulusal ve uluslararası standartlar ele alınarak incelenecektir. Aynı zamanda tasarımda kullanılacak malzemeler ve bu malzemeler üzerinde yapılacak deneyler standartlar göz önüne alınarak incelenmiştir.

2.1. Havalimanı Üstyapı Tasarım Metotlarının Tarihsel Gelişimi

Havacılık alanında yaşanan ilk teknik gelişmelerin ardından, havaalanı üstyapılarının tasarımı için çeşitli mühendislik yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmaların öncüsü olan kuruluşların başında Amerikan Mühendisler Kurulu (U.S. Army Corps of Engineers) gelmektedir. Kurulun hazırladığı yöntemler, havaalanı altyapılarının tasarımı ve değerlendirilmesi sürecine sistematik bir yaklaşım kazandırmıştır (Horoñjeff ve ark., 2010).

Havaalanı üstyapılarının taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla 1956 yılında ICAO (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) tarafından LCN (Load Classification Number – Yük Sınıflandırma Sayısı) sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, havaalanı kaplama sistemlerinin hava araçlarıyla uyumlu olup olmadığını değerlendirmek için kullanılan ilk kapsamlı yöntemlerden biridir (ICAO, 1956).

1965 yılına gelindiğinde LCN sisteminin eksiklerini gidermeye yönelik daha gelişmiş versiyonlar sunulmuş ve yöntemin uygulama alanı genişletilmiştir. Ancak zamanla bu yöntemin bazı sınırlılıklar taşıdığı anlaşılmış ve ICAO tarafından 1977 yılında LCG (Load Classification Group – Yük Sınıflandırma Grubu) yöntemi geliştirilmiştir. Bu sistem, kaplama sınıflandırmasında daha esnek bir gruplandırma yaklaşımı sunarak alternatif bir değerlendirme imkânı sağlamıştır (ICAO, 1977).

1980’li yılların başında ise uluslararası sivil havacılık faaliyetlerinin artması ve hava trafiğinin karmaşıklaşması ile birlikte daha kapsamlı bir sistem gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaç doğrultusunda ICAO tarafından geliştirilen ve günümüzde de yaygın olarak kullanılan ACN/PCN (Aircraft Classification Number / Pavement Classification Number – Uçak Sınıflandırma Sayısı / Pist Taşıma Kapasitesi Sayısı) yöntemi uygulamaya alınmıştır. Bu sistem hem uçakların yapısal yük sınıflandırmasını hem de havaalanı üstyapılarının

taşıma kapasitesini karşılıklı olarak değerlendirmeye olanak tanıyan modern bir yaklaşımdır (ICAO, 1983).

2.2. Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemleri

Havaalanı üstyapı tasarımı, genel olarak deneysel yöntemler ve çözümsel (analitik) yöntemler başlıkları altında incelenmektedir. Deneysel yöntemler, geçmiş yıllarda yapılan gözlemler ve uygulamalardan elde edilen tecrübelerle dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde, belirli yük ve zemin koşulları için hazırlanmış çizelgeler ve tasarım tabloları yardımıyla üstyapı katmanlarının kalınlıkları belirlenmektedir. Deneysel yaklaşımlar, sahada uzun yıllar boyunca edinilmiş uygulama deneyimlerinin sistematik hale getirilmiş biçimidir.

Öte yandan çözümsel (analitik) olarak da adlandırılan yöntemler, daha karmaşık mühendislik hesaplarına dayanmaktadır. Bu yöntemler yalnızca geçmiş deneyimlere değil, aynı zamanda malzeme özellikleri, yükleme koşulları, üstyapı tabakalarının taşıma kapasitesi ve iklimsel değişkenler gibi pek çok parametrenin hesaba katılmasını sağlar. Analitik yöntemlerde, yük etkileri altında tabakaların gerilme ve deformasyon davranışları incelenerek optimum kalınlıklar belirlenir. Bu durum, deneysel yöntemlere kıyasla daha güvenilir ve hassas sonuçlar elde edilmesini mümkün kılar.

Bu yöntemler, tarihsel olarak en yaygın şekilde kullanılan tasarım yaklaşımlarıdır. Zamanla teknolojik gelişmelere bağlı olarak LCN (Load Classification Number) ve ACN/PCN (Aircraft Classification Number / Pavement Classification Number) yöntemleri de uygulamaya dâhil edilmiştir. Bu yöntemler, daha kapsamlı analiz imkânı sunarak havaalanı üstyapı sistemlerinin performansını artırmaya yönelik çözümler sağlamaktadır.

Türkiye’de ise havaalanı kaplama tasarımında birden fazla yöntem birlikte kullanılmakta olup; projeye, zemin koşullarına ve uçak türlerine bağlı olarak yöntemler arasında entegrasyon sağlanmaktadır (Okur, 2008).

Havaalanı tasarımları gerçekleştirilirken pist, apron ve taksi yolu gibi kritik alanların kaplanmasında genellikle esnek kaplama, rijit kaplama ve kompozit kaplama olmak üzere üç temel yöntem uygulanmaktadır. Bu kaplama türlerinin seçimi, öncelikle PAT sahasına (Pist–Apron–Taksi yolu) gelecek yük miktarına ve havaalanı sahasının kullanım amacına bağlı olarak belirlenmektedir. Ancak yapı kullanım amacı tek başına belirleyici değildir; ekonomik koşullar, maliyet-etkinlik analizi ve yerel çevresel şartlar da üstyapı tasarımında

dikkate alınması gereken önemli faktörler arasında yer almaktadır. Üstyapı tasarımında mühendislik açısından en temel hususlardan biri, taşıma yükünün zemin tabakalarına doğru düzgün bir şekilde aktarılmasıdır.

İklim koşulları da kaplama türü seçiminde belirleyici bir unsurdur. Esnek üstyapı malzemeleri, sıcak iklim koşullarında iz bırakma (rutting), soğuk iklim koşullarında ise çatlama (cracking) gibi deformasyon davranışları sergileyebilir. Bu tür mevsimsel problemler göz önüne alındığında rijit kaplamalar, iklim kaynaklı bozulmalara karşı daha dayanıklı olup uzun ömürlü çözümler sunmaktadır. Bu nedenle, özellikle iklimsel değişkenliğin yüksek olduğu bölgelerde rijit kaplama sistemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir (Kuloğlu, N. ve Ekmen, R., 1996).

2.3. Havaalanlarında Esnek Üstyapı Tasarımı

Esnek üstyapı sistemleri, havaalanlarında uçak yüklerinin zemine güvenli ve dengeli şekilde aktarılmasını sağlayan, katmanlı yapıdan oluşan mühendislik çözümleridir. Bu sistemler, üstten alta doğru sırasıyla kaplama tabakası, temel, alt temel ve taban zeminden meydana gelir. Her katman, kendinden alttaki katmana yükleri kademeli olarak iletecek şekilde tasarlanır. Esnek üstyapıların en temel özelliği, deformasyona karşı elastik davranış göstermeleri ve yükleri daha geniş bir alana yayarak tabana iletmeleridir (Horonjeff ve ark., 2010).

Esnek üstyapı tasarımı için geliştirilen yöntemler arasında tarihsel olarak CBR (California Bearing Ratio – Kaliforniya Taşıma Oranı) Yöntemi en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntemde, zemin taşıma kapasitesi CBR deneyleri ile belirlenir ve bu değere göre kaplama tabaka kalınlıkları grafiksel yöntemlerle saptanır. CBR yöntemi, uygulama kolaylığı ve pratikliği nedeniyle özellikle orta ve düşük kapasiteli havaalanlarında tercih edilmektedir. Ancak sınırlı parametreye dayanması nedeniyle, karmaşık uçak trafiğinin bulunduğu büyük havaalanlarında yetersiz kalabilmektedir (Yoder ve Witczak, 1975).

1980’li yılların başlarında ICAO tarafından önerilen ACN/PCN (Aircraft Classification Number / Pavement Classification Number – Uçak Sınıflandırma Sayısı / Üstyapı Taşıma Kapasitesi Sayısı) yönteminde amaç, uçağın sahip olduğu yük oranını ve üstyapının dayanımını sınıflandırmaktır (Ashford ve Wright, 1992).

ICAO'nun sivil havacılık ve uluslararası uçuş standartları açısından yayımlamış olduğu kurallarda, ağırlığı 5700 kg'dan fazla olan uçaklar için tasarlanan üstyapıların taşıma kapasitesinde ACN/PCN yönteminin kullanılması gerektiği belirtilmektedir (Bingöl, 2000).

Uçak üreticileri, ACN/PCN yönteminin uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla, ürettikleri uçakların teknik özellikleri içerisinde hem esnek üstyapılar hem de rijit üstyapılar için tanımlanan dört farklı zemin taşıma gücü sınıfına göre düzenlenmiş veriler sunmaktadır. Bu kapsamda her uçak için hem maksimum park ağırlığı hem de operasyon sırasındaki boş ağırlığı esas alınarak iki farklı yük düzeyine göre ACN değeri hesaplanmaktadır.

Bu değerlere, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından yayımlanan Havaalanı Tasarım El Kitabı (Aerodrome Design Manual), Doc-9157-AN/90 Ek-5 içinde yer alan tablolar aracılığıyla ulaşılabilmektedir. Söz konusu tablolar, çok sayıda uçağa ait ACN değerlerini standart zemin sınıfları için ayrıntılı biçimde sunmaktadır (ICAO, 1983).

Modern havaalanı tasarımlarında ise FAA (Federal Aviation Administration) yöntemi daha gelişmiş bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntem yalnızca zemin dayanımını değil, aynı zamanda uçak tekerlek yükleri, iniş takımı düzeni, yıllık kalkış sayısı, zemin sınıflandırması, drenaj koşulları ve iklim etkileri gibi çok sayıda parametreyi kapsamaktadır. FAA yöntemi, ESWL (Equivalent Single Wheel Load – Eşdeğer Tek Tekerlek Yüğü) kavramı üzerinden yük analizini gerçekleştirir ve tasarım grafiklerinden faydalanan katman kalınlıklarını belirler. FAA yöntemi, yoğun trafiğe sahip havaalanları için daha güvenilir ve ayrıntılı çözümler sunmaktadır (FAA, 2009).

Bunlara ek olarak Asphalt Institute, Shell yöntemi, Kanada ve Fransa pratikleri de esnek üstyapı tasarımında başvurulan yöntemler arasında yer almaktadır. Asphalt Institute Yöntemi, asfalt kaplamaların mekanik davranışlarını temel alarak katmanlar arası yük geçişini esas alır. Shell Yöntemi ise elastik tabaka teorisi temelinde tasarım yapar ve tekrarlı yük etkilerinin deformasyona etkisini hesaplar. Bu yöntemler, genellikle diğer metotlarla birlikte ek yöntem olarak kullanılmakta ya da bölgesel zemin koşullarına uyarlanarak uygulanmaktadır (Shell International ve Asphalt Institute, 1991).

Sonuç olarak havaalanlarında esnek üstyapı tasarımında kullanılacak yöntemin seçimi; uçak trafiğinin yoğunluğu, zemin özellikleri, iklim koşulları, bütçe olanakları ve proje ölçeği gibi kriterlere göre belirlenmektedir. Her yöntem farklı avantajlar sunmakla birlikte, mühendislik kararları doğru verilmediği takdirde tasarım yetersiz kalabilir. Bu nedenle, tasarım yaklaşımı seçilirken çok parametreliliği bir değerlendirme yapılması; üstyapının dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği açısından önemlidir (Kök, 2008).

Havaalanı üstyapılarında uygulanacak kaplama kalınlıkları, hava taşıtlarının iniş takımı özelliklerine göre belirlenmektedir. Bu doğrultuda çeşitli standart ölçütler geliştirilmiştir. Tek tekerlekli iniş takımlarına sahip hava araçları için özel bir sınıflandırmaya gerek duyulmazken; çift tekerlekli ve çift sıra (tandem) düzenli iniş takımlarında, tekerlekler arası mesafeler ve tekerlek sıraları arası mesafeler esas alınmaktadır. Hafif hava araçları için bu değerler 20 inç (51 cm) ile 45 inç (114 cm) aralığında, ağır hava araçlarında ise 30 inç (76 cm) ile 55 inç (140 cm) aralığında tanımlanmıştır. Geniş gövdeli uçaklar çoğunlukla çift sıra iniş takımı olarak sınıflandırılmakta ya da bu tür uçaklar için özel hesap eğrileri kullanılmaktadır (FAA, 2009).

2.4. Havaalanlarında Rijit Üstyapı Tasarımı

Beton kaplama, elastik zemine göre daha rijit bir yapı sergileyerek yükleri doğrudan geniş bir alana yayar ve zemine iletir. Bu sistemde kaplama, zemin üzerinde bir kiriş gibi davranarak taşıma yüklerini daha verimli şekilde dağıtır. Bu yönüyle rijit üstyapılar, yük aktarımı açısından esnek sistemlere göre daha yüksek performans sunmaktadır. Bu yapı türü, havaalanlarında pist, apron ve taksi yolları gibi yoğun yüke maruz kalan alanlarda tercih edilmekte ve yüksek taşıma kapasitesi ile uzun ömürlü performans sağlamaktadır (Yoder ve Witczak, 1975).

Rijit üstyapı tasarımı, kaplama yüzeyinde oluşan gerilmeleri temel alarak geliştirilen bir mühendislik yaklaşımıdır. Bu gerilmeler; hava aracının ağırlığı, iniş takımı düzeni, tekerlek basınçları ve hava aracının hareket ettiği rota (pist, apron, taksi yolu) gibi çeşitli etkenlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca tekrarlayan yük etkisi (trafik yükü frekansı) de kaplama performansını doğrudan etkileyen faktörler arasında yer alır (Yoder ve Witczak, 1975).

Karayolu kaplama sistemlerinde de rijit üstyapı tasarımı kullanılmakla birlikte, havaalanlarında uygulanan rijit sistemler karayolu uygulamalarından önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle havaalanlarında uçak lastik temas noktalarının sabit olması, belirli alanlarda yoğun gerilme birikimine neden olur. Bu durum, rijit kaplamanın yük yayılım kapasitesi ile birlikte değerlendirilmesini gerektirir (Kök, 2008).

Esnek, rijit ve kompozit üstyapı sistemleri arasında tasarım yaklaşımı bakımından farklılıklar bulunmaktadır. Bu sistemlerin her biri için kullanılacak malzeme türleri, tasarım deneyleri ve analiz yöntemleri farklıdır. Bununla birlikte kazı, zemin dolgusu ve alt temel

alışmaları için belirli deneysel prosedürler ortak bir standart çerçevesinde uygulanmaktadır. Türkiye’deki havaalanı projelerinde bu yapı sistemleri, havaalanının kullanım amacı, uçuş trafiği yoğunluğu ve zemin özellikleri dikkate alınarak seçilmektedir. Üstyapının altında yer alacak dolgu, alt temel ve temel tabakaları da malzeme tipine göre sınıflandırılarak projelendirilir (Kök, 2008; AYGM, 2020).

2.5. Havaalanı Tasarımında Kazı İşlemleri

Ülkemizde yer alan havaalanları genel anlamda belirli bir idarenin denetiminde, yerli veya yabancı iştirakler tarafından inşa edilmektedir. Havaalanı üstyapı tasarım sürecinde, proje alanının belirlenmesinin ardından gerçekleştirilen ilk uygulamalardan biri kazı çalışmalarının yürütölmesidir. Bu alışmalar, zemin özelliklerine bağlı olarak farklı sınıflandırmalara tabi tutulmaktadır.

Kazı işlemleri sonucunda elde edilen malzeme, yapılan deney sonuçlarına göre dolgu malzemesi olarak tekrar kullanılabilir. Ancak bu malzeme ister havaalanı sahası içerisinden ister dış kaynaklardan temin edilsin, belirli fiziksel ve kimyasal kriterleri karşılamak zorundadır. Kullanılacak malzemede; organik içerikler (ağaç, çalı, kök, kömür vb.), bataklık karakterli topraklar, yüksek oranda toksik veya endüstriyel atık içeren zeminler, çözünebilir bileşikler (örneğin %20’den fazla jips ya da kaya tuzu içeren zeminler) bulunmamalıdır. Bu tür içerikler, zemin taşıma gücünü ve yapısal bütünlüğü olumsuz etkileyerek dolgu amacıyla kullanılmalarını uygunsuz hâle getirir (UAB, 2020).

2.5.1. Havaalanı kazı işlemleri esnasında yapılan deneyler

Havaalanı üstyapı tasarımlarında, tasarım yapılacak sahanın belirlenmesinin ardından kazı çalışmaları neticesinde elde edilen zemin malzemelerinin tekrar kullanım uygunluğunu değerlendirmek amacıyla çeşitli deneyler uygulanmaktadır. Bu deneyler, dolgu tabakasında kullanılacak malzemelerin teknik özelliklerinin, su içeriklerinin ve sıkışma performanslarının belirlenmesini sağlar.

2.5.1.1. Likit limit deneyi

Likit limit deneyi, zeminin sıvılaşıma eğilimi hakkında bilgi veren temel bir deney yöntemidir. Bu deneyde, zeminin sıvılaşıma değerini belirlemek için iki farklı yöntem kullanılır: Casagrande yöntemi ve koni batma yöntemi. Zemin mühendisliği açısından, bir zeminin su içeriği ile plastik davranışları arasındaki ilişki, mühendislik tasarımları açısından büyük önem taşımaktadır (Dipova, 2011).

Zeminlerin sınıflandırılması ve taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla kullanılan en önemli parametrelerden biri likit limit değeridir. Likit limit, bir zeminin plastik hâlden sıvı hâle geçtiği minimum su içeriği olarak tanımlanır ve zeminlerin mühendislik karakteristiklerini anlamak açısından temel bir testtir. Resim 2.1’de Casagrande yöntemi kullanılarak likit limit tayininde kullanılan cihazın görseli verilmiştir (Holtz ve Kovacs, 1981).



Resim 2. 1. Casagrande likit limit cihazı (URL-3, 2025)

2.5.1.2. Plastik indeksi deneyi

Plastik indeks deneyi, havaalanı üstyapılarında kullanılacak zemin malzemelerinin plastik davranışlarını, su içeriği aralığına bağlı olarak değerlendiren bir deney yöntemidir (ASTM, 2011). PI değeri (Plastik İndeksi), bir zeminin plastik özelliklerini ve deformasyona yatkınlığını belirlemede kullanılır.

Plastik indeks, zeminlerin mühendislik açısından nasıl davranacağını anlamada kritik bir gösterge olup havaalanı tasarımlarında stabilite analizlerinde önemli bir rol oynar. PI değeri düşük olan zeminler, havaalanı pistleri için daha uygun kabul edilir; çünkü bu tür zeminler deformasyona karşı daha dirençlidir (Das, 2013).

Eğer bir zeminin PI değeri çok yüksekse, bu zeminler suya duyarlıdır ve şişme-büzülme problemleri gösterebilir. Bu da PAT sahalarında çatlaklara ve yüzey bozulmalarına neden olabilir (Holtz ve Kovacs, 1981). Bu nedenle, PAT sahalarının uzun vadeli performansı için PI değeri 10'un altında olan zeminler tercih edilmeli veya uygun zemin stabilizasyon yöntemleri uygulanmalıdır. Resim 2.2'de plastik indeks deney aletlerinin görseli verilmiştir (AASHTO, 2021).



Resim 2. 2. Plastik indeks deneyi (URL-4, 2025)

2.5.1.3. Standart proktor deneyi

Havaalanı zeminlerinde dolgu yapılırken hem sıkıştırma işlemi öncesinde hem de sonrasında dolgu malzemesinin geçirgenliği yüksek, ancak dayanımı düşük özellikler sergilediği gözlemlenmektedir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen standart Proktor deneyinin temel amacı; dolgu malzemesinin optimum su muhtevasını ve bu içerikte elde edilebilecek maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemektir.

Bu deneyde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, sıkıştırma işlemi sırasında zemindeki su muhtevasının uygun aralıkta olmasıdır. Su içeriği düşük olursa taneler arası sürtünme artar ve sıkışma zorlaşır; su içeriği yüksek olursa zemin içinde hava kalır ve bu da sıkışmayı engeller. Dolayısıyla, optimum su içeriği değerinin tespiti, dolgu kalitesinin ve taşıma kapasitesinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Resim 2.3.'de standart proktor değerinin tayininde kullanılan deney aletleri verilmiştir (URL-5, 2025).



Resim 2. 3. Standart proktor deneyi (URL-6, 2025)

2.6. Havaalanları Dolgu İşlemleri

Havalimanı altyapı projelerinde, özellikle pist, apron ve taksi yolu (PAT sahaları) gibi unsurların inşasında zemin iyileştirme ve dolgu çalışmaları büyük önem arz etmektedir. PAT sahaları, uçakların güvenli kalkış, iniş ve yer hareketlerini sağlayan en kritik

bölgelerdir. Bu nedenle taşıma kapasitesi yüksek, oturma riskleri minimuma indirgenmiş bir zemin yapısına ihtiyaç duyulmaktadır.

Dolgu işlemleri hem doğal zemin yetersizliğinin giderilmesi hem de tasarım kotlarına ulaşılması amacıyla uygulanmaktadır. Bu işlemler sayesinde, PAT sahalarının üzerindeki kaplama sistemlerinin stabilitesi sağlanmakta ve yapı yükleri uygun şekilde zemine aktarılmaktadır. Zemin taşıma gücünün yetersiz olduğu durumlarda, uygun şekilde sınıflandırılmış dolgu malzemeleri kullanılarak yük dağılımı iyileştirilir (FAA, 2021).

Havaalanı üstyapı tasarımlarında don etkisinin görüldüğü bölgelerde kullanılacak dolgu malzemelerinin özellikleri, belirli deney standartları çerçevesinde değerlendirilmelidir. Bu bağlamda Tablo 2.1’de belirtilen sınır değerler esas alınır.

Tablo 2. 1. Toprak dolgu malzemeleri özellikleri (UAB, 2020)

Deney	Şartname Limiti	Deney Standardı
Likit Limit (LL) %	≤ 60	TS 1900–1, AASTHO T 89
Plastisite İndeksi (PI) %	≤ 35	TS 1900–1, AASTHO T 90
Maksimum kuru birim ağırlık (standart proktor)	$\geq 1,450 \text{ t/m}^3$	TS 1900–1, AASTHO T 99

Havaalanı alt temel ve taban malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen CBR (California Bearing Ratio) deneyi, bu malzemelerin taşıma gücünü belirlemek amacıyla uygulanır. CBR testi hem laboratuvar ortamında sıkıştırılmış zemin örnekleri üzerinde hem de sahada düz yüzeylerde yapılabilmektedir. Özellikle ince taneli zeminlerde daha sağlıklı sonuçlar veren bu deney, zaman alıcı ve maliyetli olması nedeniyle bazı projelerde sınırlı şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle, ilave olarak başka deneysel parametreler de geliştirilmiştir (Şeker ve Selçuk, 2018).

Zemin dolgusu, doğal veya yapay kökenli kırıntılı malzeme ile yapılan ve her biri yaklaşık 20 cm kalınlığında sıkıştırılmış katmanlar hâlinde gerçekleştirilen bir işlemdir. Dolgu serim yöntemi; PAT sahasının iklimsel koşullarına, kullanılacak malzemenin granülometrik yapısına ve yerel zemin özelliklerine bağlı olarak belirlenir (UAB, 2020).

2.7. Havaalanında PAT Sahası ve Çevre Drenajı

Yer altı suyu ve yüzey suyu, uçakların operasyonel güvenliğini doğrudan etkileyerek ciddi riskler oluşturabilir. Yetersiz veya hatalı drenaj uygulamaları, sahada uzunlamasına eğimlerin ve enine eğim hatalarının neden olduğu kalıcı su birikintilerine yol açabilir. Havalimanlarının güvenli ve kesintisiz hizmet sunabilmesi için hem yüzeysel akışlardan kaynaklanan hem de yer altı su düzeyinden doğan suların etkili bir şekilde uzaklaştırılması gereklidir. Bu nedenle pist, apron ve taksi yolları (PAT sahası) ile çevre alanlar etkin bir drenaj sistemine sahip olmalıdır (UAB, 2020).

Havalimanı zemin etütlerinde yer altı suyu varlığına rastlanması durumunda, drenaj ihtiyacının belirlenmesi amacıyla çeşitli sondaj çalışmaları yapılmalıdır. FAA tarafından yayımlanan teknik düzenlemelere göre sondaj sayısı, derinliği ve yerleşim noktaları, zemin profiline ve topografik eğime göre belirlenmektedir. Bu çalışmalar sonucunda yüzey altı su koşulları ayrıntılı şekilde analiz edilerek drenaj projeleri şekillendirilmektedir (UAB, 2020).

FAA'nın ilgili teknik düzenlemeleri doğrultusunda pist ve çevre yollarında drenaj sistemlerinin etkinliğinin sağlanabilmesi için filtrasyon ve geçirgenlik (permeabilite) kriterlerinin karşılanması zorunludur. Bu kapsamda, drenaj şiltelerinde kullanılacak malzemenin;

- Zemin tanelerini geçirmeyecek şekilde filtreleme özelliğine sahip olması,
- Aynı zamanda yeterli su geçirgenliğine (permeabiliteye) sahip olması beklenir.

Bu iki teknik kriter birlikte değerlendirilerek, drenaj sistemlerinde kullanılacak dolgu veya filtre malzemesinin uygunluğu kontrol edilmelidir (FAA ve Mühendisler Birliği, 1970).

2.8. PAT Sahaları Temel Altı ve Temel Tabakası

Havalimanı projelerinde, pist, apron ve taksi yolu gibi PAT sahalarının alt yapısında yer alan her bir katmanın mühendislik gereklerine uygun şekilde tasarlanması büyük önem taşır. Bu sahaların taşıyacağı yükler, yalnızca hareket hâlindeki uçaklardan değil; uzun süreli park hâlindeki uçakların statik yüklerinden, çevresel etkilerden ve zemin deformasyonlarından da kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kaplama sistemini taşıyan taban zemininin fiziksel ve mekanik özellikleri, yapının bütünlüğü açısından kritik rol oynar.

PAT sahalarının alt tabakaları, genellikle doğal zemin iyileştirilmeden önce uygulanmakta olan taban tabakası, alt temel tabakası ve temel tabakası olmak üzere üç ana katmandan oluşur:

- **Taban tabakası**, doğal zeminin taşıma gücünü iyileştirmek ve oturma risklerini azaltmak amacıyla uygulanır. Bu katman, çoğunlukla zemine doğrudan serilen, geçirgenliği yüksek ve sıkıştırılabilirliği düşük malzemelerden oluşur.
- **Alt temel tabakası**, taban ile temel arasında geçiş sağlayan ve yükün kademeli olarak aktarılmasına yardımcı olan bir ara katmandır. Kırmataş, stabilize malzeme veya iri granüllü dolgu ile oluşturulur.
- **Temel tabakası**, kaplama sistemine doğrudan destek sağlayan, en üstteki taşıyıcı tabakadır. Malzeme olarak yüksek mukavemetli, granülometrik dağılımı kontrollü kırmataş veya çimentolu stabilize malzemeler tercih edilir.

Bu üç katmanın işlevi, kaplamanın maruz kalacağı yüklerin daha derin katmanlara düzgün bir şekilde iletilmesini ve zemine yayılmasını sağlamaktır. Böylece esnek veya rijit kaplamaların performansı artırılır ve yapının ömrü uzatılır.

Tablo 2. 2. Temel altı ve temel tabakaları malzeme deneyleri (UAB, 2020)

Deney adı	Şartname Limiti	Deney Standardı
Aşınma (Los Angeles) Nispeti	En çok %40	TS EN 1097-1, AASHTO T 96
Don Dayanımı Na ₂ SO ₄ Değeri	En çok %15	TS EN 1367-1, AASHTO T 104
Likit Limiti (LL)	En çok %25	TS 1900-1, AASHTO T 89
Plastik indeksli (PI)	En çok %6	TS 1900-1, AASHTO T 90
Laboratuvar CBR değeri (Yaş CBR)	En az %50	TS 1900-1, TS 1900-2 AASHTO T 193, ASTM D 1883
Şişme Yüzdesi	En çok %0,5	
Organik madde Tayini	En çok %1	TS 8336, AASHTO T 194

Tasarım sürecinde; her tabakanın kalınlığı, malzeme tipi, sıkıştırma seviyesi ve drenaj özellikleri dikkate alınarak mühendislik analizleri yapılır. Özellikle drenaj kapasitesi düşük bölgelerde, temel ve alt temel tabakalarının geçirgenliği yüksek olmalı; aksi hâlde

zemin suya doyararak taşıma kapasitesini kaybedebilir. Bu nedenle temel tabakası yalnızca yük taşıyıcı değil; aynı zamanda yapısal su yönetimi sağlayan bir sistem olarak da değerlendirilmelidir. Tablo 2.2.'de temel altı ve temel tabakasında kullanılacak malzemeler üzerinde uygulanan deneyler ve şartname limitleri verilmiştir (UAB, 2020).

2.8.1. Temel altı ve temel tabakası deneyleri

PAT sahalarına ait temel tabakalarının ve alt temel tabakalarının tasarımında kullanılacak malzemenin mühendislik uygunluğu, çeşitli laboratuvar ve arazi deneyleri ile belirlenmektedir. Bu deneyler hem malzeme seçiminde hem de yerinde uygulama kalitesinin değerlendirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

2.8.1.1. Elek analizi deneyi

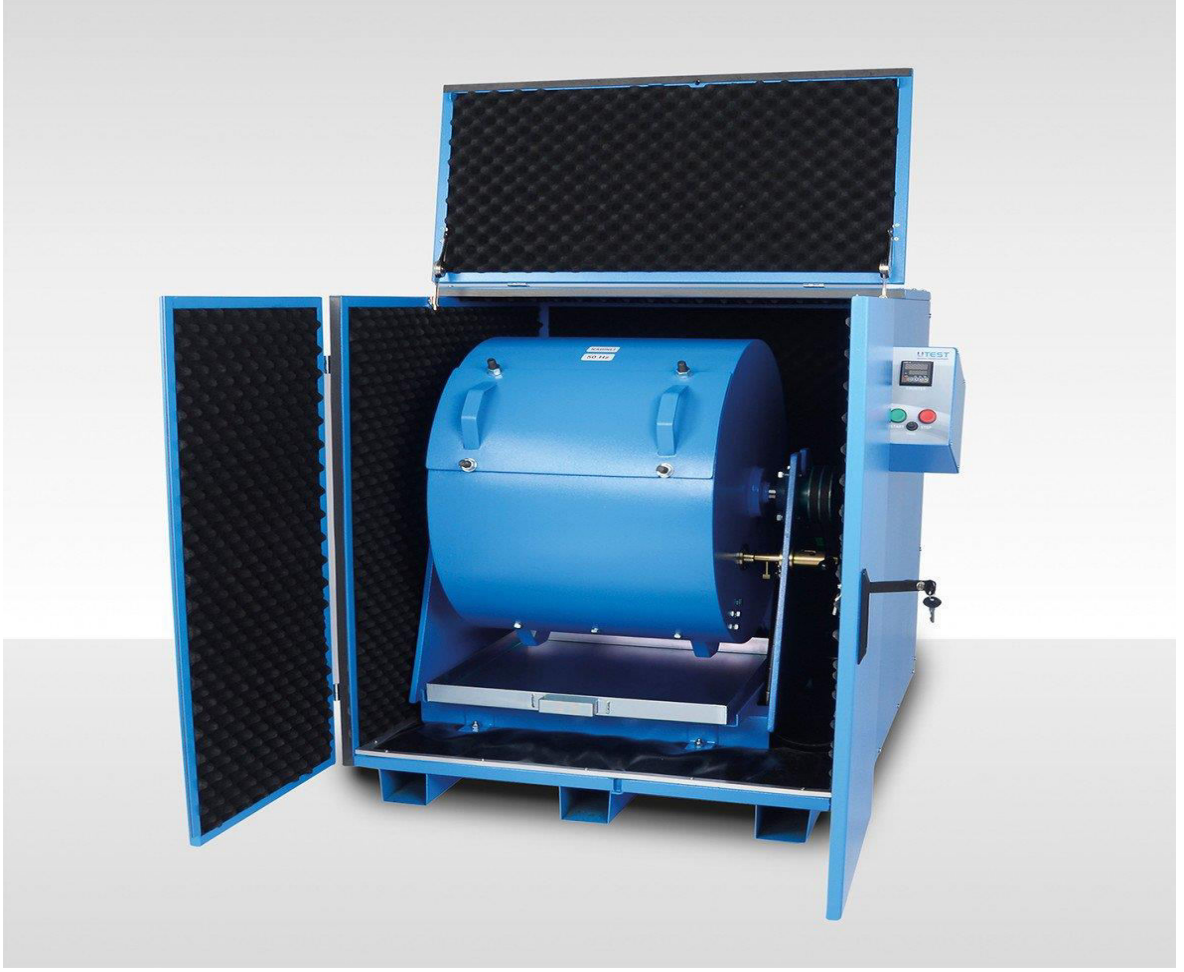
Elek analizi deneyi, PAT sahalarında kullanılacak temel ve temel altı malzemelerinin tane büyüklüğü dağılımını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen önemli bir deneysel yöntemdir. Bu analizle birlikte, malzemenin derecelenmiş yapıya sahip olup olmadığı, iri veya ince taneli özellik gösterip göstermediği belirlenir. Dolayısıyla bu deney, drenaj kapasitesinin, sıkışabilirliğin ve yük yayılım davranışının değerlendirilmesinde doğrudan belirleyici rol oynar. Resim 2.4'te elek analizi deney aletleri verilmiştir (Karayolları Genel Müdürlüğü [KGM], 2021).



Resim 2. 4. Elek analizi deneyi görünümü (URL-7, 2020)

2.8.1.2. Los Angeles deneyi ve şişme yüzdesi deneyi

Havaalanı üst yapı tasarımlarında kullanılacak malzemelerin darbe aşınmaya maruz bırakılarak aşınma oranının tespiti için yapılan deneydir. Silindirik bir kabın içine konulacak malzemelerin dönme etkisine maruz kaldıktan sonra malzemelerin aşınma oranları bulunur. Resim 2.5’te Los Angeles deney cihazı görseli verilmiştir (Çevrim, 2017).



Resim 2. 5. Los Angeles deney cihazı (URL-8, 2025)

Şişme yüzdesi deneyi, zeminin su ile temas ettiğinde ne ölçüde hacim değiştirdiğini belirlemek amacıyla uygulanır. Bu deney, özellikle kil oranı yüksek olan, ince taneli ve plastiklik özelliği bulunan zeminlerde önem taşır. Çünkü bu tür zeminler suyu emerek hacim artışına (şişmeye) neden olabilir ve bu durum kaplama sisteminin stabilitesi açısından ciddi sorunlar doğurabilir.

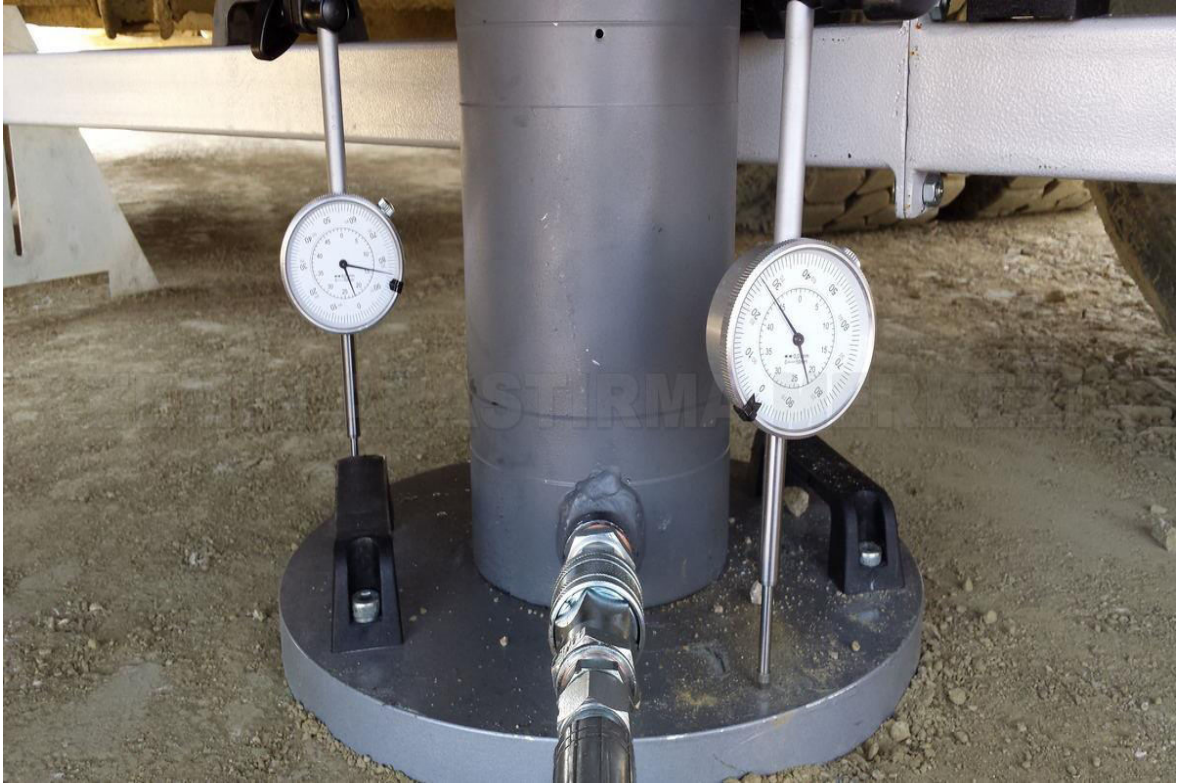
Zemin numunesi, standart çap ve yüksekliğe sahip bir kalıp içinde, su ile temas edecek şekilde belirli bir süre bekletilir. Deney süresince zeminin yüksekliğindeki değişim hassas ölçüm cihazları ile takip edilerek şişme miktarı milimetre cinsinden tespit edilir. Bu değer, daha sonra yüzdelik oranla ifade edilerek şişme yüzdesi hesaplanır.

Şişme eğiliminde olan zeminler, havaalanı PAT sahalarının altında yer alacak temel altı ve temel tabakalarında kullanılmak için uygun değildir. Çünkü bu zeminler, kaplama tabakasında düzensiz oturma, seviye kaybı ve çatlama gibi deformasyonlara neden olabilir.

Bu nedenle şişme yüzdesi belirli bir sınırın altında tutulmalı; gerekirse zemin stabilizasyonu, malzeme değişimi ya da drenaj iyileştirme yöntemleri ile şişme riski azaltılmalıdır. Genellikle iyi performans beklenen havaalanı dolgu zeminlerinde şişme yüzdesi %2'nin altında olmalıdır (TS 1900-1/T1, AASHTO T 92).

2.8.1.3. K reaksiyon modülü deneyi

K reaksiyon modülü, zeminlerin rijit yapılarla etkileşiminde birim alana uygulanan yükün, birim oturmaya oranını ifade eden bir parametredir. Bu modül, özellikle rijit temellerin ve beton yol kaplamaların tasarımında kritik bir rol oynar. K reaksiyon modülü genellikle plaka yükleme deneyi ile belirlenir. Bu deneyde belirli bir çap ve kalınlığa sahip çelik bir plaka zemin yüzeyine yerleştirilir ve üzerine kademeli olarak artan yükler uygulanır. Her yük adımında, plakanın oturma miktarı hassas ölçüm cihazıyla kaydedilir. Elde edilen yük-oturma verileri kullanılarak zemin reaksiyon modülü hesaplanır. Resim 2.6.'da K reaksiyon modülü deneyinin uygulama esnasındaki görseli verilmiştir (AASHTO, 2021).



Resim 2. 6. K reaksiyon modülü deneyi (URL-9, 2025)

2.9. Havaalanları Yapıştırma Tabakaları

Yapıştırma tabakası, üstyapı tabakalarının birbiriyle bütünleşmesini ve yük aktarımının etkin şekilde sağlanmasını temin eden bağlayıcı bir katmandır. Havaalanlarında özellikle asfalt kaplama sistemlerinin uygulanmasında; alt tabaka ile yeni serilecek tabaka arasında kayma, ayrılma ve boşluk oluşmasını engellemek amacıyla yapıştırma tabakası kullanılır.

Bu tabakanın temel amacı, yeni asfaltın serileceği yüzeye yapışma mukavemeti kazandırmak ve tabakalar arası gerilme dağılımını dengelemektir. Uçak iniş ve kalkışları sırasında meydana gelen yüksek tekerlek basınçları, yüzey ile alt tabaka arasında kayma gerilmeleri oluşturabilir. Eğer bu iki tabaka arasında yeterli bağ yoksa, asfalt yüzeyde çatlamlar, tabaka ayrılmaları veya dalgalanmalar meydana gelebilir.

Yapıştırma tabakaları genellikle asfalt emülsiyonları (katyonik veya anyonik) kullanılarak uygulanır. Uygulama yapılmadan önce yüzey temizliği büyük önem arz eder. Serilecek asfaltın cinsine, ortam sıcaklığına, trafik yüküne ve yüzey yapısına bağlı olarak uygun emülsiyon tipi ve serim miktarı belirlenir. Bu miktar genellikle 0,30–0,60 kg/m² arasında değişmektedir (URL-10, 2023), (KGM, 2024).

Resim 2.7’de PAT sahasında tabakalar arasına serilen bitümlü yapıştırıcı tabakasının serim işlemi verilmiştir (UAB, 2020).



Resim 2. 7. Bitümlü yapıştırıcı tabaka serimi (URL-11, 2025)

2.10. Bitümlü Temel Tabakası

Bitümlü temel tabakası, kum-çakıl karışımından veya konkase malzemeden oluşan mevcut bir temel tabakası üzerine, asfalt ve betondan oluşan kaplamalar üzerine bitümlü temel tabakası veya düzeltme tabakası olarak uygulanacak tabakalardır. Bitümlü temel tabakasının agregaları; kaba, ince veya gerektiğinde eklenmek suretiyle mineral filler malzemelerden meydana gelmektedir (UAB, 2020).

Bitümlü temel tabakasında kullanılacak agregalar üzerinde yapılacak deneylerden soyulma oranı deneyi bitümlü bağlayıcı ile kaplanmış agregaların su ve mekanik etkilere karşı dirençli olup olmadığı belirlenir. Bu test, bitümlü karışımlarda agregalar ve bağlayıcı arasındaki yapışma kalitesini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Özellikle nemin neden olduğu soyulma problemlerini belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Deneyin temel amacı, bitüm ile kaplanmış agregaların suya ve soyulmaya karşı direncini belirlemektir. Bu sayede, kullanılan malzemelerin havaalanı kaplamalarında uzun ömürlü olup olmadığı anlaşılır. Deney sonucunda, numune sudan çıkarıldıktan sonra kurutulur ve soyulma miktarı gözle değerlendirilir. Agregaların yüzeyinden ayrılan bitüm yüzdesine göre derecelendirme yapılır. Belirli bir yüzde üzerinde soyulma, malzemenin yetersiz yapışma gösterdiğini ve nem hasarına karşı duyarlı olduğunu gösterir. Bu aşamadan sonra ise havaalanı tabakalarında kullanıma uygun olmayan agregalar için katkı maddesi kullanarak iyileştirme yoluna gidilebilir. Resim 2.8’de soyulma oranı deneyinde suda bekletilen agregaların görünümü verilmiştir (Roberts ve ark., 1996).



Resim 2. 8. Soyulma deneyi (URL-12, 2025)

2.10.1. Özgöl ağırlık ve su emme deneyi

Havaalanı PAT sahaları yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren özel mühendislik yapılarıdır. Bu yapılarda kullanılan agregalar, uçakların yüksek tekerlek basınçlarına ve aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri, pist kaplamalarının performansını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Özgöl ağırlık ve su emme deneyleri agregaların yoğunluğu ve boşluk oranları hakkında önemli bilgiler sağlar (Neville, 2011).

Bu deneylerin temel amacı, havaalanı pistlerinde kullanılan kaba ve ince agregaların özgöl ağırlığını ve su emme oranını belirlemektir.

Yoğunluk ve dayanıklılık: Daha yüksek özgöl ağırlığa sahip agregalar, genellikle daha dayanıklıdır (Neville, 2011).

Su emme kapasitesi: Agregaların suyu ne kadar emdiğini gösterir. Yüksek su emme kapasitesi, donma-çözülme döngülerine karşı daha hassas malzemeler anlamına gelir. Su emme oranı %2,0'den düşük olmalıdır, çünkü yüksek su emme oranı, agreganın porozitesinin fazla olduğunu ve donma-çözülme hasarına karşı duyarlı olduğunu gösterir.

Resim 2.9.'da özgül ağırlık deneyinin uygulama esnasındaki görseli verilmiştir (AASHTO, 2021).



Resim 2. 9. Özgül ağırlık deneyi (URL-13, 2025)

2.10.2. Çöktürme deneyi metodu

Bitümlü malzemeler, yol yapımında bağlayıcı olarak kullanılan ve çeşitli mineral dolgularla karıştırılarak dayanıklı asfalt kaplamalar oluşturulan organik bileşiklerdir. Ancak bu malzemeler içinde istenmeyen saf olmayan malzemeler, özellikle karbonatlar, çözünmeyen katı partiküller ve metal oksitler bulunabilir. Bu deneyin temel amacı, bitümlü bağlayıcılarda asidik çözeltide çözünmeyen veya gaz çıkışıyla tepkime veren maddeleri belirlemektir. Böylece malzemenin saflık derecesi ve içeriğindeki yabancı bileşenler analiz edilebilir (Whiteoak, 1990).

Yapılan deney sonucunda; CO_2 gaz çıkışı gözlemlenirse, numunede karbonat (CaCO_3 veya MgCO_3) bileşenleri bulunduğu anlaşılır. Birikinti veya tortu kalırsa bu çözünmeyen safsızlıkların varlığını gösterir. Çözünen bileşenler ise mineral katkı maddelerinin türüne bağlı olarak değerlendirilebilir (Kandhal, 1992).

2.11. Beton Asfalt Binder ve Aşınma (Satış) Tabakası

Binder tabakası havaalanı tabakalarından temel tabakası ve aşınma tabakası arasında yer alan yük taşıma kapasitesini arttıran asfalt tabakasıdır. Bu tabaka hava araçlarının iniş ve kalkışları esnasında meydana gelen yükleri alt tabakalara iletir. Bu tabaka aynı zamanda hava araçlarının tekerlek izlerini ortadan kaldırıp ağır uçak yüklerine karşı direnç sağlar (URL-14, 2024).

Havaalanlarında aşınma tabakası, üst yapının en üst katmanı olup, doğrudan uçak trafiğinin yarattığı yükler ve çevresel etkilere maruz kalır. Bu tabaka, yüksek trafik, çevre ve iklim koşullarından kaynaklanan gerilmelere dayanıklı olmalı, çatlak veya tekerlek izi oluşumunu engellemeli ve yeterli sürtünme direnci sağlayarak güvenli bir iniş ve kalkış yüzeyi sunar (URL-14, 2024).

Binder ve aşınma tabakasında kullanılacak agregalar bitümlü malzeme ile harmanlanarak tabaka serimine uygun bir hale getirilir.

2.11.1. Modifiye bitüm malzemesi

Havaalanlarında kullanılan modifiye bitümlü malzeme, geleneksel bitümlü malzemeye katkı maddelerinin eklenmesiyle elde edilen ve özellikle yüksek sıcaklık stabilitesi, düşük sıcaklık çatlama direnci ve yorgunluk ömrü gibi iyileştirilmiş malzemelerdir. Binder ve aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü malzemeye ek olarak modifiye edilmiş bitümlü malzeme de kullanılabilir. Ülkemizde kullanılacak modifiye bitüm malzemenin hangi iklimde hangi tip kullanılacağı Tablo 2.3.'de yer almaktadır (UAB, 2020).

Tablo 2. 3. Bitümlü malzeme tipleri ve kullanılacak bölgeler listesi (UAB, 2020)

Modifiye Bitüm Tipi	Bitümlü Malzemenin Kullanılacağı İklim
Tip 1 veya Tip 2	Akdeniz ikliminin etkili olduğu bölgelerde, Güney Doğu Anadolu'nun güney kesimlerinde
Tip 3	Karadeniz, Marmara, İç Anadolu, İç Batı Anadolu, Güney Doğu Anadolu'nun kuzey kesimlerinde ve Doğu Anadolu'nun batı kesimlerinde
Tip 4	Doğu Anadolu'nun diğer kesimlerinde

2.11.2. Binder ve aşınma tabakaları karıştırma, serim işlemleri

Binder ve aşınma tabakalarının malzeme seçimi ve laboratuvarda yapılan tayin işlemlerinin ardından, serim öncesinde seçilen malzemeler asfalt plentinde karıştırılır. Karıştırma işlemleri, el değmeden ve tamamen elektronik kontrollü, hassas tartı sistemine sahip asfalt plentlerinde gerçekleştirilir. Karışım işlemi tamamlanan binder ve aşınma malzemesi, kendi tahrik gücüne sahip asfalt serme makineleri ile sahaya serilir. Bu makineler; serdiği malzemeyi ayrıştırmadan, düzgün bir şekilde yayabilecek ve aynı zamanda serilen malzemeyi en az %85 oranında sıkıştırabilecek kapasitede olmalıdır.

Bitümlü temel tabakasının serim işlemini yapacak makineler ise 0–30 cm kalınlık aralığında çalışabilecek ve gerektiğinde bu aralığı değiştirebilecek kapasiteye sahip olmalıdır. Ayrıca, serim makineleri 2,5 metreden az olmamak üzere, 7,5 metreye kadar serim genişliğine sahip olmalıdır (UAB, 2020).

Beton asfalt kaplamada binder tabakası için sıkışma oranı en az %96, aşınma (satih) tabakası için ise en az %98 olmalıdır

Bitümlü temel tabakasının kontrolü kapsamında açıklanan Hi-LO dedektörü ve Elektronik Pürüzlülük İndikatörü gibi cihazlar yardımıyla, binder ve aşınma tabakalarının yüzey düzgünlüğü kontrol edilmektedir. Bu cihazlar sayesinde, serim ve sıkıştırma işlemleri tamamlanan tabakaların yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmektedir. Resim 2.10'da Hİ-LO dedektör, Resim 2.11'de ise pürüzlülük ölçüm cihazı görseli yer almaktadır (UAB, 2020).



Resim 2. 10. Hİ-LO dedektör (URL-15, 2025)



Resim 2. 11. Pürüzlülük ölçüm cihazı (URL-16, 2025)

2.11.3. Binder ve satıh tabakaları arazi ölçüm işlemleri

Asfalt istasyonundan alınan malzemelerin Marshall metoduna göre deneysel denetimi amacıyla, ortalama her 250–300 ton asfalt karışımı için asfalt plentinin altında bulunan kamyonlardan en az 20–25 kg numune alınmaktadır. Tablo 2.4’de, bu numuneler sonucunda elde edilen deney değerlerinin, karışım formülü raporlarında belirtilen değerler ile sınırları verilmiştir (UAB, 2020).

Tablo 2. 4. Laboratuvar yoğunluk ve karışım formül değerleri farkı tablosu (UAB, 2020)

Deney Adı	Değerler	Standart
Yoğunluk	%2	ASHTO T 166
Stabilite	%20	ASTM D 1559
Akma Direnci	± 2	AASHTO T 164
Asfalt Oranı	± 0.3	AASHTO T 30

Mekanik yöntemler kullanılarak sıkıştırılmış haldeki binder tabakasından alınan numunelerden elde edilen değerler ile asfalt istasyonundan alınan numunelerden elde edilen laboratuvar yoğunluk değerlerinin birbirine oranlanması sonucu elde edilen sıkışma değerinin %96’nın altına düşmemesi gerekmektedir (UAB, 2020).

Benzer şekilde, mekanik yöntemlerle sıkıştırılmış haldeki aşınma (satıh) tabakasından alınan numunelerden elde edilen değerler ile asfalt istasyonundan alınan numunelerden elde edilen laboratuvar yoğunluk değerlerinin birbirine oranlanması sonucu elde edilen sıkışma değerinin ise %98’in altına düşmemesi istenir (UAB, 2020).

2.12. Beton Kaplama

Ülkemizde havaalanlarındaki PAT sahaları, kendi içinde farklılıklar göstermektedir. Bazı havaalanlarında PAT sahalarının tamamı aynı tür malzemeden inşa edilmişken, bazılarında ise PAT sahası bölümleri farklı malzemelerle yapılmıştır. Örneğin; bir havaalanında apron sahası beton kaplamadan oluşturulmuşken, aynı havaalanının pist sahası esnek kaplama dediğimiz bitümlü malzemeden yapılmış olabilir. PAT sahasının bu şekilde

farklı kaplama türleriyle oluşturulmasında; iklim koşulları, maliyet, verimlilik ve kullanım amacı gibi çeşitli etkenler rol oynamaktadır.

Beton kaplamalar, uçuş trafiğinin sağlıklı ve güvenli bir şekilde yürütülmesi açısından kritik öneme sahiptir. Yüksek eğilme dayanımı sayesinde beton kaplamalar, ağır uçak yüklerini etkin biçimde taşıyabilir ve uzun ömürlü kullanım sağlar. Bu özellikleri sayesinde havaalanı PAT sahalarının kesintisiz ve güvenli bir biçimde hizmet vermesi mümkün olur. Ayrıca beton kaplamalar, yüksek aşınma dirençleri sayesinde kullanıldıkları yapılarda uzun hizmet ömrü sunar (Özdemir, 2010).

Beton kaplamalar, yüksek eğilme direncine sahip olmaları sayesinde yükleri geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. Bu özellikleri sayesinde, zayıf taban zeminleri üzerinde dahi, esnek üstyapılara kıyasla daha üstün performans sergilerler (Arslan, 2007).

Bu hususlar göz önünde bulundurulduğunda, havaalanlarında beton kaplamaların kullanımı; yüksek taşıma kapasitesi, dayanıklılık, aşınma direnci ve yüzey özellikleri gibi avantajları sayesinde uçuş güvenliği ve operasyonel verimlilik açısından büyük önem arz etmektedir.

2.12.1. Beton kaplama agregası

Havaalanı PAT sahalarında serimi yapılacak beton kaplamanın agregası, doğadan veya taş ocaklarından elde edilen malzemelerden oluşmaktadır. Ancak bu malzemeler doğrudan kullanılmaz; öncelikle yıkanır ve tane boyutlarına göre kaba, ince veya ihtiyaç halinde orta agrega olarak sınıflandırılır. Agregası sınıflandırması yapılırken, agrega içerisinde yabancı madde bulunmamasına ve donmuş yapı özelliği göstermemesine özen gösterilir.

Agregası seçimi sırasında öncelikli olarak agregaların petrografik analiz yöntemine göre test edilmiş olması gerekmektedir. Bu analizden sonra diğer deneyler gerçekleştirilir. Beton kaplamalarında kullanılacak agrega ocaklarında, volkanik kökenli taşlar, andezitler, opal çört, fillit (phyllite), riolit, sünger taşı, kalsedonit çörtler, tridimit ve kristobalit bazlı malzemeler bulunmamalıdır (UAB, 2020).

Petrografik analiz; agregaların mineral bileşimini, doku özelliklerini ve varsa kusurlarını mikroskopik düzeyde inceleyerek, beton içerisindeki uzun vadeli davranışlarını öngörmeyi sağlar. Özellikle alkali-agrega reaksiyonu gibi zararlı kimyasal etkileşimlerin önceden tespit edilmesinde bu analiz büyük önem taşır. AAR, betonun dayanıklılığını

olumsuz yönde etkileyerek genişmelere ve çatlaklara yol açabilir. Bu nedenle petrografik analiz, uygun agrega seçimi ve beton performansının güvence altına alınması açısından hayati bir rol oynar (Kaya, 2024).

Beton kaplama tabakalarında kullanılacak agregalara, CSA 23.2-25A standardı kapsamında “Alkali-Silika Reaktivite Tayini” (Harç Çubuklarının Hızlandırılmış Genleşme Deneyi) uygulanmaktadır. Bu deneyin 14 günlük sonuçlarına göre malzemenin uygunluk durumu Tablo 2.5’de verilmiştir. Ayrıca beton kaplama imalatının başlangıcından tamamlanmasına kadar agrega grupları; elek analizi, No: 200 (74 mikron) elekten geçen ince malzeme oranı ve incelik modülü açısından sürekli olarak denetlenmektedir (UAB, 2020).

Tablo 2. 5. Harç çubuklarının hızlandırılmış genleşme deneyi değerleri (UAB, 2020)

Deney Metodu	Genleşme Yüzdesi	Kabul Edilebilirliği
CSA 23.2-25A	$\geq \%0,200$	Kabul edilemez.
	$\%0,150$ ile $\%0,200$ arasında	İdare karar verir.
	$\leq \%0,150$	Kabul edilir.

2.12.1.1. Beton kaplama kaba agregası

Beton kaplama tabakasında kullanılacak kaba agregalar, AASHTO M 80 ve TS 706 EN 12620 standartlarını sağlayan ve Tablo 2.50’de belirtilen fiziksel özellik şartlarını karşılayan malzemelerden seçilmelidir.

TS 706 EN 12620 standardı; beton yapımında kullanılacak doğal, yapay veya geri kazanılmış agregaların özelliklerini tanımlar. Bu standart, agregaların tane büyüklüğü dağılımı, fiziksel ve mekanik özellikleri ile zararlı maddelere ilişkin sınırları belirlemektedir (TS 706 EN 12620 + A1, 2009).

AASHTO M 80 standardı ise beton agregalarının kalite gereksinimlerini ortaya koyar. Bu standart kapsamında agregaların fiziksel özellikleri, dayanıklılık kriterleri ve zararlı maddelere dair kabul edilebilir limitler tanımlanmıştır. Örneğin, agregaların aşınma direnci, donma-çözülme dayanıklılığı ve zararlı madde içerikleri, bu standartta belirtilen

sınırlar içinde olmalıdır. Tablo 2.6.'da beton kaplamada kullanılacak kaba agregalar üzerinde yapılacak deneyler ve standartları verilmiştir (AASHTO, 2021).

Tablo 2. 6. Beton kaplama kaba agregasının fiziksel özellikleri (UAB, 2020)

Deney Adı ve Deney Standardı	Şartname Limitleri
Aşınma Kaybı (Los Angeles), TS EN 1097-2, AASHTO T 96	maks. % 35
Don Kaybı (Na ₂ SO ₄), TS EN 1367-1, AASHTO T 104	maks. % 12
No: 200 Elekten Geçen Malzeme Oranı, TS 1900 -1, AASHTO T 11	maks. % 1
Kil Topakları Oranı, TS 3527, AASHTO T 112	maks. % 0,5
Yumuşak Parçalar, kömür, linyit ve Şist gibi, TS EN 1744-1, AASHTO T 113	maks. % 1
İğnesellik Limiti, BS 812 Formül: Ortalama Uzunluk/ Ortalama Elek Boyutu (*)	< 2,0
Yaprasallık Limiti, BS 812 Formül: Ortalama Kalınlık/Ortalama Elek Boyutu (*) Ortalama elek boyutu = $(2'' + 3/8'') / 2 = 19/16$	> 0,6

2.12.1.2. Beton kaplama ince agregası

Hem doğal kum hem de kırma kum yıkanmış olacak No:200 eleği geçen malzeme oranı maksimum %2 olacaktır. Ancak, kırma kum No:200 eleği geçen malzeme oranı taş tozundan meydana gelirse maksimum %4 olması gerekir. İnce agreganın yukarıda belirtilen eleklerden birbirini takip eden herhangi iki elek arasında %45'ten fazla malzeme kalmıyorsa, bu gronölometriye sahip malzemenin incelik modülü 2,3 ile 3,1 arasında olması gerekir. Beton kaplamada kullanılacak ince agreganın üretim esnasında incelik modülü farkının en fazla 0,20 olması gerekir (UAB, 2020).

Tablo 2.7'de beton kaplama tabaksında kullanılacak ince agregalar üzerinde yapılacak deneyler ve standartları verilmiştir.

Tablo 2. 7. Beton kaplama ince agregasının fiziksel özellikleri (UAB, 2020)

Deney Adı ve Deney Standardı	Şartname Limitleri
Don Kaybı (Na ₂ SO ₄), TS EN 1367-1, AASHTO T 104	maks. %10
No: 200 Elekten Geçen, Malzeme Oranı, TS 1900 -1, AASHTO T 11	maks. %2
Kil Topakları Oranı, TS 3527, AASHTO T 112	maks. %0,25
Yumuşak Parçalar, kömür, linyit ve Şist gibi, TS EN 1744-1, AASHTO T 113	maks. %1
Organik Madde Oranı, AASHTO T-194, TS 3673	maks. %0,2
Kum Eşdeğeri, AASHTO T-176, TS EN 933-8	min. %60

2.12.2. Havaalanı beton agrega deneyleri

Havaalanı PAT sahalarında yapılacak beton kaplama agregaların kullanım açısından uygunluğu için bazı deneylere ihtiyaç duyulur. Bu deneylerin amacı doğada elde edilen malzemelerin istenen standartları sağlayıp sağlamadıklarını denetlemektir. Beton kaplamalarda kullanılacak agregalar üzerinde yapılacak deneyler aşağıda açıklanmıştır.

2.12.2.1. Kil topakları oranı deneyi

Kil topakları oranı deneyi, agregaların içinde bulunan kil topakları ve ufalanabilir parçacıkların miktarını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu tür yabancı maddeler, beton kaplamalarda kullanılacak malzemelerin dayanıklılığını ve performansını olumsuz etkiler. Bu nedenle, malzeme kalitesini değerlendirmek amacıyla bu deney metodu uygulanmaktadır.

AASHTO T 112 standardına göre; ince agregada bulunmasına izin verilen maksimum kil oranı %3'tür. Kaba agregada ise bu oran, betonun tipi ve kullanılacağı konuma bağlı olarak %0 ile %10 arasında değişmektedir (Atatürk Üniversitesi, 2017).

2.12.2.2. Yumuşak parçalar, kömür, linyit ve şist deneyi

Havaalanı üstyapı tasarımlarında kullanılan agregaların kalitesi, içerdikleri yumuşak parçalar, kömür, linyit ve şist gibi düşük dayanımlı bileşenler açısından değerlendirilmelidir. Bu tür malzemelerin fazlalığı, üstyapı kaplamalarının dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü olumsuz etkileyebilmektedir.

Bu deneyde, TS EN 1744-1 ve AASHTO T 113 standartları esas alınarak zayıf parçaların miktarı tespit edilir. TS EN 1744-1 standardı, elle ayırma yöntemine dayanmakta; AASHTO T 113 standardı ise yoğunluk farkından yararlanarak hafif parçaları belirlemektedir. Her iki yöntem de beton üretimi ve diğer inşaat uygulamalarında kullanılan agregaların kalite kontrolü açısından kritik öneme sahiptir (Neville, 2011).

2.12.2.3. İğnesellik sınırı

Agrega tanelerinin boyutsal oranları, özellikle uzunluk ve kalınlık arasındaki ilişki, şekilsel niteliklerin belirlenmesinde önemli bir ölçüttür. Bu çerçevede, “iğnesellik sınırı”, agrega tanelerinin daha çok iğne biçiminde olup olmadığını ortaya koyan bir kriter olarak değerlendirilir. Bu sınır, beton ve asfalt kaplamaların performans analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (TS EN 933-4, 2008).

Beton üretiminde kullanılacak agregaların şekli, taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Bu bağlamda, agrega tanelerinin yuvarlak, kübik ve mümkün olduğunca az iğne şeklinde olması tercih edilmektedir. İğne şeklindeki agregalar, betonun işlenebilirliğini azaltmakta ve tane düzeninin bozulmasına yol açarak dayanımı olumsuz etkileyebilmektedir (Karakas ve Yılmaz, 2020).

Düşük iğnesellik oranına sahip agregalar ise daha düzgün şekilli olduklarından, yüzeye daha iyi yerleşir, yüksek yoğunluk ve dayanıklılık sağlar. Bu tür agregalarla oluşturulan kaplamalar, taşıma kapasitesini artırırken, bakım maliyetlerini azaltır ve uzun ömürlü bir yapı elde edilmesini sağlar (Çelik ve Kaya, 2015).

2.12.2.4. Yapraksallık sınırı

Agregaların şekil özelliklerinin bir diğer önemli bileşeni de yapraksallıktır. Yapraksallık sınırı, agregaların kalınlığı ile yüzey boyutları arasındaki oranı esas alır ve

agreganın daha çok ince tabakamsı bir formda olup olmadığını değerlendirir. Yapraksı agrega, kalınlık-boyut oranı 0,6'nın altında olan taneler için tanımlanır (BS 812, 1995).

Yüksek yapraksallık oranına sahip agregalar, kaplama malzemesi içinde düzensiz dağılım göstererek boşluk oluşumuna neden olabilir. Bu boşluklar, kaplama sisteminin dayanımını olumsuz etkiler. Ayrıca, yapraksı agregalar kırılğan oldukları için yük altında çatlama ve yüzey bozulmalarına zemin hazırlar (Yıldız, 2019).

Öte yandan, yapraksallık sınırına uygun agregalar sayesinde karışım homojenliği sağlanır, sıkışma kabiliyeti artar ve kaplamanın genel stabilitesi güçlendirilir. Bu tür agregalarla inşa edilen kaplamalar hem daha uzun ömürlü olur hem de bakım ihtiyacı azalır; dolayısıyla işletme maliyetleri önemli ölçüde düşer (Çelik ve Kaya, 2015).

2.12.2.5. Organik madde oranı

Yol üst yapısında kullanılan agregalarda bulunan organik maddeler (örneğin humus, bitki kalıntıları, kömür ve linyit), çimentonun hidratasyon sürecini olumsuz etkileyerek betonun dayanımını azaltabilir. Bu nedenle, agregaların organik madde içerikleri TS EN 1744-1 ve AASHTO T 1944 standartlarına göre belirlenmekte ve uygunlukları kontrol edilmektedir (Neville, 2011).

TS EN 1744-1 standardında, organik madde varlığı çözelti rengindeki değişime göre değerlendirilir; sarı veya kahverengi bir renk oluşumu, organik madde mevcudiyetine işaret eder. AASHTO T 1944 standardı ise, renk değişimini karşılaştırma skalası aracılığıyla yorumlayarak benzer bir analiz yöntemi sunar (TSE, 2010).

2.12.3. Beton kaplama çimentosu

Beton kaplama tabakası elde edilebilmesi için kullanılan çimentoların topaklanmamış ve sertleşmemiş olması gereklidir. Ayrıca, santrallerde kullanılacak çimentoların sıcaklıkları +40 °C'yi aşmamalıdır. Çimentonun çözünür alkali oksit ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$) miktarı en fazla %0,6 olmalıdır. Çünkü çimentodaki alkali içeriği, betonun nihai dayanımı üzerinde doğrudan etkilidir. Kullanılan çimento tipleri ile bu çimentoların tabi olduğu kontrol standartları Tablo 2.55'te sunulmuştur (UAB, 2020).

2.12.4. Beton kaplama karma suyu

Beton kaplama tabakası üretiminde kullanılan karma suyu, çimento ve agrega ile kimyasal reaksiyona girerek betonun dayanım ve dayanıklılığını etkiler. Bu nedenle, TS 1008 ve AASHTO T 26 standartlarına uygun, yabancı madde içermeyen sular tercih edilmelidir. pH değeri 4,0–7,0 aralığı dışında kalan, asidik veya bazik özellikteki sular kullanıma uygun değildir.

Havaalanı kaplamaları, diğer beton uygulamalarına kıyasla daha yüksek performans gerektirdiğinden, yalnızca standartlara uygunluk yeterli değildir. Suda çözünmüş tuzlar, sülfatlar ve alkali içerik gibi bileşenler de dikkatle analiz edilmelidir. Bu maddeler, beton iç yapısında zararlı genleşmelere, alkali-agrega reaksiyonlarına ve yüzey çatlamalarına yol açabilir. Böyle patolojik etkiler, özellikle pist kaplamalarında ciddi yapısal problemlere neden olabilir. Bu doğrultuda, AASHTO T 26 standardında belirtilen testlerin titizlikle uygulanması önerilmektedir (Neville, 2011).

2.12.5. Beton kaplamada boşluk oranı ve kimyasal katkı maddesi

Havaalanı beton kaplamalarında boşluk oranı yalnızca mekanik dayanım açısından değil, yüzey dayanıklılığı ve donma-çözülme çevrimlerine karşı performans bakımından da kritik öneme sahiptir. Beton içerisindeki mikro hava kabarcıkları, suyun donarak genleşmesini absorbe ederek çatlak oluşumunu önler. Özellikle soğuk iklim bölgelerinde hizmet veren havaalanlarında, TS EN 12350-7 ve AASHTO T 152 standartlarına uygun hava içeriği sağlanarak betonun servis ömrü artırılabilir. Bu sayede bakım maliyetleri düşerken, operasyonel güvenlik de artış gösterir (Neville, 2011).

Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde görülen farklı iklim koşulları, özellikle yüksek rakımlı ve dağlık alanlarda donma-çözülme olaylarını yaygınlaştırmaktadır. Bu tür çevresel etkilerden kaynaklanabilecek bozulmaları önlemek amacıyla, beton imalatı sırasında hava hapsedici kimyasal katkı maddeleri kullanılır. Bu katkıları, toplam beton hacmi içinde %3 ila %6 oranında boşluk oluşturarak don etkilerine karşı dayanımı artırır. Boşluk oranı, TS EN 12350-7 ve AASHTO T 152 standartlarına uygun olarak, hava metresi yardımıyla günde en az iki kez ölçülmelidir. Belirlenen sınır değerlerin aşılması esastır (UAB, 2020).

Türkiye'deki saha uygulamalarında, boşluk oranı kontrolleri genellikle şantiye laboratuvarlarında gerçekleştirilmekte ve %5 civarında tutulması, özellikle havaalanı PAT

sahalarında beton performansını olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca, katkı maddesi türü ile agrega cinsi, boşluk oranı üzerinde doğrudan etkilidir. Uygun katkı seçimi ile hem hava içeriği hem de betonun işlenebilirliği optimize edilebilir. Önerilen hava içeriği miktarları Tablo 2.8’de verilmiştir (Demirboğa & Gül, 2005).

Tablo 2. 8. Beton kaplama tabakasında önerilen hava içeriği miktarı (UAB, 2020)

Dona Maruz Kalma Derecesi	Maksimum Agrega Boyu				
Maksimum Agrega Boyutu	50,8mm 2’’	38,1mm 1 ½’’	25mm 1’’	19mm ¾’’	12,5mm ½’’
Hafif Şiddetteki Ortam (Az)	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Orta Şiddetteki Ortam (Orta)	4,0	4,5	4,5	5,0	5,5
Şiddetli Ortam (Yüksek)	5,0	5,5	6,0	6,0	7,0

- **Hafif Şiddette Ortam (Az):** Donma ve çözülme olaylarının beklenmediği bölgelerde, betonun yalnızca işlenebilirliğini artırmak amacıyla hava hapsedici katkı maddesi kullanılır.
- **Orta Şiddette Ortam (Orta):** Donmanın muhtemel olduğu, ancak donma öncesinde kaplamanın doğrudan nem veya suya maruz kalmadığı alanlarda uygulanır.
- **Şiddetli Ortam (Yüksek):** Donma olaylarının ardından buz çözücü kimyasalların kullanıldığı ya da kaplamanın zararlı kimyasal maddelere maruz kaldığı bölgelerde tercih edilir. Bu tür ortamlarda beton aynı zamanda yüksek miktarda nem ve su etkisine açıktır (UAB, 2020).

2.12.6. Beton kaplama derz dolgu malzemesi

Havaalanlarında beton kaplama döküm işlemleri sırasında, kaplamanın enine ve boyuna doğrultularındaki derz aralıklarına derz dolgu malzemesi uygulanır. Bu işlem, betonun 28 günlük priz süresini tamamlamasının ardından gerçekleştirilmelidir (UAB, 2020).

TS 14188-2 standardı, beton kaplama derzlerinde kullanılacak elastomerik dolgu malzemelerinin fiziksel ve mekanik performans kriterlerini tanımlar. Havaalanı gibi ağır trafik yüklerine maruz kalan alanlarda kullanılacak bu malzemelerin; yüksek elastikiyet, iyi aderans, yeterli çekme dayanımı, hareket kabiliyeti ve yaşlanma direnci gibi özellikleri karşılaması zorunludur. Ayrıca, sıcaklık değişimlerine karşı dirençli olmaları ve meydana gelen deformasyonları absorbe edebilmeleri beklenir. Bu gereklilikleri karşılayan poliüretan ve silikon esaslı malzemeler, TS 14188-2 standardına göre havaalanı koşullarına en uygun dolgu türleri arasında yer almaktadır (Akyüz ve ark., 2022).

2.12.7. Beton kaplama tabakası dayanım değeri

Tablo 2.9’da laboratuvar ortamında TS EN 12390-2 ve AASHTO T 126 standartlarına göre hazırlanmış numuneler üzerinde yapılacak dayanım testleri sonucu sağlanması gereken minimum dayanım değerleri verilmiştir (UAB, 2020)

Tablo 2. 9. Laboratuvarda hazırlanan numunelerin dayanım değerleri (UAB, 2020)

Numune	Numune Test Süresi	Dayanım Türü	Minimum Dayanım Değeri
Beton Kiriş	7 günlük	Eğilme-Gerilme	35 kg/cm ² (3,5 N/mm ²)
Beton Kiriş	28 günlük	Eğilme-Gerilme	50 kg/cm ² (5,0 N/mm ²)
Beton Silindir	28 günlük	Eğilme-Gerilme	300 kg/cm ² (30 N/mm ²)

Beton karışım formülünün onaylanmasının ardından, kaplama imalat sürecine geçilir. Üretilen betonun kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla, laboratuvar koşullarında hazırlanmış numuneler ile sahada üretilen beton karşılaştırılır. Bu kapsamda, kaplama tabakasında kullanılacak her 300 m³ beton için en az dokuz adet 60×15×15 cm boyutlarında kiriş numune ile üç adet 15 cm çapında silindir numune hazırlanarak test edilir.

Laboratuvar ortamında elde edilen numunelere ait dayanım değerleri Tablo 2.9’da beton santralinden alınan saha numunelerinin sağlanması gereken minimum dayanım değerleri ise Tablo 2.10’da sunulmuştur (UAB, 2020).

Tablo 2. 10. Şantiye ortamında hazırlanmış numunelerin dayanım değerleri (UAB, 2020)

Numune	Numune Test Süresi	Dayanım Türü	Minimum Dayanım Değeri
Beton Kiriş	7 günlük	Eğilme-Gerilme	31,5 kg/cm ² (3,15 N/mm ²)
Beton Kiriş	28 günlük	Eğilme-Gerilme	4,5 kg/cm ² (4,5 N/mm ²)
Beton Silindir	28 günlük	Eğilme-Gerilme	250 kg/cm ² (25 N/mm ²)

2.12.8. Beton kaplama karışım oranları

Beton kaplama üretiminde, çimento türüne bağlı olarak karışım oranları belirli standartlara göre ayarlanır. CEM I 32,5 veya CEM II 32,5 çimento türlerinin kullanılması durumunda, 1 m³ beton için en az 375 kg çimento; CEM I 42,5 veya CEM II 42,5 kullanıldığında ise en az 350 kg çimento kullanılması gerekmektedir. Karışımda su/çimento oranı (W/C) en fazla %50 olmalıdır (UAB, 2020).

Federal Aviation Administration (FAA) rehberlerine göre, havaalanı betonlarında önerilen su/çimento oranı 0,40–0,45 aralığında tutulmalıdır. Bu oran, betonun yeterli mekanik dayanımı ile birlikte donma-çözülme direncini sağlayacak şekilde optimize edilmektedir.

2.12.9. Beton kaplama slump deneyi

Havaalanı PAT sahalarında kullanılan betonlar, yüksek taşıma kapasitesi ve uzun servis ömrü gereksinimleri doğrultusunda özel olarak tasarlanır. Bu tür uygulamalarda, betonun taze halindeki işlenebilirliği (kıvamı), hem uygulama kalitesi hem de nihai mekanik performans açısından belirleyici bir faktördür. Kıvamın düşük olması yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerini zorlaştırırken; aşırı kıvamlı betonlarda ayrışma ve segregasyon gibi olumsuzluklar gözlenebilir. Bu nedenle, pist, apron ve taksi yolları gibi kritik alanlarda homojen dağılım ve yüksek dayanıklılık sağlamak amacıyla kıvam kontrolü zorunludur. Bu kontrol, TS EN 12350-2 ve AASHTO T 119-42 standartları esas alınarak yapılan slump deneyi ile gerçekleştirilir (Yüzer, 2005).

Türkiye’deki havaalanı PAT sahalarında uygulanan slump deneyi kapsamında, her mikser ya da kamyon başına veya en fazla her 200 m²’lik kaplama alanı için en az üç adet

numune alınarak deney yapılmalıdır. Kullanılan agreganın türüne bağlı olarak hedef slump değerleri değişkenlik gösterir: Yuvarlak agregalı betonlarda slump değeri en fazla 2,5 cm, kırılmış agregalı betonlarda ise en fazla 3,5 cm olmalıdır (UAB, 2020).

2.12.10. Beton kaplama dökümü

Beton kaplama tabakasının serimi, olağan koşullar altında, genişliği 3 metre ile 7,5 metre arasında değişen şeritler halinde gerçekleştirilir. Tesviye işlemleri sırasında, yüzey düzgünlüğü ve dayanımın sağlanabilmesi amacıyla vibrasyonlu tesviye yöntemi tercih edilir. Havaalanı PAT sahasında gerçekleştirilen beton döküm uygulamasına ilişkin görsel, Resim 2.12’de sunulmuştur (UAB, 2020).



Resim 2. 12. Beton kaplama dökümü (URL-17, 2014)

Resim 2.13’te beton kaplama tabaksı dökümü sonrası tesviye işlemi gösterilmiştir. Beton kaplamasının serim ve sıkıştırma işlemlerinden sonra betonun kür malzemesi ile bakımı yapılır. Resim 2.14’te ise başka bir hava sahasına uygulanan beton kaplama dökümü sonrası tesviye işlemi gösterilmiştir (UAB, 2020).



Resim 2. 13. Beton kaplama dökümü sonrası tesviye işlemi (URL-18, 2025)



Resim 2. 14. Beton kaplama dökümü tesviye işlemi (URL-19, 2025)

2.12.11. Beton kaplama kalınlık ve mukavemet kriterleri

Beton kaplamanın belirli bölgelerinde, kalınlık ve dayanım kontrolü amacıyla çeşitli deneyler uygulanır. Bu kapsamda, her 5000 m²'lik alan için karot makinesi yardımıyla bir adet silindir numune alınır. Bu numune üzerinde; silindir basınç dayanım deneyi, su emme deneyi ve ultrasonik hız ölçümü gerçekleştirilir.

Numune ile projede öngörülen tabaka kalınlığı arasında en fazla 5 mm sapma olması, ayrıca yapılan deney sonuçlarının proje tasarımında belirtilen minimum değerlere göre %90'dan fazla sapma göstermemesi, ilgili bölgedeki beton kalitesinin uygunluğunu gösterir (UAB, 2020).

2.12.12. Beton kaplama yüzünün pürüzlülük ve çatlak kriterleri

Serim ve sıkıştırma işlemleri tamamlanan beton kaplamaların yüzey pürüzlülüğü, Hi-LO dedektörleri kullanılarak ölçülür. Bu cihazlar, 3 metre uzunluğunda tekerlekli bir yapıya sahip olup yüzeydeki yüksek ve alçak noktaları tespit ederek kaplamanın düzgünlüğünü değerlendirir.

Hi-LO dedektör ile yapılan ölçümlerde, beton kaplamanın yüzey pürüzlülüğü 3 metrede 3 mm'yi geçmemelidir. Ölçüm sırasında 3 metrede 6 mm'yi aşan pürüzlülük tespit edilirse, ilgili beton plakalar genişlik boyunca ve 3 metreden az olmamak üzere sökülerek yeniden imal edilir (UAB, 2020).

Pürüzlülük değeri 3 mm ile 6 mm arasında olup, ilgili alanda çatlak, soyulma ya da benzeri yüzey kusurları bulunmuyorsa, ilgili beton bölgesine ilişkin maliyette %3 oranında kesinti yapılabilir. Ancak bu kesintinin uygulanabilmesi için, her beton panel için Elektronik Pürüzlülük Göstergesi (Electronic Roughness Indicator) ile yapılan ölçümlerin, AYGM Araştırma Dairesi Başkanlığı uzmanlarınca doğrulanması ve tüm maliyetin yüklenici tarafından karşılanması gerekir. Eğer elde edilen pürüzlülük indeksi (RI) değeri 150 inç/milin altında kalıyorsa, herhangi bir kesinti yapılmaz; bu değerin aşılması durumunda kesinti uygulanır (UAB, 2020).

Beton kaplamalarda yapısal nitelikteki derin çatlaklara kesinlikle izin verilmez. Ancak yüzeyde oluşabilecek ince ve sathi kılcal çatlaklar bu kapsam dışında değerlendirilir. Kaplamada, panel birleşimlerinde aynı yönde ilerleyen veya düzensiz dağılım gösteren çatlakların uzunluğu 1,5 metreden fazlaysa, bu alanlar çatlak olarak kabul edilir ve uygun

yöntemlerle onarılarak güçlendirilir. Bu durumda beton panel bedelinden %5 oranında kesinti uygulanır. Çatlakların derz kenarına 1,5 metreden daha yakın veya düzensiz ve karmaşık dağılımda olması durumunda ise, ilgili panellerin kısmen ya da tamamen sökülerek yeniden yapılması idarece talep edilebilir.

Sökülerek yeniden yapılan beton bloklarda, çatlak onarımı sonrasında hiçbir çatlak bölgesi kenara 1,5 metreden daha yakın olmayacak şekilde düzenleme yapılmalıdır. Onarılarak kabul edilen blokların toplam miktarı, tüm kaplama bloklarının %1'ini aşamaz. Ancak tamamen veya kısmen sökülerek yeniden yapılan bloklar bu sınırlamaya dahil edilmez.

Beton kaplama tabakası üzerinde, döküm işleminden itibaren 10 gün geçmeden araç trafiğine izin verilmez. Kaplamanın tamamen trafiğe açılması ise derz dolgu işlemlerinin tamamlanmasının ardından gerçekleştirilir (UAB, 2020).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde yukarıda yer alan bölümlerde teorik olarak anlattığımız PAT sahasının her katmanını içeren aşamalardan sonra Türkiye’de en çok kullanılan uçak tiplerinden Airbus A330-300 uçak tipinin iniş ağırlığı ve iniş takımları esas alınarak esnek ve rijit üst yapı tasarımları yapılacaktır. Bu bölümde yapılacak çalışmanın dayanağı önceki bölümlerde birçok kaynaktan elde edilen verilerle hesaplanmıştır. Aynı zamanda çalışmanın bu aşaması 3 boyutlu görsellerle desteklenmiştir.

3.1. Airbus A330-300 Uçak Tipi İçin Esnek ve Rijit Kaplama Tayini

FAA yöntemiyle ilgili bilgiler bölüm 2.3’te yer almaktadır. Bu uçak kalkış ağırlığı olarak yüksek değere sahip bir uçak olduğundan kaplama kalınlığı açısından A330-300 uçağını taşıyabilecek bir kaplama çoğu uçak yüklerini de güvenli bir şekilde karşılayacaktır. Tablo 3.1.’de Airbus A330-300 uçağının teknik özellikleri tablo halinde verilmiştir.

Tablo 3. 1. Airbus A330-300 uçağı teknik özellikleri (URL-20, 2025)

Özellik	Değer
Uçak Tipi	Airbus A330-300
MTOW (Max. Take-Off Weight)	242,000 kg $\approx$ 535,000 lb
İniş Takımı	Dual tandem (2 ana takım $\times$ 4 tekerlek)
Lastik Temas Alanı (tahmini)	~ 210 in ² (B747’ye benzer)
Dual Spacing	~ 55 inç
Yıllık İniş Sayısı	6.000

3.1.1. Esnek üst yapı tasarımı

FAA yöntemine göre esnek üst yapı tasarımında kaplama kalınlığı tayininde en önemli kriter CBR değerleridir. CBR (California Bearing Ratio), bir zeminin taşıma kapasitesini gösteren temel geoteknik parametrelerden biridir. Çünkü FAA’nın esnek kaplama tasarım yöntemi (özellikle FAA AC 150/5320-6 gibi dokümanlarda) doğrudan

zemin tabakalarının taşıma kapasitesine göre kaplama kalınlıklarını belirler. Bu kapasite CBR değeri ile ifade edilir.

Taban zemini (Subgrade), doğal zeminin taşıma gücünü temsil eder. Zayıf bir zemin sayılır (5-8 arası). Alt temel (Subbase), granüler veya stabilize malzeme kullanıldığını gösterir. Daha iyi taşıma kapasitesi sağlar. FAA yönteminde esnek kaplamaların CBR nomogramları esas alınarak yapılmasının sebebi yük transferi aşağıya doğru olur.

Uçak yükleri, tekerlekten yüzey kaplamasına, ardından alt tabakalara iletilir. Her tabaka, alttakine yükü yayarak aktarır. Alttaki tabakanın CBR değeri düşükse, daha kalın üst kaplama gerekir. Zeminin zayıf olması daha kalın kaplama gerektirir. Örneğin: CBR = 3 çok zayıf zemin olur ve daha fazla kalınlık gerekir, CBR = 10+ ise daha az kaplama kalınlığı yeterli olur.

FAA yönteminde CBR değerleri, zeminin yük taşıma gücünü ölçmek ve her tabakanın kalınlığını doğru belirlemek için kullanılır. Özellikle uçak yüklerinin çok yüksek olduğu havaalanlarında, bu parametreler kaplamanın ömrünü ve emniyetini belirleyen en kritik unsurlardandır. Taban zemini, genellikle mevcut yerel zemindir (toprak, kil, silt vs.). Bunun taşıma kapasitesi genelde düşük olur ve CBR 3–10 arası alınır. Örneğin: Bir havaalanı PAT sahasının taban zemini CBR değerini 30 alıp yapay bir zemine çevirmek ekonomik değildir.

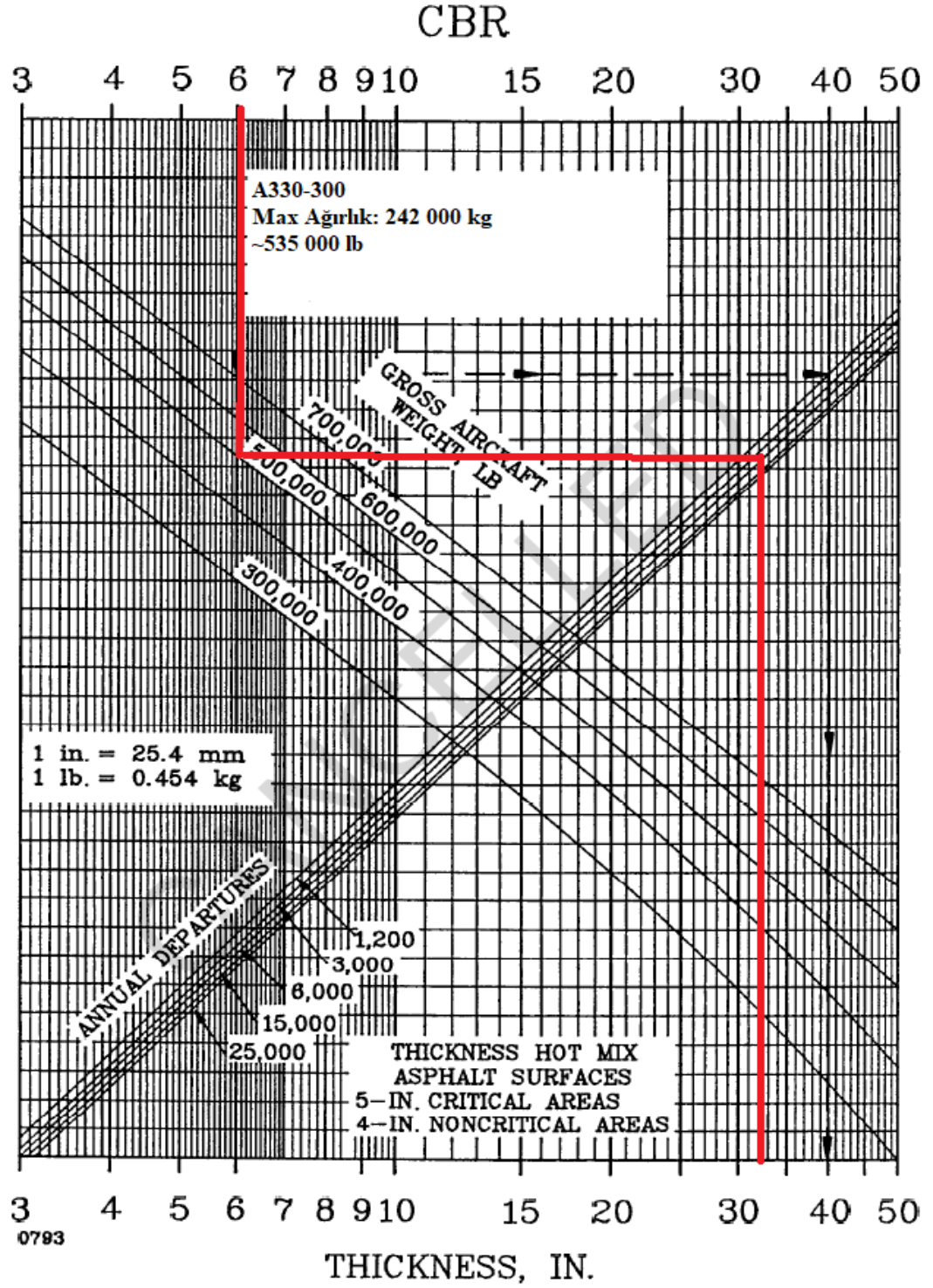
Alt temel ve temel gibi katmanlarda yüksek CBR'li malzemeler (örneğin kırmataş, stabilize malzeme) kullanılır. Bu sayede alttaki zayıf doğal zeminle uğraşmadan, kaplama tasarımı optimize edilir. FAA yönteminde taban zeminin CBR'si düşük kabul edilir, çünkü bu zemine müdahale etmek maliyetli ve verimsizdir. Bu nedenle tasarımda üst katmanlar (alt temel, temel, kaplama) iyileştirilerek zayıf taban zemine karşı sistem desteklenir.

FAA'nın AC 150/5320-6 dizayn grafiklerinde; alt temel varsayılan CBR değeri: 20 olarak esas alınır. Alt temelinin CBR değeri 20'den düşükse FAA uyarı yapar ve daha kalın kaplama ister. Bu da daha yüksek maliyete yol açar (FAA AC: 150/5320-6G, 2021).

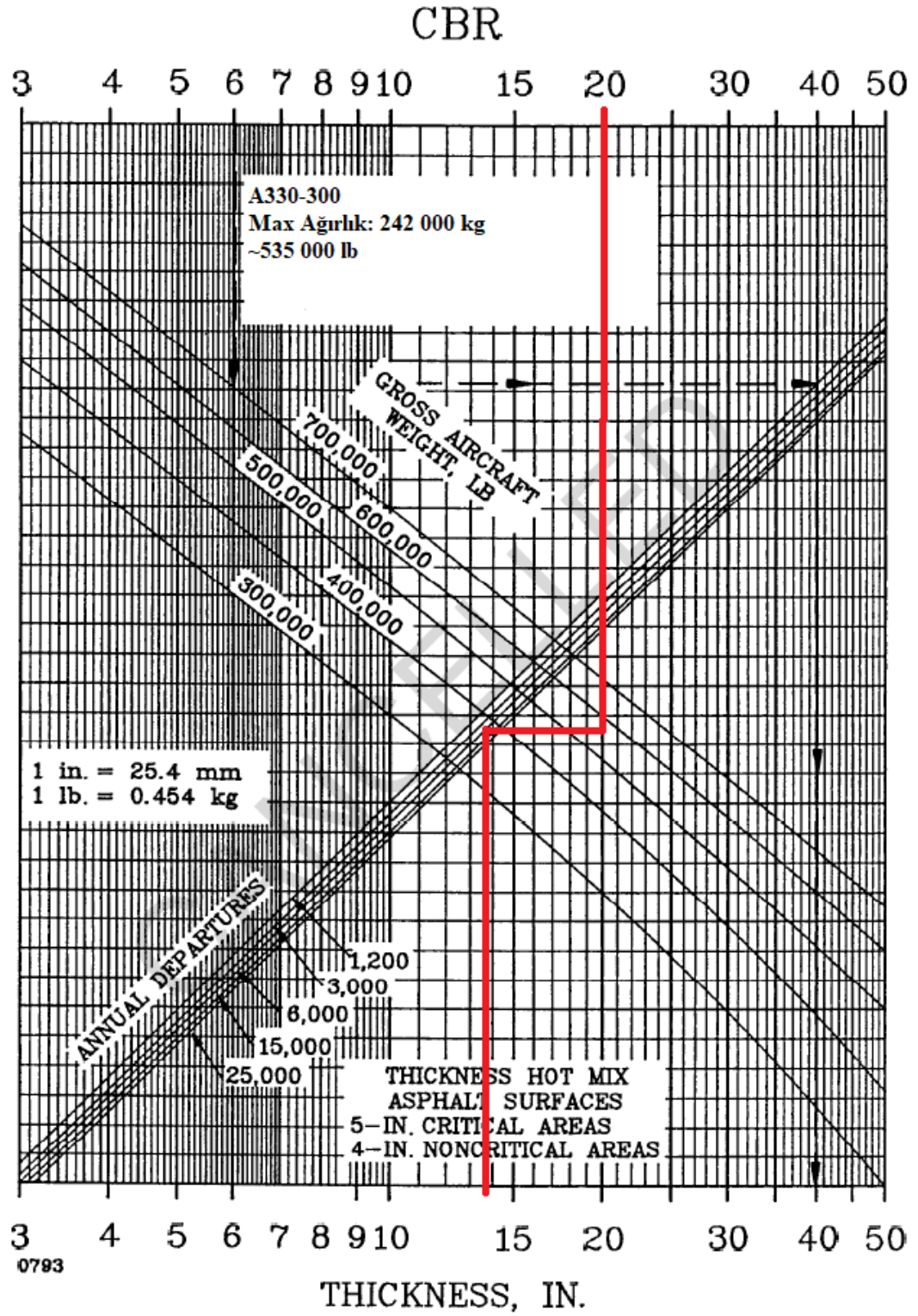
Alt temel için FAA tarafından CBR = 20 alınmasının sebebi, bu değer hem uygulamada yaygınca elde edilebilen bir granüler tabaka dayanımını temsil etmesi hem de FAA dizayn tabloları ve yazılımları ile uyumlu olmasıdır.

Uygulama aşamasında Taban zemini CBR değeri 6, Alt temel CBR değeri 20 olarak alınarak nomogram üzerinden A330-300 uçağı için yaklaşık kaplama kalınlığı tayini yapılacaktır. Resim 3.1.'de esnek üst yapı tabakası için toplam kalınlık hesaplamasına dair

görsel yer alırken Resim 3.2’de esnek üst yapı tabakası için alt temel kalınlık hesaplamasına dair görsel verilmiştir.



Resim 3. 1. CBR 6 değeri üzerinden toplam kalınlık tayini (FAA, 1995)



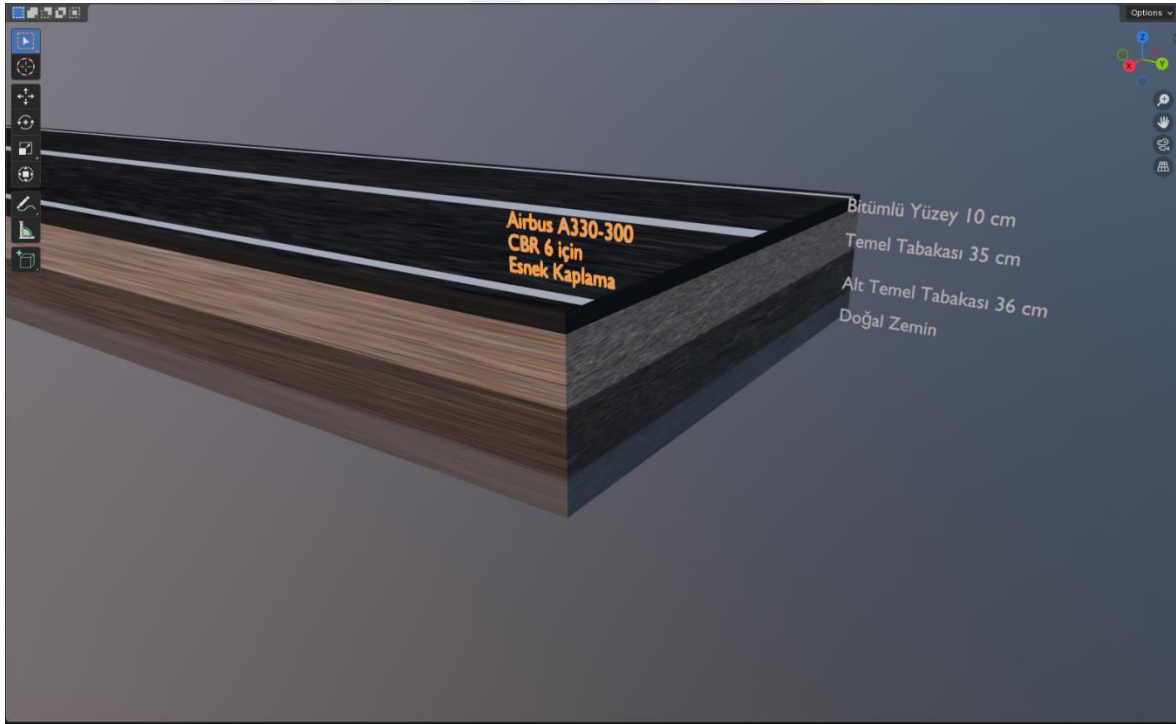
Resim 3. 2. Alt temel kalınlık tayini (FAA, 1995)

Tablo 3.2’de CBR değeri 6 alınarak hesaplanan esnek üst yapıya ait tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 3. 2. CBR 6 değeri üzerinden tabaka kalınlıkları

Tabaka	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)	Açıklama
Bitümlü Yüzey	4	10	Sıcak karışım asfalt (yük temas ve kayma dayanımı için)
Temel	14	35	Kırma taş + bağlayıcı (yük dağıtımı)
Alt Temel	14	36	CBR = 20 granüler malzeme
Toplam	32 inç	81 cm	FAA nomogramına uygun, optimize edilmiş kalınlık

Resim 3.3'te toplam tabaka kalınlığı tayini için CBR değeri 6, alt temel kalınlığı için CBR değeri 20 alınan tabakanın 3 boyutlu görünümü verilmiştir.



Resim 3. 3. Esnek kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü

Tasarım yapılırken;

- CBR = 6 noktasından dikey bir çizgi çizilir.
- 533,500 lb'ye en yakın ağırlık eğrisi ($\approx 550,000$ lb) seçilir.
- Yıllık 6,000 inişe karşılık gelen zona (Annual Departures) girilir.

- Elde edilen kesişim noktasından, doğrudan alt ekseninde kesilen noktaya inilir.
- Kaplama Kalınlığı ≈ 32 inç olarak karşımıza çıkar. Bu değer, FAA nomogramının alt ekseninde belirtilen “THICKNESS, IN.” ekseninden okunmuştur. Bu kalınlık yapılacak esnek üst yapı tasarımının toplam kalınlığını ifade eder.
- Alt temel kalınlık tayini için ise yine aynı grafikten CBR değeri 20 alınır ve yine aynı parametreler uygulanır. Burada yaklaşık 14 inçlik kısım bitümlü kaplama ve temel kalınlığına karşılık gelir. Toplam kalınlıktan 14 inçlik kalınlık çıkarıldığında alt temel kalınlığı elde edilir. CBR değerinin düşük olması temel kalınlığının artmasına yol açar. Bu da artan maliyet ve işçilik anlamına gelir.
- Bitümlü sıcak karışım tabaka kalınlığı 8 ~ 10 cm alınır (Okur, 2008).
- Bu kalınlık hesaplamalarının yanında ülkemizde yapılan PAT sahaları için ayırıcı tabakalar da kullanılmaktadır. Bu aşamada AYGM şartnameleri dikkate alınarak; gerilmeye karşı polietilen film veya bitüm emülsiyon malzemeler de kullanılır.
- Alt temel ve doğal zemin tabakasının stabilitesini sağlamak için kullanılan alt temel malzemesi ve doğal zemin yapısına uygun drenaj işlemleri ve drenaj filtre malzemeleri de kullanılabilir (AYGM, 2020).

$CBR \leq 8$ zeminlerde iyileştirme yapılmadıysa kalın asfalt ve güçlü temel/alt temel önerilir. Esnek kaplama yapılarında bitümlü yüzey, stabilize temel ve granüler alt temel olmak üzere en az üç katman önerilir (ICAO,2022)

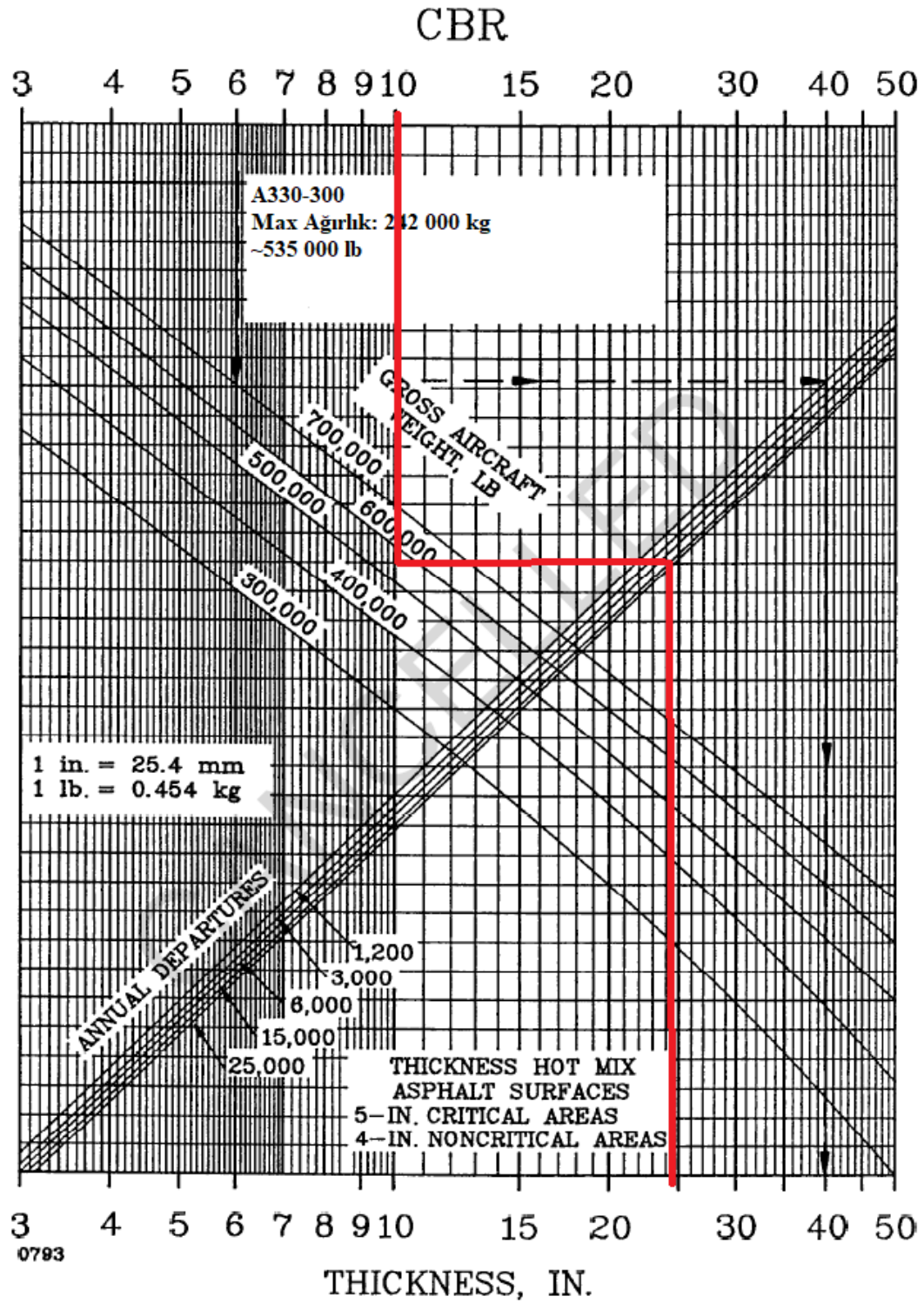
$CBR = 6$, tipik olarak zayıf drenajlı ve plastisite özelliği yüksek zeminler için geçerlidir. Bu tür zeminlerde, deformasyon riskine karşı yüksek kaplama kalınlığı önerilir (ASTM,2021)

Airbus A330-300 uçağı, 533.500 lb kalkış ağırlığı ile ağır bir uçaktır. Eğer zemin CBR’si yalnızca 6 ise, yüklerin tabana iletimi nedeniyle yüksek deformasyon riski oluşur. Bu nedenle nomogramdan 32 inç=81 cm kaplama kalınlığı elde edilmesi mühendislik olarak tutarlıdır. Alt temel CBR = 20 olduğu için taşıma gücü arttırılmıştır, 6,000 iniş sayısı orta yoğunluktadır ve bu durum yorulma ömrü açısından dikkate alınmıştır.

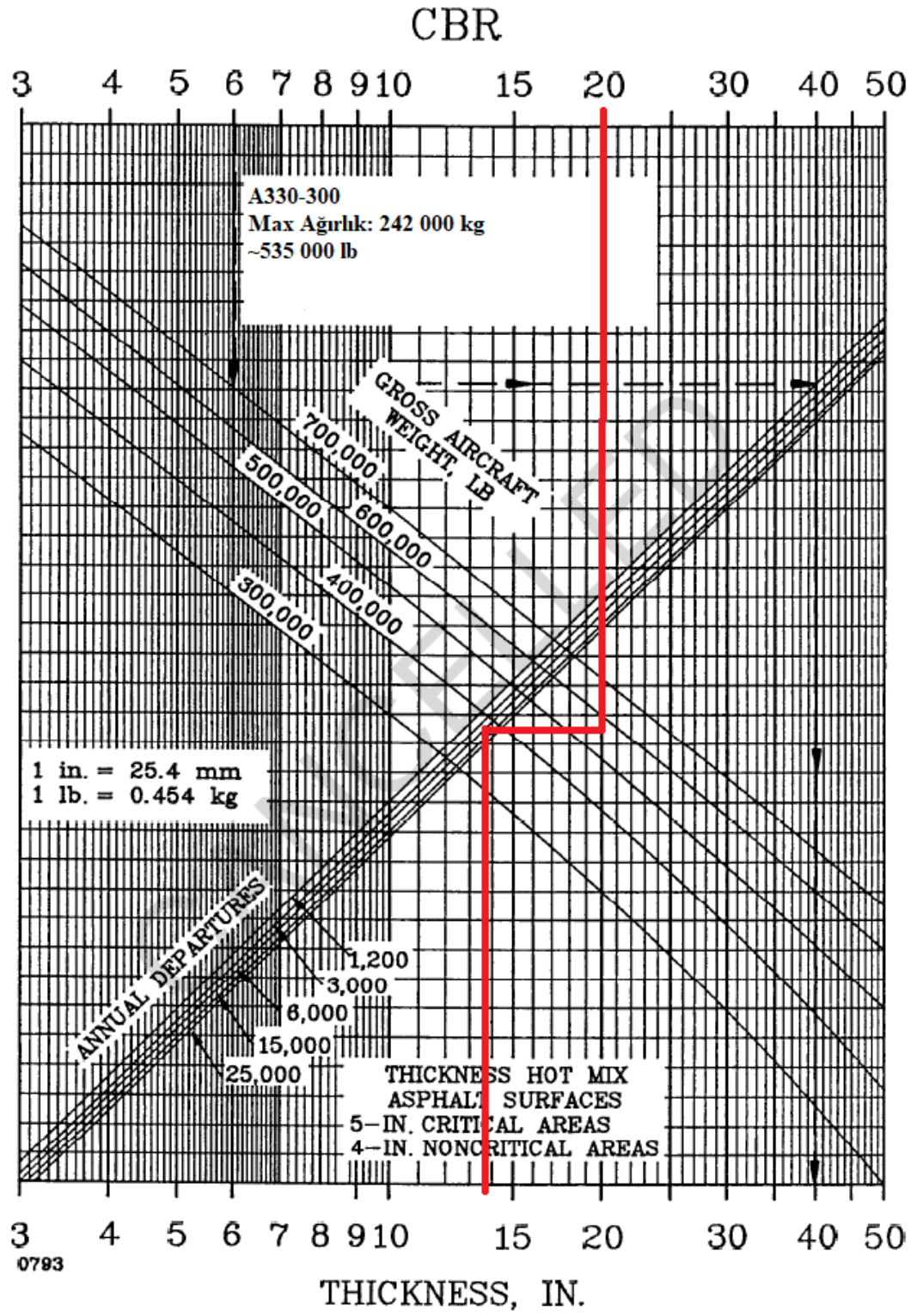
Uygulama öncesinde CBR sahada deneyle teyit edilmeli, zemin iyileştirmesi yapılacaksa (kireç-çimento stabilizasyonu vb.) kaplama kalınlığı yeniden gözden geçirilebilir, drenaj tabakası, geotekstil ayırıcı ve filtre elemanları gibi ikincil yapı elemanları da detay projeye dahil edilmelidir.

Esnek üst yapı tasarımında uygulama aşamasında Taban zemini CBR değeri 10, Alt temel CBR değeri 20 olarak alınarak nomogram üzerinden A330-300 uçağı için yaklaşık

kaplama kalınlığı tayini yapılacak. Resim 3.4.'de esnek üst yapı tabakası için toplam kalınlık hesaplamasına dair görsel yer alırken Resim 3.5.'de esnek üst yapı tabakası için alt temel kalınlık hesaplamasına dair görsel verilmiştir.



Resim 3. 4. CBR 10 değeri üzerinden toplam kalınlık tayini (FAA,1995)



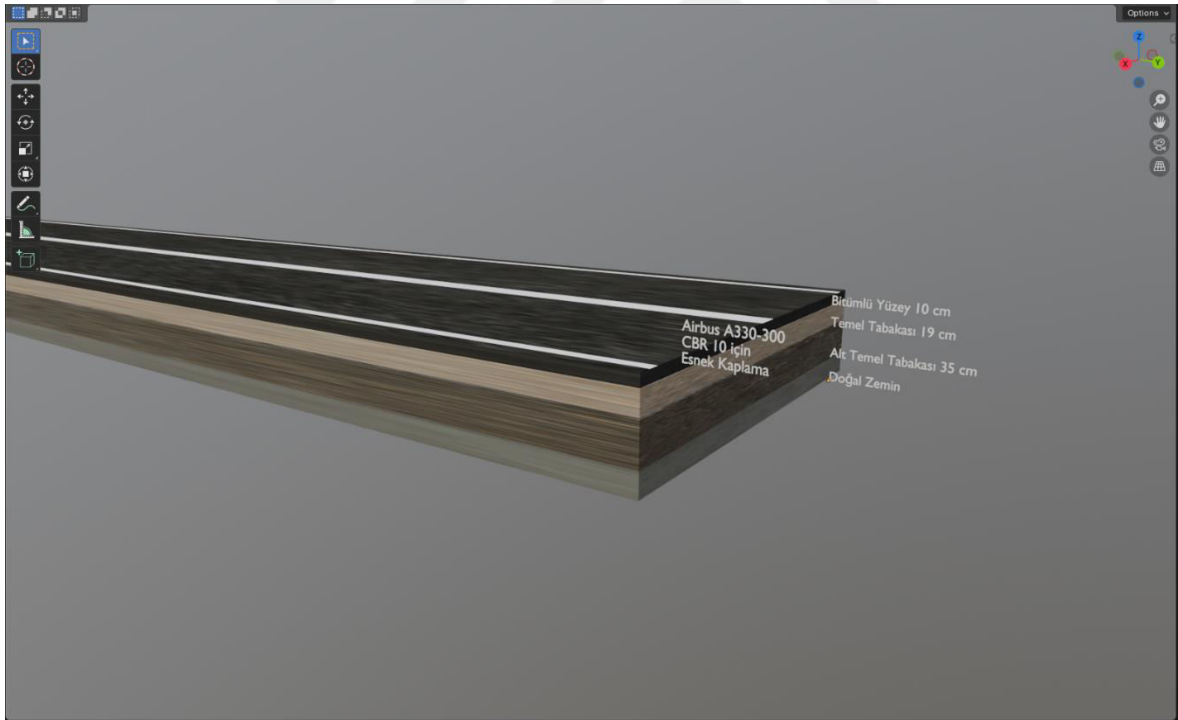
Resim 3. 5. Alt temel kalınlık tayini (FAA,1995)

Tablo 3.3'te CBR değeri 10 alınarak hesaplanan esnek üst yapıya ait tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 3. 3. CBR 10 değeri üzerinden tabaka kalınlıkları

Tabaka	Kalınlık (inç)	Kalınlık (cm)	Açıklama
Bitümlü Yüzey	4	10	Aşınma ve kayma dayanımı
Stabilize Temel	7	19	Yük taşıma ve yayılma tabakası
Granüler Alt Temel	14	35	CBR = 20 granüler malzeme
Toplam	25	64	FAA nomogramına göre hesaplanan kalınlık

Resim 3.6'da toplam tabaka kalınlığı tayini için CBR değeri 10, alt temel kalınlığı için CBR değeri 20 alınan tabakanın 3 boyutlu görünümü verilmiştir.



Resim 3. 6. Esnek kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü

Alt temel kalınlık tayini için ise yine aynı grafikten CBR değeri 20 alınır ve yine aynı parametreler uygulanır. Burada yaklaşık 14 inçlik kısım bitümlü kaplama ve temel kalınlığına karşılık gelir. Toplam kalınlıktan 14 inçlik kalınlık çıkarıldığında alt temel

kalınlığı elde edilir. Bu tasarım aşamasında CBR değerinin yüksek olması CBR değeri düşük olan kaplamaya göre alt temel kalınlığının daha az olmasına yol açar.

Zemin CBR'si 10 olan sahalarda alt temel kalınlığı optimize edilebilir ancak iyileştirme gereksinimi düşüktür (ICAO,2022).

CBR = 10, orta seviyeli doğal zemin anlamına gelir (kumlu kil/siltli zemin olabilir). Alt temel CBR = 20, GW/GP tipi iyi derecelenmiş granüler malzeme olabilir (ASTM, 2021).

CBR değerinin yüksek olması taşıyıcı olarak yükü doğal zemine aktaran alt temel tabaka kalınlığının CBR değeri düşük olan kaplama tasarımına göre daha az olmasına yol açar. Tablo 3.4'te yapılacak esnek üst yapı tasarımının uzun ömürlü olması açısından yönetmeliklere göre tavsiyeler yer almaktadır.

Tablo 3. 4. Tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması (FAA, 1995 ve diğer)

Tabaka Türü	Durum (CBR=6 için)	Durum (CBR=10 için)	Kaynak	Açıklama
Drenaj Tabakası	Gerekli	Tavsiye edilir	FAA, ICAO, KGM	Yeraltı suyu varsa kullanılır. Granüler malzeme veya geokompozit.
Geotekstil Ayrıcı	Tavsiye edilir	Opsiyonel	FAA, ICAO, KGM	Zemin ile alt temel karışmasını engeller. Özellikle siltli zeminlerde.
Zemin İyileştirme	Tavsiye edilir	Gerekmez	FAA AC 150/5320- 6D	CBR = 6 ise kireç/çimento stabilizasyonu gerekebilir.
Drenaj Borusu + Filtre	Opsiyonel	Opsiyonel	ICAO, DHMI	Perfore borular + filtre çakılı, apron kenarlarında önerilir.
Dolgu	Gerektiğinde	Gerektiğinde	ICAO ADM, KGM	Platform yükseltme, oturma kontrolü için. Zorunlu değil, saha koşuluna bağlı.

Kaplama kalınlıkları dikkate alındığında zemin CBR değeri arttıkça kaplamanın kalınlığı azalmaktadır.

FAA'ya göre CBR < 8 zeminler için yüksek kalınlık zorunludur.

ICAO'ya göre CBR < 10 için zemin iyileştirme veya daha kalın kaplama önerilir. 3 tabakalı sistem (yüzey + temel + alt temel) önerilir.

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'na göre zemin CBR'si < 8 ise iyileştirme yapılmalı veya daha kalın granüler tabaka kullanılmalıdır.

Bu verilerden yola çıkarak CBR değerinin esnek kaplama kalınlığı üzerinde büyük etkisi görülmektedir. Kaplama kalınlığının fazla olması hem maliyeti yükseltmekte hem de işçilik açısından zaman kaybına neden olmaktadır. Bu açıdan PAT sahasının inşa edileceği sahanın temel ve bitümlü kaplama açısından CBR değerinin 10 olması kaplama kalınlığının daha az olmasına bu da maliyet ve zaman açısından avantaj sağlayacaktır.

3.1.2. Rijit üst yapı tasarımı

Çalışmanın bu adımında FAA yöntemine göre Airbus A330-300 uçağı teknik özellikleri esas alınarak beton kaplama, alt temel ve temel kalınlıkları tayini yapılacaktır.

Taban zemini doğal tabaka olarak alt temel, temel ve beton kaplamadan gelen yükleri karşılayan yapı bölümüdür. Taban zemini k değeri (modulus of subgrade reaction), rijit kaplama tasarımında kritik bir parametredir çünkü zeminin rijit plakaya verdiği elastik tepkiyi ifade eder. Yeterli taşıma gücüne sahip olmayan doğal zeminlerde üst yapı tabakasının ömrü kısalmış, beton çatlar, kaplama kalınlıkları yetersiz kalır. Subgrade k değerinin tayini için mevcut zemin üzerine kademeli yükler uygulanır. Plakanın altında oluşan düşey oturma (defleksiyon) ölçülür. Böylece k değeri tespit edilir. Plaka yükleme testinin yapılmadığı sahalarda k değeri Tablo 3.5.'de yer alan FAA verilerine göre zemin tipine göre seçilir (FAA, 1995).

Tablo 3. 5. Zemin tipine göre k değeri tayini

Zemin Tipi	k Değeri (pci)	k (MN/m ³)
Yumuşak kil	50	13.6
Kumlu kil	75	20.4
Sıkı kum/çakıl	100	27.2
Stabilize alt temel	150	40.8
Kaya veya çok sert zemin	200+	54+

K değeri, sabit olmak zorunda değildir; sahadaki zemin özelliklerine göre değiştirilebilir. Ancak standart tasarım grafiklerinde genellikle 50 psi gibi emin bir değer

kullanılır. Sahada iyileştirme yapılmışsa veya testlerle yüksek değer doğrulanmışsa, daha yüksek k değeri kullanılarak daha ekonomik tasarım yapılabilir.

FAA kaynaklarına göre abaklarda yer alan beton eğilme dayanımı değeri (psi) kullanım alanı ve uçak tipine göre seçilmektedir. Uçakların ağırlıklarına göre eğilme dayanım değeri değişmektedir. FAA kaynaklarına göre eğilme dayanımı değeri seçim kriterleri Tablo 3.6.'da yer almaktadır (FAA, 1995).

Tablo 3. 6. Uçak tiplerine göre eğilme dayanımı değerleri (FAA, 1995)

Kullanım Alanı	Eğilme Dayanımı (psi)	Not
Hafif uçaklar (GA apron)	550–600 psi	Daha ince plak
Orta düzey apron/taksi yolları	600–700 psi	Standart
Ana pist / ağır uçak	700–800+ psi	Kalın plak gerekir
Özel yüksek dayanım sınıfı beton	>800 psi	Maliyetli, özel projelerde

Beton psi değeri teknik olarak değiştirilebilir ve bu, zemin durumu, maliyet hedefi, trafik yoğunluğu gibi faktörlere göre optimize edilebilir. Ancak; dayanımı yükseltmek maliyeti artırır ve kalınlığı azaltır. Dayanımı düşürmek, maliyeti düşürür, kalınlığı artırır. Her iki durumda da FAA grafiklerinden kalınlığa etkisi hesaplanabilir.

FAA'nın rijit üstyapı tasarım grafiklerinde eğilme dayanımı eğrileri 500–900 psi aralığında çizilmiştir. Bu grafiklerde ağır uçaklar için genellikle 700–800 psi arası değerler referans alınır. FAA'nın rijit kaplama grafiklerinde yatay eksen olarak psi cinsinden eğilme dayanımı kullanılır.

FAA'nın rijit üstyapı tasarım grafiklerinde eğilme dayanımı eğrileri ağır uçaklar için genellikle 700–800 psi arası değerler referans alınır. FAA Kaynağı: AC 150/5320-6D

Airbus A330-300, pist yüzeyine büyük yük uygulayan, çift tandem teker yapısına sahip, uzun menzilli geniş gövdeli bir uçaktır. FAA grafiklerinde benzer yük profiline sahip uçaklar için genellikle 740–800 psi arası eğilme dayanımı esas alınmıştır.

Çalışmanın bu aşamasında Rijit kaplama tasarımı için yumuşak kil ve sıkı/kum çakıldan meydana gelen yıllık yaklaşık 6000 uçuş gerçekleştiren ve Airbus A330-300 uçağının ağırlığı ve teknik özelliklerine göre psi değeri 750, k değeri (pci) 100 ve 50 olarak değerlendirilip rijit kaplama kalınlıkları tayin edilecektir.

Kaplama tayini uygulama aşamasında;

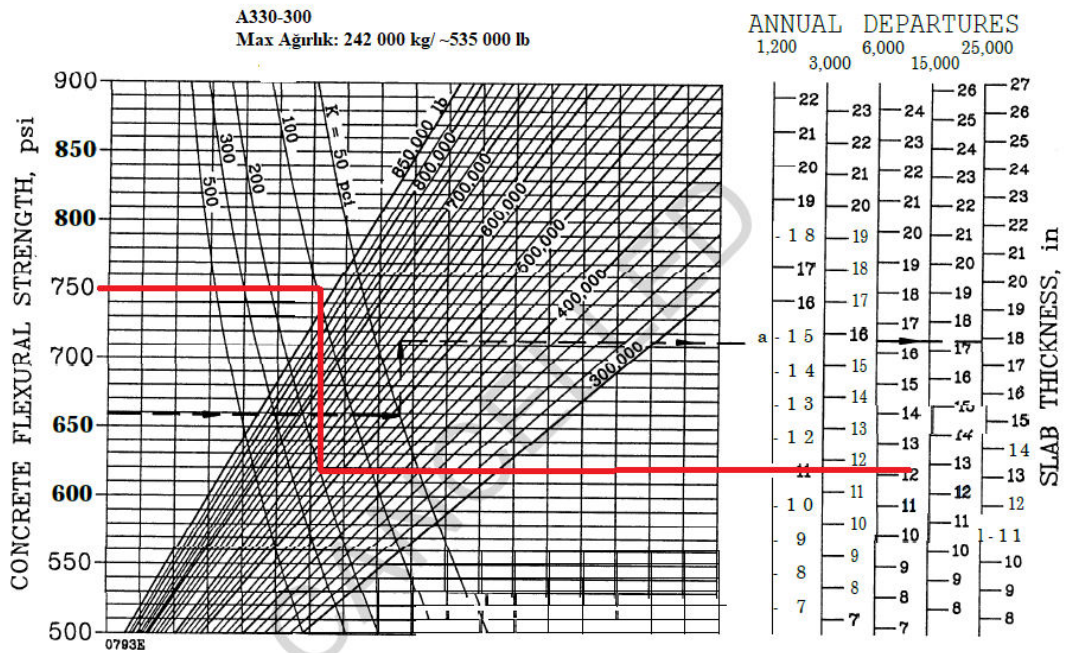
750 psi, FAA'nın önerdiği dayanım aralığında yer alır (600–900 psi). Grafikte bu noktadan yatay bir çizgi çizilir.

750 psi çizgisi, $k = 100$ ve 50 pci eğrilerini keser. Bu eğri, yumuşak kil ve sıkı kum/çakıl gibi taşıma kapasiteli zeminlere karşılık gelir.

Bu kesişim noktasından dikey bir çizgi çizilir. Grafikte 533,500 lb'ye yakın eğri 550,000 lb (gross load) eğrisidir

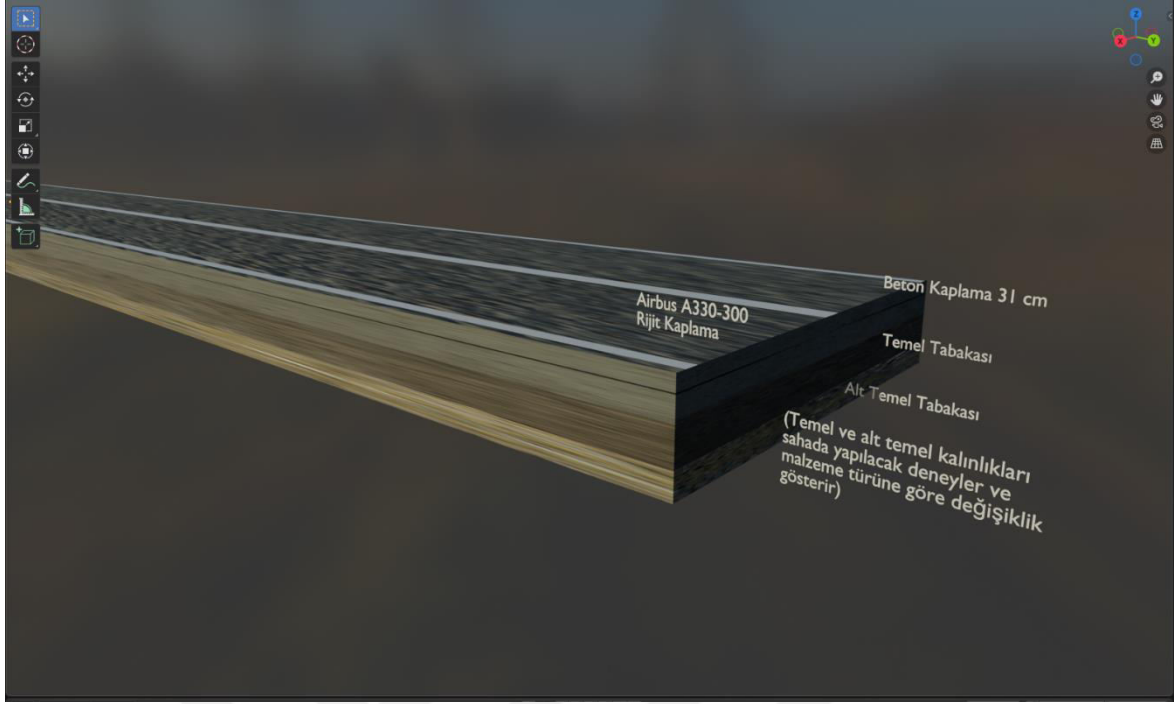
Bu kesimden sağa yatay çizgi çekilir. Bu çizgi, yıllık uçuş sayısını temsil eden kolonlarla kesişecektir. Bu aşamada beton tabaka kalınlığı inç cinsinden tayin edilir.

Resim 3.7'de k değerinin 100 olduğu varsayılarak beton kaplama kalınlığı tayini verilmiştir.



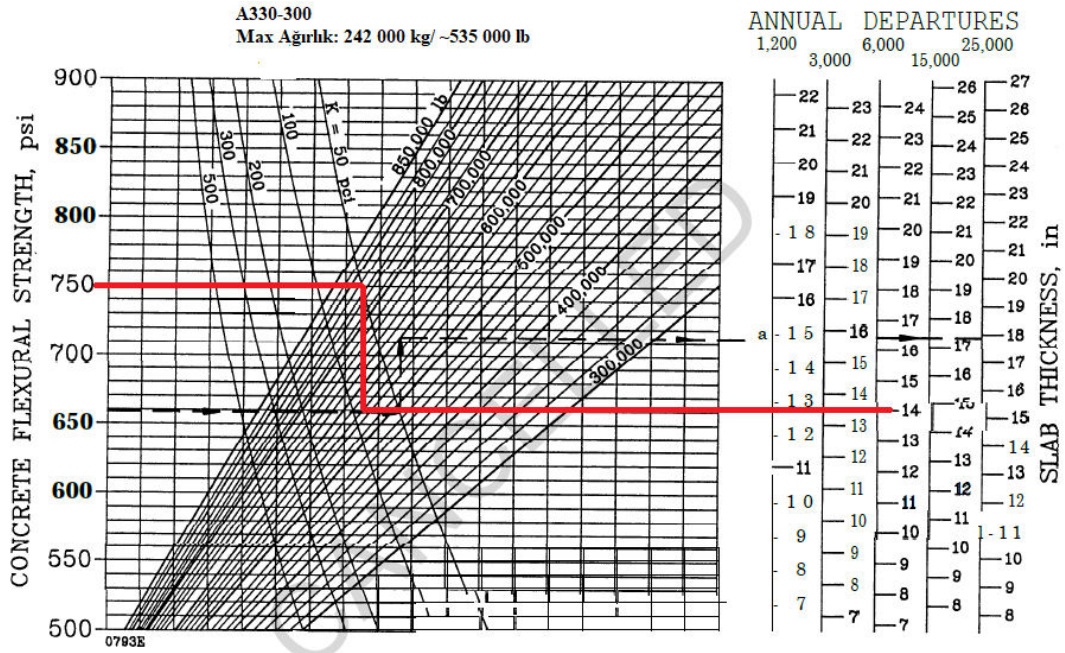
Resim 3. 7. Beton kaplama kalınlığı tayini (FAA, 1995)

Abak yardımıyla yapılan hesaplamalar sonucunda 750 psi ve 100 pci değerleri esas alınarak hesaplaması yapılan beton kaplama kalınlığı yaklaşık 12 inç yani 31 cm olarak karşımıza çıkmaktadır. Resim 3.8.'de 31 cm kalınlığa sahip rijit kaplamanın 3 boyutlu görünümü verilmiştir.



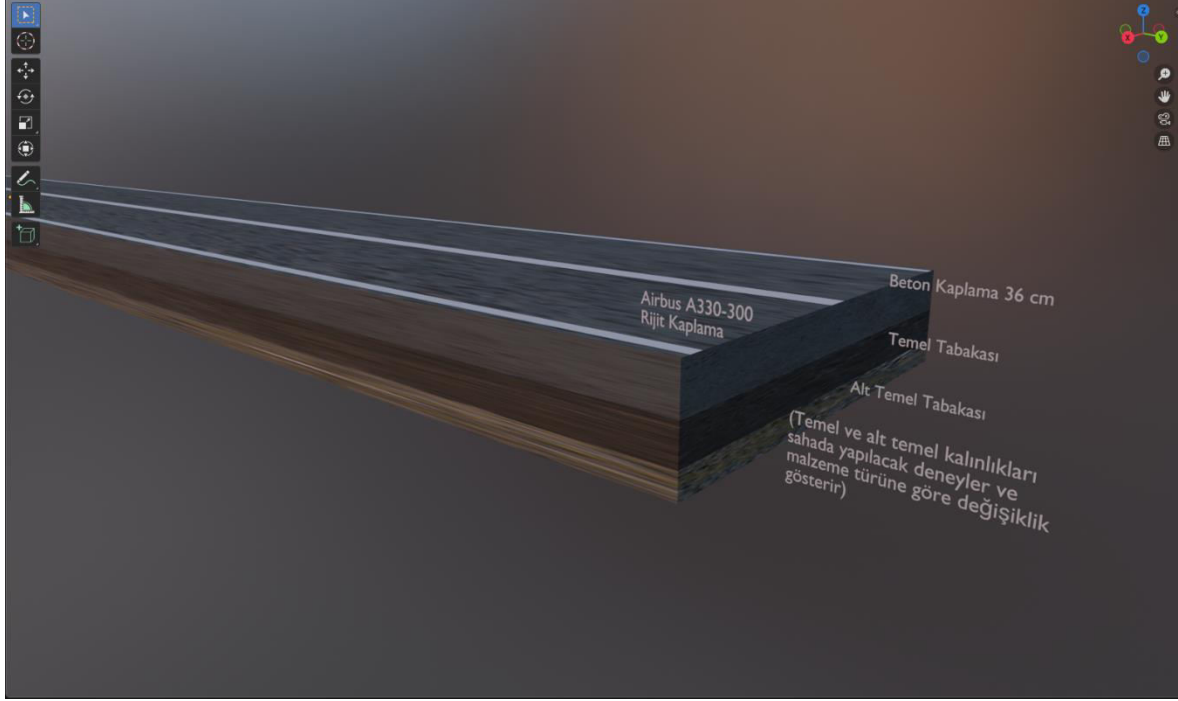
Resim 3. 8. Rijit kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü (31 cm)

Resim 3.9’da k değerinin 50 olduğu varsayılarak beton kaplama kalınlığı tayini yapılmıştır.



Resim 3. 9. Beton kaplama kalınlığı tayini (FAA, 1995)

Abak yardımıyla yapılan hesaplamalar sonucunda 750 psi ve 50 pci değerleri esas alınarak hesaplaması yapılan beton kaplama kalınlığı yaklaşık 14 inç yani 36 cm olarak karşımıza çıkmaktadır. Resim 3.10'da 36 cm kalınlığa sahip rijit kaplamanın 3 boyutlu görünümü verilmiştir.



Resim 3. 10. Rijit kaplama tabaka kalınlıklarının 3 boyutlu görünümü (36 cm)

Tabaka kalınlık tayininden yola çıkarak zemin özelliğine göre tabaka kalınlıklarının değiştiği görülmektedir. Sıkı kum/çakıldan oluşan zeminlerin yüksek drenaj kapasitelerine sahip oldukları, yüksek içsel sürtünme açısı ve düşük sıkışma özellikleri sayesinde PAT sahaları için daha uygun zeminlerdir. Bu durum sıkı kum/çakıldan oluşan zeminlerin beton kaplama kalınlıklarının daha az olduğunu ortaya koymuştur.

Yumuşak kilden oluşan zeminler, düşük taşıma gücü ve yüksek sıkışabilirlik nedeniyle PAT sahaları gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalan yapılar için doğal halleriyle uygun değildir. Bu zeminler iyileştirme tekniklerine ihtiyaç duyar ve daha kalın beton kaplamalara ihtiyaç duyar.

Beton kaplama kalınlığı tayininden sonra şimdi beton plakanın altında yer alan ve gelen yükleri zemine iletecek temel ve alt temel tabakaları için kullanacağımız 2 adet abak yer almaktadır.

Resim 3.11’de yer alan grafikte rijit kaplama tabakası altına inşa edilecek temel tabakasının Resim 3.12’de ise temel tabakası altında yer alan alt temel tabakasının mm ve inç cinsinden kalınlık tayini hesabı yapılır. Grafiğin X ekseninde kaplama kalınlığı yer almaktadır. Y ekseninde k değeri yer almaktadır.

Resim 3.11. ve 3.12.’de yer alan Subgrade k değeri (modulus of subgrade reaction), yukarıda beton kaplama kalınlığı tayini yapılırken anlatılmıştır.

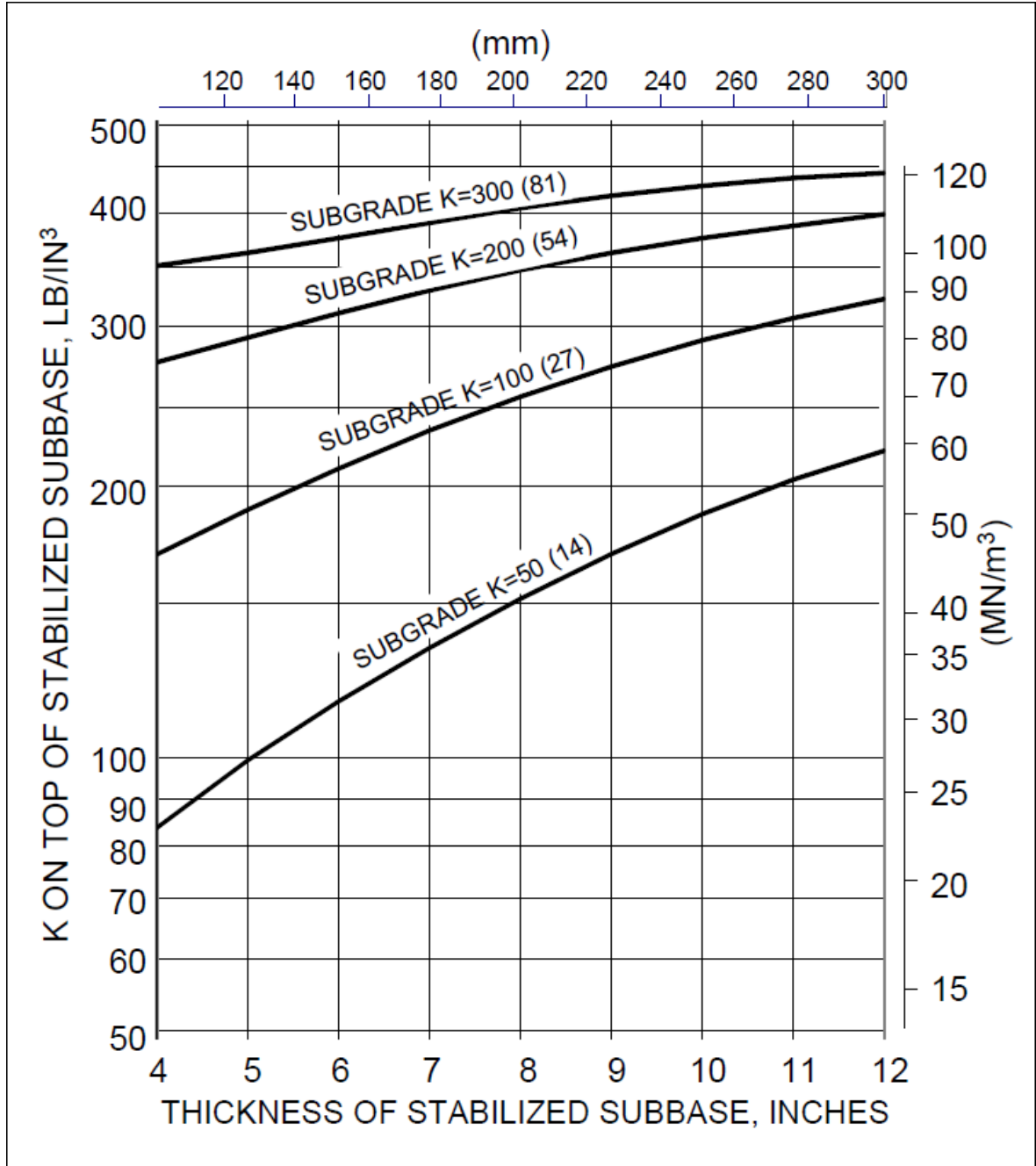
Temel ve alt temel tabakası tayin edilirken doğal zemin k değeri esas alınarak tabakaların kalınlık tayini yapılır. FAA verilerine göre alt temel ve temel malzemesi seriminde kullanılacak malzeme değerlerine göre ve sugrade k değeri esas alınarak abaklardan kaplama kalınlık tayini yapılır. Bu aşamada FAA’nın bazı önerileri yer almaktadır (FAA, 2021).

Tablo 3.7’de yerinde yapılan deney sonuçlarından farklı olarak malzeme türüne göre alt temel ve temel tabakası tayininde kullanılacak k değerleri verilmiştir.

Tablo 3. 7. Alt temel ve temel tabakası için malzemeye göre k değerleri (FAA, 2021)

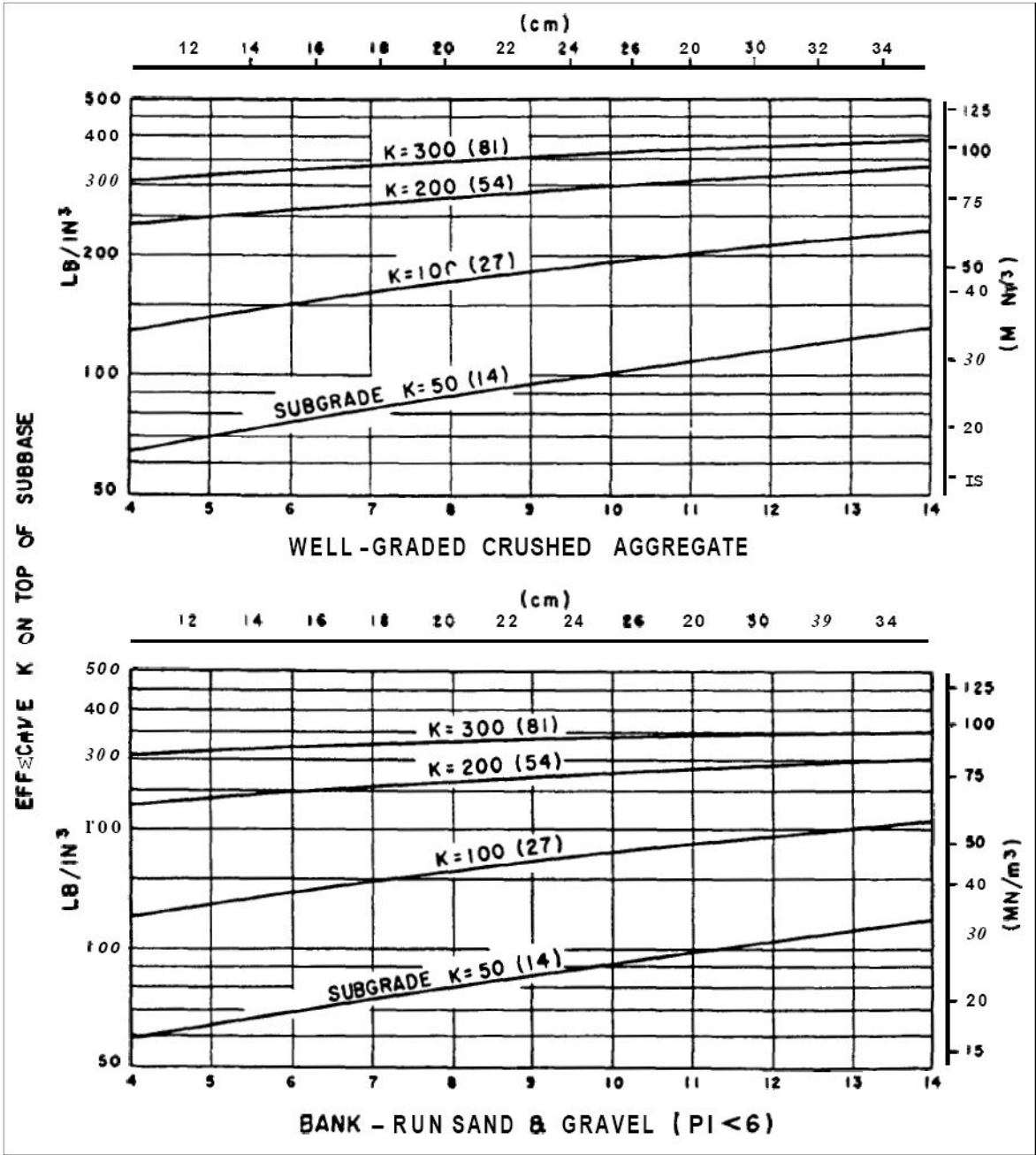
Alt Temel ve Temel Malzeme Türü	Tipik k Değeri (lb/in ³)	Açıklama
İyi derecelendirilmiş kırmataş	200 – 300	. Yüksek taşıma gücü sağlar. Drenajı iyidir, granüler yapılıdır. FAA tasarımlarında sıklıkla tercih edilir.
Doğal çakıl-karışımı (PI < 6)	100 – 200	Düşük plastisiteli doğal malzemeden oluşur. Çoğu zaman stabilize edilmeden serilir. Orta düzey taşıma kapasitesi sunar.
Stabilize kum/çakıl karışımı	150 – 250	Saha karışımı olarak hazırlanır. Genellikle çimento veya kireçle stabilize edilir. Yoğunluk ve sıkıştırma performansına bağlı olarak iyi taşıma kapasitesi sağlar.
Geri dönüşümlü beton malzeme	200 – 300	Kırılmış eski beton malzemelerinden elde edilir. Yeterli sıkıştırma ile yüksek taşıma gücü sağlar. Sürdürülebilir malzeme olması sebebiyle tercih edilir.

Resim 3.11’de rijit kaplama altına gelecek temel kalınlığı grafiği yer alırken Resim 3.12.’de temel tabakası altına gelecek ve yükleri doğal zemine aktaracak alt temel kalınlığı verilmiştir.



Resim 3. 11. Temel tabakası kalınlık tayini (FAA, 2014)

Resim 3.11’de beton kaplama altına gelen uçak yüklerini karşılayan temel tabakası kalınlık tayini yer almaktadır. Bu tabaka alt temel tabakasında yer almakla beraber portland çimento, bitümlü malzeme, kırılmış agrega gibi malzemelerin sıkıştırılmasından meydana gelir. Temel tabakası ile beton kaplama tabakası arasına veya alt temel ile temel tabakası arasına bitümlü yapıştırıcı malzeme serimi yapılabilir. Tack coat katmanları çok ince olduğundan toplam kalınlığa etkisi azdır ama yapısal bütünlük için kritik önemdedir. Tabakalar aderans sağlar ve yük dağılımını olumlu yönde etkiler (AYGM,2020).



Resim 3. 12. Alt temel tabakası kalınlık tayini (FAA, 2014)

Alt temel tabakası doğal zemin ile temel tabakası arasında serimi planlanan taşıyıcı görevi gören tabakadır. Alt temel tabakası gelen yükleri doğal zemine aktaran bir veya birkaç malzemenin karışımından meydana gelir. Alt temel tabakası olarak kullanılan Grafiğin Y ekseninde yer alan subbase k değeri, alt temel tabakasının elastik davranışını temsil eder. Bu değer; malzeme cinsi, dane dağılımı, sıkıştırma derecesi, nem içeriği ve laboratuvar deney sonuçlarına bağlıdır.

Ülkemizde inşa edilen havaalanlarında AYGM şartnamelerine göre alt temel malzemesi olarak genellikle kırmataş malzemesi kullanılır. Bu malzemeler; mıcır veya kırma taştan meydana gelen düşük plastisiteli, iyi derecelendirilmiş, suya karşı dayanıklı ve stabilize edilmiş malzemelerdir. Alt temel malzemesi olarak; kum-çakıl karışımları, bitümlü malzeme, geri dönüşümlü beton malzemesi gibi malzemeler de alt temel malzemesi olarak kullanılır (AYGM, 2020 ve TSE 9582, 2012).



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, havaalanı PAT sahası üstyapılarında kullanılan esnek ve rijit kaplama sistemleri mühendislik parametreleri bağlamında kapsamlı şekilde değerlendirilmiş; ağır uçak sınıfına giren Airbus A330-300 tipi uçak temel alınarak üstyapı tasarım analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, uçak tipi, iniş takımı geometrisi, teker yükü ve operasyonel frekans gibi değişkenlerin, kaplama sisteminin kalınlığı ve tabaka özellikleri üzerinde doğrudan belirleyici olduğu ortaya konmuştur.

A330-300 tipi uçak, sahip olduğu yüksek yapısal yükleme kapasitesi nedeniyle hem esnek hem de rijit sistemlerde daha büyük kalınlıklarda üstyapı gerektirmektedir. Bu durum, pist tasarımında yalnızca trafik yoğunluğunun değil, aynı zamanda uçağa özgü yükleme karakteristiklerinin dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Esnek sistemlerde granüler temel tabakası ve bitümlü bağlayıcıların deformasyon ve yorulma dayanımı açısından belirleyici olduğu; rijit sistemlerde ise beton tabaka kalınlığı, reaksiyon modülü (k değeri) ve alt tabaka destek koşullarının performansı doğrudan etkilediği tespit edilmiştir.

Tasarım sürecinde kullanılan FAA, ICAO, AASHTO ve TS gibi standartlara dayalı yöntemlerin, farklı mühendislik varsayımlarına sahip olması nedeniyle aynı saha koşullarında dahi farklı kalınlık değerleri üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yöntem seçiminde saha özelliklerinin, uçak filosunun, iklim koşullarının ve ekonomik kısıtların birlikte değerlendirilmesini; çok kriterli karar destek sistemlerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır.

Analizler sonucunda, esnek sistemlerin zemin taşıma gücündeki değişimlere daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. Örneğin CBR değerindeki küçük bir artış (CBR 6'dan 10'a) yaklaşık 17 cm kaplama kalınlığı azalmasına yol açarken; rijit sistemlerde k değerinin iki katına çıkması durumunda ($k = 50 \rightarrow 100$ pci), beton kalınlığında yalnızca 5 cm'lik bir azalma gözlenmiştir. Bu bulgular, esnek kaplamaların zemin koşullarından daha fazla etkilendiğini açıkça göstermektedir.

Esnek kaplamalar, uygulama kolaylığı ve düşük ilk yatırım maliyeti gibi avantajlar sunsa da zayıf zeminlerde kalın tabaka gereksinimi ve deformasyon riski nedeniyle bazı sahalarda ekonomik ve yapım süresi açısından dezavantajlı hale gelebilmektedir. Rijit sistemler ise yüksek yük taşıma kapasitesi ve daha uzun servis ömrü sunmasına karşın, ilk yapım maliyetleri ve inşaat süresi bakımından daha yüksek değerlere sahiptir. Buna karşın,

düşük bakım ihtiyacı sayesinde yaşam döngüsü maliyeti açısından avantaj yaratabilmektedir.

Kompozit kaplama sistemleri, rijit ve esnek sistemlerin olumlu yönlerini birleştirme potansiyeline sahip alternatiflerdir. Özellikle zemin koşullarının heterojen olduğu havaalanı sahalarında, bu tür melez çözümler teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir seçenekler olarak değerlendirilebilir.

Tasarım aşamasında yalnızca uçakların maksimum kalkış ağırlığı değil, aynı zamanda iniş takımı dizilimi, tekerlek sayısı ve lastik basınçlarının da ayrıntılı olarak analiz edilmesi gereklidir. Zemin etüt çalışmalarının ise yalnızca taşıma gücü ile sınırlı kalmayıp; plastisite indeksi, şişme potansiyeli, likit limit gibi parametreleri de içerecek biçimde genişletilmesi önerilmektedir. Malzeme seçimi, bu mühendislik verileri doğrultusunda optimize edilmelidir.

Ayrıca, drenaj sistemlerinin üstyapı dayanımı ve uzun ömürlülüğü üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, yüzey suyu tahliyesi, banket eğimi ve alt drenaj sistemleri gibi unsurlar tasarım sürecine entegre edilmelidir.

Sonuç olarak bu çalışma, havaalanı pist üstyapı tasarımında yalnızca taşıma kapasitesinin değil; zemin özellikleri, malzeme performansı, çevresel koşullar ve ekonomik sürdürülebilirliğin birlikte ele alınması gerektiğini vurgulayan bütüncül bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Elde edilen bulgular, akademik literatüre katkı sağlamanın yanı sıra, saha uygulamalarında tasarımcı ve karar vericilere rehberlik edecek niteliktedir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO T 222-8**, 2021, Nonrepetitive Static Plate Load Test Of Soils And Flexible Pavement Components For Use In Evaluation And Design Of Airport And Highway Pavements
- AASHTO T 85**, 2021, Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 90**, 2021, Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils.
- AASHTO T 92-97, 2005**. Determing The Shrinkage Factor of Soils.
- Akyüz, B., Demir, A., & Sarı, M.**, 2022. “Beton üretiminde kullanılan suyun özelliklerinin incelenmesi”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(1), 311–320.
- Arslan M.**, 2007, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Ankara.
- Ashford, N., Wright, P., H.**, Airport Engineering, 1992, John Wiley&Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- ASTM**, 2021, Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils
- AYGM**, 2020, Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, Teknik Esasları; Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi.
- Bingöl, G.**, 2000, Havaalanı Üstyapılarının Tasarımı ve İyileştirilmesi Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çelik, H., Kaya, M.**, 2015, Beton ve Asfalt Kaplamalarda Kullanılan Agregaların Şekil Özelliklerinin Mekanik Davranışa Etkisi. Yapı Teknolojileri Dergisi, 3(2), 63–70.
- Çevrim K.**, 2025, Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarı Los Angeles (Aşınma Kaybı) Deneyi.
- Das, B. M.**, 2013, Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning.
- Demirboğa, R., & Gül, R.**, 2005, Katkı maddelerinin betonun mekanik özelliklerine etkisi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1(2), 25–34.
- Deney Föyü 216**, 2017, Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı-1.
- Dipova, N.**, 2011, Zeminlerin Likit Limitinin Tek Nokta Koni Batma Yöntemiyle Belirlenmesi.
- FAA**, 1995, Airport Pavement Design And Evaluation

FAA, 1995 ve diğeri, FAA AC 150/5320-6D, 1995, ICAO ADM Part 2 (2022), Chapter 3: Structural Design, Appendix A, KGM 2023 Teknik Şartnamesi – Esnek Üstyapılar, DHMİ Teknik Şartnamesi (2021)

FAA AC 150/5320-5B, 1970, Airport Drainage.

FAA AC 150/5320-6F, 2016, Airport Pavement Design and Evaluation.

FAA AC 150/5320-6G, 2021, Airport Pavement Design and Evaluation.

FAA, 2009, AC 150/5320-6D - Airport Pavement Design and Evaluation

FAA, 2014, 150/5335-5C, Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength

FAA, 2021, AC 150/5320-6G - Airport Pavement Design and Evaluation

Holtz, R. D., & Kovacs, W. D., 1981, An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall.

Horonjeff, R., McKelvey, F.X., Sproule, W.J., & Young, S.B., 2010, Planning and Design of Airports. McGraw-Hill Education.

ICAO, 1956, Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements. International Civil Aviation Organization.

ICAO, 1977, Report on Load Classification Group (LCG) System for Aerodrome Pavement Evaluation. ICAO Working Paper.

ICAO, 1983, Aerodrome Design Manual, Part 3 – Pavements, Doc 9157-AN/901. International Civil Aviation Organization.

ICAO, 2018. International Standards and Recommended Practices: Aerodromes-Annex14, Volume I.

ICAO, Annex 14, 2009, Volume I: RESA Standartları; T.C. Ulaştırma Bakanlığı, DLHİGM Teknik Esasları, 2007.

ICAO, Annex 14, 2010, Volume I: Aerodrome Design and Operations.

ICAO, 2022, Aerodrome Design Manual – Part 2

Kandhal, P. S., 1992, Evaluation of Baghouse Fines in Bituminous Paving Mixtures. Transportation Research Board.

Karakaş, A., Yılmaz, B., 2020, Havalimanı Üstyapı Kaplamalarında Agregası Şekil Özelliklerinin Önemi. İnşaat Mühendisliği Dergisi, 25(1), 45–56.

Kaya A., 2024., TS 706 EN 12620 Standardı ile Beton Agregalarının Kalite Kontrolü.

Kök E., 2008, Karayolu ve Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemleri, Karşılaştırması ve Türkiye Uygulamaları.

Kuloğlu, N., Özdemir, M. A., Kök, B.V., 2007, Havaalanı Esnek Üstyapı Tasarım Metodlarının Değerlendirilmesi.

Kuloğlu, N. ve Ekmen, R., 1996, AASHTO Metodunda Esnek Üstyapı Sayısına Etki Eden Parametreler.

KYGM, 2021, Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvar El Kitabı.

Neville, A. M., 2011, Properties of Concrete. Pearson Education Limited.

Okur F., 2008, Havaalanı Üstyapı Tasarım Yöntemler.

Özdemir M. A., 2010, Havaalanı Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W., 1996, Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.

Shell International, 1991, Shell Pavement Design Manual; Asphalt Institute, MS-1: Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavements.

Şeker V., Selçuk L., 2018, Californiya Taşıma Oranının Laboratuvar Değerlerinin Belirlenmesinde Ultrasonik P-Dalga Hızının Kullanılabilirliği.

TSE 9582, 2014, Granüler Alt Temel Malzemesi Şartnamesi

TS EN 1744-1, 2010, Agregaların Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi.

TS 1900-1/T1, 2007, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri.

TS 706 EN 12620 + A1, 2009, Beton Agregaları.

TS EN 933-4, 2008, Tests for geometrical properties of aggregates – Part 4: Determination of particle shape – Shape index.

UAB, 2016, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yapım İşleri Teknik Şartnameleri.

UAB, 2020, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yapım İşleri Teknik Şartnamesi.

URL-1, 2025. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/ProjelerDetay.aspx?q=72>

URL-2, 2025. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/ProjelerDetay.aspx?q=72>

URL-3, 2025 <https://insapedia.com/kivam-limitlerinin-belirlenmesi-likit-limit-plastik-limit-deneyleri/>

URL-4, 2025 <https://www.liyatest.com.tr/urun/zemin-test-cihazlari/sikistirilmis-yol-taban-alt-taban-toprak-analizi/proktor-kalip-ve-tokmaklar/>

URL-5, 2025. <https://zeminarastirma.com/dolgu-testleri/proktor-deneyi/>

URL-6, 2025 <https://www.liyatest.com.tr/urun/zemin-testcihazlari/topraksiniflandirma/plastiklimit-deney-seti/>

URL-7, 2020. <https://insapedia.com/agrega-deneyleri/>

URL-8, 2025 <https://www.utest.com.tr/tr/20389/Los-Angeles-Asindirma-Cihazı>

URL-9, 2025 <https://zeminarastirma.com/dolgu-testleri/plaka-yukleme-deneyi/>

URL-10, 2023 https://www.tamyol.com.tr/UserFiles/Content/yol_ust_yapisi.pdf

URL-11, 2025. <https://www.vimpo.com.tr/tr/blog/bitum-emulsiyonu-nedir>

URL-12, 2025 <http://www.abtlab.com.tr/urun/suyun-tesirine-karsi-dayaniklilik-soyulma-mukavemeti-deneyi.html>

URL-13, 2025 <https://volkanatabey.com.tr/agrega-ozgul-agirlik-ve-su-emme-deneyi/>

URL-14, 2024. https://www.asnud.org.tr/Asfalt_Tabakalari.asp

URL-15, 2025 <https://www.humboldtmg.com/high-low-detector-2.html>

URL-16, 2025 <https://dal.aku.edu.tr/2015/11/25/puruzluluk-olcum-cihazı/>

URL-17, 2014 <https://www.iha.com.tr/haber-yuksekoa-havalimanında-calismalar-suruyor-380520>

URL-18, 2025. www.sapphireyapi.com.tr

URL-19, 2025. www.gordionbeton.com.tr

URL-20, 2025 <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a330/a330-300>

Whiteoak, D., 1990, The Shell Bitumen Handbook. Shell International Petroleum Company.

Yoder, E., J., Witczak, M., W., 1975, Principles of Pavement Design, John Wiley&Sons, New York.

Yüzer, N., 2005, Ulaştırma Yapılarında Beton Kalitesi, İMO Teknik Dergi.