

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAVAALANI KAPLAMALARINDA UÇAK/KAPLAMA
SINIFLANDIRMA DEĞERİ (ACR/PCR) YÖNTEMİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan KILIÇASLAN

AĞUSTOS 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAVAALANI KAPLAMALARINDA UÇAK/KAPLAMA
SINIFLANDIRMA DEĞERİ (ACR/PCR) YÖNTEMİNİN ANALİZİ

Hakan KILIÇASLAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / 07 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 01 / 08 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Havaalanı Kaplamalarında Uçak/Kaplama Sınıflandırma Değeri (ACR/PCR) Yönteminin Analizi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma, tez çalışması süresince sonlu elemanlar çalışmasında hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşım İnşaat Yük. Müh. Musa KAYIPMAZ’a ve Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğünde PCN çalışmalarıyla tezime katkıda bulunan Jeoloji Müh. Murat FEYZİFAR’a teşekkür ederim.

Son olarak, bana maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve her kararında arkamda olan eşim Arş. Gör. Dr. Şeymanur KILIÇASLAN’a, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Sevgi KILIÇASLAN ve babam Dr. Öğr. Üyesi Aydın KILIÇASLAN’a, abilerim İnşaat Yük. Müh. Talha KILIÇASLAN ve Dr. Ubeyde KILIÇASLAN’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Hakan KILIÇASLAN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Havaalanı Kaplamalarında Uçak/Kaplama Sınıflandırma Değeri (ACR/PCR) Yönteminin Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 01/08/2024

Hakan KILIÇASLAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. ACR (Uçak Sınıflandırma Değeri).....	3
1.2. ACR Hesabında Alt Zemin Koşulları	3
1.3. ACR/PCR Sistemindeki Genel Özellikler ve ACR'nin Önceki Metod Olan ACN'den Farklı Yönleri	5
1.4. PCR Hesaplama.....	6
1.5. Uçak Sınıflandırma Numarası (ACN) / Kaplama Sınıflandırma Numarası (PCN).....	7
1.6. ACN/PCN Sisteminden ACR/PCR'ye Geçiş.....	9
1.7. ACN/PCN ile ACR/PCR'nin Karşılaştırılması	10
1.8. Havaalanı Kaplaması Yazılımları	15
1.9. ACR/PCR Hesaplama Yöntemi	16
1.9.1. Matematiksel Yöntem	16
1.9.2. Rijit Kaplamalar	16
1.9.3. Esnek Kaplamalar	18
1.10. PCR Kavramı	21
1.10.1. PCR'yi Belirlemek İçin Uçak Kullanma Yöntemi	22
1.11. PCR'yi Belirlemek İçin Teknik Değerlendirme Yöntemi	23
1.11.1. Lastik Basınçları	27
1.11.2. Eşdeğer Trafik.....	28
1.11.3. Varış ve Kalkış.....	28
1.11.4. Geçiş/Kapsama (P/C)	30
1.12. Elastisite Modülü ve CBR İlişkisi	32

1.13. Kaplama Sorunları.....	33
1.13.1. Esnek Kaplama Sorunları.....	34
1.13.2. Rijit Kaplama Sorunları	40
1.14. Zemin Katmanı.....	42
1.15. Katmanlı Elastik Analiz (LEA) Programları.....	44
1.15.1. KENLAYER	46
1.15.2. MichPAVE (Michigan Flexible Pavement Design System).....	47
1.15.3. MnPAVE.....	48
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	51
2.1. FAARFIELD Verileri.....	51
2.2. FAARFIELD Sonuçlarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Değerlendirilmesi	54
2.2.1. PCR Değerinin Yeterli Olduğu 1. Durum.....	57
2.2.2. PCR Değerinin Yetersiz Olduğu 2. Durum	60
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	64
3.1. Katman Özelliklerinin PCR'a Etkisi	64
3.2. PCR'ın Yeterli Olduğu 1. Durumda Sonlu Elemanlar Analizi	71
3.3. PCR'ın Yetersiz Olduğu 2. Durumda Sonlu Elemanlar Analizi	78
3.4. FAARFIELD Programının Dezavantajları.....	84
3.5. Kaplama Yazılımlarında Kullanılan Girdiler	87
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
5. KAYNAKLAR	93
6. EKLER.....	95
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HAVAALANI KAPLAMALARINDA UÇAK/KAPLAMA SINIFLANDIRMA DEĞERİ (ACR/PCR) YÖNTEMİNİN ANALİZİ

Hakan KILIÇASLAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2024, 94 Sayfa, 8 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, BM'ye bağlı bir uzmanlık kuruluşu olan Uluslararası Sivil Havacılık Kurumu (ICAO) tarafından uluslararası kaplama dayanımı metodunun güncellenmesi çalışmaları kapsamında, eski ACN/PCN'den yeni yöntem olan ACR/PCR'a geçişte yeni yöntem deneysel ve analitik metodlarla incelenerek uygulanabilirliği hakkında veriler elde edilmiştir. Federal Havacılık İdaresinin uçağın farklı kaplamalardaki etkisini açıklayan "Uçak Sınıflandırma Değeri (ACR)" ile havaalanı kaplamasının sınırsız kullanımı için yük taşıma kapasitesini ifade eden "Kaplama Sınıflandırma Değeri (PCR)" hesaplamalarında kullanılmak üzere ürettiği FAARFIELD yazılımının doğruluğunun araştırılması amacıyla farklı katman özelliklerine sahip iki havaalanı kaplamasının FAARFIELD ve LS-DYNA adlı sonlu elemanlar yöntemini temel alan analiz programıyla kıyaslanması yapılmış olup FAARFIELD'in geliştirilmesi gerekli yönleri hakkında sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaplama sınıflandırma değeri, Katmanlı elastik analiz, Elastisite modülü

MSc. Thesis

SUMMARY

ANALYSIS OF THE AIRCRAFT/PAVEMENT CLASSIFICATION RATIO (ACR/PCR) METHOD IN AIRPORT PAVEMENTS

Hakan KILIÇASLAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2024, 94 Pages, 8 Pages Appendix

In this thesis, within the scope of the updating of the international pavement strength method by the International Civil Aviation Organization (ICAO), a division affiliated with the UN, data on the applicability of the new method was examined with experimental and analytical methods in the transition from the old ACN / PCN to the new method ACR / PCR. In order to investigate the accuracy of the FAARFIELD software, which was produced by the Federal Aviation Administration for use in the calculations of the "Pavement Classification Ratio (PCR)", which expresses the load carrying capacity for the unlimited operations of the airport pavement and the "Aircraft Classification Ratio (ACR)", which explains the effect of the aircraft on different pavements, different two airport pavements with layer properties have been compared with FAARFIELD and the analysis program based on the finite element method called LS-DYNA. Results and suggestions about the aspects of FAARFIELD that need to be improved are included.

Key Words: Pavement classification ratio, Layered elastic analysis, Modulus of elasticity

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. An-225 kargo uçağı	1
Şekil 2. Yükleme altında havalimanı kaplama kesiti deformasyonu	2
Şekil 3. ACR/ACN oranı	10
Şekil 4. Alt zemin kategorisi A için çift tekerlek konfigürasyonlu uçakların ACN ve ACR değerlerinin karşılaştırılması	11
Şekil 5. Artan ACN ile dikey gerinim ve ACR'nin değişimi	12
Şekil 6. Artan ACR ile CDF değişimi	13
Şekil 7. PCN'ye kıyasla alt zemin kategorisi A için uçak ACN değerleri	14
Şekil 8. Alt zemin kategorisi A için PCR ile karşılaştırıldığında uçak ACR değerleri	14
Şekil 9. Değerlendirme noktaları	19
Şekil 10. Önerilen PCR hesaplama prosedürünün akış şeması	25
Şekil 11. Taksi yolu konfigürasyonları (paralel ve merkezi)	30
Şekil 12. CBR-Elastisite modülü (E) ilişkilerinin karşılaştırılması	33
Şekil 13. Yorulma çatlağı	35
Şekil 14. Asfalt kaplamada kuma sorunu	36
Şekil 15. Kaplamadaki çöküntü deformasyonu	37
Şekil 16. Derz yansıma çatlağı	37
Şekil 17. Boyuna (a) ve enine (b) çatlak	38
Şekil 18. Tekerlek izi deformasyonu	39
Şekil 19. Beton kaplamada patlama sorunu	40
Şekil 20. Köşe çatlağı	41
Şekil 21. Boyuna çatlama	41
Şekil 22. Enine çatlama	42
Şekil 23. Dayanım (D) çatlaması	42
Şekil 24. BISAR, JULEA ve MnLayer programlarında işlem sayılarının karşılaştırılması	45
Şekil 25. KENLAYER programı girdi menüsü	46
Şekil 26. (a), (b) MichPAVE programı girdileri	47
Şekil 27. LTPP (Long Term Pavement Performance)'den elde edilen dinamik modül denklemi	48

Şekil 28.	MnPAVE programında asfalt kaplamalarda kullanılan eşdeğer kalınlık denklemi	49
Şekil 29.	Eşdeğer tekil tekerlek yükü analiz menüsü	50
Şekil 30.	Esnek kaplamalı katman kesiti	53
Şekil 31.	Rijit kaplamalı katman kesiti	53
Şekil 32.	Boeing 777-9 uçağının tekerlek koordinatları (inç biriminde)	56
Şekil 33.	Boeing 777-9 uçağına ait görseller	57
Şekil 34.	Katman kalınlıkları ve elastik modül değerleri	58
Şekil 35.	Beton kaplama ve alt katmanların mukavemet değerleri	58
Şekil 36.	ACR-PCR değerleri grafik gösterimi	59
Şekil 37.	ACR ve PCR değerleri (1. durum)	59
Şekil 38.	Yükleme öncesi katman görünümü (1. durum)	60
Şekil 39.	Katman kalınlıkları ve elastik modül değerleri	61
Şekil 40.	Beton kaplama ve alt katmanların mukavemet değerleri	61
Şekil 41.	ACR-PCR değerleri grafik gösterimi	62
Şekil 42.	ACR ve PCR değerleri (2. durum)	62
Şekil 43.	Yükleme öncesi üst yüzey katman görünümü (2. durum)	63
Şekil 44.	Esnek kaplamalı katman kesiti	64
Şekil 45.	PCR-CBR grafiğı (diğer değışkenler sabit)	65
Şekil 46.	Örnek rijit kaplamalı katman kesiti	66
Şekil 47.	Rijit kaplamada PCR ve kaplama elastisite modülü ilişkisi	66
Şekil 48.	Esnek kaplamada PCR ve kaplama elastisite modülü ilişkisi	67
Şekil 49.	Esnek kaplama için PCR-E ₂ ilişkisi (diğer değışkenler sabit)	68
Şekil 50.	Esnek kaplama için PCR-E ₃ ilişkisi (diğer değışkenler sabit)	68
Şekil 51.	Esnek kaplama için PCR-h ₁ ilişkisi (diğer değışkenler sabit)	69
Şekil 52.	Esnek kaplama için PCR-h ₂ ilişkisi (diğer değışkenler sabit)	70
Şekil 53.	Esnek kaplama için PCR-h ₃ ilişkisi (diğer değışkenler sabit)	70
Şekil 54.	Yükleme anında Z doğrultusundaki (düşey) basınç dağılımı (zaman: 0,047 sn)	72
Şekil 55.	Yükleme sonrası kaplama altı basınç dağılımı (zaman: 0,054996 sn)	73
Şekil 56.	X ekseninde oluşan basınç ve çekme gerilmeleri kaplama altı görünümü	74
Şekil 57.	Y ekseninde oluşan gerilmeler	76
Şekil 58.	Yükleme sonrası üst kaplama altında oluşan düşey deplasmanlar (0,63 mm)	77
Şekil 59.	Taban zemininin üst kısmındaki birim şekil değıştirme, gerinim (ϵ) değıeri ($5,63 \times 10^{-3}$)	78

Şekil 60.	Yükleme anında Z doğrultusundaki (düşey) kaplama altı basınç dağılımı (zaman: 0,0465 sn)	79
Şekil 61.	Yükleme sonrası Z doğrultusundaki basınç dağılımı (zaman: 0,059497 sn)....	80
Şekil 62.	X ekseninde kaplama altında oluşan gerilmeler	81
Şekil 63.	Y ekseninde kaplama altında oluşan gerilmeler	82
Şekil 64.	Yükleme sonrası üst kaplama altındaki düşey deplasman.....	83
Şekil 65.	Taban zemininin üst kısmındaki birim şekil değiştirme, gerinim (ϵ) değeri ($5,49 \times 10^{-3}$)	84
Şekil 66.	Kaplama analiz kesitinde taban zemin CBR değeri 8'den (a) 12'ye (b) çıkarıldığında öğütülmüş ve öğütülmemiş agrega elastisite değerlerinin artışı	85
Şekil 67.	MnPAVE programında mevsimsel koşulların düzenlendiği kontrol paneli.....	87

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. ACR hesabında kullanılan standart alt zemin koşulları.....	4
Tablo 2. Rijit ACR hesabında referans kaplama yapısı	17
Tablo 3. Kplama tipi ve sembolleri	26
Tablo 4. Lastik basınç sınıflandırması	27
Tablo 5. Paralel ve merkezi taksi yollarında P/TC değerleri	29
Tablo 6. Katmanların elastik modül değerleri	44
Tablo 7. Uçak listesi ve ACR değerleri	52
Tablo 8. Ön ve arka tekerleklerin kaplamaya uyguladığı basınç değerleri.....	55
Tablo 9. Esnek kaplamada katman kalınlıklarının değişimini gösteren korelasyon denklemi ve determinasyon (kararlılık) katsayısı	71
Tablo 10. Esnek kaplamada elastisite modül değişimini gösteren korelasyon denklemi ve determinasyon (kararlılık) katsayısı	71
Tablo 11. TS500'e göre beton karakteristik basınç ve eksenel çekme değerleri.....	75
Tablo 12. Kplama yazılımlarında kullanılan girdiler	88

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E_c	: Betonun elastik modülü (MPa)
$E_{V,SG}$	: Taban zemininin üst kısmındaki dikey basınç gerinimi
KV	: Kinematik viskozite
T_{surf}	: Beton yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)
ν	: Poisson oranı
AASHTO	: Amerikan Karayolları Birliği (American Association of State Highway and Transportation Officials)
ACN	: Uçak sınıflandırma numarası (Aircraft Classification Number)
ACR	: Uçak sınıflandırma değeri (Aircraft Classification Rating)
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı (California Bearing Ratio)
CDF	: Kümülatif hasar faktörü (Cumulative Damage Factor)
DSWL	: Türetilmiş tekil tekerlek yükü (Derived Single Wheel Load)
FAA	: Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
FAARFIELD	: FAA Beton ve Esnek Yinelemeli Elastik Katman Tasarımı (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design)
HMA	: Sıcak asfalt karışımı (Hot Mix Asphalt)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Kurumu (International Civil Aviation Administration)
LEA	: Katmanlı elastik analiz (Layered Elastic Analysis)
MAGW	: Maksimum brüt ağırlık (Maximum Allowable Gross Weight)
P/C	: Geçiş/kapsama (Pass to Coverage)
P/TC	: Geçiş/trafik döngüsü (Passes to Traffic Cycles)
PCC	: Portland çimento betonu (Portland Concrete Cement)
PCN	: Kaplama sınıflandırma numarası (Pavement Classification Number)
PCR	: Kaplama sınıflandırma değeri (Pavement Classification Rating)

1. GENEL BİLGİLER

Havaalanı trafiğindeki artışın devam etmesi ile havaalanı kaplamalarında optimum tasarım ve inşaat metodu kullanılarak operasyonel hazırlığın artırılması ve havaalanı kaplamasının denetim ve bakımı için daha etkili yöntemlerin kullanılması gerekliliği oluşmaktadır. Bu sebeple sahada hızla uygulanabilecek ve aynı zamanda uzun vadeli dayanıklılığı artırabilecek yenilikçi teknolojiler araştırılmaktadır.

Uçak üretiminde yolcu, kargo ve yakıt kapasitesini artırmaya olan yönelimler, lastik basıncında ve tekerlek yüklerinde önemli bir artışa yol açmıştır. Havaalanı kaplama endüstrisi son yıllarda bu artışları karşılayabilecek kaplama tasarımı ve malzemelerine yönelik standartlarını revize etmeye başlamıştır (URL-1, 2024).



Şekil 1. An-225 kargo uçağı



Şekil 2. Yükleme altında havalimanı kaplama kesiti deformasyonu (Mahaffay vd., 2019)

FAA Havalimanları Ofisi, 2011 yılında büyük uçak trafiğine sahip havalimanlarındaki pistlerin tasarım ömrünü 20 yıldan 40 yıla çıkarmayı hedeflemiştir. Bu havalimanları, geçen takvim yılı boyunca ABD'deki toplam uçak seferlerinin en az %1'ini oluşturan havalimanlarıdır.

Her yıl sağlanan Havaalanı İyileştirme Programı (AIP) hibelerinin yaklaşık %70'i havaalanı kaplamalarına harcanmaktadır. Bu durum, 2017 mali yılında havaalanlarına sağlanan 3,3 milyar dolarlık destekten 2 milyar dolardan fazlasının kaplamalar için kullanıldığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, yüzey ömrünü uzatmaya yönelik araştırmalar, paydaşlar için ekonomik tasarruf açısından oldukça önemli hale gelmiştir.

Yüksek kapasiteli havaalanlarında daha az müdahale gerektiren (rehabilitasyon projeleri) uygulamalar, daha düşük sermaye maliyetleri, azalan gecikmeler ve kaplamaların yeniden inşası için daha kısa kesinti süreleri anlamına gelmektedir. Bu da FAA için yaşam döngüsü maliyet tasarrufu demektir (URL-2, 2023).

2009 yılında Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization, ICAO), uluslararası kaplama dayanım raporlama metodunu güncellemeyi araştırmak için bir çalışma grubu kurmuştur. Çalışma grubu geliştirilerek ICAO Uçak Sınıflandırma Değeri (ACR)-Kaplama Sınıflandırma Değeri (PCR) metodunu kabul

etmiştir. Bu teknik sayesinde, bir uçağın farklı yüzeylerdeki etkisini tek bir özel numara ile ifade etmek, ACR yöntemi ile mümkündür. ACR, belirli bir standart zemin altı mukavemetine sahip yol kaplamasında, bir uçağın göreceli etkisini ifade eden bir sayı olup PCR ise bir kaplamanın sınırsız kullanım için yük taşıma kapasitesini ifade eder.

1.1. ACR (Uçak Sınıflandırma Değeri)

ACR; uçak ağırlığına, lastik basıncı, iniş takımı geometrisi gibi özelliklerine, kaplamanın cinsine ve zemin mukavemetine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bir kaplamanın yük taşıma kapasitesi, belirli bir uçak veya kaplama hakkında ayrıntılı bilgi vermeden, tek bir rakamla ifade edilir (Kaplama Sınıflandırma Değeri, PCR).

Kaplama mukavemetini raporlamak için standartlaştırılmış ACR yönteminin kullanımı yalnızca 5700 kgf veya daha fazla taşıma gücüne sahip kamuya açık havaalanlarındaki kaplamalar için geçerlidir. 5700 kgf ağırlıktan daha az taşıma gücüne sahip kaplamalar yalnızca brüt ağırlık ve iniş takımı konfigürasyonunu bildirmek içindir.

Uçak üretimi yapan firmalar ACR değerinin resmi olarak hesaplanmasını sağlar. ACR'nin hesaplanması; uçağın arka ağırlık merkezi, teker aralığı, lastik basıncı gibi özellikler hakkında ayrıntılı bilgi gereklidir.

1.2. ACR Hesabında Alt Zemin Koşulları

Beton ve esnek kaplamalar için, uçak iniş takımlarının destek gereksinimleri, her alt zemin destek kategorisi için katman elastik yöntemi (LEA) ile belirlenir. Kaplama kesiti türleri için tanımlanan parametreler kullanılarak matematiksel olarak hesaplanan tek tekerlek yükü, iniş takımı ile kaplama arasındaki etkileşimi tanımlamak için kullanılır.

Tablo 1. ACR hesabında kullanılan standart alt zemin koşulları (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

Alt zemin Dayanım Kategorisi	Alt zemin Dayanımı E (Elastisite Modülü) psi (MPa)	Alt zemin Kategori Sınırları E (Elastisite Modülü) psi (MPa)	Zemin Kodları
Yüksek	29008 (200)	$E \geq 21.756$ (≥ 150)	A
Orta	17405 (120)	$E \geq 14.504 < 21.756$ ($\geq 100 < 150$)	B
Düşük	11603 (80)	$E \geq 8.702 < 14.504$ ($\geq 60 < 100$)	C
Aşırı Düşük	7252 (50)	$E < 8.702$ (< 60)	D

Türetilen tek tekerlek yükü, kaplama yapısına eşit basınç anlamına gelir ve karşılaştırmak için kaplama kalınlığının belirtilmesi ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu, belirli bir uçak iniş takımı için elde edilen kalınlığın, standart lastik basıncında (1,5 MPa (218 psi)) tek bir tekerlek yüküne karşılık gelen kalınlıkla eşitlenmesiyle sağlanır. ACR, yüzlerce kilogram olarak ifade edilen tek tekerlek yükünün iki katı olarak tanımlanır.

Esnek kaplamalar için ACR hesaplamasını standart hale getirmek amacıyla, türetilen tek tekerlek yükü, uçağın 36.500 geçişi için hesaplanan toplam kalınlığa göre 1,5 MPa (218 psi) sabit basınç altında belirlenir. Rijit kaplamalar için ACR hesaplamasının standartlaştırılması amacıyla, $\sigma = 2,75$ MPa (399 psi) olarak belirlenmiş bir gerilme değeri kullanılır.

Kaplamada oluşan hasarın, yük uygulamalarının kırılmaya kadar olan yük uygulama sayısına bölünmesiyle orantılı olduğunu varsayan Kümülatif Hasar Faktörü (CDF) kavramı kullanılmaktadır.

P/C (pass to coverage) oranı, kaplamanın bir birim alanına tam bir yük uygulamak için gereken geçişleri belirtir.

ACR hesaplanırken, verilen uçak kütlesi için bir referans kalınlık belirlenir. Uçak iniş takımlarına göre farklı referans kaplama yapıları kullanılır. Özellikle ana iniş takımının her ayağında iki veya daha az tekerleği olan uçaklar için referans yapı, 76 mm'lik asfalt beton tabakaları, sıkıştırılmış agrega ve alt zemini içerir. Ana iniş takımının her ayağında üç veya daha fazla tekerleği bulunan uçaklar için asfalt beton tabaka kalınlığı 127 mm olarak belirlenir. Değişken tabaka kalınlığı, uçağın 36.500 geçişi için alt zeminin (CDF) kümülatif hasar faktörü 1.0'a ulaşana kadar ayarlanır. Elde edilen kalınlık, ACR için referans

kalınlıktır. Bu referans kalınlığını kullanarak ve 1,5 MPa (218 psi) sabit lastik basıncını koruyarak, DSWL yük büyüklüğü, zeminin hasarını 1.0 olarak eşitleyene kadar ayarlanır. ACR, ardından DSWL'nin (yüzlerce kilogram olarak ifade edilen) iki katı olarak tanımlanır. (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.3. ACR/PCR Sistemindeki Genel Özellikler ve ACR'nin Önceki Metod Olan ACN'den Farklı Yönleri

ACR-PCR Sisteminde;

- Esnek ve rijit kaplamalar için tek tip standart alt zemin kategorileri kullanılır.
- Alfa faktörü yok, katman denklik faktörleri, tabanın üstü vb. yöntemler mevcuttur.
- ICAO Hava Seyrüsefer Komitesince resmi olarak kabul edildikten sonra, ACN-PCN yönteminden ACR-PCR'ye dört yıllık geçiş süresi öngörülmektedir.
- Başlangıç Temmuz 2020'de yapılmış olup tam uygulanabilirliğin Kasım 2024'te gerçekleşmesi planlanmaktadır. Geçiş sürecinde her iki sistem de kullanılacaktır.
- PCR'ı değerlendirmek için standart ACR hesaplaması yapılır.
- Doğrudan FAARFIELD programı ve trafik listesi kullanılır.
- FAARFIELD, pistteki zemin kaplama yapısına ait özellikleri (kaplama kalınlığı, Elastisite modülü) uçak özelliklerini (lastik basıncı, teker aralığı, teker genişliği, uçak ağırlığı vb.) ve trafik listesini içeren bir programdır.
- Farklı kritik uçaklar için çoklu potansiyel PCR'lar artık dikkate alınmayacaktır.
- Esnek kaplamalardaki HMA bindirmelerini sorunsuzca halleder.
- Tüm uçaklardaki ACR değeri PCR'den küçüktür.

ACR'nin önceki metod olan ACN'den farklı yönleri:

- Tüm yapılar sert ve esnek olmak üzere elastik katmanlıdır. Esnek ACR ana iniş takımındaki tüm tekerlekleri dikkate alır.
- Standart lastik basıncı 1,25 MPa'dan 1.5 MPa'a yükseltilmiştir.
- ACN binlerce kilogram, ACR ise yüzlerce kilogram olarak ifade edilir. Bu yüzden çoğu uçakta ACR değerleri, eşdeğer ACN'ye göre yaklaşık olarak 10 kat daha fazladır. Bu, geçiş döneminde iki sistemi karıştırmamak için kasıtlı olarak tanımlanmıştır.
- Kaplama Kategorileri CBR yerine Elastisite Modülü tarafından tanımlanmıştır.

- Tüm değerler alt temelin üst kısmında tanımlanmıştır.
- Katmanlı Elastik Analiz (LEA) metodu, ACR-PCR yönteminde kullanılan tek matematiksel modeldir.
- Esnek ACR hesaplamalarında referans yapılarının belirlenmesi, malzemelerin tanımlanması ve katmanların yapısal özelliklerine bağlıdır. Tüm katmanlar, Elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν) ve kalınlık (tasarım katmanı hariç) değerleri ile tanımlanır. LEA hesaplamaları, tüm yatay yüzeylerin birbirine kenetlenmiş olduğu varsayımıyla gerçekleştirilir (Brill, 2020).

1.4. PCR Hesaplama

İşletim ağırlığı listesinde bulunan uçakların ACR değeri hesaplanır. En yüksek ACR değeri bulunur. Kritik uçak seçilir. Kritik uçağın izin verilen maksimum brüt ağırlığı (MAGW) hesaplanır. Kritik uçağın maksimum brüt ağırlığındaki ACR değeri, PCR'ye eşittir. Uçak değerlendirmesi, PCR'nin, tesisi şu anda kullanan ve kaplama sorununa yol açmayan uçaklar arasında en yüksek ACR'ye sahip olanı belirleyerek tespit edildiği anlamına gelir.

Esnek kaplamalarda, her katmana iletilen yükün, o katmanın taşıma kapasitesini aşmaması sağlanır. Rijit kaplamalarda ise, yükleri desteklemek için genellikle sert veya rijit katman kullanılır. Bu katmanın rijitliği ve sonucunda ortaya çıkan giriş hareketi, rijit kaplamanın yükleri geniş bir alt zemin alanına dağıtmasını sağlar. Rijit yapının yük taşıma kapasitesi, büyük ölçüde alttaki katmanlardan gelen düzgün desteğe ve yapısal katmanın gücüne bağlıdır.

Bir havalimanının paralel yerine merkezi bir taksi yolu konfigürasyonuna sahip olması durumunda, pistteki kapsama sayısı etkin bir şekilde iki katına çıkar ve PCR'yi azaltır. P/TC (Passes to Traffic Cycles) oranı, merkezi taksi yolu konfigürasyonunu yansıtır. Toplam CDF (Cumulative Damage Factor) 1.0'ı geçtiğinde, listelenen uçaklardan en az birinin ACR'sinin PCR değerinden büyük olması beklenir.

1.5. Uçak Sınıflandırma Numarası (ACN) / Kaplama Sınıflandırma Numarası (PCN)

Bir uçağın kaplama üzerindeki göreceli etkisini, standart bir zemin altı dayanımı için gösteren sayı, Uçak Sınıflandırma Numarası (ACN) olarak tanımlanır.

ACN, belirli bir kaplama kalınlığı belirtmeden, her bir uçağın farklı kaplamalar üzerindeki etkisini kaplama tipine ve zemin altı mukavemetine göre değişen tek bir benzersiz numara ile ifade eder. 1,25 megapaskal (= 181 psi) olarak standartlaştırılmış tek tekerlek lastik basıncı ile ton olarak ifade edilen türetilmiş tek tekerlek yükünün (DSWL) iki katıdır. Ek olarak, türetilmiş tek tekerlek yükü, alt zemin mukavemetinin bir fonksiyonudur. Her kaplama tipi (esnek veya rijit) için dört alt zemin kategorisi tanımlanmıştır (yüksek, orta, düşük ve ultra düşük).

Seçilen uçaklar için ACN değerleri, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından belirlenmiştir. Yeni bir uçağın hizmete girmesiyle birlikte, üreticilerin ACN değerini hesaplamaları ve bu bilgiyi uçuş kılavuzunda paylaşmaları gerekmektedir. ACN tabloları, iki farklı ağırlık durumuna göre değerler sağlar: biri izin verilen maksimum toplam ağırlık, diğeri ise uçağın boşken çalışma ağırlığıdır.

Esnek kaplamalar dört alt zemin kategorisine sahiptir:

- A. Yüksek Mukavemet – CBR 15 (Tüm CBR'ler %13'ün üzerinde)
- B. Orta Mukavemet – CBR 10 (%8 ila %13 arasındaki CBR için)
- C. Düşük Mukavemet – CBR 6 (%4 ila %8 arası CBR için)
- D. Ultra Düşük Mukavemet – CBR 3 (%4'ün altındaki CBR için)

California taşıma oranı (CBR), kaplama altındaki doğal zeminin mekanik mukavemetinin değerlendirilmesi için bir penetrasyon testidir. Bu işlem, standart bir alana sahip bir piston kullanılarak toprağa veya agregaya nüfuz etmek için gereken basıncın ölçülmesiyle yapılır. Elde edilen basınç, standart sıkıştırılmış bir kaya malzemesinde aynı penetrasyonu sağlamak için gerekli olan basınca bölünür. Sonuç, ardından 100 ile çarpılarak yüzde cinsinden ifade edilir. Bir tasarım değeri oluşturmak için gereken CBR testlerinin tam sayısı, zeminlerin sayısına, tipine, doğasına ve değişkenliğine bağlıdır. Sahada karşılaşılan zemin koşullarının değişkenliği, ihtiyaç duyulan test sayısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak, her bir farklı ana toprak tipi için üç CBR testi yeterlidir.

Sert kaplamalar dört alt zemin kategorisine sahiptir:

A. Yüksek Mukavemet – Alt Zemin $k = 150 \text{ MN/m}^3$ (120 MN/m^3 üzerindeki tüm k değerleri).

B. Orta Mukavemet – $k = 80 \text{ MN/m}^3$ (60 ile 120 MN/m^3 arasındaki değerler için).

C. Düşük Mukavemet – $k = 40 \text{ MN/m}^3$ (25 ile 60 MN/m^3 arasındaki değerler için).

D. Ultra Düşük Mukavemet – $k = 20 \text{ MN/m}^3$ (25 MN/m^3 altındaki tüm k değerleri).

Örnek olarak;

A320-200 uçağı maksimum toplam ağırlıktaki (725 kN) ACN değerleri:

Esnek kaplama alt zeminleri: A - 37; B-39; C-44; D-50

Rijit kaplama alt zeminleri: A - 40; B-43; C-45; D-48

Boşken çalışma ağırlığındaki (402 kN) ACN değerleri:

Esnek üstyapı alt zeminleri: A - 19; B-19; C-21; D-25

Rijit üstyapı alt zeminleri: A - 20; B-21; C-23; D-24

Alt zemin mukavemeti azaldıkça uçağın kaplamaya olan etki numaralandırmasının (ACN) arttığı gözlenmiştir.

Kaplama Sınıflandırma Numarası (PCN), bir kaplamanın sınırsız operasyonlar için taşıyabileceği yük kapasitesini gösteren bir değerdir.

PCN, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından belirlenen bir standart olup, pist, taksi yolu veya apronun dayanıklılığını ifade etmek için Uçak Sınıflandırma Numarası (ACN) ile birlikte kullanılır. Bu standart, aşırı aşınmayı önleyerek kaplamaların ömrünü uzatmaya katkıda bulunur.

PCN, kaplamayı düzenli olarak kullanabilecek en yüksek zarar verici uçağın ACN'si ile belirlenir ve Havacılık Bilgi Yayınları'nda (AIP) yayımlanır.

PCN ve PCR, kaplama özelliklerini tanımlayan beş parçalı bir kod şeklinde belirtilir. İlk bölüm, kaplamanın taşıma kapasitesini temsil eden sayısal PCN değeridir ve hesaplanan değer en yakın tam sayıya yuvarlanmış halidir. Bu değer, uçak geometrisi ve kaplamanın trafik yoğunluğu gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak hesaplanır. İkinci bölüm ise kaplamanın türüne göre R (rijit/beton) ya da F (esnek/asfalt) harfleri ile ifade edilir.

Üçüncü kısım, yukarıda ACN açıklamasında belirtilen A, B, C, ve D harflerinden biridir. Bu harfler kaplama yapısını destekleyen alt zeminin dayanımını ifade eder. A tipi alt zemin çok güçlü (beton karışım kil gibi), D tipi ise çok zayıf (sıkıştırılmamış toprak) olarak nitelendirilir. Dördüncü kısım, kaplamanın destekleyebileceği maksimum lastik basıncını ifade eden bir harftir. Kullanılabilecek harfler şunlardır:

W (sınırsız) - lastik basıncı sınırı yok.

X (yüksek) - maksimum lastik basıncı: 1,75 MPa

Y (orta) - maksimum lastik basıncı: 1,25 MPa

Z (düşük) - maksimum lastik basıncı: 0,5 MPa

Beşinci kısım, ilk değerin elde edildiği yöntemi açıklayan bir mektuptur. T teknik değerlendirmeyi gösterir. U kullanımı gösterir – fiziksel bir test yöntemi.

Örnek:

80/R/B/W/T PCN kodu şu anlama gelir:

Alt kaplamanın yük taşıma kapasitesini gösteren değeri 80 (birimsiz)

Rijit kaplama (R)

Orta mukavemetli bir alt zemine sahip kaplama (B)

Kaplamada lastik basıncı sınırı yoktur (W)

80 değeri teknik değerlendirme ile hesaplanmıştır (T)

(U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2006).

1.6. ACN/PCN Sisteminden ACR/PCR'ye Geçiş

Bir havaalanı kaplamasının PCN değerini belirlemek için dünya çapında birkaç farklı yöntem geliştirildiğinden, PCN değerinin benzersiz bir şekilde tanımlanamaması nedeniyle PCR yöntemi tercih edilmektedir.

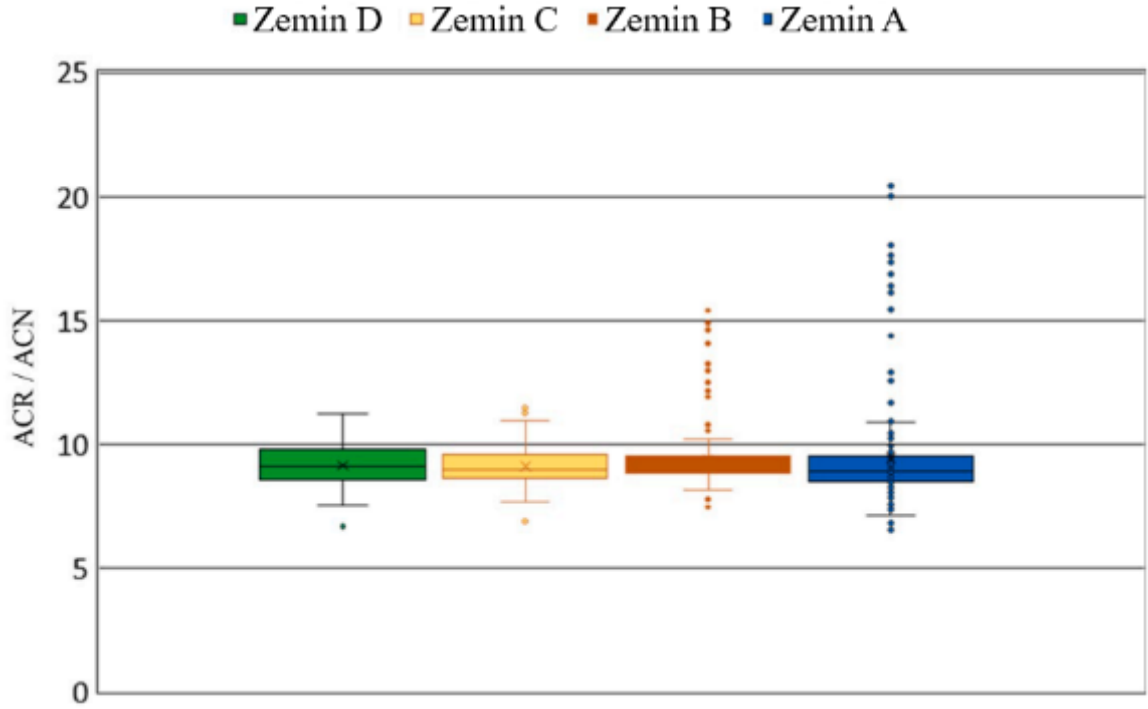
ACN-PCN yöntemi, geleneksel ampirik tasarım yaklaşımlarına dayanmakla birlikte, son yıllarda gelişen üstyapı analizine yönelik ileri düzey analitik teoriler, havaalanı kaplama tasarımı ve değerlendirme süreçlerine entegre edilmiştir. Bu teoriler artık pratikte yaygın olarak kullanıldığından, havaalanı kaplamalarının yük taşıma kapasitelerini raporlamak için kullanılan sistemin güncellenmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu amaçla, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), Kasım 2024 itibarıyla geçerli olacak olan Uçak Sınıflandırma Değeri – Kaplama Sınıflandırma Değeri (ACR-PCR) yöntemini tanıtmıştır.

ACN, tekil tekerlek yükünün (DSWL) iki katı olarak tanımlanır ve ton cinsinden ifade edilir. ACN-PCN yöntemi, belirli bir PCN değerine sahip bir kaplamanın, sınırsız kullanım koşulları altında, bu değere eşit veya daha düşük ACN değerine sahip uçakların ağırlığını taşıyabilmesi için tasarlanmıştır. Ancak, ICAO, PCN'nin nasıl hesaplanacağına dair net bir kılavuz sunmamaktadır, bu nedenle PCN belirleme yöntemi havalimanı yetkililerine

bırakılmıştır. Dünya genelinde kabul görmüş birçok yöntem mevcuttur ve bunlardan biri de FAA tarafından geliştirilmiş olan bu yöntemdir (Armeni & Loizos, 2022).

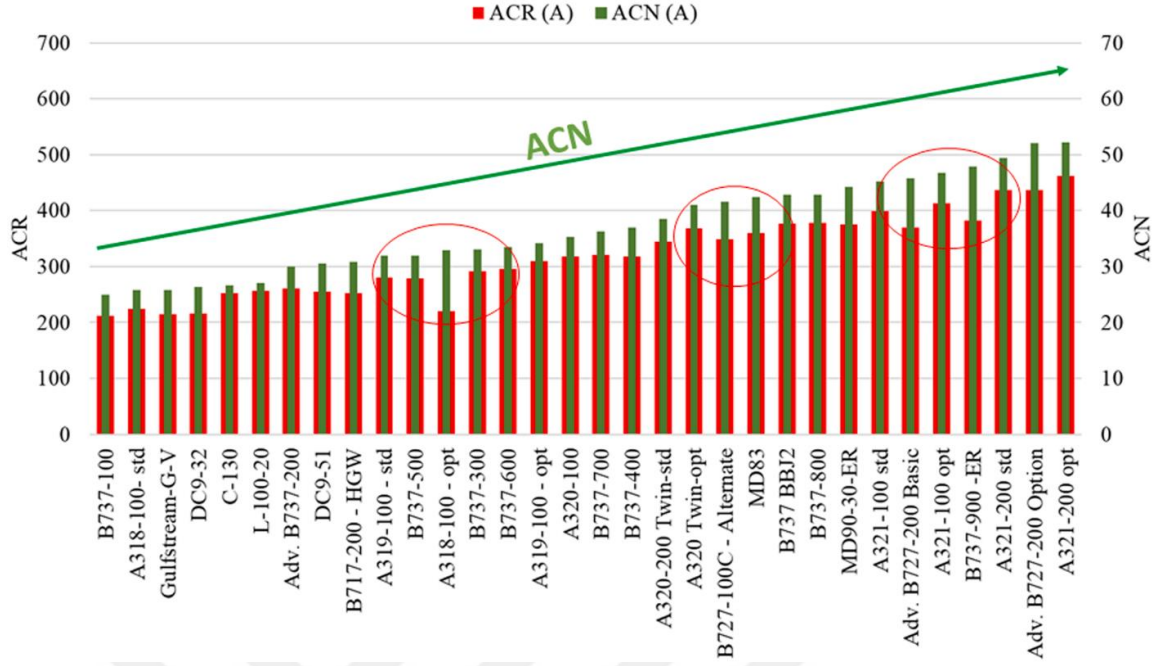
1.7. ACN/PCN ile ACR/PCR'nin Karşılaştırılması

Literatürde 170 uçak verisinin aynı seti için, her bir alt zemin kategorisinde ACR/ACN oranı tahmin edilmiştir. Sonuçlar, iki endeksin oranının her alt sınıf kategorisi için sabit olmadığını ve çoğu durumda 10'dan az olduğunu göstermektedir. Ancak ACR'nin ACN'den yirmi kat daha yüksek olabileceği durumlar vardır (Şekil 3).



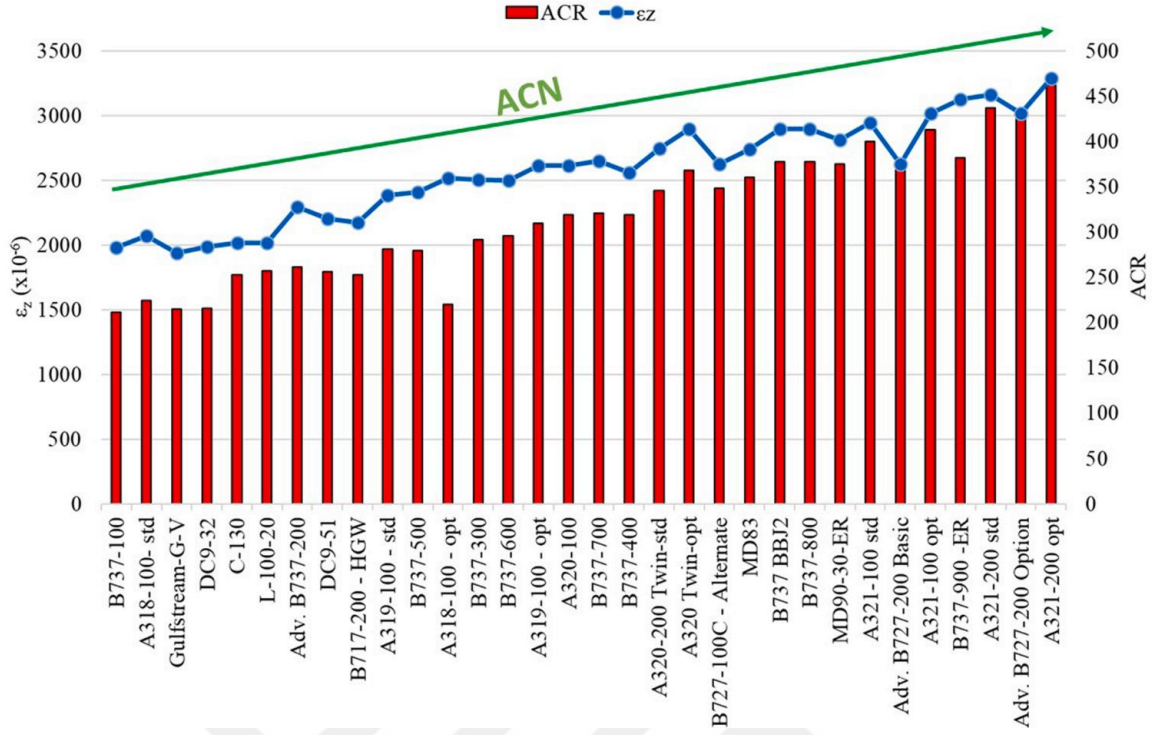
Şekil 3. ACR/ACN oranı (Armeni & Loizos, 2022)

ACN ve ACR indeksleri arasındaki ilişkinin derinlemesine incelenmesi için FAA'nın uçak kütüphanesinden aynı iniş takımı konfigürasyonuna (çift tekerlek) sahip 32 uçak seçilmiştir. Her bir alt zemin kategorisi için ACN ve ACR değerleri, uçakların tüm alt zemin kategorileri için artan ACN ile sıralandığı aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır (Şekil 4, Şekil 5). Şekillerin tümü, ACN değerlerindeki varyasyonun ACR varyasyonunu takip etmediğini göstermektedir. ACN arttıkça ACR'nin birkaç dalgalanma sunduğu gözlemlenmiştir.



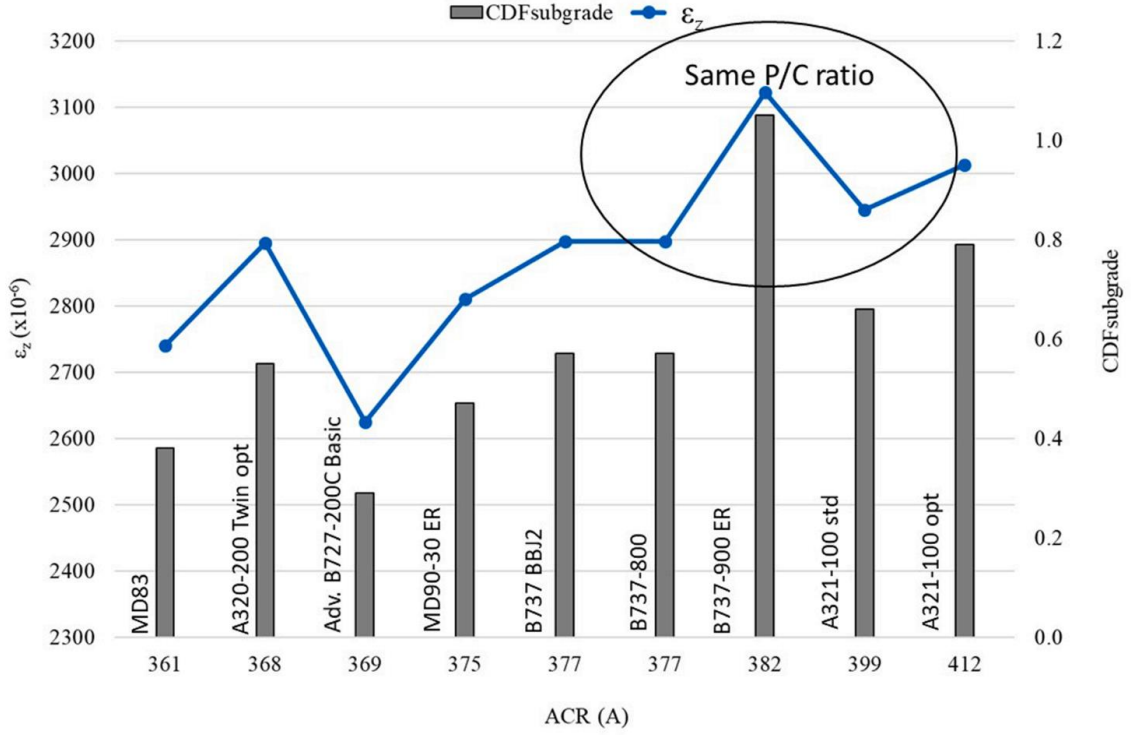
Şekil 4. Alt zemin kategorisi A için çift tekerlek konfigürasyonlu uçakların ACN ve ACR değerlerinin karşılaştırılması (Armeni & Loizos, 2022)

ACR-PCR'nin uygulanması sırasında bazı uçakların göreceli hasarının değiştiği gözlenmiştir. Örneğin, A321-100 uçağının ACN değeri, B737-900 uçağının ACN'sinden daha düşük olmasına rağmen, A321-100'ün ACR değeri, B737-900'ün ACR'sinden daha yüksektir (Şekil 4). ACR'deki değişim, CDF alt sınıfının varyasyonunu izlediği için, ACR-PCR raporlama sürecinde kullanılan modelleme, ACN modellemesine göre daha uygun bir yaklaşımdır. Bu uyum, ACR'nin analitik tasarım ve değerlendirme süreçlerinin temel prensipleriyle daha tutarlı olmasından kaynaklanmaktadır (Armeni & Loizos, 2022).



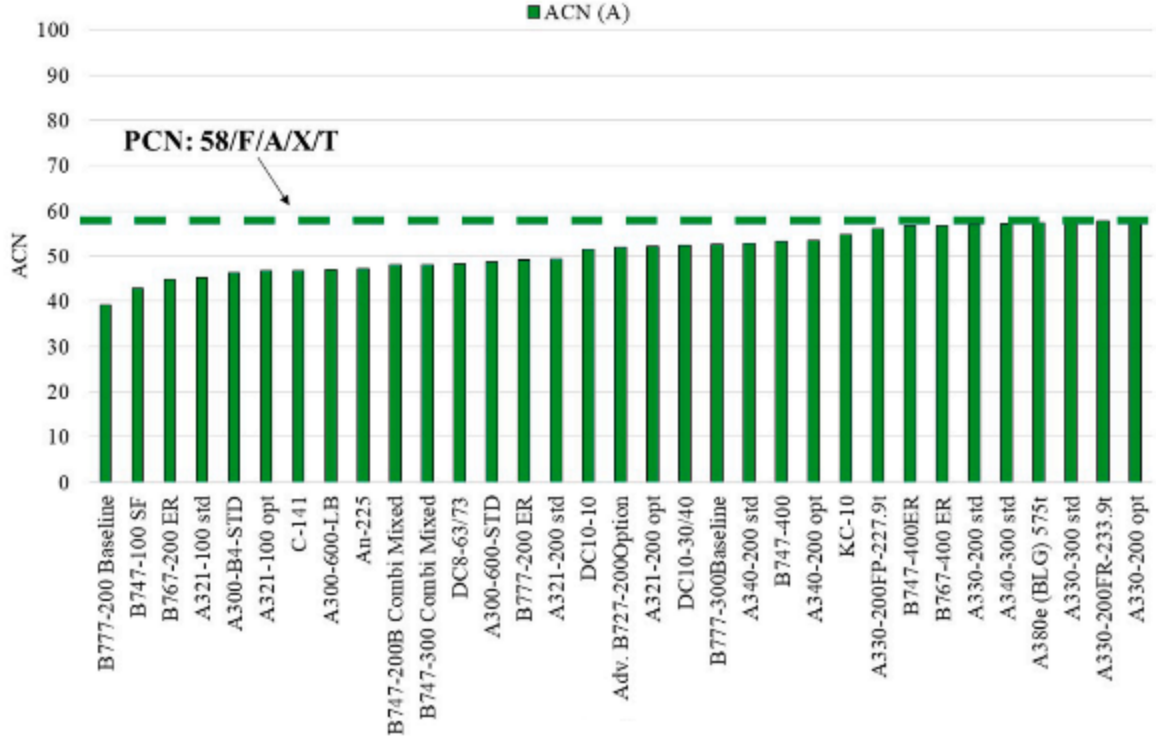
Şekil 5. Artan ACN ile dikey gerinim ve ACR'nin değişimi (Armeni & Loizos, 2022)

Ancak yukarıdaki gözlemler incelenen tüm uçaklar için geçerli değildir. ACR değerlerinin dikey gerinim varyasyonunu kesin olarak takip etmediği ortaya çıkmıştır. Şekil 6'da 9 uçak için dikey gerilme ve artan ACR'li CDF değerleri ayrıntılı olarak gösterilmekte olup burada daha yüksek ACR değerlerine sahip uçakların kaplamada daha az hasar verebileceği gözlemlenmektedir. Örneğin, A alt zemin kategorisinde 412 değerinde ACR'ye sahip A321-100opt uçağı, aynı alt zemin kategorisinde 382 değerindeki ACR'ye sahip olan B737-900 uçağından daha düşük bir CDF değerine sahiptir. Bu uçaklar aynı P/C oranı ve yıllık kalkış sayısı şartlarında olduğundan, hasarları temel olarak alt zeminin tepesindeki dikey gerilimden etkilenir. Bu sebeple ACR-PCR sisteminin uygulanması konusunda halen tutarsızlıklar olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Armeni & Loizos, 2022).

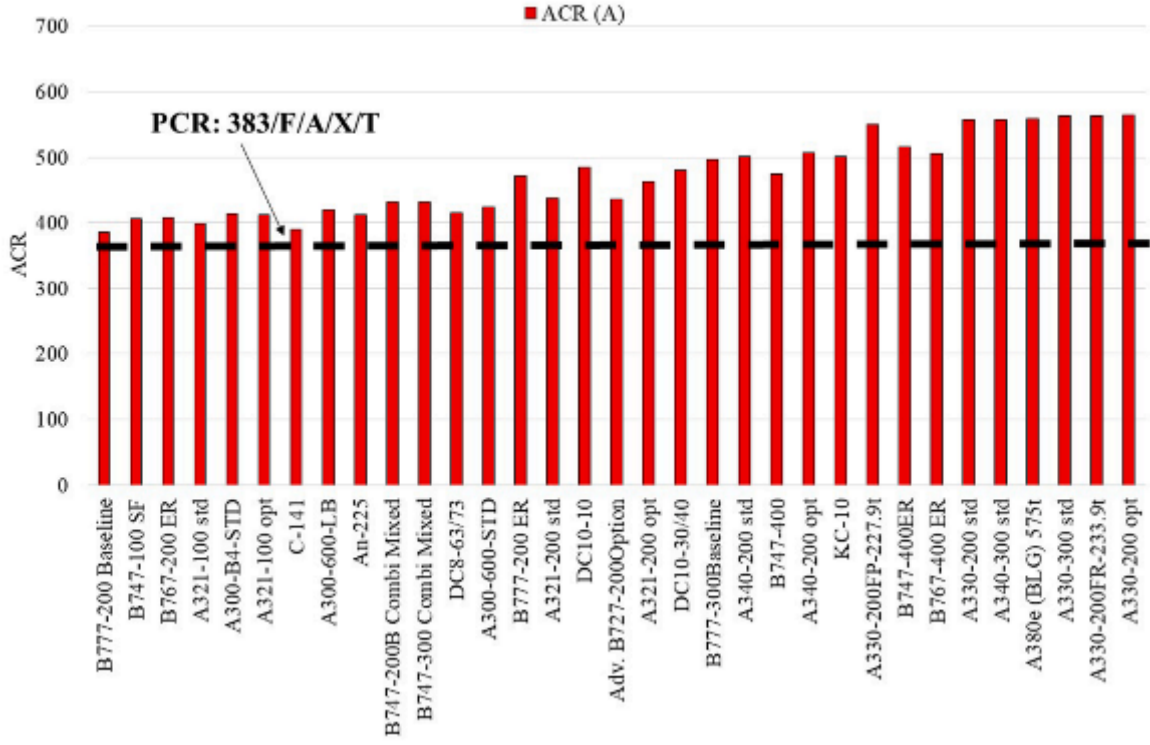


Şekil 6. Artan ACR ile CDF değişimi (Armeni & Loizos, 2022)

ACN değerleri, PCN'den daha düşük olan 33 tip uçak seçilmiştir, bu da kaplamanın PCN'ye göre ağırlık kısıtlaması olmaksızın yüklerini taşıyabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 7'de uçakların tipleri ve ACN değerleri gösterilmektedir. Bu uçaklar için ACR değerleri hesaplanmış ve pistin kaplama PCR değeri ile birlikte Şekil 8'de sunulmuştur. Yapılan analiz, bu uçakların ACR değerlerinin PCR değerini aştığını, yani yeni ACR-PCR sistemine göre pist kaplamasının bu uçakların operasyonlarını sınırsız bir şekilde kabul edemeyeceğini, dolayısıyla operasyonların kısıtlanması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, PCR'nin PCN'ye eşdeğer olmadığı ve bu özel durum için uygulanması sırasında daha riske girmek istemeyen bir metod olduğu gösterilmiştir (Armeni & Loizos, 2022).



Şekil 7. PCN'ye kıyasla alt zemin kategorisi A için uçak ACN değerleri (Armeni & Loizos, 2022)



Şekil 8. Alt zemin kategorisi A için PCR ile karşılaştırıldığında uçak ACR değerleri (Armeni & Loizos, 2022)

Kaplama değerlendirmesi için ayrıntılı analitik prosedürler dahil edildiğinden, ACR-PCR sisteminin en son havaalanı kaplaması değerlendirme teknikleriyle daha tutarlı olduğu ortaya çıkmıştır. Uçakların havaalanı kaplamaları üzerindeki etkisini ifade etmek için kullanılan ACR endeksi önemli ölçüde iyileştirilmiştir, ancak bu endeks hala bazı tutarsızlıklar sunduğundan, kullanılan modellemeyi iyileştirmek için daha fazla araştırma yapılması gerekebilir.

İki sistem arasındaki aktarılabirlik göz önüne alındığında, ACN ve ACR arasında güçlü bir korelasyon var gibi görünse de ACR'nin ACN'den bağımsız olarak tahmin edilmesi gerekir.

Ayrıca, iki havalimanının esnek pist kaplamasının PCN ve PCR değerlerinin tahmininden, kaplamanın taşıyabileceği uçak yükü miktarı açısından PCR yaklaşımının PCN'ye kıyasla daha riske girmek istemeyen bir metod olabileceği ortaya çıkmıştır (Armeni & Loizos, 2022).

1.8. Havaalanı Kaplaması Yazılımları

FAAPAVEAIR - Kaplama yönetim sistemi - AC 150/5370-7B, 2014'te tavsiye edilir. FAAPAVEAIR, 1997 yılında başlatılan FAA-NASAO girişimi kapsamında, genel havacılık (GA) kaplama durumu verilerini toplamak ve paylaşmak için en uygun çözümdür. FAA'ya, Federal AIP fonlarının dağıtımına yönelik kararlar verirken kaplama durumu bilgilerini içeren koordineli bir sistem sunar ve bu sayede etkili ve kolay erişilebilir bir araç sağlar. Ayrıca, FAAPAVEAIR, havaalanı sponsorlarının FAA'nın AC5380-6A: Havaalanı Kaplamalarının Bakımına İlişkin Kılavuzlar ve Prosedürler'de belirtilen zorunlu kaplama bakım yönetim programı gereksinimlerine uymasını kolaylaştırır. Havaalanı yöneticileri ve sponsorlar, internet erişimi olan her yerden kaplama verilerini görüntüleyip yönetebilirler. Veriler, yerel (birkaç havaalanı) veya global (birkaç eyalet) kaplama durumu değerlendirmeleri gibi farklı amaçlarla sorgulanabilir. Ayrıca, aynı anda birden fazla kullanıcı veri girişi yapabilir veya sorgulama gerçekleştirebilir. şu anda FAA PAVEAIR, 1.700'den fazla havaalanından elde edilen kaplama verilerini içermektedir. FAAPAVEAIR'da aşağıdaki yazılımlar kullanılır:

FAA PAVEAIR Resmi Web Sitesi: <https://faapaveair.faa.gov/>

FAAFIELD 2.0.2 - Kaplama tasarımı ve değerlendirmesi - AC 150/5320-6G, 2021

ProFAA - Kaldırım pürüzlülüğünü toplayın ve analiz edin - AC 150/5380-9, 2009

BAKFAA - Kaplama katmanı özelliğini geriye doğru hesaplama - AC 150/5370-11A, 2003 (URL-3, 2023).

1.9. ACR/PCR Hesaplama Yöntemi

1.9.1. Matematiksel Yöntem

ACR-PCR yönteminde kullanılan temel matematiksel model, Katmanlı Elastik Analiz (LEA) yöntemidir. Bu model, havaalanı üst yapısının, esnek ya da rijit olmasına bakılmaksızın, düzenli homojen, elastik ve izotropik katmanlardan oluştuğunu varsayar. Her bir katman, elastik modül (E), Poisson oranı (ν) ve sabit katman kalınlığı (t) gibi parametrelerle tanımlanır. Katmanların yatayda sonsuz bir uzantıya sahip olduğu kabul edilirken, alt katmanın ya da zemin tabakasının dikey olarak sonsuzluğa uzandığı varsayılır (yani alt zemin elastik bir yarı uzay olarak modellenir). Modelin doğrusal elastik yapısı sayesinde, çoklu tekerleğe sahip bir uçağın iniş takımı yükü, bireysel tekerlek yüklerinin birleşik gerilim ve gerinim tepkileri olarak hesaplanabilir. LEA modelinin kullanımı dünya çapındaki kaplama tasarım yöntemleriyle korelasyona izin verir (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.9.2. Rijit Kaplamalar

Rijit kaplama ACR prosedürü, 1,5 MPa (218 psi) sabit lastik basıncında elde edilen tek tekerlek yükünü, referans beton levhası kalınlığı (t) ile ilişkilendirir. Bu süreçte, dört alt zemin kategorisi göz önünde bulundurulur ve 2,75 MPa (399 psi) standart beton gerilmesi (eğilmede çekme değeri) kullanılır. Standart bir beton gerilimi kullanıldığı için rijit ACR hesaplamasında kaplamanın bükülme mukavemeti veya kaplama sayısına dair herhangi bir bilgiye ihtiyaç duyulmadığı vurgulanmalıdır. Bir uçağın rijit ACR'sini belirlemek için şu adımlar izlenir:

- Referans Kaplama Yapısı:

Üretici tarafından sağlanan kaplama gereksinim verileri kullanılarak, belirlenen uçak kütlesi için referans kalınlığı (t), alt zeminin elastik modül (E) değeri ve raporlama için kullanılan standart beton gerilimi (2,75 MPa veya 399 psi) hesaplanır. Dört alt zemin kategorisinin tümü için LEA modeli için Tablo 2'de gösterilen kesit kullanılır.

Tablo 2. Rijit ACR hesabında referans kaplama yapısı (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

Katman Tanımı	Katman Adı	Kalınlık, mm (in)	E, Mpa (psi)	ν (Poisson)
Beton Kaplama (PCC)	Katman 1	Değişken	27.579 (4.000.000)	0,15
Agrega Tabakası	Katman 2	200 (7,9)	500 (72.519)	0,35
Temel Tabakası	Katman 3	Sonsuz	Alt Zemin Kategorileri Tablosu (Tablo 1)	0,40

LEA modelinde izin verilen minimum Katman 1 kalınlığı 50,8 mm'dir (2 inç). LEA hesaplamaları, Katman 1 ile Katman 2 arasındaki yatay arayüzün tam kayma (bağlantısız) ve Katman 2 ile Katman 3 arasındaki yatay arayüzün tam bağlı (bağlantılı) olduğunu varsayar. LEA modelinde gerilim (σ), Katman 1'in (beton tabakası) tabanında hesaplanan maksimum yatay gerilimdir.

Gerilim Değerlendirme Noktaları: LEA değerlendirme noktalarının sayısı, iniş takımındaki tekerlek sayısı ile eşittir. Bu değerlendirme noktaları, Katman 1'in alt kısmında, her tekerleğin merkez noktası altında yer alır. Katman 1'in kalınlığı (t), tüm değerlendirme noktalarında maksimum gerilimin 2,75 MPa (399 psi) olmasını sağlayacak şekilde ayarlanır. Bu ayarlardan sonra elde edilen t , ACR için referans kalınlıktır.

- Hafif Uçaklar İçin Değiştirilmiş DSWL Hesaplaması

Bazı hafif uçaklarda gerekli referans kalınlık (t), izin verilen minimum kalınlıktan daha azdır. Eğer Katman 1'in teorik kalınlığı, maksimum gerilimi 2,75 MPa (399 psi) eşitleyecek kadar küçükse (50,8 mm veya 2 inç'ten az), DSWL'yi hesaplamak için aşağıdaki değiştirilmiş adımlar izlenir:

İzin verilen minimum beton kalınlığı (50,8 mm veya 2 inç) için karşılık gelen gerilim değeri 2,75 MPa (399 psi) olarak belirlenir. Bu minimum kalınlığı kullanarak seçilen alt zemin için DSWL hesaplanır.

1,50 MPa (218 psi) sabit lastik basıncı altında, tek tekerlek yükü büyüklüğü, Katman 1'in alt kısmındaki maksimum yatay gerilim, minimum kalınlıkla belirlenen gerilim değerine eşit olacak şekilde ayarlanır.

Seçilen kütle ve alt zemin kategorisindeki uçak sınıflama değeri, 100 kg cinsinden türetilen tek tekerlek yükünün iki katı olarak hesaplanır. ACR'nin sayısal değeri raporlama

için en yakın on katına yuvarlanabilir. (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.9.3. Esnek Kaplamalar

1. Adım

Alt katmanların sayısını N olarak belirlenir. Taban katmanı kalınlığı t_B 15 inçten (381 mm) azsa, $N = 1$ olur ve alt katmanlamaya gerek kalmaz. t_B 15 inçten (381 mm) büyük veya ona eşitse, alt katmanların sayısı şöyledir:

$$N = \text{int} \left(\frac{t_B}{254} + 0,5 \right) \quad (1)$$

burada t_B mm cinsindendir ve int işlevi argümanın tamsayı kısmını döndürür (yani bir sonraki tam sayıya yuvarlar).

2. Adım

Alt katmanların kalınlığını belirleme işlemi şu şekildedir:

Eğer $N = 1$ ise, alt katman kalınlığı, taban katmanının kalınlığı t_B 'ye eşittir.

Eğer $N > 1$ ise, alt katmanların kalınlıkları şu şekilde hesaplanır:

$N-1$ alt katmanının kalınlığı 254 mm (10 inç) olarak alınır. Üst alt katmanın kalınlığı ise $t_B - (N-1) \times 254$ mm olarak hesaplanır. Genel olarak, N alt katman eşit kalınlığa sahip olmamaktadır. Örneğin, taban katmanının kalınlığı 660 mm (26 inç) ise, 1. adımdan itibaren alt katman sayısı 3 olacaktır. Altındaki 2 alt katmanın her biri 254 mm'dir (10 inç). Üst katman kalınlığı ise 152 mm (6 inç) ($660 \text{ mm (26 inç)} - 2 \times 254 \text{ mm (10 inç)}$) olmaktadır.

3. Adım

Her alt katmana bir modül değeri E atanır. Modül değerleri aşağıdaki denklemle verilir:

$$E_n = E_{n-1} \times \{1 + [\log(t_n) - \log 25,4] \times (c - d[\log(E_{n-1}) + \log 145,037])\} \quad (2)$$

E_n = mevcut alt katmanın psi (MPa) cinsinden modülü;

E_{n-1} =mevcut alt katmanın hemen altındaki alt katmanın modülü; veya mevcut alt katmanın en alt katman olduğu durumdaki modülü;

t_n =mevcut alt katmanın inç (mm) cinsinden kalınlığı;

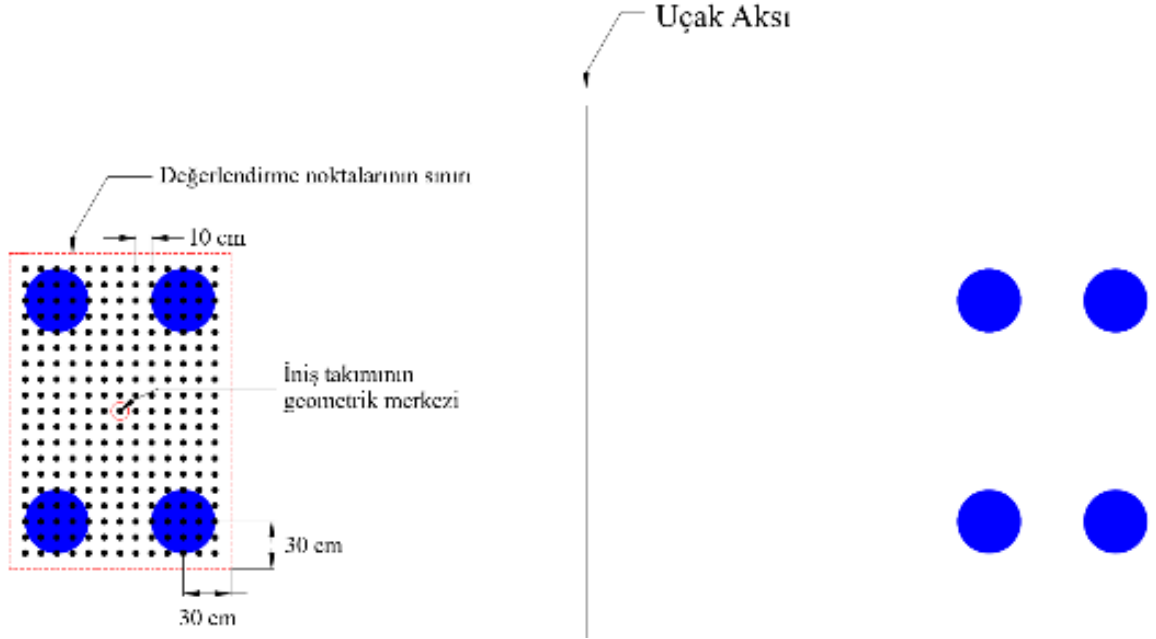
$c=10,52$ (sabit)

$d=2.0$ (sabit)

Yukarıdaki denklem en alt katmandan başlayarak yinelemeli olarak uygulanır.

ACR değeri, ana iniş takımındaki tüm tekerlekler kullanılarak hesaplanır; burun iniş takımındaki tekerlekler bu hesaplama dahil edilmez. LEA modelinde, ε gerinimi, alt zemin (en alt) katmanının üst yüzeyinde hesaplanan maksimum dikey birim şekil değiştirmeyi ifade eder. ICAO-ACR bilgisayar programında, gerinimler, değerlendirme donanımının geometrisine bağlı olarak belirli noktalar için hesaplanır. Bu değerlendirme noktaları, her tekerleğin merkez noktasının hemen altına yerleştirilmiş ve iniş takımının ana eksenlerine paralel olarak düzenlenmiş 10 cm aralıklı bir ızgarayla tanımlanır.

İki yükten oluşan basit ana iniş takımları için (örneğin, ikili veya D düzenekte 2 tekerlek, ikili tandemde 4 tekerlek veya 2 parçalı düzenekte vb.), ızgara orijini yükün geometrik merkezine göre ayarlanır. Izgaranın sınırları, yükün etrafındaki maksimum tekerlek koordinatlarının 30 cm ötesine kadar uzanır.



Şekil 9. Değerlendirme noktaları (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

Ana iniş takımı grubunu oluşturan ikiden fazla yük takımına sahip daha karmaşık iniş takımı türleri için ızgaranın orijini tüm iniş takımı grubunun geometrik merkezindedir.

Izgaranın sınırları, her yönde maksimum tekerlek koordinatlarının 30 cm (11,8 inç) ötesine uzanır (Şekil 9). Geometrik merkez koordinatlarını hesaplamak için, tüm dahil edilen tekerlekler eşit şekilde ağırlıklandırılmalıdır; bu, tekerlek yüklerinin veya lastik basınçlarının farklı olmasından bağımsızdır.

Esnek ACR prosedürü, temel hasar yasasıyla ilişkili alt zemin göçme kriterine dayanır:

$$D_e(\varepsilon) = \frac{1}{C_e(\varepsilon)} \quad (3)$$

Bu temel hasar kanunu, muhtemelen birden fazla gerinim tepe noktasına sahip ve tepe noktaları arasında sıfır gerinime dönüş olmayan, karmaşık gerinim profilleri üreten ardışık aksların olduğu düzenlemelere uygulanamayan yükleme döngüsü (maksimum değeri ε olan tek tepeli gerinim profili) kavramına dayanmaktadır. Bu sebeple, temel hasar kanunu bir integral formülü ile ifade edilir:

$$D = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} < \frac{dD_e(x)}{dx} > dx \quad (4)$$

Burada x , iniş takımı koordinatındaki boyuna konumu ifade eder.

- Türetilmiş Tekil Tekerlek Yüğü (DSWL) Hesaplanması

Uçak üreticisi tarafından yayınlanan kaplama gereksinimi verilerini kullanarak, verilen uçak kütlesi, alt zeminin E değeri ve uçağın 36500 geçişi için referans kalınlığı t hesaplanır. Değişken (tasarım) katmanının kalınlığı, hasar değeri 1,0'a eşit olana kadar ayarlanır. Elde edilen bu kalınlık t , ACR için referans kalınlık olarak kabul edilir.

Aynı LEA modeli kullanılarak, seçilen alt zemin için türetilmiş tek tekerlek yüğü hesaplanır. 218 psi (1,50 MPa) sabit lastik basıncı korunarak, tek tekerlek yüğü büyüklüğü, 36.500 geçişte hasarın 1,0'a eşit olmasını sağlayacak şekilde ayarlanır. Tek tekerlek yüğü altındaki gerinimlerin değerlendirilmesi için, alt zemin üst kısmında, tekerleğin merkezinin hemen altında bulunan bir değerlendirme noktası kullanılır.

- Hafif Uçaklar İçin Değiştirilmiş DSWL Hesaplaması:

Bazı hafif uçaklar için gerekli referans kalınlık t , izin verilen minimum kalınlıktan daha az olabilir. Eğer değişken tasarım katmanının teorik kalınlığı 25,4 mm (1 inç)'den az ise 36.500 uçak geçişinde hasarı 1,0'a eşitlemek için aşağıdaki adımlar izlenir:

1. İzin verilen minimum değişken tasarım tabakası kalınlığı olan 25,4 mm'ye (1 inç) karşılık gelen alt zemin üst kısmındaki maksimum dikey gerinim değeri belirlenir.

2. Referans yapının minimum kalınlığını kullanarak, seçilen alt zemin için DSWL hesaplanır. 1,5 MPa (218 psi) sabit lastik basıncı korunarak, tek tekerlek yükü büyüklüğü, alt zemin üst kısmındaki maksimum dikey gerinimi Denklem 3'te belirtilen değere eşit olana kadar ayarlanır.

LEA modelinde, değişken (taban) katmanının izin verilen minimum kalınlığı 1 inç (25,4 mm) olarak belirlenmiştir.

- ACR Hesaplanması

Seçilen kütle ve alt zemin kategorisi için uçak sınıflandırma değeri, 100 kg cinsinden DSWL'nin iki katı olarak hesaplanır. ACR'nin sayısal değeri raporlama için en yakın on katına yuvarlanabilir.

Uçak lastikleri, genellikle motor itişisi olmadan maksimum brüt kütleyle karşılık gelen basınca kadar şişirilir ve bu basınç, kalkış kütlelerinde değişiklik olsa bile korunur. Ancak, azaltılmış kütlelerde, değiştirilmiş ağırlık merkezlerinde veya azaltılmış lastik basınçlarında yapılan çalışmalar da verimli olabilir. Bu koşullarda, ACR hesaplaması yapmak için ayarlanan lastik şişirme basıncının ICAO-ACR'ye özel giriş alanına girilmesi gerekir (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.10. PCR Kavramı

Bir kaplamanın mukavemeti, kaplamanın sınırsız olarak kabul edebileceği uçağın yük oranı cinsinden rapor edilir. Sınırsız işlemler, PCR'nin uçak ACR'si ile ilişkisini ifade eder; yani, PCR'nin ACR'den büyük veya eşit olması durumunda bir uçağın ağırlık sınırlaması olmadan çalışmasına izin verilebilir. Ancak, "sınırsız operasyon" terimi, kaplamanın ömrünü dikkate almaz. Raporlanacak PCR, mevcut ve gelecekteki trafik için kaplama mukavemetinin yeterli olmasını sağlamalıdır ve trafik önemli ölçüde değişirse yeniden değerlendirilmelidir. Önemli bir trafik değişikliği, yeni bir uçak tipinin tanıtılması veya mevcut uçak trafik seviyelerinde artış gibi durumlar olabilir.

Kaplama için sayısal PCR değerinin belirlenmesi, "Uçak kullanma yöntemi" veya "Teknik değerlendirme yöntemi" olmak üzere iki prosedüre dayanabilir. ICAO, üye devletlerin PCR değerlerini nasıl belirleyeceklerine dair esneklik tanır. Her iki prosedür de PCR'yi belirlemek için kullanılabilir, ancak hangi metodolojinin kullanıldığı raporlanmalıdır (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

PCR, AASHTO tasarımlarındaki karayolu mekanistik analizlerinde kullanılan Yapısal Numara (Structural Number, SN) ile benzer kavramlardır. Yapısal Numara (SN), tasarımın trafik yüklerini sürdürmek için gereken genel yapısal gereksinimi temsil eder. Toprak desteği (MR), eşdeğer tekil eksenel yük (ESAL), hizmet verilebilirlik ve çevresel şartlar için gerekli olan kaplamanın yapısal gücünü ifade eden soyut bir kavramdır.

1.10.1. PCR'yi Belirlemek İçin Uçak Kullanma Yöntemi

Uçak Kullanma Yöntemi, mevcut kaplama tesislerinde kullanılmasına izin verilen tüm uçakların ACR değerlerinin belirlendiği ve en yüksek ACR değerinin PCR olarak raporlandığı bir yöntemdir. Bu yöntem, uygulanması kolay olup kaplama yapısı hakkında ayrıntılı bilgi gerektirmez. PCR raporlanırken, alt zemin destek kategorisi kritik bir girdi olarak değerlendirilmez. Bilgi mevcut değilse, önerilen alt zemin destek kategorisi Kategori B olarak alınmalıdır.

Uçak Kullanma Yöntemi'nin temel varsayımı, kaplama yapısının trafik karışımındaki tüm uçakları destekleyebilecek yapısal kapasiteye sahip olduğudur ve her uçağın ağırlık sınırlaması olmaksızın kaplama yapısı üzerinde çalışabileceğini ifade eder. Bu yöntemde ACR/PCR'yi belirlemek için kullanılan metodoloji, havaalanının boyutsal gereksinimlerini belirlemek için kullanılan kritik tasarım uçağını dikkate almaz.

Bu yöntemin doğruluğu geçmiş uçak trafiğinin kayıtlarının alınmasına bağlıdır. Kaplamayı çok nadir kullanan bir uçağın PCR'yi belirlemek için kullanılması durumunda, kaplama kapasitesinin önemli ölçüde fazla tahmin edilmesi ortaya çıkabilir. Benzer şekilde, kaplama kapasitesinin önemli ölçüde eksik tahmin edilmesi, kabul edilebilir trafiğin çalışmasını engelleyerek kaplamanın ekonomik olmayan şekilde kullanılmasına yol açabilir. Bir uçağın normal trafiğin bir parçası olarak kabul edilmesinden önce, operasyon sıklığına ilişkin asgari sınırlar bulunmamasına rağmen, raporlama yapan kurum, kaplama kapasitesinin olduğundan fazla veya eksik gösterilmesinden kaçınmak için rasyonel bir yaklaşım kullanmalıdır. Yukarıda sıralanan endişeler nedeniyle, Uçak Kullanma

Yönteminin uzun vadede kullanılması önerilmez (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.11. PCR'yi Belirlemek İçin Teknik Değerlendirme Yöntemi

Kaplama bölümünün mukavemeti, uçak trafik kompozisyonuna ve kaplama yapısının türü ve alt zemin destek koşulları ile birlikte operasyon sayısına bağlı olarak değişecektir. Teknik Değerlendirme Yöntemi, kaplama mukavemetini belirlemek için kaplama yapısına özgü değişkenler (katman kalınlığı, elastisite modülü vb.) dikkate alır. Genel olarak, bir kaplama yapısının belirli bir uçak için yükleme yoğunluğu arttıkça (uçak ağırlığındaki artış), izin verilen operasyon sayısı (trafik) azalır. İki kaplama yapısının farklı kesitlere sahip olması durumunda, benzer dayanıklılık göstermesi mümkündür; ancak, izin verilen uçak operasyonları bu kaplamalar arasında önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Teknik değerlendirme, kaplamanın dayanıklılığını belirlemek için tüm faktörleri göz önünde bulundurur ve bu nedenle kaplama değerlendirmesi mutlak değerler yerine temsili tahminler olarak görülmelidir. Başarılı bir kaplama değerlendirmesi, kaplama üzerindeki tüm değişkenlerin etkilerini dikkate alarak kaplamanın dayanıklılığını belirler.

Teknik değerlendirmenin sonuçları, Uçak Kullanma Yöntemi'ne göre daha tutarlıdır ancak daha fazla bilgi gerektirir. Kaplama değerlendirmesi, yerinde incelemeler, yük taşıma testleri ve mühendislik kararlarının bir kombinasyonunu içerebilir. Kaplama mukavemeti değerlendirmesi genellikle nihai mukavemet veya ani hasar kriterleri açısından yapılır. Ancak, kaplamalar genellikle ani yapısal bozulmalar nedeniyle hizmet dışı bırakılmaz. Bir kaplamanın kullanılabilirliğindeki bir azalma, genellikle yüzey pürüzlülüğündeki artışlar, tekerlek izleri veya çatlamlar gibi lokal bozulmalarla ilişkilidir. Bir kaplama yapısının yeterliliğinin belirlenmesinde yalnızca kaplama yüklerinin büyüklüğü dikkate alınmamalı, aynı zamanda trafiğin birikmiş etkisinin kaplamanın amaçlanan ömrü üzerindeki etkisi de dikkate alınmalıdır. Teknik bir PCR belirlemek için; uçak trafiği bileşimi ve sıklığı, kaplama yapısının her katmanının kalınlığı, malzeme türü, mukavemeti ve alt zeminin elastik modülü hakkında bilgi gerekir.

PCR prosedürü:

Adım 1: Mevcut en iyi veri kaynakları kullanılarak, ilgili tüm kaplama verileri (katman kalınlıkları, elastik modüller ve tüm katmanların Poisson oranları) toplanır. Bu veriler, mevcut uçak trafiği veya öngörülen uçak trafiği kullanılarak toplanmalıdır.

Adım 2: Uçak tipi, kalkış sayısı (veya kaplama tasarımıyla uyumlu operasyonlar) ve değerlendirilen kaplamanın tasarımı veya tahmini kalan yapısal ömrü boyunca maruz kalması beklenen uçak ağırlığı gibi girdiler belirlenir.

Not: FAA prosedürü, geçişlerin uçak tipinden bağımsız olarak $s = 776 \text{ mm}$ (30,54 inç) standart sapma ile bir Gaussian (veya normal) dağılım fonksiyonu tarafından dağıtıldığını varsayar.

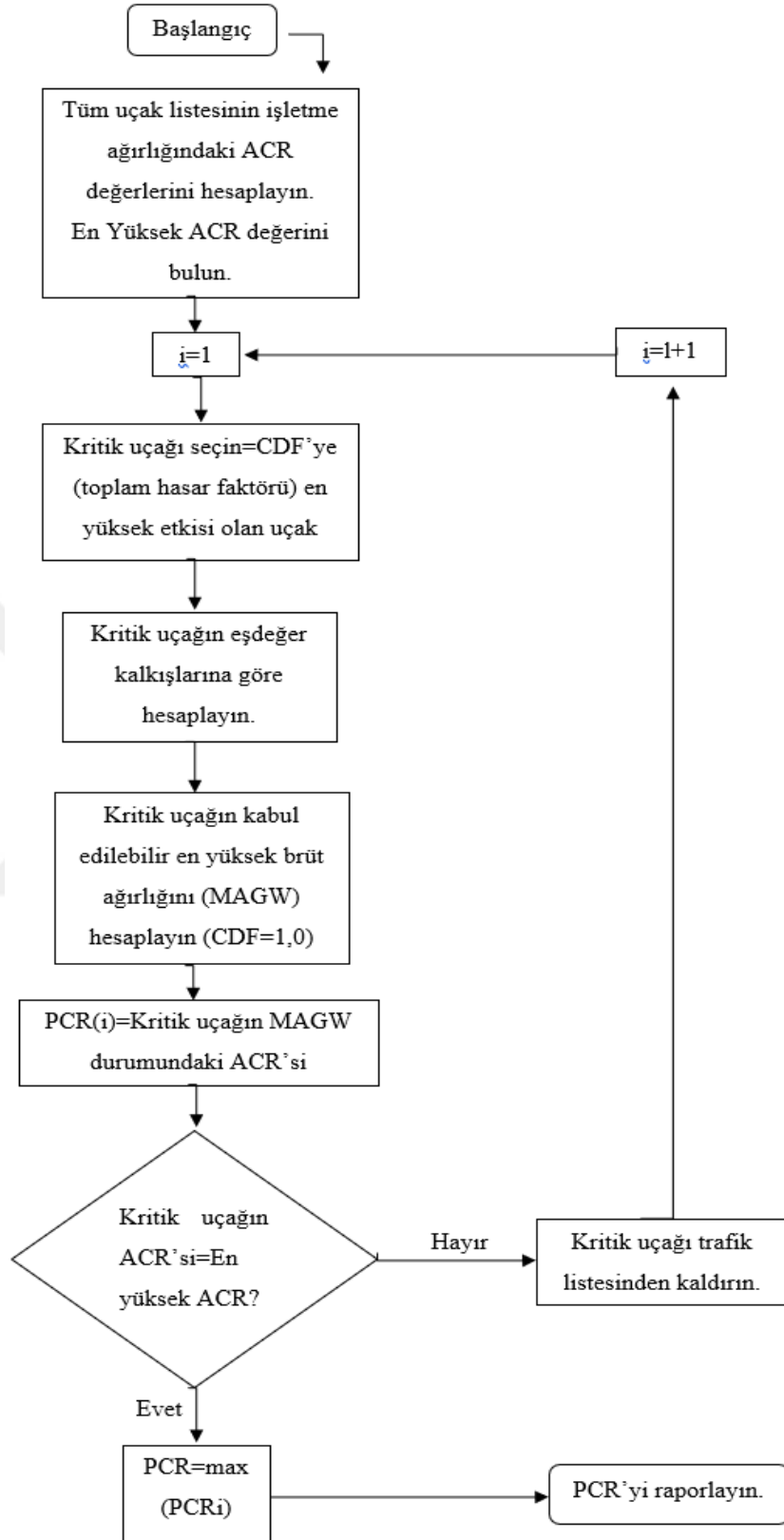
Adım 3: Uçak karışımındaki her bir uçağın ACR'leri kendi çalışma ağırlığında hesaplanır ve maksimum ACR değeri kaydedilir.

Adım 4: Uçak karışımının maksimum CDF'si hesaplanır ve bu değer kaydedilir.

Adım 5: Maksimum CDF'ye en yüksek katkıyı sağlayan uçak, kritik uçak olarak seçilir. Bu uçak AC(i) olarak adlandırılır; burada i, başlangıç değeri 1 olan bir endeks değeridir. Mevcut kritik uçak AC(i) dışındaki tüm uçaklar trafik listesinden çıkarılır.

Adım 6: Kritik uçakların yıllık kalkışları, maksimum uçak CDF'sinin 4. adımda kaydedilen değere eşit olana kadar ayarlanır. Kritik uçağın eşdeğer yıllık kalkış sayısı kaydedilir.

Adım 7: Adım 6'da elde edilen yıllık kalkış sayısı için maksimum 1,0 CDF elde etmek üzere kritik uçak ağırlığı ayarlanır.



Şekil 10. Önerilen PCR hesaplama prosedürünün akış şeması (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

PCR değeri doğrudan kaplama tasarımı için kullanılmamalıdır. Üstyapıların tasarımı ve değerlendirilmesi, genellikle karmaşık mühendislik problemleridir ve bu süreçler tek bir sayıya indirgenemez. Bu tür değerlendirmeler, kapsamlı analizler ve çeşitli faktörlerin dikkate alınmasını gerektirir. PCR değerlendirme sistemi, daha yüksek değerlerin daha büyük yük kapasitesine sahip kaplamaları temsil edecek şekilde kaplama kapasitesini karşılaştırma imkanı sunar.

PCR sistemi, bilgi miktarını maksimize etmek ve bilgisayar sistemleriyle uyumlu hale getirmek amacıyla kodlanmış bir format kullanır. PCR, aşağıdaki beş bölümden oluşan kod şeklinde rapor edilir:

PCR değeri (sayı olarak ifade edilir) / Kaplamanın cinsi / Alt zemin kategorisi / lastik basınç aralığı / PCR belirleme metodu.

Farklı dayanımlara sahip kaplamalar için, kaplamanın en zayıf bölümüne ilişkin kontrol PCR sayısal değeri genellikle kaplamanın genel dayanımı olarak rapor edilir. Eğer en zayıf segment pistin en yoğun kullanılan kısmında yer almıyorsa, mühendislik değerlendirmesi gerekebilir. Bu durumda, PCR'yi belirlemek için daha temsili bir segment seçilmesi daha uygun olabilir.

Tablo 3. Kaplama tipi ve sembolleri (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

Kaplama Tipi	Kaplama Kodlaması
Esnek	F
Rijit	R

Kaplama türlerinin ve stabilize katmanların çeşitli kombinasyonları, sert veya esnek olarak sınıflandırılabilir karmaşık kaplamalarla sonuçlanabilir. Bir kaplama bölümü, hem sert hem de esnek kaplamaları temsil eden çok sayıda yapısal elemandan oluşabilir. Kompozit kaplamalar genellikle kaplamanın ömrü boyunca çeşitli aşamalarda uygulanan yüzey kaplamalarının bir birleşimidir. Eğer bir kaplama kompozit bir yapıya sahipse, kaplama tipi, kaplamanın yapısal davranışını en iyi şekilde yansıtan tür olarak rapor edilmelidir. FAARFIELD, kaplama kalınlığı sert kalınlıkla uyumlu hale gelene kadar esnek kaplamayla kaplanmış sert bir kaplamayı sert kaplama olarak değerlendirecektir. Kaplamanın kompozit bir yapıdan olduğunu belirten bir notun eklenmesi ve aşınma yüzeyinin dikkatlice belirtilmesi daha uygun olacaktır (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.11.1. Lastik Basınçları

- Rijit kaplamalar

Beton kaplamalar, uçak lastiklerinin yüksek basıncına karşı genellikle çok dayanıklıdır. Beton kaplamalar, ticari uçakların kullanabileceği basınçlardan daha yüksek basınçlara dayanacak şekilde tasarlandığından, genellikle W kodu olarak sınıflandırılabilir. Bu nedenle, uçak lastiği basıncının beton yüzeyli kaplamalar üzerinde minimal etkisi olacaktır.

- Esnek kaplamalar

Asfalt kaplamaların lastik basıncı üzerindeki etkileri, asfalt karışımının kalitesine ve iklim koşullarına bağlı olarak değişebilir. Asfalt kaplamaların lastik basıncına karşı dayanıklılığı, karışımın yırtılma veya yoğunlaşma karşısındaki direnci ile ilişkilidir. Kötü yapılmış bir asfalt kaplama, yük altında konsolidasyon nedeniyle tekerlek izi oluşumuna neden olabilir. Lastik basıncına karşı direnç sağlamak için, düşük kaliteli karışımların stabilitesi veya kayma direnci büyük önem taşır. FAA spesifikasyonu Madde P-401'e uygun şekilde hazırlanmış ve yerleştirilmiş bir karışım, 1,5 MPa'yı (218 psi) aşan önemli lastik basıncına dayanabilir. Madde P-401, Asfalt Karışım Kaplama, AC 150/5370-10, Havaalanları İnşaatının Belirlenmesi Standartlarının güncel versiyonunda sağlanmaktadır. Düşük kaliteli malzemeler ve yapım standartlarının kullanıldığı asfalt kaplamalar, 0,7 MPa (100 psi) veya daha düşük lastik basınçlarının etkisi altında deformasyona uğrayabilir. Bu etkiler asfalt tabakası kalınlığından bağımsız olmasına rağmen, 10,2 ila 12,7 cm (4 ila 5 inç) arasında iyi yerleştirilmiş asfalta sahip kaplamalar genellikle X veya W koduyla değerlendirilebilirken, daha düşük kaliteli asfalttan oluşan daha ince kaplamalar Y sınıfının üzerinde değerlendirilmemelidir (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

Tablo 4. Lastik basınç sınıflandırması (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

Kategori	Kod	Lastik Basınç Aralığı
Limitsiz	W	Basınç sınırlaması yok
Yüksek	X	1,75 MPa (254 psi) basınç limiti
Orta	Y	1,25 MPa (181 psi) basınç limiti
Düşük	Z	0,5 MPa (73 psi) basınç limiti

1.11.2. Eşdeğer Trafik

Kümülatif Hasar Faktörü (CDF) prosedürü, havaalanındaki trafik karışımının etkilerini değerlendiren ayrıntılı bir yöntem sunar. Bu yöntem, trafik karışımındaki farklı uçakların etkilerini hesaplamak için kullanılır ve tüm trafiğin etkilerini içeren bir PCR'nin (Kaplama Mukavemeti) belirlenmesine olanak sağlar.

Kümülatif Hasar Faktörü (CDF) prosedürü, trafik karışımındaki uçakların etkilerini bir araya getirerek, tüm trafiğin kaplama üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi sağlar. Bu yöntem, bir havaalanının kaplamasının dayanıklılığını belirlemek için ayrıntılı analizler gerektirir. Eşdeğer trafik kavramı, trafik karışımındaki tüm uçakların etkilerini bir kritik uçakta birleştirir. Böylece, tüm trafiğin etkilerini içeren bir PCR hesaplanabilir. CDF prosedürü, tek bir uçağın etkisini analiz etmek için kullanıldığından, bu gereklidir.

- Teknik ve Uçak Kullanma Yöntemleri:

Teknik Yöntem: Kaplama tasarımında ayrıntılı analizler yaparak, her bir uçağın etkisinin hesaplanmasını ve bu etkilerin toplamını içerir. Trafik karışımındaki her bir uçağın brüt ağırlığı ve kaplama kesiti dikkate alınarak, PCR belirlenir.

Uçak Kullanma Yöntemi: Bu yöntem, mevcut uçakların ACR değerlerini belirler ve en yüksek ACR değerini PCR olarak raporlar. Bu yöntem daha basittir ve kaplama yapısının ayrıntılarına ihtiyaç duymaz.

- Trafik Terimleri ve Kaplama Stresi:

Varış, Kalkış, Geçiş: Bu terimler, bir kaplamanın üzerindeki uçak trafiğinin çeşitli yönlerini ifade eder ve kaplama üzerindeki etkileri belirlemede kullanılır.

Kapsama, Yük Tekrarı, Operasyon ve Trafik Döngüsü: Kaplama üzerindeki uçak trafiğinin etkilerini analiz ederken kullanılan terimlerdir. Bu terimlerin doğru bir şekilde tanımlanması ve uygulanması, kaplama tasarımı ve değerlendirmesi sürecinde büyük önem taşır. Sonuç olarak, teknik değerlendirme yönteminin sağladığı ayrıntılı bilgiler, kaplama tasarımı ve değerlendirmesi için sağlam bir temel oluşturur. Bu bilgiler, PCR belirleme sürecinde kaplama tasarımının tüm etkilerini dikkate almayı sağlar (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.11.3. Varış ve Kalkış

Uçaklar havaalanından kalkarken, varışa göre daha fazla yakıt bulundurur. Sonuç olarak, uçuş sırasında kullanılan yakıt ve kanatlardaki kaldırma kuvvetinin bir sonucu olarak

uçağın ağırlığının daha düşük olması nedeniyle, pist kaplaması üzerindeki tekerleklerin stres yükü, iniş sırasında kalkışa göre daha azdır. Bu, konma darbesinde bile geçerlidir, çünkü kanatlarda halen kaldırma kuvveti vardır ve bu da dinamik dikey kuvveti azaltır. FAA kaplama tasarım prosedürü, sadece kalkışları dikkate alır ve inişleri değerlendirme dışında bırakır. Yükleme gerilimlerinin hesaplanma yöntemi ne olursa olsun, bir trafik döngüsü, aynı uçağın bir kalkış ve bir iniş yapması olarak tanımlanır.

- Paralel Taksi Yolu Durumu

Paralel taksi yolları söz konusu olduğunda iki farklı yükleme durumu göz önüne alınabilir. Bu senaryolar, uçakların tüm iniş ve kalkış döngülerinde yolcu ve kargo yüklerinin benzer olduğunu varsayar:

Eğer uçak havaalanında yakıt alıyorsa, iniş sırasında uygulanan basınç yükü azaltılmış olarak kabul edilir. Bu durumda, bir trafik döngüsü yalnızca bir kalkış geçişinden oluşur, yani trafik döngüleri başına geçiş oranı (P/TC) 1'dir.

Uçak yakıt temin edemezse, hem iniş hem de kalkış geçişleri dikkate alınmalıdır. Bu durumda bir trafik döngüsü, eşit yük stresine sahip iki geçişi içerir ve trafik döngüleri başına geçiş oranı (P/TC) 2'dir (Tablo 5).

Tablo 5. Paralel ve merkezi taksi yollarında P/TC değerleri (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

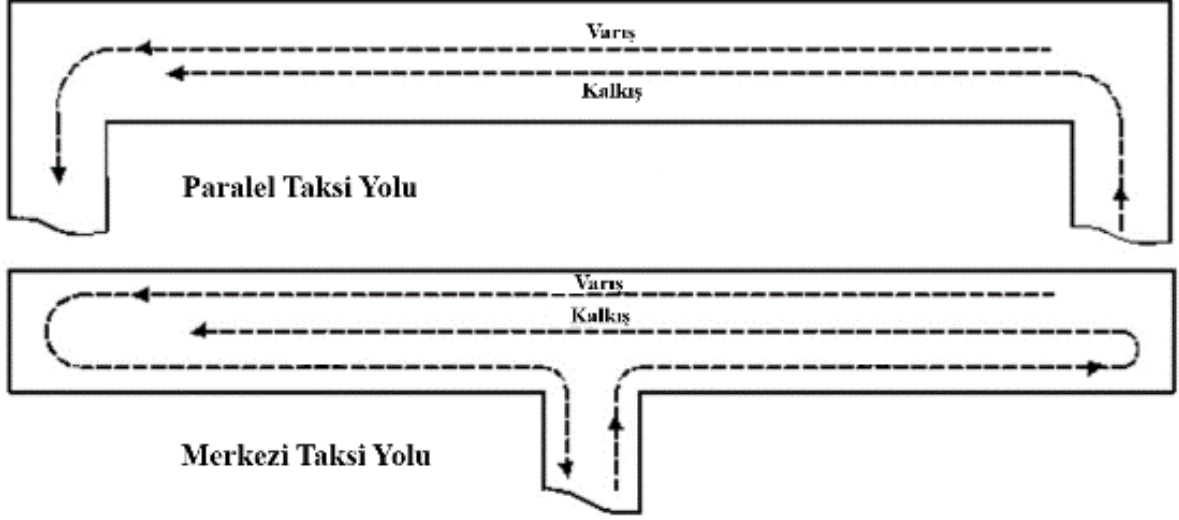
Taksi Yolu	P/TC Havaalanından Yakıt Alınmış (Kalkış Brüt Ağırlığı Varış Brüt Ağırlığından Fazla)	P/TC Havaalanından Yakıt Alınmamış (Kalkış Brüt Ağırlığı Varış Brüt Ağırlığına Eşit)
Paralel	1	2
Merkezi	2	3

- Merkezi Taksi Yolu Senaryosu

Merkezi taksi yolu konfigürasyonu için iki olası yükleme durumu söz konusu olabilir. Paralel taksi yolu senaryosunda olduğu gibi, her iki durumda da iniş ve kalkış döngüsünde faydalı yüklerin yaklaşık olarak aynı olduğu varsayılır:

Eğer uçak havaalanında yakıt alıyor ise hem kalkış hem de kalkışa taksi geçişleri, maksimum yük stresine neden olacak şekilde iki geçiş içerir. Bu durumda, iniş geçişleri dikkate alınmaz. Bu tür operasyonlar sırasında pistin yalnızca bir kısmı kullanılabilir, ancak her geçişte pistin tamamının kaplandığını varsaymak daha dikkatli bir yaklaşım olacaktır. Bu durumda P/TC oranı 2 olarak belirlenir.

Uçak yakıt alamıyor ise hem iniş hem de kalkış geçişleri, taksi geçişleriyle birlikte sayılmalıdır. Bu durumda, bir trafik döngüsü eşit yüklerde üç geçişten oluşur. Bu senaryoda P/TC oranı 3 olarak hesaplanır (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).



Şekil 11. Taksi yolu konfigürasyonları (paralel ve merkezi) (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022)

1.11.4. Geçiş/Kapsama (P/C)

Bir uçak pist boyunca hareket ederken, genellikle tamamen düz bir çizgide veya önceki tekerlek yolunda hareket etmez. İstatistiksel olarak, uçak pistte normal bir dağılımla dolaşır. Kaplama üzerindeki birim alan, uçağın ana iniş takımının bir tekerleği tarafından geçtiğinde kapsam olarak kabul edilir. Uçağın piste her çıkışı sırasında bu birim alanın tamamen kaplanıp kaplanmadığı değişebilir. Birim alanın kaplanması için gerekli geçiş sayısı, geçiş/kapsama (P/C) oranıyla ifade edilir.

Kapsama alanı ve P/C oranı hem esnek hem de sert kaplamalar için kullanılsa da, P/C oranı esnek kaplamalar için sert kaplamalardan biraz farklıdır. Bu fark, esnek ve rijit kaplamaların farklı iniş takımı konfigürasyonlarına verdiği tepkilerden kaynaklanır. İki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) tekerleklere sahip iniş takımları için oranlar farklılık gösterebilir ve aynı terimin her iki kaplama türü için kullanılması kafa karıştırıcı olabilir.

Uçak geçişleri gözlemlerle belirlenebilirken, kapsamalar FAARFIELD programı kullanılarak hesaplanır. P/C oranı, geçişleri kapsama dönüştürmek için gereklidir. Bu oran,

tekerlek sayısı, iniş takımı konfigürasyonları, lastik temas alanları ve iniş takımı üzerindeki yük gibi faktörlere bağlı olarak her uçak için değişir. FAARFIELD programı, herhangi bir uçağın P/C oranını otomatik olarak belirler ve kullanıcıların yalnızca geçişlere odaklanmaları gerekir.

Eğer havaalanında merkezi bir taksi yolu konfigürasyonu varsa, pistteki kapsama sayısı iki katına çıkabilir ve PCR değerini düşürebilir. ICAO kılavuzuna göre, PCR'nin %10'unun üzerinde olan uçaklar zaman zaman aşırı yükleme operasyonlarına izin verir, ancak bu uçakların aşırı yüklemeleri toplam operasyonların %5'i ile sınırlandırılır. Her aşırı yükleme işleminden sonra kaplama durumu izlenmelidir. Aşırı yüklemelerle ilgili önerilen yönergeler şunlardır:

1. Esnek veya sert kaplamalarda, PCR'nin %10'unu aşmayan ACR'ye sahip uçakların trafikleri kaplamayı olumsuz etkilememelidir. Örneğin, PCR değeri 700 olan bir kaplama, ACR değeri 770 olan uçaklara sınırlı trafik desteği verebilir.

2. Yıllık aşırı yük trafiği, toplam uçak trafiğinin yaklaşık %5'ini geçmemelidir. Yüzde 5'i temsil eden işlem sayısı için kesin bir kılavuz mevcut değildir.

3. Yapısal bozulma belirtileri gösteren kaplamalarda, don etkisi veya su nedeniyle zayıflama durumlarında aşırı yüklere izin verilmemelidir.

4. Aşırı yükleme operasyonları sırasında havalimanı sahibi kaplamanın durumunu düzenli olarak kontrol etmelidir. Ayrıca, aşırı yükleme kriterleri periyodik olarak gözden geçirilmelidir. Aşırı yüklemelerin sık tekrarı, kaplama ömrünü önemli ölçüde kısaltabilir ve büyük onarımları gerektirebilir.

Önerilen PCR, toplam $CDF > 1$ olduğunda trafik operasyonları için yeterli olmayabilir. Havalimanları, PCR derecesini değerlendirirken üç seçenekten birini seçebilirler:

1. PCR'nin mevcut teknik değerlendirme yöntemine göre kalmasına izin verir ve trafik karışımında, rapor edilen PCR'yi aşan ACR'lere sahip bazı uçakların veya azaltılmış ağırlıklı uçakların bulunmasını sağlar.

2. Kaplamayı ekleyerek veya daha yüksek ACR'lere sahip uçakları destekleyecek şekilde yeniden inşa ederek PCR'yi artırır.

3. PCR'yi en yüksek ACR'ye sahip uçağa göre yükseltir, ancak bu, erken ve yüksek maliyetlerle yeniden inşa veya kaplama projelerine neden olabilir. Bu, PCR değerlendirmesini kullanım değerlendirmesiyle değiştirir ve kaplama ömrünü kısaltabilir (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

1.12. Elastisite Modülü ve CBR İlişkisi

Elastisite Modülü, üstyapı tasarımında en sık başvurulacak parametrelerden biridir. Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık Yetkilileri Birliği (AASHTO) Tasarım Kılavuzu, CBR değerlerini İngiliz birimleri (psi) veya metrik birimler (MPa) ile Young modül değeri E'ye dönüştürmek için Shell tarafından geliştirilen Denklem 5'in kullanılmasını tavsiye etmektedir.

$$E(\text{MPa}) = 10.34 \times \text{CBR} \text{ veya } E(\text{psi}) = 1,500 \times \text{CBR} \quad (5)$$

Diğer yaygın dönüşüm denklemleri aşağıdaki gibidir:

ABD Ordusu Mühendisler Birliği Araştırma ve Geliştirme Merkezi Su Yolları Deney İstasyonu “U.S. Army Corps of Engineers Research and Development Center Waterways Experiment Station”:

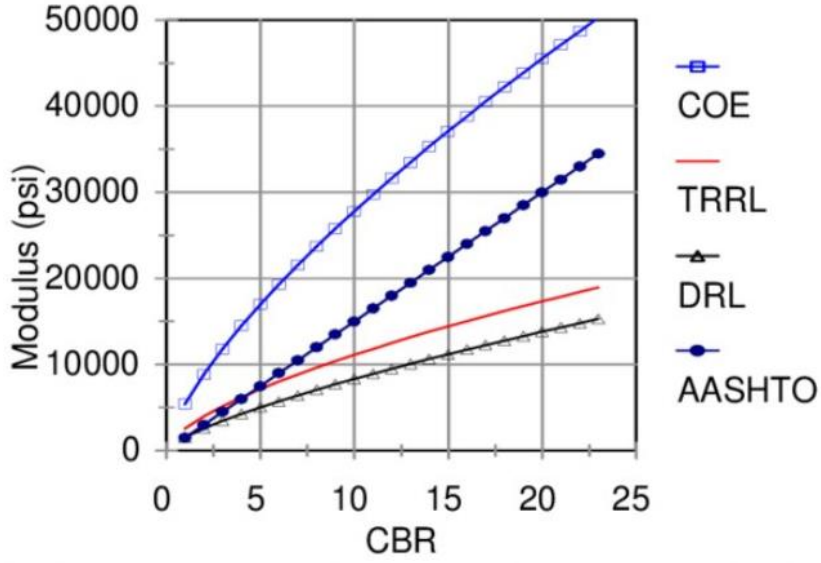
$$E(\text{MPa}) = 37.3 \times \text{CBR}^{0.711} \text{ veya } E(\text{psi}) = 5409 \times \text{CBR}^{0.711} \quad (6)$$

Birleşik Krallık'taki Ulaşım ve Yol Araştırma Laboratuvarı (TRRL) “Transport & Road Research Laboratory”:

$$E(\text{MPa}) = 17.6 \times \text{CBR}^{0.64} \text{ veya } E(\text{psi}) = 2550 \times \text{CBR}^{0.64} \quad (7)$$

Danimarka Yol Laboratuvarı “The Danish Road Laboratory”:

$$E(\text{MPa}) = 10 \times \text{CBR}^{0.73} \text{ veya } E(\text{psi}) = 1500 \times \text{CBR}^{0.73} \quad (8)$$



Şekil 12. CBR-Elastisite modülü (E) ilişkilerinin karşılaştırılması (Wu & Sargand, 2007)

CBR değeri belirlendikten ve Denklem 5'ten 8'e kadar olanlardan birine girildikten sonra bir modül hesaplanır. Bu denklemlerden elde edilen sonuçlar belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Şekilde, bu denklemler arasındaki farklar detaylı olarak gösterilmektedir. Çeşitli dönüşüm denklemlerinden anlaşılacağı üzere, kuruluşlar genellikle yerel şartlara uygun kendi denklemlerini geliştirme eğilimindedir. Bu denklemler Şekil 12'de görüldüğü üzere yüksek farklılıkta Elastisite modülü sonuçları vermektedir. CBR değeri 20 olan bir zeminde Danimarka Yol Laboratuvarına göre E değeri 89,07 MPa (13361 psi) iken ABD Ordusu Mühendisler Birliği Araştırma ve Geliştirme Merkezi Su Yolları Deney İstasyonuna göre ise 313,86 MPa (45514 psi) olmaktadır (Wu, & Sargand, 2007).

1.13. Kaplama Sorunları

Yapısal ve işlevsel olarak güvenilir bir kaplama oluşturmak ve sürdürmek, kaplama kalınlığı tasarımı, malzeme seçimi, inşaat, denetim ve bakım konularında FAA'nın belirlediği standartlara ve uygulamalara sıkı bir şekilde uyulmasını gerektirir. FAA'nın havaalanı kaplamaları ile ilgili standartları şunlardır:

- AC 150/5320-6D - Yapısal Tasarım Gereksinimleri
- AC 150/5370-10A - İnşaat ve Malzeme Gereksinimleri
- AC 150/5320-12C - Sürtünme Gereksinimleri

- AC 150/5360-8B - Bakım Gereksinimleri
- Başlık 14, Federal Düzenlemeler Kanunu (CFR), Bölüm 139 - İşletim Gereksinimleri

Bu standartlardan herhangi birine uyulmaması durumunda, kaplamanın tasarım ömrü boyunca etkili bir hizmet sunması mümkün olmayacaktır.

Standartların doğru bir şekilde uygulanması, kaplamanın ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Standartlar, kaplamaların çeşitli nedenlerle başarısız olabileceğini kabul eder; bu nedenler yapısal, malzeme, inşaat kalitesi, çevresel etmenler ve diğer faktörleri içerir. Bu nedenler genellikle yapısal (örneğin kalınlık), işlevsel (örneğin kayma direnci, malzeme dayanıklılığı) ve operasyonel (örneğin yüzey durumu) olarak sınıflandırılır.

Kaplama bozulmaları, yükleme, çevresel koşullar, inşaat hataları veya bunların kombinasyonundan kaynaklanan kaplama bozulmasının dışsal göstergeleridir. Kaplama arızaları hem yapısal hem de işlevsel olabilir. Yapısal hasar, hasarın nedenini ve etkilenmiş kaplama katmanını detaylı bir şekilde incelemeyi gerektirir ve bu tür onarımlar genellikle yüksek maliyetli olabilir ve kaplamanın yeniden inşasını gerektirebilir. İşlevsel arızaların düzeltilmesi ise genellikle daha basit ve maliyet açısından daha az yük getirir (Garg vd., 2004).

Havaalanı kaplamalarında oluşan deformasyon ve sorunlardan bazıları aşağıdaki başlıklarda sıralanmıştır.

1.13.1. Esnek Kaplama Sorunları

- Yorulma Çatlağı:

Tekrarlanan trafik yükü altında HMA (sıcak asfalt karışımı) yüzeyinin yorulma hasarından kaynaklanan bir dizi birbirine bağlı çatlak, Şekil 13'te gösterildiği gibi timsah çatlağı olarak adlandırılır. Tekerlek yükü altında, HMA katmanının alt kısmında meydana gelen yüksek çekme gerilmeleri, yorulma çatlaklarının oluşumuna neden olabilir. Bu çatlaklar, tekrarlanan yüklemelerle birbirine bağlı bir dizi paralel çatlak olarak yüzeyde yayılır. Özellikle tekerlek yollarında görülen timsah çatlakları, kaplamanın yapısal bütünlüğünü tehdit eden önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir.



Şekil 13. Yorulma çatlağı (Abdalfattah vd. 2015)

MichPAVE (Michigan Flexible Pavement Design System) programında, doğrusal veya doğrusal olmayan mekanik analizden elde edilen sonuçlar diğer parametrelerle birlikte yorulma ömrünü ve tekerlek izi derinliğini tahmin etmek için saha verilerine dayanarak türetilen iki ampirik performans modeline girdi olarak kullanılır. Bu performans modelleri şu anda asfalt betonu (AC) yüzeyi, temel ve yol yatağı toprağı içeren üç katmanlı kaplamalarla ve AC yüzeyi, temel, alt temel ve yol tabanı toprağı içeren dört katmanlı kaplamalarla sınırlıdır. Diğer kesit türleri için yorulma ömrü ve tekerlek izi derinliği tahminleri anlamsız olabilir.

Yorulma hasarı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\ln(N) = -3,454 \ln(SD) + 0,018FT - 0,223 \ln(\varepsilon_t) + 3,477 \ln(H_{AC}) - 3,521 \ln(KV) + 0,053 \ln(E_{AC}) - 1,027 \ln(E_{BS}) - 1,515 \ln(E_{SG}) + 32,156 \quad (9)$$

N = Kümülatif trafik hacmi (ESAL)

SD = Tekerlek altında yüzey sapması (inç)

FT = Saha boyunca izin verilen yorulma çatlağı uzunluğunun yüzdesi

ε_t = Uçak tabanında oluşan çekme gerilimi (psi)

H_{AC} = Asfalt kaplama kalınlığı (inç)

KV = Kinematik viskozite (centistokes)

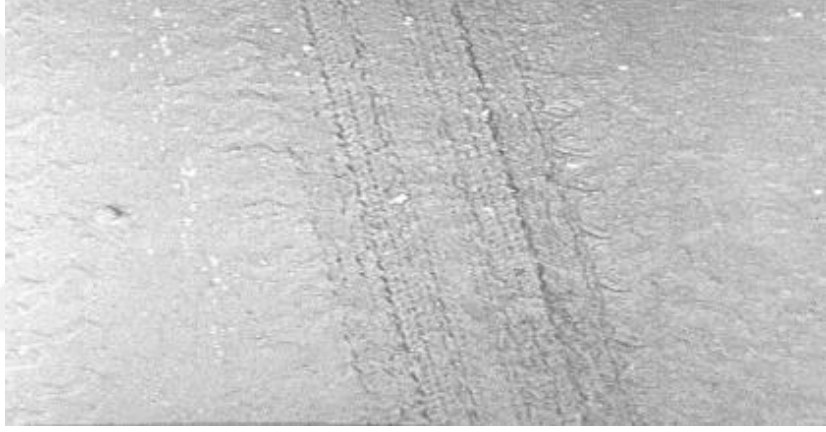
E_{AC} = Asfalt katmanının elastik modülü

E_{BS} = Taban katmanının elastik modülü

E_{SG} = Taban zemininin elastik modülü

- Kusma

Kusma, kaplama yüzeyinde genellikle oldukça yapışkan hale gelen bir bitümlü malzeme tabakasının oluşmasıdır. Genellikle aşırı HMA veya katran kullanımı, düşük hava boşluğu içeriği, ya da her ikisinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Sıcak havalarda asfaltın karışım boşluklarını doldurup yüzeye yayılması nedeniyle meydana gelir. Bu durum, zayıf karışım tasarımının bir sonucudur ve malzeme ile ilgili bir sorunu işaret eder. Kusma, fonksiyonel başarısızlıklara yol açabilir. Şekil 14, yüksek derecede kusmayı göstermektedir.



Şekil 14. Asfalt kaplamada kusma sorunu (Garg vd., 2004)

- Çöküntüler

Çöküntüler, çevredeki kaplamadan biraz daha düşük kotlara sahip olan lokal kaplama yüzey alanlarıdır. Çökmeler temel toprağının oturmasından kaynaklanabileceği gibi inşaat sırasında da oluşabilir. Bu durumda taban zemini CBR değerlerinin doğru tespit edilip FAARFIELD yazılımına girilmesi gerekmektedir. Çöküntüler uçağın suda kızaklamasına yol açarak işlevsel arızaya yol açabilir.



Şekil 15. Kaplamadaki çöküntü deformasyonu (Garg vd., 2004)

- Derz Yansıma Çatlağı

Bu tür bir bozulma, beton levhaları üzerindeki asfalt kaplamalarda meydana gelir ve ısı ile nem değişiklikleri nedeniyle ve yüklemeye bağlı olarak beton levhasının asfalt yüzeyinin altındaki hareketinden kaynaklanır. Bu nedenle kısmen yük ile ilişkilidir, ancak altta yatan yapının daha fazla yapısal bozulmasına yol açması anlamına gelmez ve işlevsel bir sıkıntı olarak kabul edilir.



Şekil 16. Derz yansıma çatlağı (Defence Estates, 2005)

- Boyuna ve Enine Çatlama

Boyuna çatlaklar kaplamanın merkez çizgisine veya döşeme yönüne paraleldir. Bu tür çatlaklar, genellikle kötü yapılmış kaplama şeridi bağlantıları, düşük sıcaklıklar veya asfaltın sertleşmesi nedeniyle HMA yüzeyinin büzülmesi gibi nedenlerle ortaya çıkabilir. Ayrıca, yüzey tabakasının altındaki çatlakların yansıması da bu tür çatlaklara yol açabilir. Bu çatlaklar, yükleme ile doğrudan ilişkili değildir ve genellikle inşaat, malzeme kalitesi ve çevresel faktörlerden kaynaklanır.



(a)

(b)

Şekil 17. Boyuna (a) ve enine (b) çatlak (Garg vd., 2004)

- Tekerlek İzi Deformasyonu

Tekerlek izi, tekerlek yolundaki uzunlamasına bir yüzey çökmesidir. Tekerlek izinin kenarları boyunca kaplama yükselmesi meydana gelebilir. Tekerlek izi oluşumu, genellikle trafik yüklerinden dolayı malzemelerin konsolidasyonu veya yanal hareketi nedeniyle herhangi bir kaplamada veya alt zeminde meydana gelen kalıcı deformasyondan kaynaklanır. Önemli tekerlek izleri kaplamada büyük yapısal arızalara yol açabilir. 2,5

cm'lik tekerlek izi derinliği, neden olabileceği göllenme nedeniyle işlevsel arıza olarak kabul edilir. Şekil 18, bir kaplamadaki tekerlek izi deformasyonunu göstermektedir (Garg vd., 2004).



Şekil 18. Tekerlek izi deformasyonu (Garg vd., 2004)

Tekerlek yolu boyunca inç cinsinden ortalama tekerlek izi derinliği şu şekilde hesaplanır:

$$RD = (-0,016H_{AC} + 0,033 \ln(SD) + 0,011T_{annual} - 0,01 \ln(KV)) \cdot (-2,703 + 0,657(\varepsilon_{v,base})^{0,097} + 0,271(\varepsilon_{v,SG})^{0,883} + 0,258 \ln(N) - 0,034 \ln\left[\frac{E_{AC}}{E_{SG}}\right]) \quad (10)$$

H_{AC} = Asfalt kaplama kalınlığı (inç)

SD = Tekerlek altında yüzey sapması (inç)

T_{annual} = Yıllık ortalama hava sıcaklığı (°F)

KV = Kinematik viskozite (centistokes)

$\varepsilon_{v,base}$ = Taban katmanının üst kısmındaki dikey basınç gerilimi (microstrain)

$\varepsilon_{v,SG}$ = Taban zemininin üst kısmındaki dikey basınç gerilimi (microstrain)

N = Kümülatif trafik hacmi (ESAL)

E_{AC} = Asfalt kaplamanın elastik modül değeri (psi)

E_{SG} = Taban zemininin elastik modül değeri (psi)

Denklem 10'da görüldüğü üzere ortalama tekerlek izi derinliğinin belirlenmesinde kaplama ve taban zemini özelliklerinin yanı sıra yıllık ortalama hava sıcaklığı etkisi de yer almaktadır.

1.13.2. Rijit Kaplama Sorunları

- Patlama

Şekil 19'da görüldüğü gibi patlamalar sıcak hava koşullarında, genellikle beton levhaların genişlemesine yeterince izin vermeyen dar enine çatlaklar veya derzlerde oluşmaktadır. Sıkıştırılamayan malzemelerin birleşim boşluğuna sızması genişliğin yetersiz olmasına neden olur. Genleşme yeterli basıncı gideremediğinde, döşeme kenarlarında lokal olarak yukarıya doğru bir hareket veya bağlantı yakınında kırılma meydana gelir.



Şekil 19. Beton kaplamada patlama sorunu (Garg vd., 2004)

- Köşe çatlağı

Köşe çatlağı, döşemenin köşe noktasından ölçüldüğünde, her iki taraftaki döşeme uzunluğunun yarısına veya daha kısa bir mesafede oluşan bir çatlak türüdür. Bu çatlakların oluşumuna yol açan etkenler arasında destek kaybı, kıvrılma gerilimleri ve yüklerin tekrarı bulunur.



Şekil 20. Köşe çatlağı (Garg vd., 2004)

- Boyuna, enine ve çapraz çatlaklar

Boyuna, enine ve çapraz çatlaklar, kaplamayı iki veya üç parçaya ayırır ve çoğunlukla yük tekrarı, bükülme gerilimleri ve büzülme gerilimlerinin kombinasyonundan meydana gelir. Düşük şiddetteki çatlaklar genellikle eğilme veya sürtünme ile ilişkilidir ve genellikle büyük yapısal bir sorun olarak değerlendirilmez. Ancak orta ve yüksek şiddetteki çatlaklar genellikle aktif çatlaklar olup, ciddi yapısal sorunlar olarak görülür. Şekil 21 ve 22, sırasıyla boylamsal ve enine çatlamayı göstermektedir. 3 mm'den daha fazla genişlikteki çatlakların yeterli dolgu malzemesiyle doldurulması gerekmektedir.



Şekil 21. Boyuna çatlama (Garg vd., 2004)



Şekil 22. Enine çatlama (Garg vd., 2004)

- Dayanım Çatlaması

Dayanım (D) çatlaması, betonun donma-çözülme döngüleri gibi çevresel etkilere karşı yeterli direnç göstermemesi sonucu oluşur. Bu tür çatlama sonunda betonun, derz veya çatlağın 30 ila 60 cm yakınında parçalanmasına yol açabilir ve işlevsel bir sıkıntı olarak kabul edilir. Şekil 23'te yüksek şiddetteki D çatlaması gösterilmektedir (Garg vd., 2004).



Şekil 23. Dayanım (D) çatlaması (Paul, 2014)

1.14. Zemin Katmanı

Zemin katmanı, kaplama yapısındaki en alt katmandır. Zemin tabakasının kalınlığının sonsuz olduğu varsayılır ve bir değer atanamaz. Esnek kaplama tasarımı için zemin modülü değerleri, kullanıcı tarafından FAARFIELD'a girilmek üzere çeşitli yollarla belirlenebilir:

$$E = 1500 \times CBR \text{ (psi)} \quad (11)$$

FAARFIELD elastik modüle dayalı hesaplamalar yapsa da, CBR değerlerinin doğrudan girilmesi de kabul edilebilir.

Benzer şekilde, rijit kaplama tasarımı için temel modülü, zemin reaksiyon modülü k veya elastik (Young) modülü E olarak ifade edilebilir ve her iki biçimde de programa doğrudan girilebilir. Bununla birlikte, tüm yapısal hesaplamalar elastik modül E kullanılarak gerçekleştirilir. Temel modülü bir k değeri olarak girilirse, aşağıdaki denklemler kullanılarak otomatik olarak eşdeğer E değerine dönüştürülür (Tuleubekov, K. & Brill, D.R., 2014).

$$k = 0,09643 \times E_{SG}^{0,7788} \quad (12)$$

E_{SG} = Zeminin elastik (Young) modülü, psi

k = Taban Tepkime Modülü (Yatak Katsayısı), pci

Mevcut kaplama için E modülü, düşen ağırlık deflektometresi (FWD) testi gibi tahribatsız testlerden (NDT) sahada belirlenebilir. Alt zeminin doğrudan test edilmesi mümkün değilse, bu testler gerekebilir. Eğer alt zemine erişim sağlanabiliyorsa, k değeri doğrudan plaka yükü testi ile belirlenebilir. K -modülü, plaka yükü testi ile tespit edilebiliyorsa veya başka bir yöntemle mevcutsa, k değeri doğrudan FAARFIELD programına girilmelidir; bu durumda E modülüne dönüştürülmesine gerek yoktur.

CBR verilerinin mevcut olduğu durumlarda, alt zemin için CBR'den k değerine yaklaşık dönüşüm şu şekildedir:

$$k = 28,6926 \times CBR^{0,7788} \text{ (pci)} \quad (13)$$

CBR ve k 'yi E modülüne dönüştürme denklemleri ampirik verilere dayanmaktadır. Esnek ve rijit kaplama hasar modellerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. CBR ile elastik modül arasındaki yukarıdaki doğrusal dönüşüm, havaalanı kaplama tasarımında kullanılan yaygın ve kullanışlı bir tasarım varsayımı olmasına rağmen teorik olarak doğru değildir. Çeşitli zemin malzemeleri için CBR ve elastik modül korelasyonları büyük miktarda saçılım göstermektedir. Bu nedenle yukarıdaki dönüşüm denklemlerinin dikkatli kullanılması tavsiye edilir.

T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, analizlerinde FAA'nin taban taşıma gücünde kullandığı AASHTO dönüşüm formülünü (Denklemler 11) kullanmaktadır.

FAARFIELD'de stabilize katman kategorilerini esnek ve rijit stabilize edilmiş katman olarak ikiye ayırabiliriz. Her iki kategoride hem sabit modüllü hem de değişken modüllü katman türleri mevcuttur. Değişken stabilize katmanlara bir aralık dahilinde modül değerleri atanabilir. Esnek kaplamalardaki stabilize katmanlar için modül aralığının üst ve alt sınırları, önceki FAA (CBR tabanlı) tasarım prosedüründe kullanılan eşdeğerlik faktörleriyle karşılaştırılarak oluşturulmuştur. Sabit modül türleri standart malzemelere karşılık gelir (Faarfield 2.1, 2023).

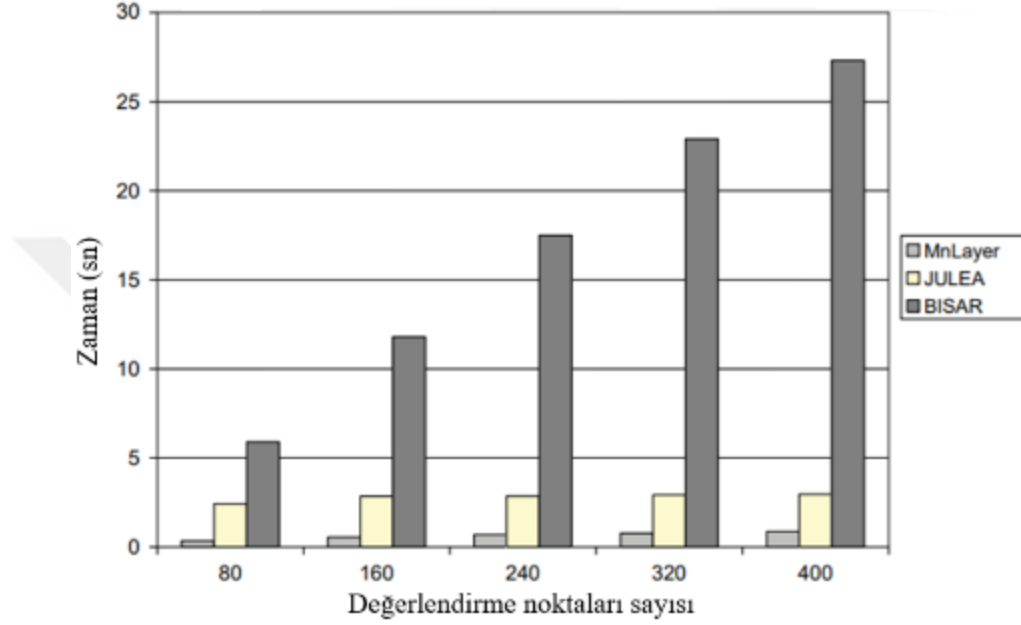
Tablo 6. Katmanların elastik modül değerleri (Faarfield 2.1, 2023)

Kategori	Malzeme	Elastik modül (psi)		Poisson değeri (v)
		Alt sınır	Üst sınır	
Esnek	Çeşitli	150.000	400.000	0,35
	P-401/P-403 Asfalt	400.000	400.000	
Rijit	Çeşitli	250.000	700.000	0,2
	P-301 temel	250.000	250.000	
	P-04 çimento katkılı temel	500.000	500.000	
	P-306 econocrete alttemel	700.000	700.000	

1.15. Katmanlı Elastik Analiz (LEA) Programları

Katmanlı elastik analiz (LET), asfalt kaplamaların tasarımı ve analizi için uzun yıllardır etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, katmanlı kaplama yapılarını, her katman arasındaki değişken arayüz koşullarıyla modelleyebilme özelliğine sahiptir. Kaplama sistemleri için geliştirilen bilgisayar programları (BISAR, WESLEA ve JULEA) bu katmanlı elastik analize dayanmaktadır. Ayrıca, AASHTO sponsorluğunda NCHRP tarafından yakın zamanda geliştirilen yeni Mekanik-Ampirik Kaplama Tasarım Kılavuzu (MEPDG) prosedürü de mevcuttur. Esnek asfalt kaplamalar için tek bir tasarım simülasyonunda katmanlı elastik analizin 1000'den fazla kez gerçekleştirilmesi gerekebilir, bu da tasarım sürecini oldukça zaman alıcı yapar. MEPDG yazılımının kullanım süresini kısaltmak için atılan önemli bir adım, katmanlı elastik analizlerin hesaplama verimliliğini

artırmaktır. Ayrıca, katmanlı elastik çözümlerin ters Hankel dönüşümünün sayısal değerlendirilmesinde çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır. MnLayer'ın yaygın olarak kullanılan iki katmanlı elastik analiz programıyla karşılaştırılması, MnLayer'ın doğruluğunun bu diğer programların doğruluğuyla eşleştiğini veya onları aştığını, hesaplama süresinin ise onlarınkinin 1/20'si kadar az olduğunu göstermiştir (Şekil 24).



Şekil 24. BISAR, JULEA ve MnLayer programlarında işlem sayılarının karşılaştırılması (Khazanovich & Wang, 2007)

Katmanlı elastik teori, asfalt kaplamaların tasarımında ve analizinde uzun bir süre boyunca etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlarda geliştirilen MEPDG prosedürü, bir esnek asfalt kaplamanın tasarım simülasyonu için katmanlı elastik analizin 1000'den fazla kez yapılmasını gerektirir, bu da süreci oldukça zaman alıcı hale getirir.

MEPDG esnek tasarım sürecinin hesaplama süresini kısaltmak için bir yaklaşım, yazılımda kullanılan katmanlı elastik analiz motorunun verimliliğini artırmaktır. Bu sebeple, MnLayer adlı yeni bir katmanlı elastik analiz programı geliştirilmiştir. MnLayer, diğer LET programları gibi Burmister'ın çözümüne dayanır ve katmanlı elastik çözümler için ters Hankel dönüşümünün sayısal değerlendirmesinde çeşitli iyileştirmeler içermektedir. MnLayer'ın yaygın olarak kullanılan iki katmanlı elastik analiz programıyla kapsamlı bir karşılaştırması, MnLayer'ın doğruluğu, diğer yazılımların doğruluğu ile karşılaştırıldığında eşdeğer veya daha üstün olduğu ve hesaplama süresinin ise bu yazılımlarınkinden yaklaşık

20 kat daha kısa olduğu gösterilmiştir. Bu özellikler, MnLayer'ı MEPDG yazılımına entegre etmek için cazip bir seçenek haline getirmektedir.

Beton kaplama yapı analizi için şu anda çeşitli yazılım çözümleri mevcuttur; bunlar arasında KENSLABS, WESLIQID, WESLAYER, ILLI-SLAB (ISLAB2000), JSLAB, RISC, DIPLOMAT, FEACONS-IV, KOLA ve EverFE bulunmaktadır. Bu yazılımların çoğu, sınırlı donanım gereksinimleri ve hesaplama süresi nedeniyle iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Kentucky Üniversitesi'nden Profesör Yang H. Huang tarafından geliştirilen KENSLABS ve Maine Üniversitesi'nden Profesör Bill Davids tarafından geliştirilen üç boyutlu program EverFE, bu yazılımlar arasında dikkate değer bir konumda bulunmaktadır. Bu programlar beton kaplama endüstrisinde yaygın ve başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar (Khazanovich & Wang, 2007).

1.15.1. KENLAYER

KENLAYER bilgisayar programı, oldukça fazla sayıda giriş parametresi içermektedir. Bu parametreler, hem SI hem de ABD geleneksel birim sistemlerinde girilebilir. Doğrusal elastik analiz için bazı giriş parametreleri arasında trafik yükü, malzeme özellikleri, her bir katmanın kalınlığı, periyot sayısı ve yük grubu sayısı bulunmaktadır. Hasar analizi için yalnızca alt zemin yüzeyindeki düşey basınç birim şekil değiştirmeleri ve asfalt tabakasının tabanındaki çekme şekil değiştirmeleri kullanılır.

TITLE EX. 1: LINEAR ELASTIC THREE-LAYER SYSTEM UNDER DUAL-TANDEM TIRES		
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	2
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0
Number of layers	(NL)	3
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	3
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	1
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	1
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1
Number of layers for top compression	(NLTC)	1
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	0

Şekil 25. KENLAYER programı girdi menüsü

1.15.2. MichPAVE (Michigan Flexible Pavement Design System)

MichPAVE programında; tekerlek yükü, lastik basıncı, yorgunluk ve tekerlek izi hesabı (yıllık ortalama hava sıcaklığı, kabul edilebilir tekerlek izi derinliği, kabul edilebilir yorgunluk hasarı, kinematik viskozite), katman özellikleri (katman sayısı, kalınlık, elastisite modülü, yoğunluk, poisson oranı, zemin yatak katsayısı, kohezyon, iç sürtünme açısı) vb. girdiler yer almaktadır (Şekil 26).

Load/Perf.

Wheel Load: 9000 (lb.)

Tire Pressure: 85 (psi)

Fatigue Life & Rut Depth Computation Required? ☒ Yes ☐ No

Fatigue Life & Rut Depth

Average Annual Air Temperature: 45 (F)

Allowable Rut Depth: 0.4 (inches)

Allowable Fatigue Damage: 70 %

Kinematic Viscosity: 270 (centistoke)

< Geri Sonraki > İptal Yardım

(a)

Material Properties Setting

Layer 1 | Layer 2 | Layer 3 | Layer 4

Name of Layer: AC

Linear Material Properties

Course	Thickness (inches)	Modulus (psi)	Density (lb/cu.ft)	Poisson's Ratio	Ko
Surface	1.5	390000	150	0.3	1.5
Leveling	2	390000	150	0.3	1.5
Base	0	270000	0	0.3	1.5
Combined	3.5	390000	150	0.3	1.5

Tamam İptal Yardım

(b)

Şekil 26. (a), (b) MichPAVE programı girdileri

FAARFIELD ve MnPAVE’de girdi olarak kullanılan tekerlek aralığı, beton kaplama analizi, periyot (zaman dilimi), araç geçiş sayısı parametreleri bu programda yer almamaktadır.

1.15.3. MnPAVE

Zaman (gün, hafta), kaplama sıcaklığı, koordinat, zemin sınıfı, eşdeğer tekil aks yükü (ESAL), hizmet yılı, yıllık trafik büyüme oranı, araç geçiş sayısı, katman sınıfları ve kalınlıkları, trafik hızı vb. bilgiler MnPAVE programının girdileri arasında yer almaktadır.

MnPAVE - HMA Dynamic Modulus Equation

Screen Capture Help

An empirical equation derived from LTPP data

$$\log_{10} E = a_0 + a_1 p_{200} + a_2 p_{200}^2 + a_3 p_4 + a_4 V_a + a_5 \frac{V_{b_{eff}}}{V_{b_{eff}} + V_a} + \frac{a_6 + a_7 p_4 + a_8 p_{3/8} + a_9 p_{3/8}^2 + a_{10} p_{3/4}}{1 + e^{(a_{11} + a_{12} \log_{10} f + a_{13} \log_{10} \eta)}}$$

HMA Mix Properties

Layer 1

$E = 1.450 \times 10^{-3} \times \text{Dynamic Modulus (kPa)}$

$\eta = 10^{-5} \times \text{Dynamic Viscosity (Pa.s)}$

P_b 5 Binder content (% by wt. of mix)

V_a 6 Expected in-place air voids (% by volume)

P_{ba} 1 Absorption (% by wt. of aggregate)

G_b 1.02 Specific gravity of binder

G_{sb} 2.65 Combined bulk specific gravity of aggregate

f 18.75 Load Frequency (Hz)

$V_{b_{eff}}$ 9.37 Effective bitumen content (% by volume)

$p_{3/4}$ 0 Cumulative percent retained on the 19.0 mm sieve

$p_{3/8}$ 5 Cumulative percent retained on the 9.50 mm

p_4 24 Cumulative percent retained on the 4.75 mm sieve

p_{200} 5 Percent passing the 0.075 mm sieve

Viscosity Equation

Restore Defaults

Air voids at bottom of HMA (for fatigue damage calculation) 8

Modulus Coefficients

a_0 3.750063	a_7 -0.0021
a_1 0.029232	a_8 0.003958
a_2 -0.001767	a_9 -1.7e-005
a_3 -0.002841	a_{10} 0.00547
a_4 -0.058097	a_{11} -0.603313
a_5 -0.802208	a_{12} -0.313351
a_6 3.871977	a_{13} -0.393532

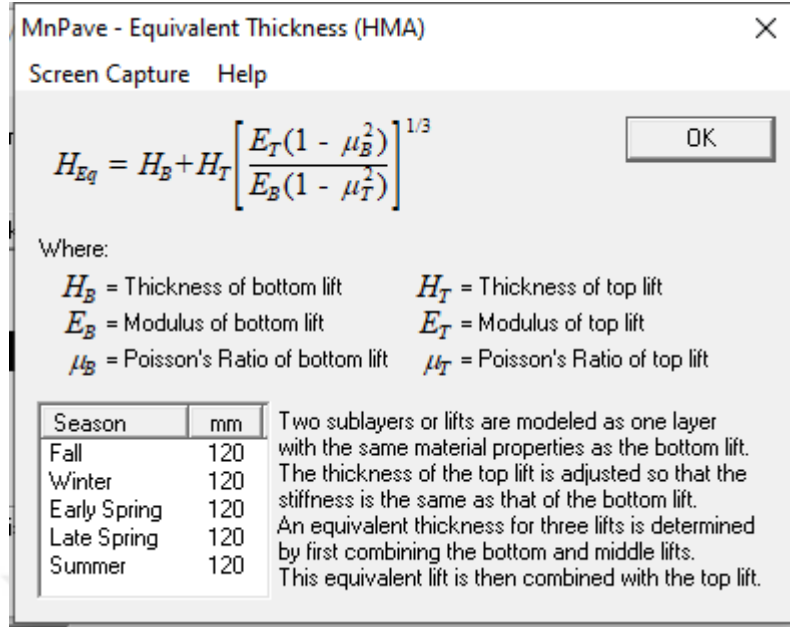
Poisson's Ratio

$\mu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(b_0 + b_1 E)}}$

b_0 -1.63 b_1 3.84e-006

OK

Şekil 27. LTPP (Long Term Pavement Performance)’den elde edilen dinamik modül denklemi



Şekil 28. MnPAVE programında asfalt kaplamalarda kullanılan eşdeğer kalınlık denklemi

Tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde Elastisite Modülü ve Poisson Oranı değerlerinin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu gibi ampirik formüllere ait sonuçlar, yapılan modellemelere zemin hazırlamış ve kullanım ömrü hakkında bilgi vermiştir. Ancak sahadaki uygulamalar ile aynı sonuç verdiğiine dair herhangi bir veri yer almamaktadır.

Yorgunluk süresi, tekerlek izi oluşum süresi, mevsimsel yorgunluk ve tekerlek izi hasar oranları, güvenilirlik (hızlı ve Monte Carlo) sonuçları da bu programın çıktıları olarak gösterilebilir.

The screenshot shows the ESAL software interface. The title bar includes standard Windows icons and the text 'ESAL'. The main window is divided into several sections:

- Axle Configuration:**
 - Tire Pressure: 80 psi
 - Wheel Spacing: 13.5 in.
 - Axle Weight: 18 kips
 - Wheel Weight: 4.5 kips
- ESALs:**
 - ☒ Lifetime: 0.375 million
 - ☐ First Year: 0.0171 million (Calculated)
 - Design Period Length: 20 years
 - Annual Growth Rate (%): 1 (Simple Growth)
- Units:**
 - ☒ English
 - ☐ SI
- Finished Traffic:** Go to Control Panel
- Buttons:** Hide Details
- Allowable Stress Failure Criterion:**

	Axle Weight (kips)	Tire Pressure (psi)	Wheel Spacing (in.)
Heaviest Single Tire Axle	22	100	
Heaviest Dual Tire Axle	28	100	13.5

At the bottom, there is a status bar with the text 'For Help, press F1' and a 'NUM' button.

Şekil 29. Eşdeğer tekil tekerlek yükü analiz menüsü

MnPAVE; FAARFIELD, MichPAVE ve KENLAYER'a göre etkili parametreler konusunda daha çeşitlidir. Bu da analiz programını daha kullanışlı hale getirmektedir. Ancak bu programda en ağır tekil tekerlek yükü 22 kips (97,86 kN), en ağır çift tekerlek yükü ise 28 kips (124,55 kN) olarak belirlenmiştir. Uçaklarda bu değerlerin daha yüksek olması sebebiyle bu programda uçak yükünün değerlendirilmesi yapılamamaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, ilk bölümde FAARFIELD programında PCR değerini etkileyen değişkenler numerik yöntemlerle araştırılmıştır. İkinci bölümde ise FAARFIELD lineer elastik analiz programı bir sonlu eleman programıyla kıyaslanarak FAARFIELD sonuçlarının tutarlılığını araştırmak amacıyla, iki farklı durum için analizler yapılmıştır. Bu iki durumda beton kaplama kalınlığı, çimento katkılı katman kalınlığı, kırılmış agrega katman kalınlığı, elastisite modülü ile alt zemin elastisite modülü değerleri girilerek FAARFIELD programında analiz edilmiştir.

İlk durumda PCR değeri uçakların ACR değerlerinin üzerinde olduğundan 20 yıllık servis ömrü boyunca kaplama kapasitesinin yeterli olduğu görülmüştür. 2. durumda ise PCR değerinin ACR değerlerinden düşük olduğu, 4 uçak için kaplamanın hizmet veremeyeceği tespit edilmiştir. Her iki duruma ait statik veriler LS-DYNA sonlu elemanlar programında çözülerek elde edilen veriler FAARFIELD programına ait sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

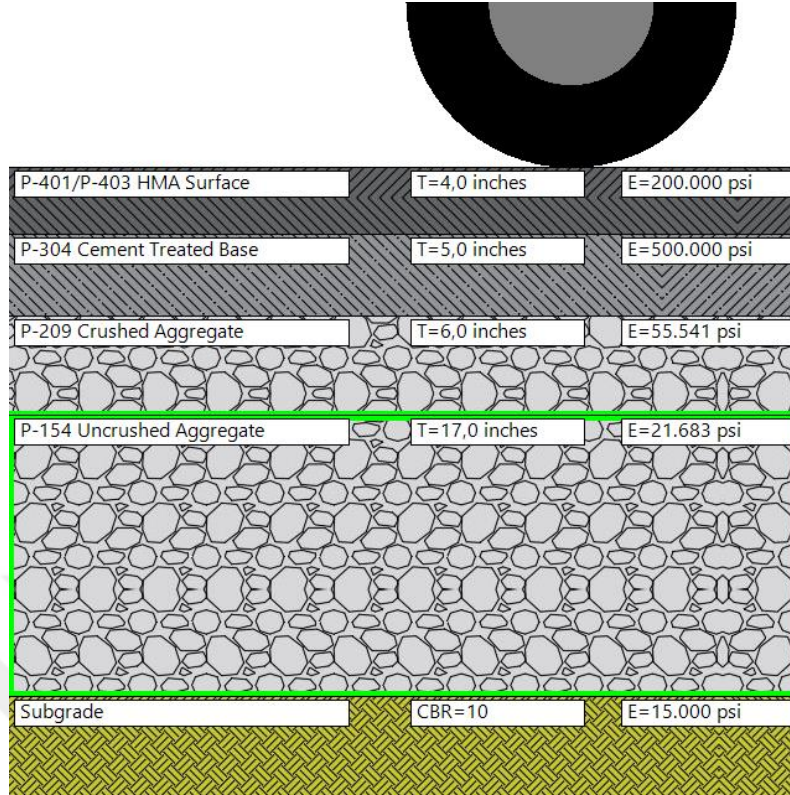
2.1. FAARFIELD Verileri

Havaalanı taksi yollarında katman ve alt zemin değerlerinin değişiminin PCR ile ilişkisi FAARFIELD 2.1 programı ile analiz edilmiştir. 20 yıllık kaplama tasarım ömrü için $P/TC=1$ olması durumunda yapılan analizde Tablo 7’de gösterilen uçak listesi kullanılmıştır.

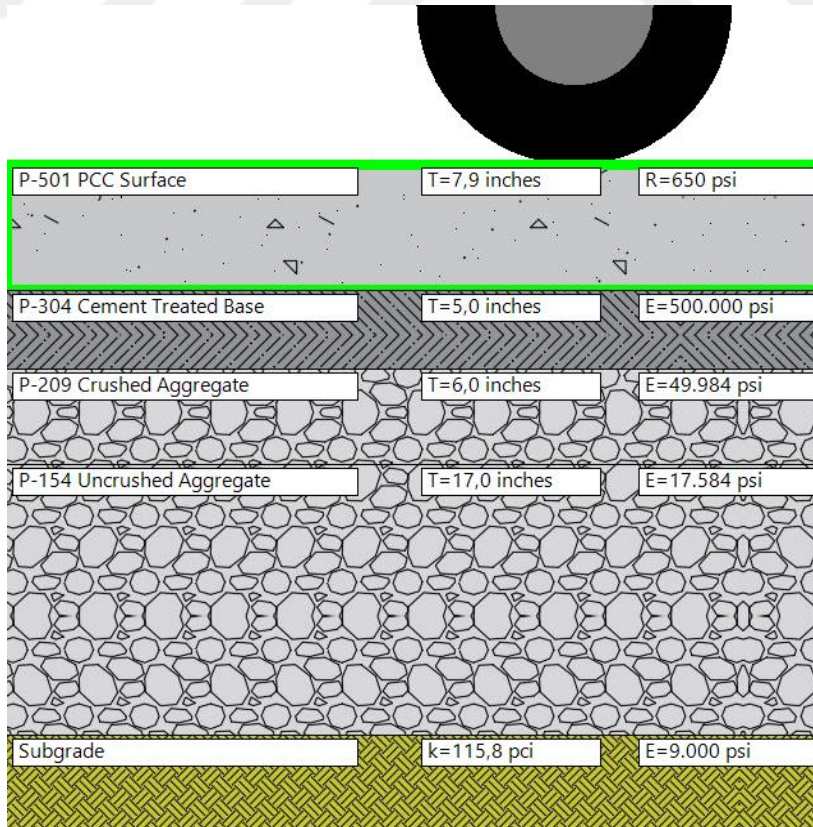
Esnek ve beton kaplamalar için yapılan analiz kesitleri Şekil 30 ve Şekil 31’de gösterilmektedir. Alt zemin için CBR; kaplama ve ara katmanlar için elastik modül (E_1 , E_2 , E_3) ile katman kalınlıklarının (h_1 , h_2 , h_3) değişiminin PCR’a olan etkisi grafikler ile gösterilmiş ve bazı sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 7. Uçak listesi ve ACR değerleri

Airplane Name	Gross Taxi Weight (lbs)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (psi)	Percent GW on Gear	Tire Contact Width (in.)	Tire Contact Length (in.)	Tire Contact Area (in. ²)	ACR Thick (in.) (B)	ACR/F/B
A300-B4/C4 Std Bogie	365.747	1,500	0	30,000	0	0	1.22	216	0.94	12,6	20,2	201,0	22,0	456.7
A319-100 std	141.978	1,200	0	24,000	0	0	1.23	173	0.926	12,5	19,9	194,9	18,6	302.5
B737-300	140.000	6,000	0	120,000	0	0	1.3	201	0.908	11,5	18,4	165,4	18,9	313.4
B747-400	877.000	1,000	0	20,000	0	0	1.16	200	0.466	14,4	23,0	260,4	23,2	518.3
B747-400 Belly	877.000	1,000	0	20,000	0	0	1.17	200	0.466	14,4	23,0	260,4	0,0	0.0
B767-200 ER	396.000	2,000	0	40,000	0	0	1.16	190	0.908	14,0	22,5	247,5	21,7	442.5
B777-200 ER	657.000	1,000	0	20,000	0	0	1.28	205	0.918	14,2	22,8	254,1	22,9	501.6
DC8-63/73	330.000	3,000	0	60,000	0	0	1.27	181	0.962	13,1	21,0	216,9	21,3	421.7



Şekil 30. Esnek kaplamalı katman kesiti



Şekil 31. Rijit kaplamalı katman kesiti

2.2. FAARFIELD Sonuçlarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Değerlendirilmesi

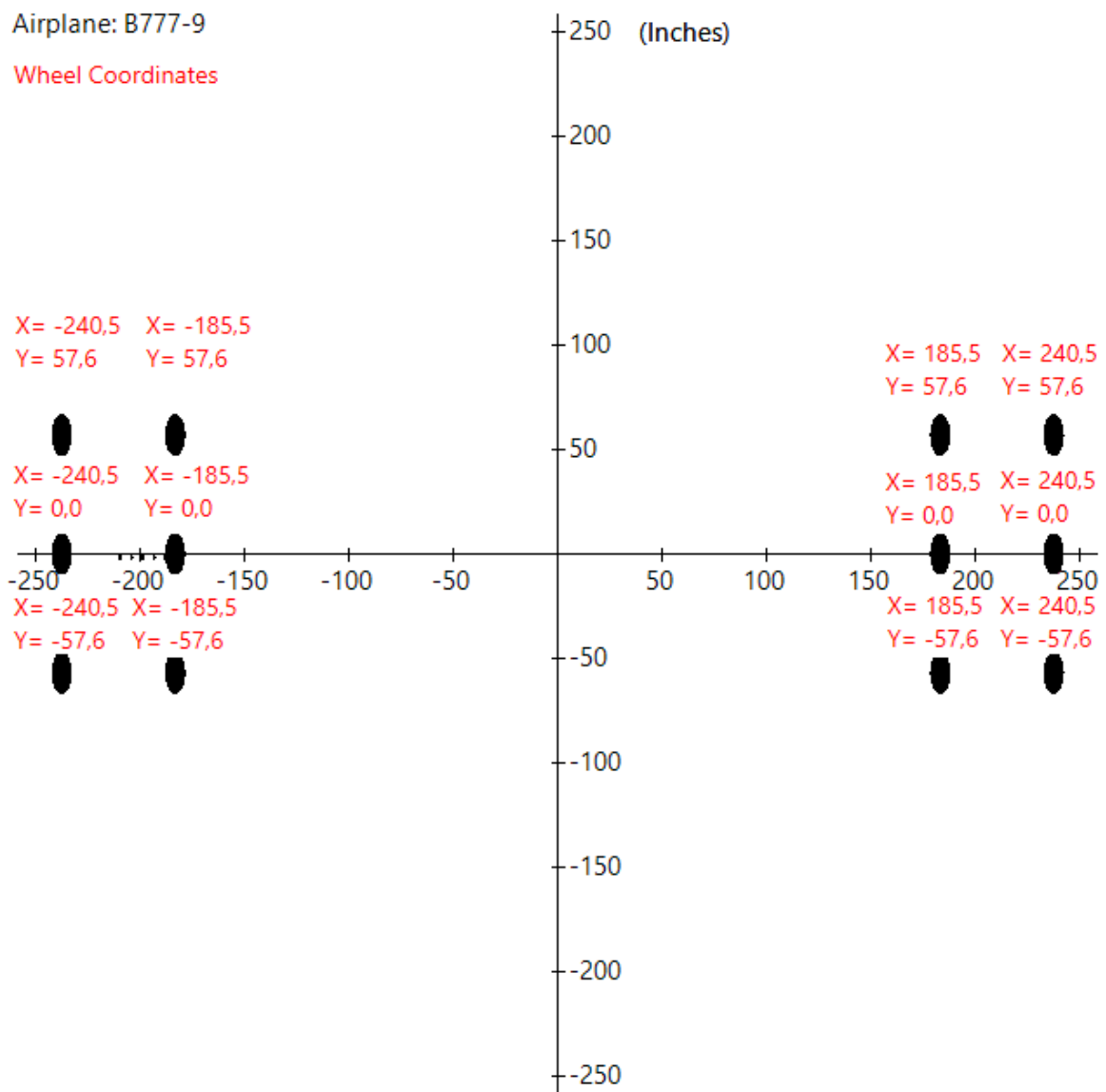
FAA uçak listesindeki en ağır tonajlı uçaklar seçilerek ağırlık ve tekerlek temas alanlarına göre ön ve arka tekerleklerinin zemine uyguladığı basınçlar Tablo 8'deki gibi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Boeing 777-9'un, 1,544 MPa arka tekerlek basınç değeriyle FAA Uçak listesindeki en yüksek tekil tekerlek yüküne sahip uçaklardan olduğu belirlenmiştir. Bu uçağın tekerlek koordinatları, ağırlığı, iniş takımına aktarılan yük oranı ve tekerlek temas alanı FAA verilerinden alınmıştır. Bu uçağın içinde olduğu bir uçak listesinin yeterli ve yetersiz PCR sonucuna ulaşılacak şekilde iki farklı katman dizilimine sahip havaalanına göre FAARFIELD programında analizi yapılmıştır.



Tablo 8. Ön ve arka tekerleklerin kaplamaya uyguladığı basınç değerleri

Sıra No	Uçak Adı	Brüt Ağırlık		İniş Takımındaki Ağırlık Oranı	İniş Takımındaki Tekerlek Sayısı	Ön Tekerlek Sayısı	Tek Tekerlek Temas Alanı		Tek Tekerleğin Kaplamaya Uyguladığı Basınç MPa (N/mm ²)	
		lbs	kN				in ²	m ²	Arka	Ön
1	2D-400	400.000,00	1.779,29	0,950	8	2	237,50	0,153	1,379	0,290
2	A380-800 WV006	1.267.658,00	5.638,82	0,380	8	2	276,20	0,178	1,503	0,791
	A380-800 WV006 Belly	1.267.658,00	5.638,82	0,570	12		276,20	0,178	1,503	
3	An-124	877.430,00	3.903,00	0,950	20	4	214,80	0,139	1,338	0,352
4	An-225	1.322.750,00	5.883,89	0,950	28	4	277,00	0,179	1,117	0,412
5	B747-8F	990.000,00	4.403,74	0,475	8	2	266,00	0,172	1,524	0,642
	B747-8F Belly	990.000,00	4.403,74	0,475	8		266,00	0,172	1,524	
6	B777-300 ER	777.000,00	3.456,27	0,950	12	2	278,30	0,180	1,524	0,481
7	B777-9	777.000,00	3.456,27	0,950	12	2	274,60	0,177	1,544	0,488
8	C-5	769.000,00	3.420,68	0,950	24	4	287,20	0,185	0,731	0,231
9	EMB-195 STD	107.916,00	480,03	0,950	4	2	166,40	0,107	1,062	0,112
10	MD-11	633.000,00	2.815,72	0,780	8	2	299,60	0,193	1,420	0,730
	MD-11 Belly	633.000,00	2.815,72	0,170	2		149,50	0,096	2,481	

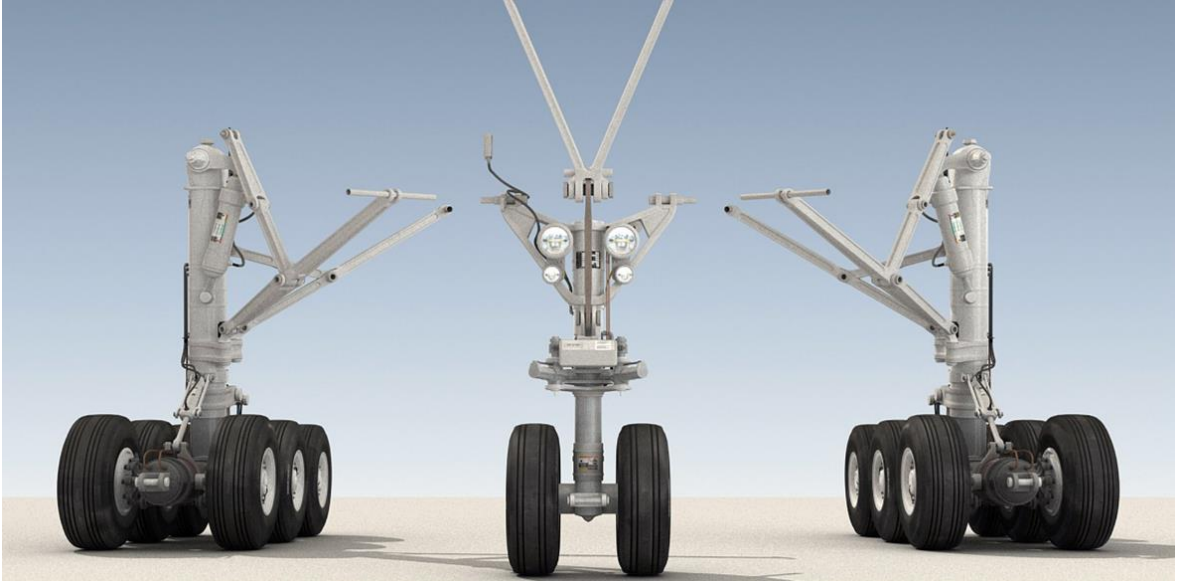
*Uçakların ön ve arka teker temas alanı eşit kabul edilmiştir.



Şekil 32. Boeing 777-9 uçağının tekerlek koordinatları (inç biriminde)



(a)

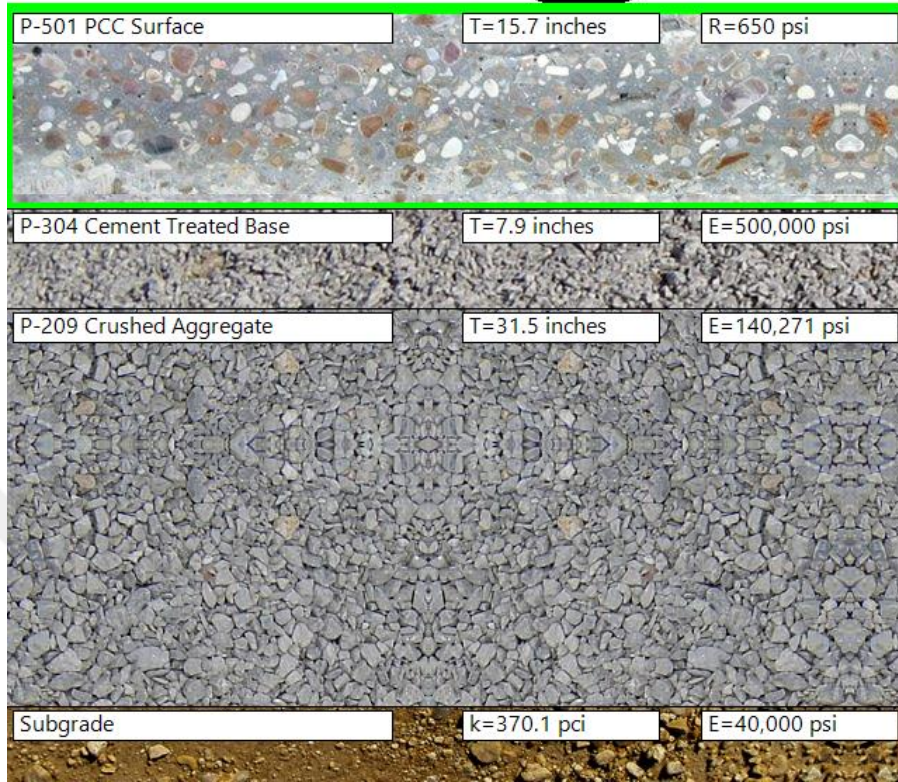


(b)

Şekil 33. Boeing 777-9 uçağına ait görseller (URL-4, 2023)

2.2.1. PCR Değerinin Yeterli Olduğu 1. Durum

PCR'ın yeterli olduğu 1. duruma ait katman özellikleri, ACR ve PCR değerleri Şekil 34, 35, 36 ve 37'de gösterilmektedir.



Şekil 34. Katman kalınlıkları ve elastik modül değerleri

Pavement Layers

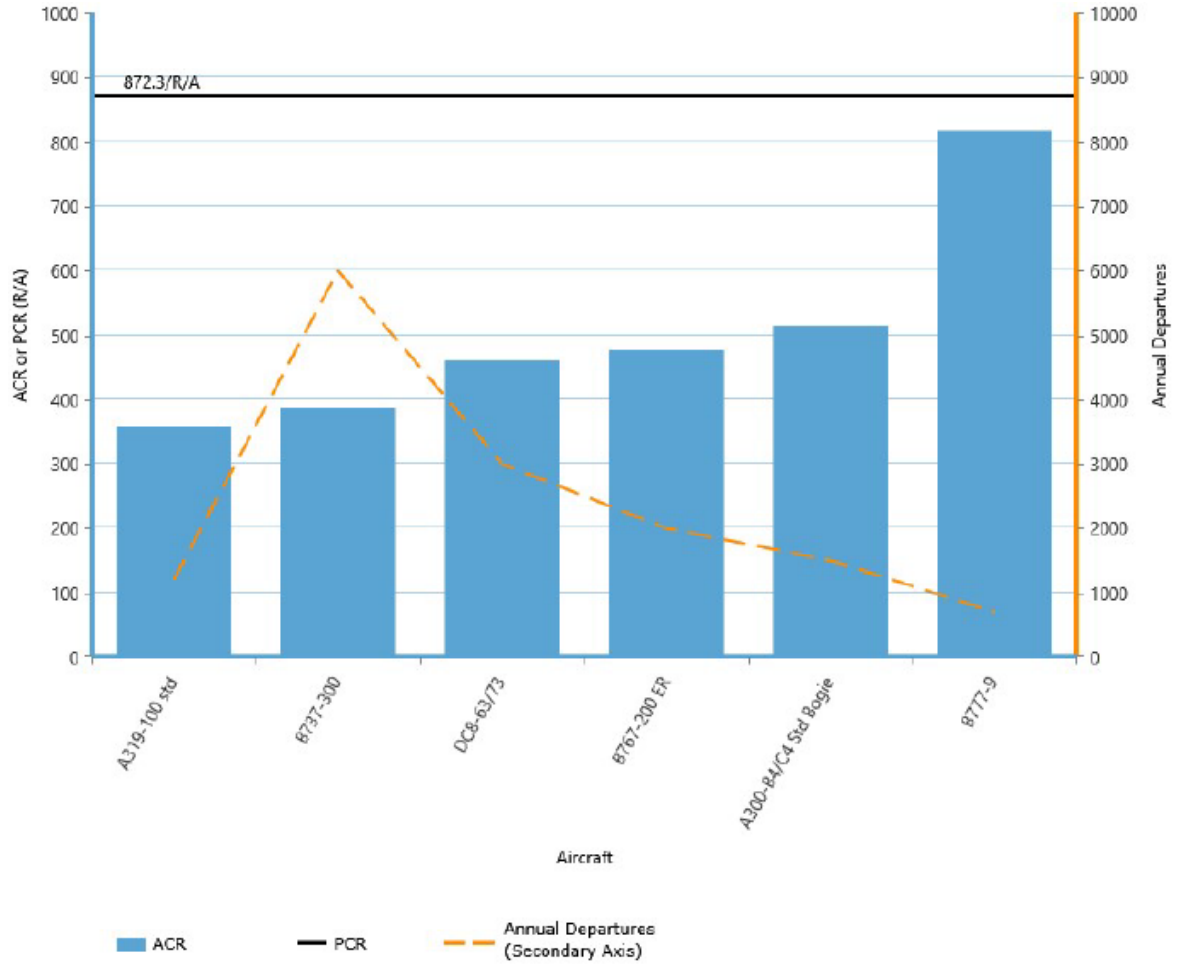
Pavement Type: New Rigid

	Material	Thickness (in.)	E (psi)	k (pci)	R (psi)
-->	P-501 PCC Surface	15.7	4,000,000		650
	P-304 Cement Treated Base	7.9	500,000		
	P-209 Crushed Aggregate	31.5	140,271		
	Subgrade		40,000	370.1	

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Design Life (Years): 20 P/TC Ratio: 1

Şekil 35. Beton kaplama ve alt katmanların mukavemet değerleri



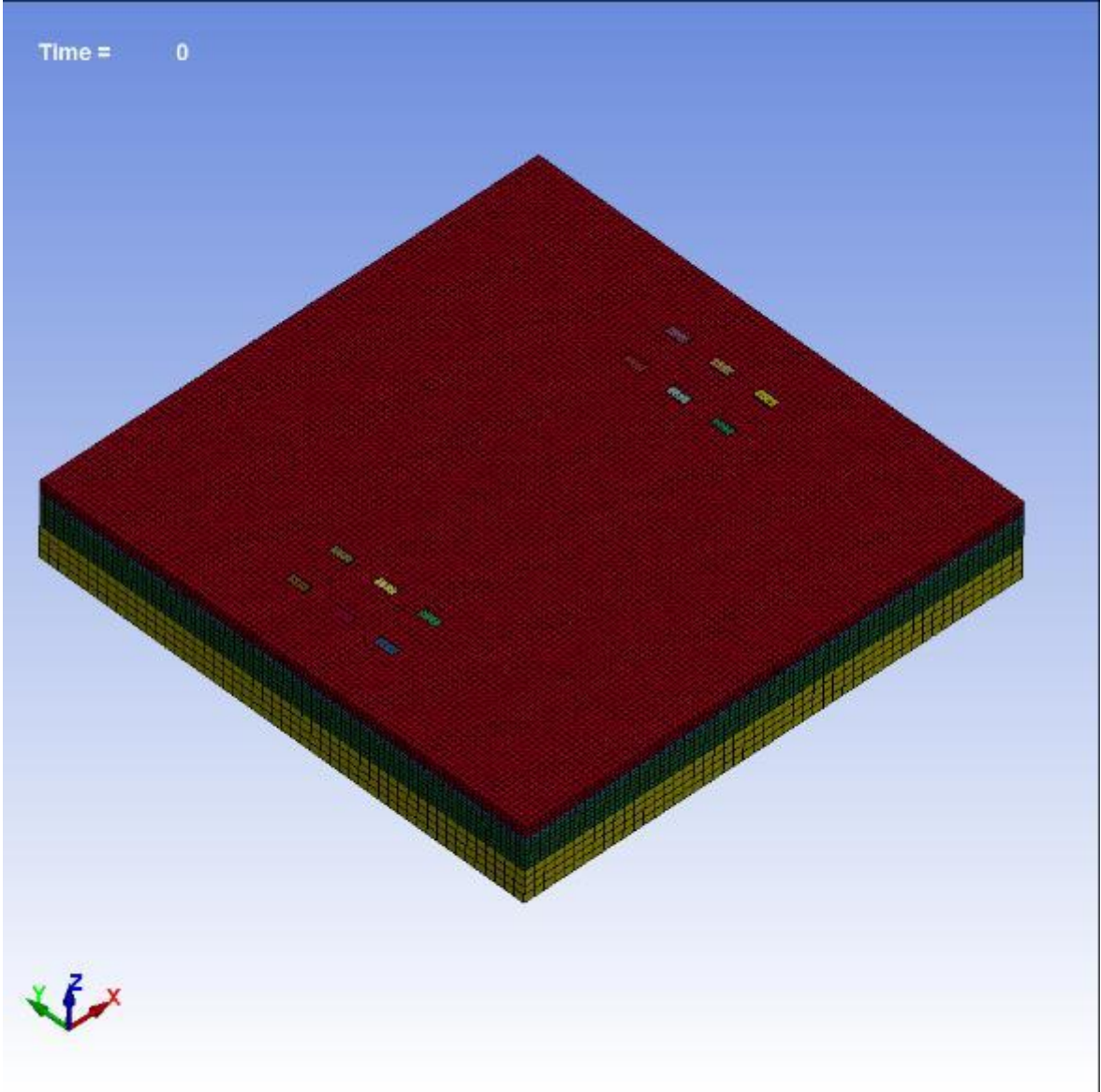
Şekil 36. ACR-PCR değerleri grafik gösterimi

No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	B777-9	818.1	872.3	700
2	A300-B4/C4 Std Bogie	515.5	-	1,500
3	B767-200 ER	475.9	-	2,000
4	DC8-63/73	459.5	-	3,000
5	B737-300	386.5	-	6,000
6	A319-100 std	358.6	-	1,200

Şekil 37. ACR ve PCR değerleri (1. durum)

$$PCR = 872/R/A/W/T$$

1. durumda 872 PCR değerinin listedeki tüm uçakların ACR'lerinden yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 36). Bu durumda bu kaplama, uçak listesi için yeterlidir.

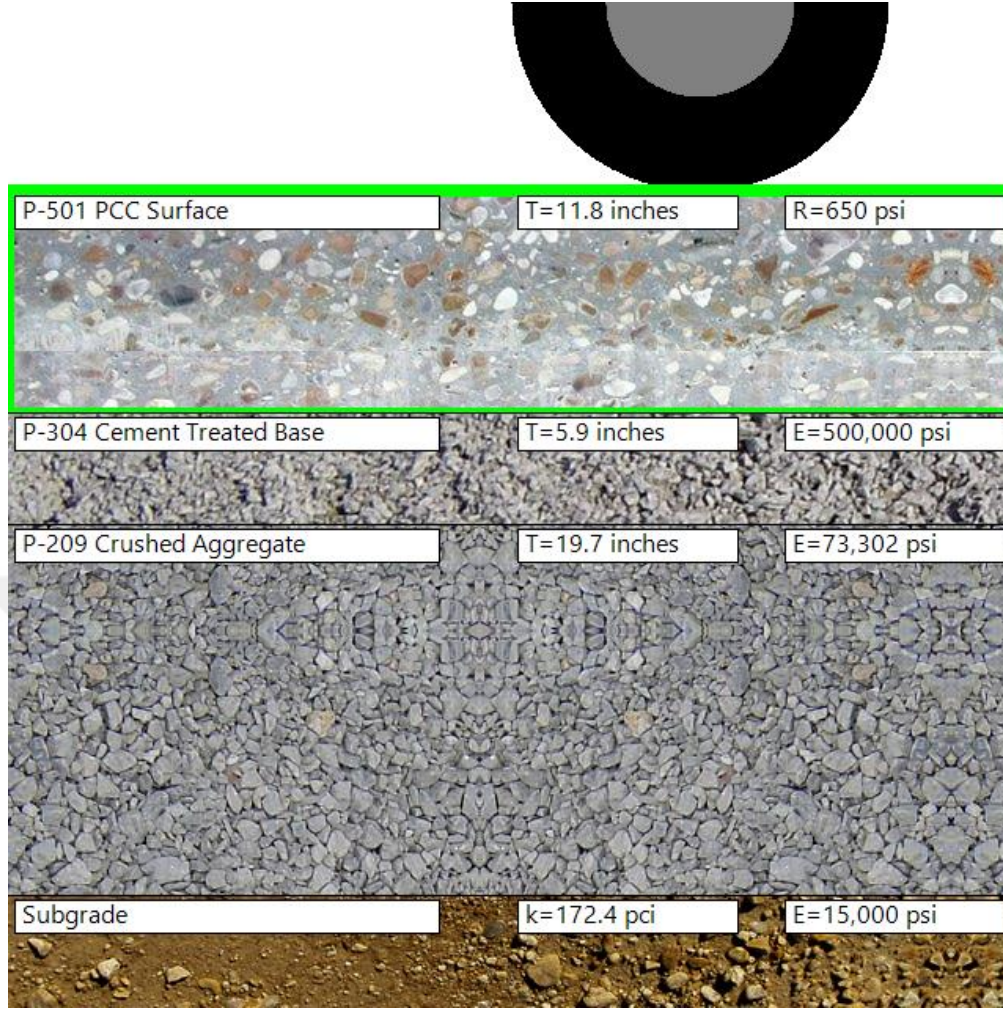


Şekil 38. Yükleme öncesi katman görünümü (1. durum)

Boeing 777-9 uçak tekerleklerinin beton kaplama üzerindeki konumu ve katman görünümü Şekil 38’de yer almaktadır.

2.2.2. PCR Değerinin Yetersiz Olduğu 2. Durum

PCR’nin yetersiz olduğu 2. duruma ait katman özellikleri, ACR ve PCR değerleri Şekil 39, 40, 41 ve 42’de gösterilmektedir.



Şekil 39. Katman kalınlıkları ve elastik modül değerleri

Pavement Layers

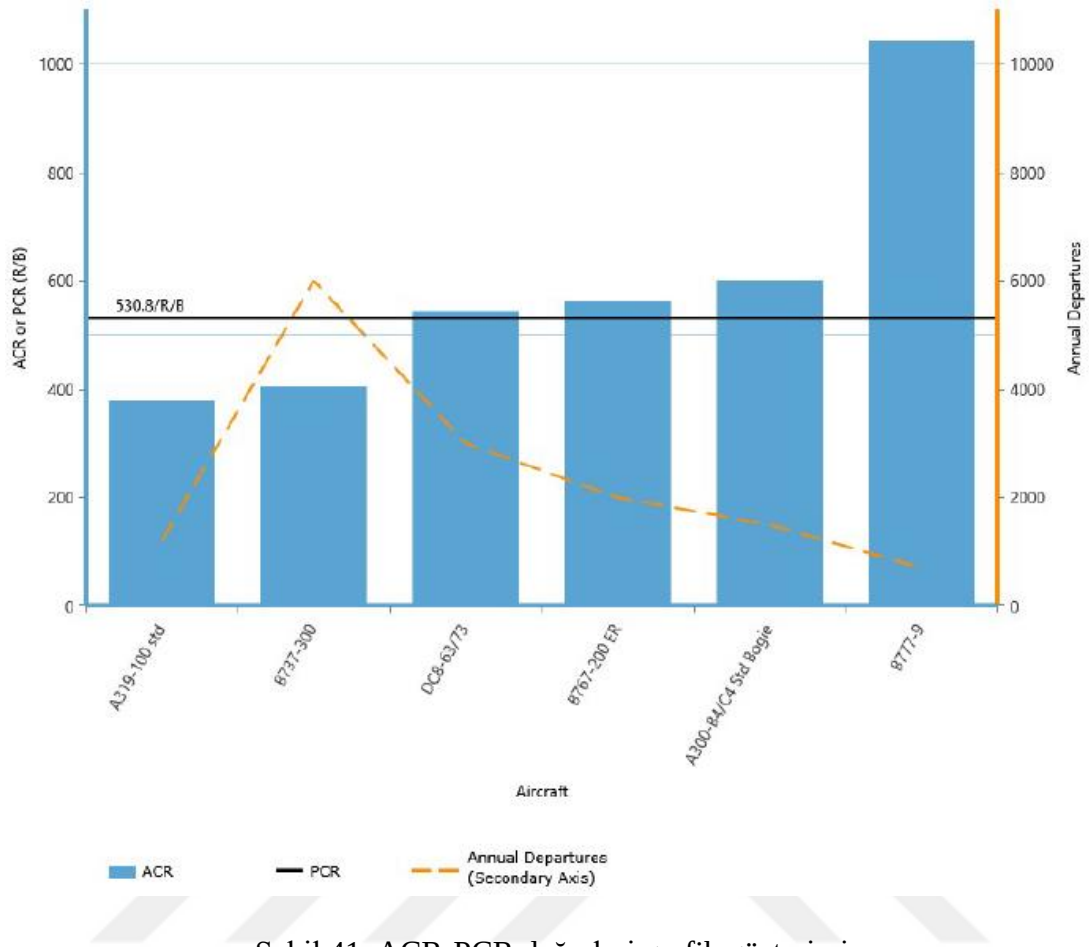
Pavement Type:

	Material	Thickness (in.)	E (psi)	k (pci)	R (psi)
-->	P-501 PCC Surface	11.8	4,000,000		650
	P-304 Cement Treated Base	5.9	500,000		
	P-209 Crushed Aggregate	19.7	73,302		
	Subgrade		15,000	172.4	

Select As The Design Layer Delete Selected Layer

Design Life (Years): P/TC Ratio:

Şekil 40. Beton kaplama ve alt katmanların mukavemet değerleri



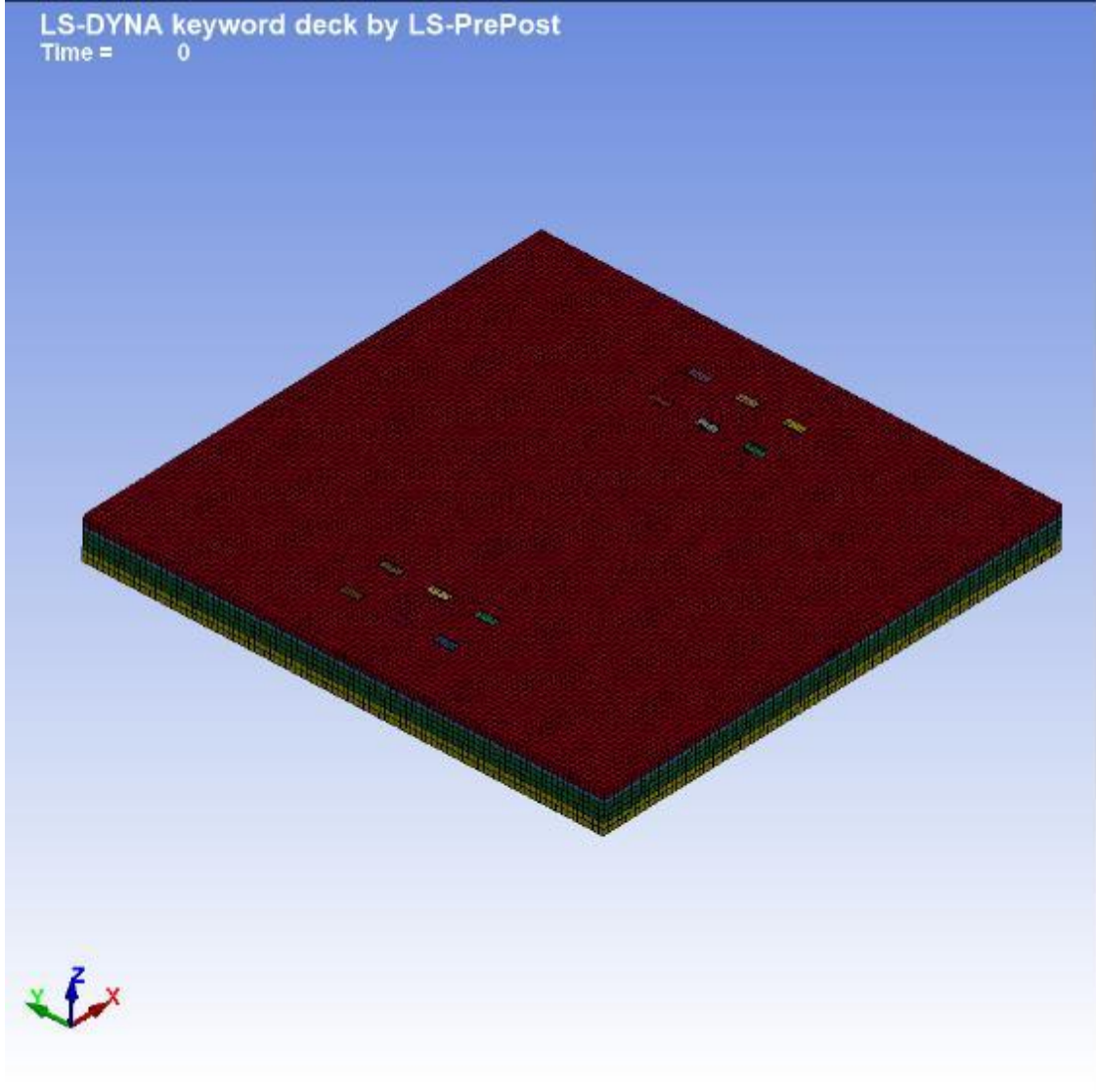
Şekil 41. ACR-PCR değerleri grafik gösterimi

No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	B777-9	1043	530.8	700
2	A300-B4/C4 Std Bogie	600	-	1,500
3	B767-200 ER	563.5	-	2,000
4	DC8-63/73	543.7	-	3,000
5	B737-300	404	-	6,000
6	A319-100 std	380.8	-	1,200

Şekil 42. ACR ve PCR değerleri (2. durum)

$$PCR = 530/R/B/W/T$$

2. durum; 530 PCR değerinin listedeki 4 uçağın ACR'sinden düşük olması sebebiyle (Şekil 41) kaplamanın bu uçak listesi için yetersiz olduğu durumdur.



Şekil 43. Yükleme öncesi üst yüzey katman görünümü (2. durum)

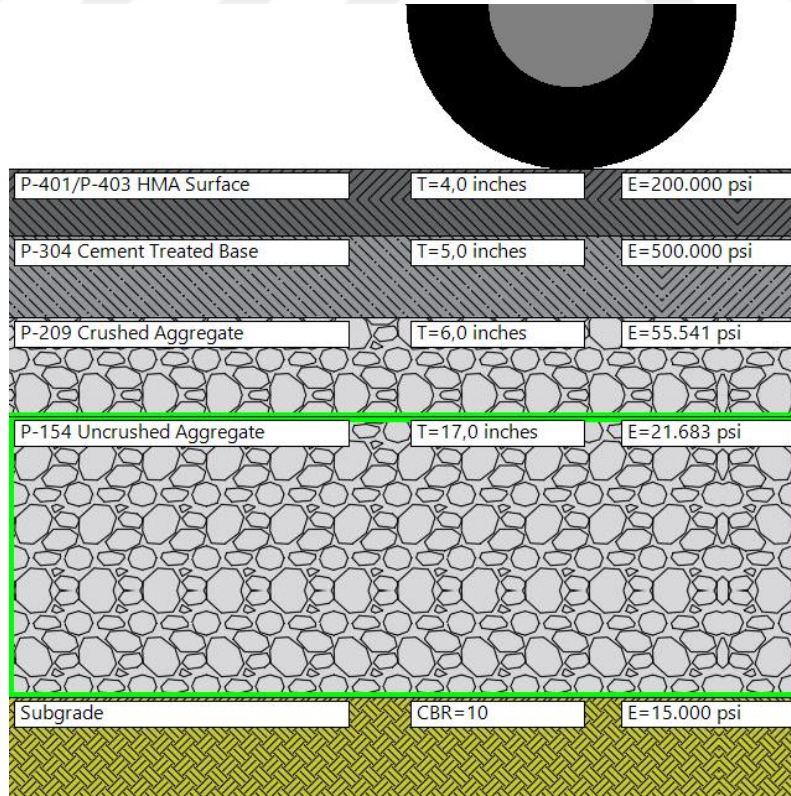
Boeing 777-9 uçak tekerleklerinin beton kaplama üzerindeki konumu ve katman görünümü Şekil 43'te yer almaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

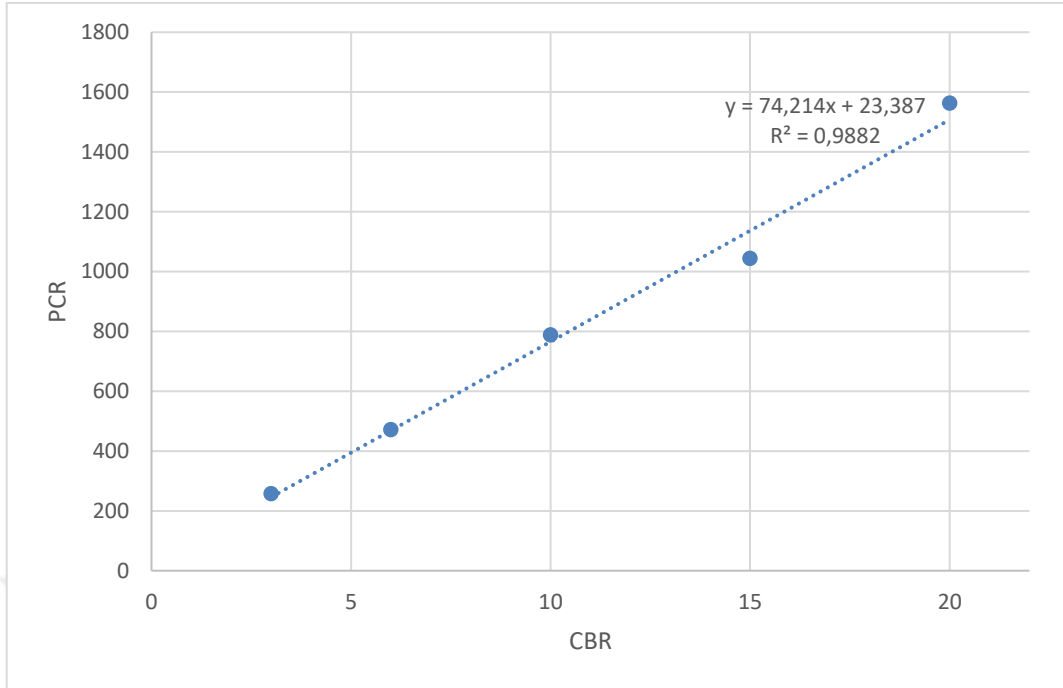
Bu bölümde, katman ve alt zemin değerlerinin değişiminin PCR ile ilişkisi FAARFIELD 2.1 programı ile analiz edilmiştir. Sonrasında aynı uçak listesi için kaplama PCR değerinin yeterli ve yetersiz olduğu durumlar, LS-DYNA sonlu elemanlar programına veri olarak girilmiştir. İki farklı durumda beton kaplama kalınlığı, çimento katkı katman kalınlığı, kırılmış agrega katman kalınlığı, elastisite modülü ile alt zemin elastisite modülü değerleri girilerek bulgular elde edilmiştir.

3.1. Katman Özelliklerinin PCR'a Etkisi

Şekil 44'teki esnek kaplamalı katman kesitinde; kaplama ve ara katman elastik modül, katman kalınlığı, tasarım ömrü, geçiş/trafik döngüsü(P/TC), uçak listesi ve yıllık kalkış sayıları vb. değişkenlerin sabit tutularak CBR değeri değişiminin PCR'a olan etkisi Şekil 45'te gösterilmektedir.



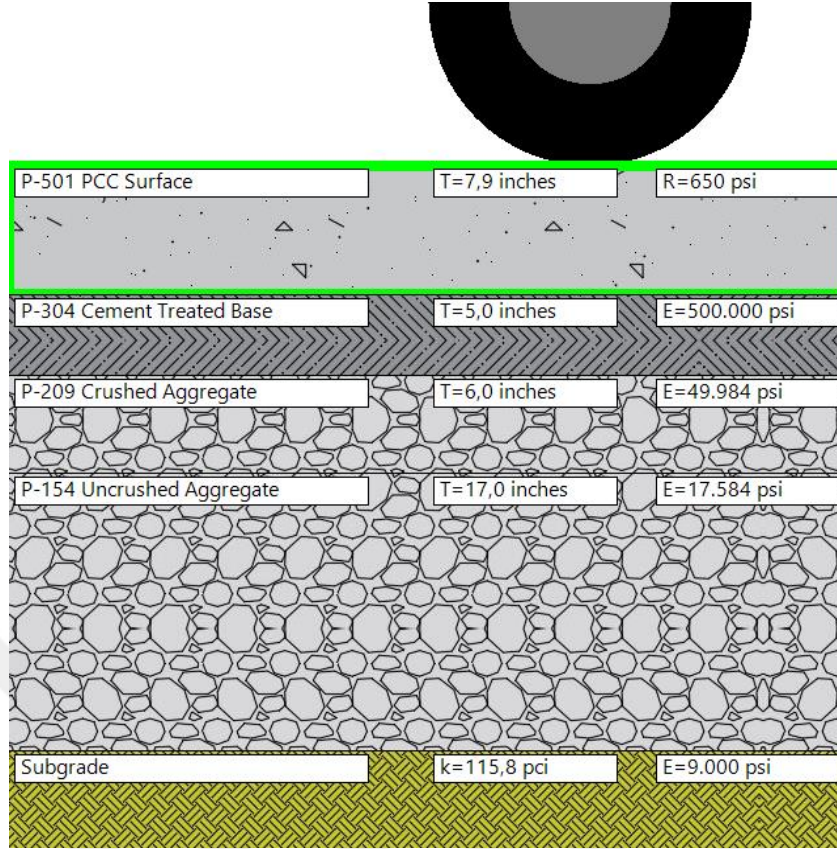
Şekil 44. Esnek kaplamalı katman kesiti



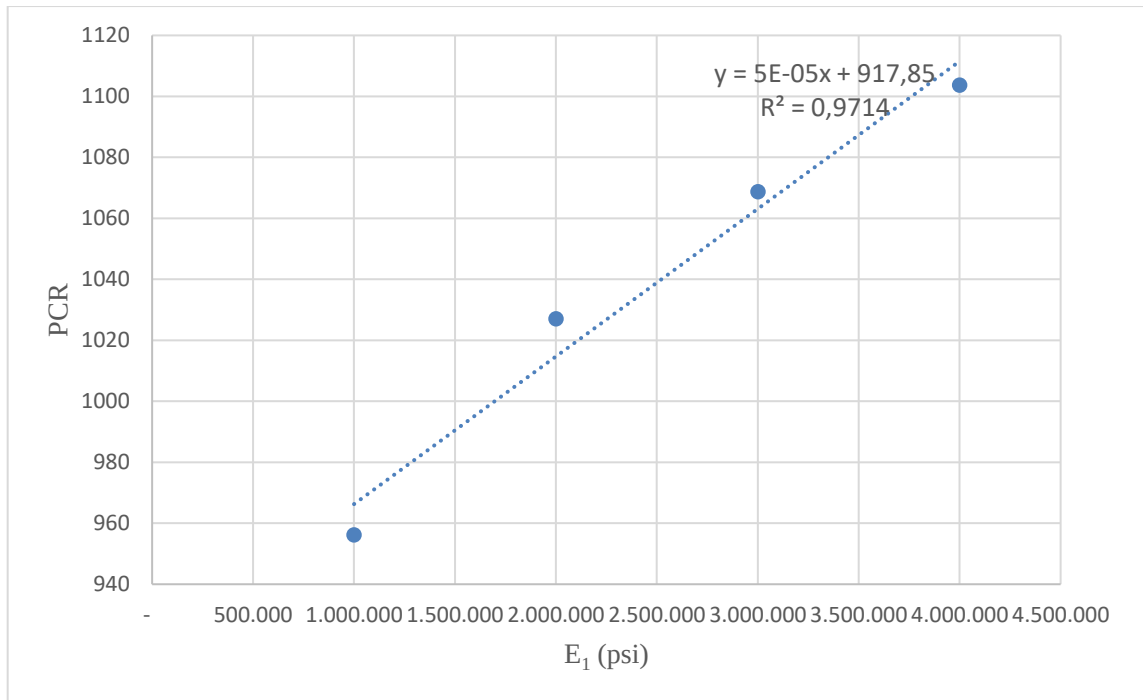
Şekil 45. PCR-CBR grafiği (diğer değişkenler sabit)

CBR değeri %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin de %98 arttığı görülmüştür. Bu durumda, ana zemin CBR değerinin PCR üzerinde tamamen etkili olduğu gözlenmiştir.

Şekil 45'te PCR 200 ile 1600 aralığında, CBR ise 2,5 ile 20 aralığında değişim göstermektedir. PCR ve CBR değişim aralıklarında aynı oranda lineer artan ilişki olduğu gözlenmiştir. Kararlılık katsayısı ($R^2=0,9882$) değeri iki parametre arasında oldukça güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde gösterilen $y = 74,214x + 23,387$ fonksiyonunda, CBR'daki 1 birimlik artışın PCR üzerinde 74 birimlik artışa sebep olabildiği görülmektedir.



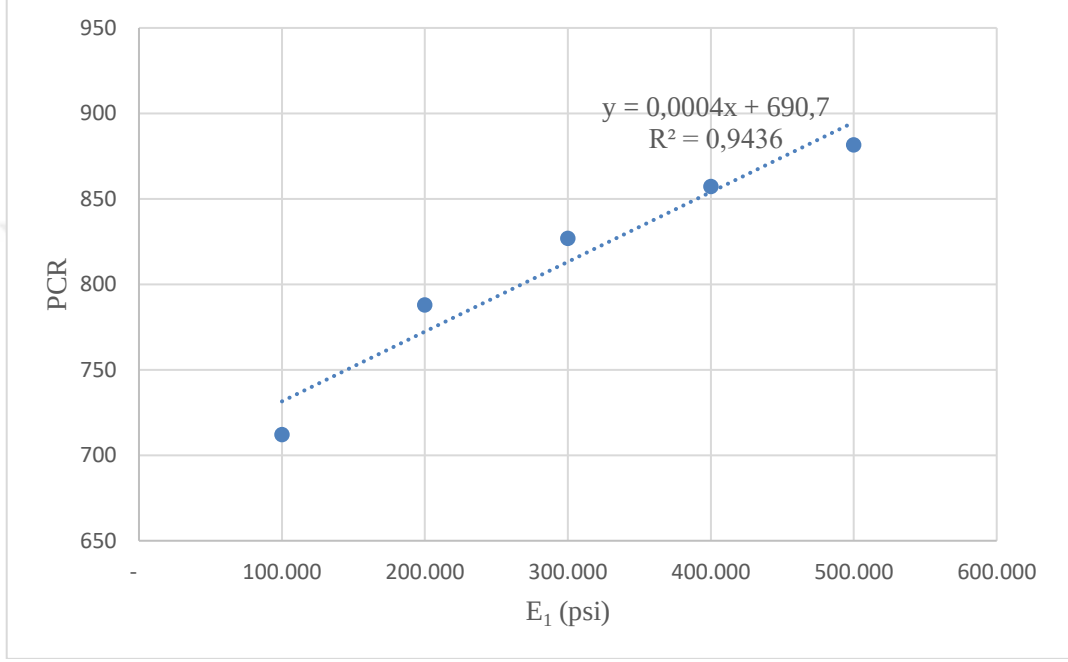
Şekil 46. Örnek rijit kaplamalı katman kesiti



Şekil 47. Rijit kaplamada PCR ve kaplama elastisite modülü ilişkisi

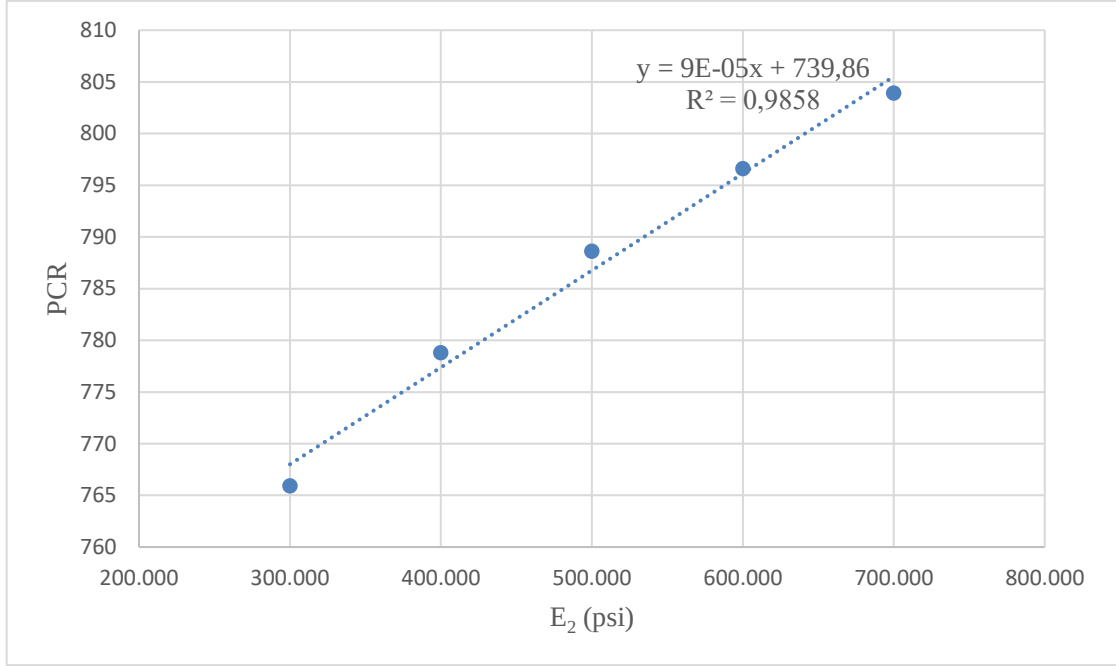
Rijit kaplama kesitinde (Şekil 46), diğer değişkenler sabit olmak kaydıyla E_1 değeri %100 artarken FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin de %8 arttığı görülmüştür.

PCR ve E_1 değişim aralıklarında lineer artan ilişki olduğu gözlenmiştir. Kararlılık katsayısı ($R^2=0,9714$) değeri iki parametre arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



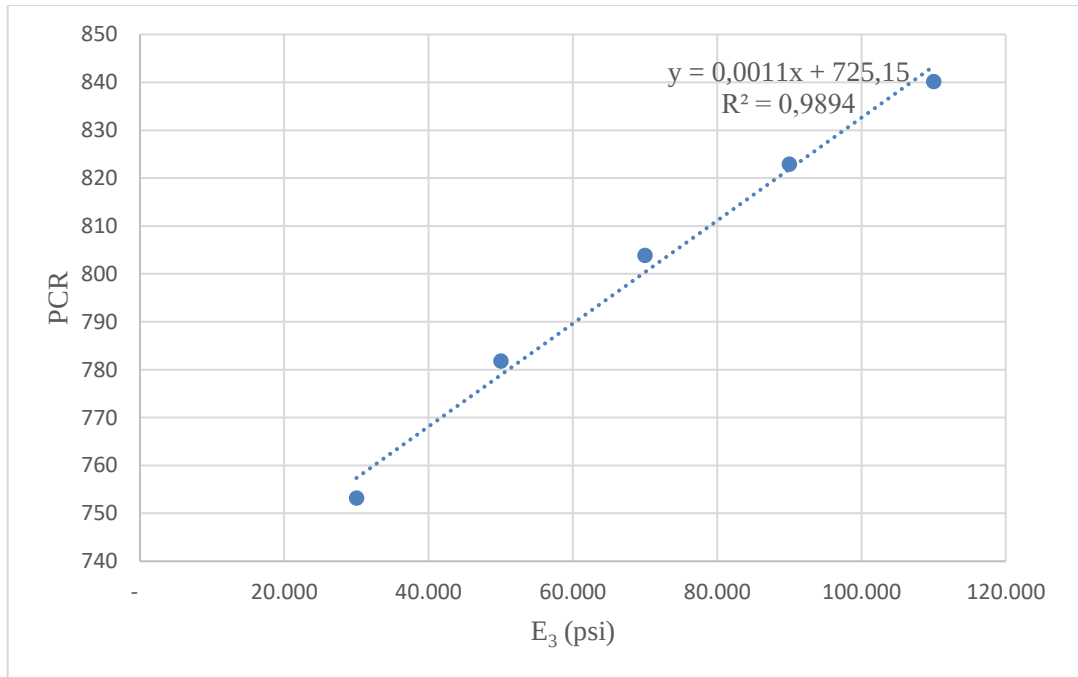
Şekil 48. Esnek kaplamada PCR ve kaplama elastisite modülü ilişkisi

Diğer değişkenler sabit olmak kaydıyla E_1 değeri %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %10 arttığı görülmüştür. Bu durumda, esnek kaplama katmanı elastik modül değişimi PCR üzerinde CBR'a kıyasla %90 daha az etkilidir.



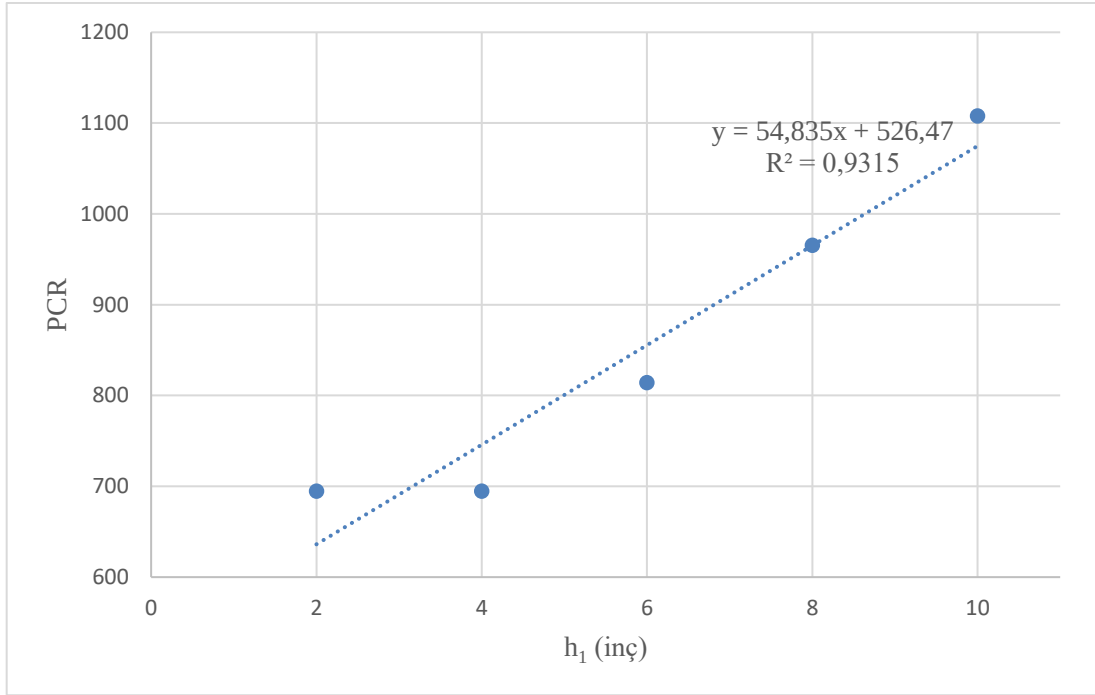
Şekil 49. Esnek kaplama için PCR-E₂ ilişkisi (diğer değişkenler sabit)

E₂ değeri %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %4 arttığı görülmüştür. Bu durumda, Şekil 33'te yer alan 2. katmanın (çimento katkı katman) PCR değeri üzerindeki etkisi taban zemini ve kaplama katmanına kıyasla daha azdır (Şekil 49).



Şekil 50. Esnek kaplama için PCR-E₃ ilişkisi (diğer değişkenler sabit)

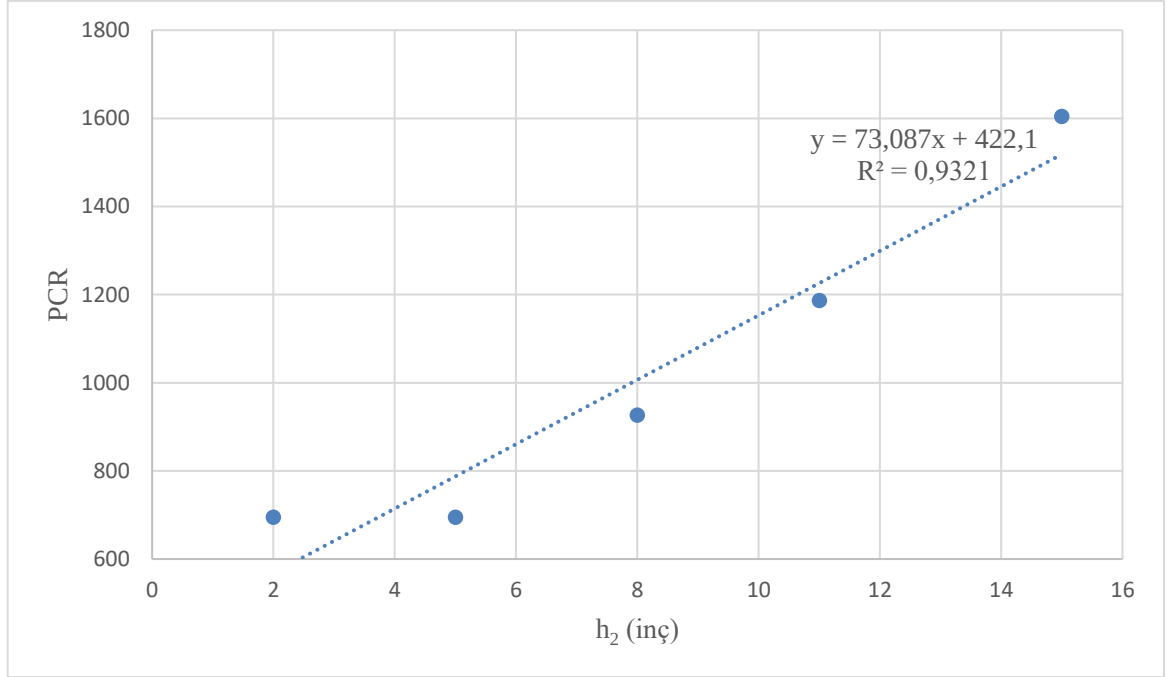
E_3 (kırılmış agrega elastisite modülü) değeri %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %5 arttığı görülmüştür. PCR artışının %5 olmasına rağmen iki değişken arasında güçlü ve lineer artan ilişki olduğu gözlenmiştir (Şekil 50).



Şekil 51. Esnek kaplama için PCR- h_1 ilişkisi (diğer değişkenler sabit)

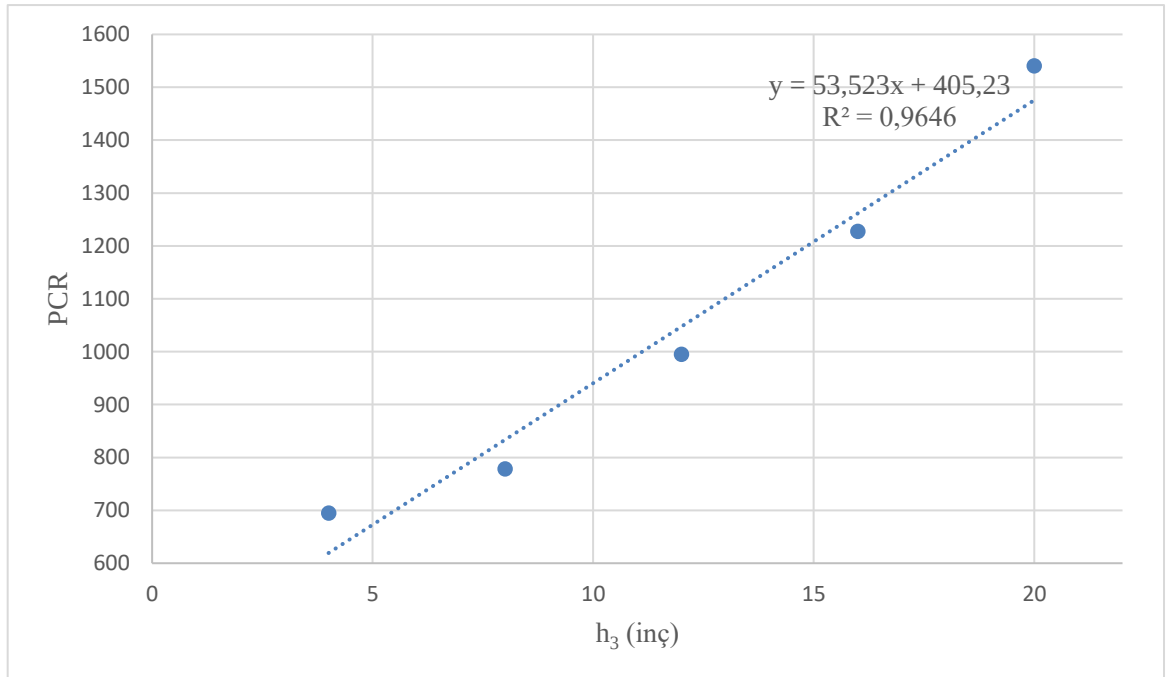
Diğer değişkenler sabit olmak kaydıyla h_1 değeri %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %38 arttığı görülmüştür. Kaplama katman kalınlığı PCR değeri üzerinde, kaplama elastisite modülüne kıyasla 4,75 kat daha etkili olmuştur.

h_1 artarken 2-4 inç aralığında PCR'ın 700 değerinde sabit kalması determinasyon katsayısının azalmasına ($R^2=0,9315$) yol açmıştır (Şekil 51).



Şekil 52. Esnek kaplama için PCR- h_2 ilişkisi (diğer değişkenler sabit)

h_2 katman kalınlığı (çimento katkılı katman) %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %52 arttığı görülmüştür. 2. katman kalınlığının artışı, h_1 'deki artışa göre PCR'ı yükseltmede %37 daha fazla etkilidir (Şekil 52).



Şekil 53. Esnek kaplama için PCR- h_3 ilişkisi (diğer değişkenler sabit)

h_3 katman kalınlığı %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %65 arttığı görülmüştür. 3. katman kalınlığının artışı, h_2 'deki artışa göre PCR'ı yükseltmede %25 daha etkilidir (Şekil 53). Katman kalınlığının PCR değerine olan etkisi, alt katmanlara gidildikçe daha da artmaktadır.

Tablo 9. Esnek kaplamada katman kalınlıklarının değişimini gösteren korelasyon denklemi ve determinasyon (kararlılık) katsayısı

	Fonksiyon	R²
h₁	$y = 54,835x + 526,47$	0,9315
h₂	$y = 73,087x + 422,10$	0,9321
h₃	$y = 53,523x + 405,23$	0,9646

Alt katmanların kalınlık değişimlerinin üst katmanlara göre PCR değeri üzerinde daha etkili olduğu gözlenmiştir. Elastisite modülü için aynı yorum yapılamamaktadır. Elastisite modülündeki değişimlerde alt ve üst katmanların etkisi değişkenlik göstermektedir. Katman kalınlığı ile PCR değeri arasında Tablo 9'da görüldüğü üzere lineer ve güçlü bir kararlılık ilişkisi vardır. PCR değerinin belirlenmesinde alt katman kalınlığının önemi bu sonuçlardan daha iyi anlaşılmaktadır.

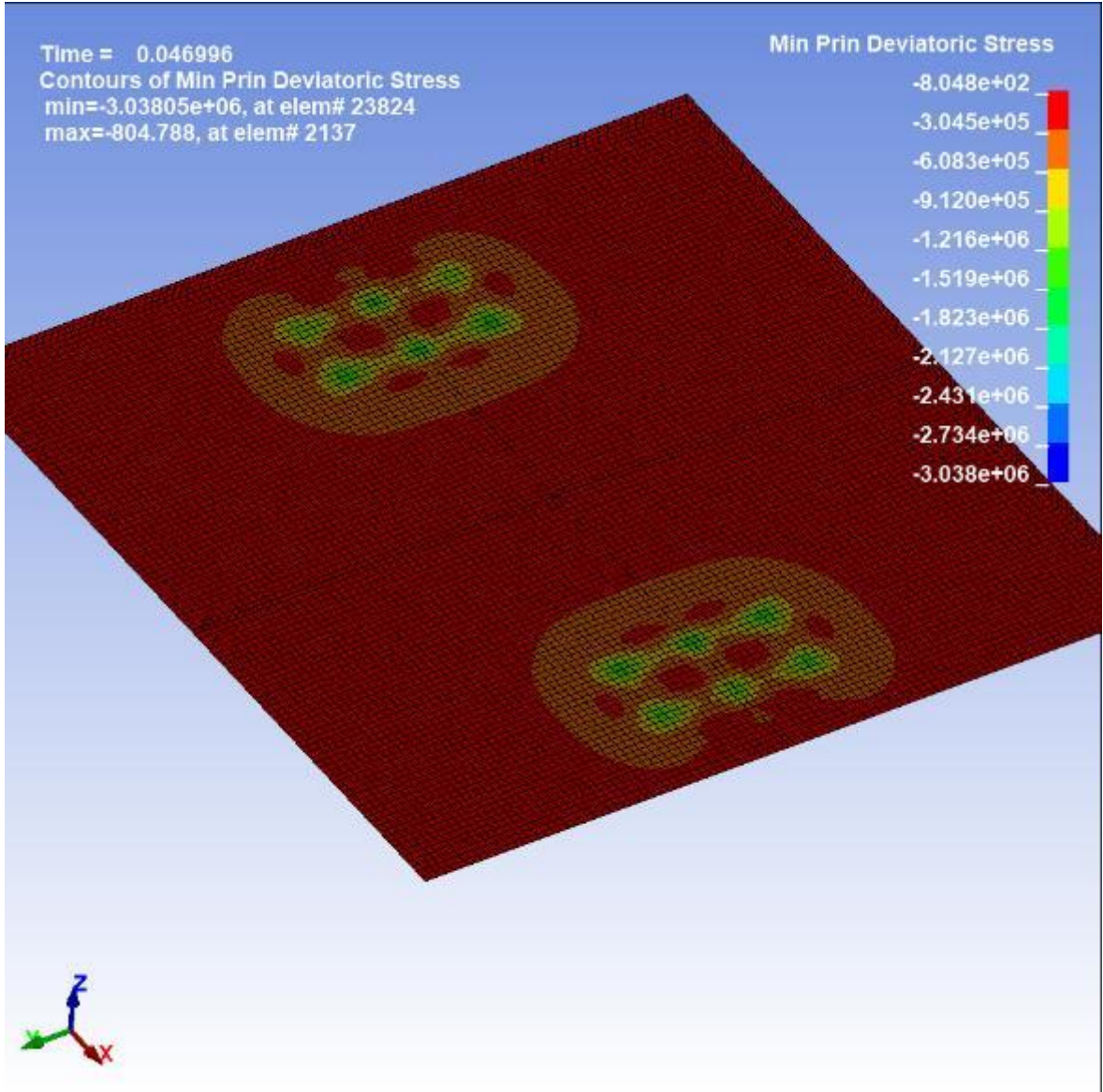
Tablo 10. Esnek kaplamada elastisite modül değişimini gösteren korelasyon denklemi ve determinasyon (kararlılık) katsayısı

	Fonksiyon	R²
E₁	$y = 0,0004x + 690,7$	0,9436
E₂	$y = 9.10^{-5}x + 739,86$	0,9858
E₃	$y = 0,0011x + 725,15$	0,9894

Alt katmanlara doğru elastisite modülü-PCR ilişkisinde daha az sapma ile oluşan güçlü bir kararlılık ilişkisi vardır. Diğer değişkenler sabitken katman kalınlık değişiminin Elastisite Modülü değişimine göre PCR üzerinde daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

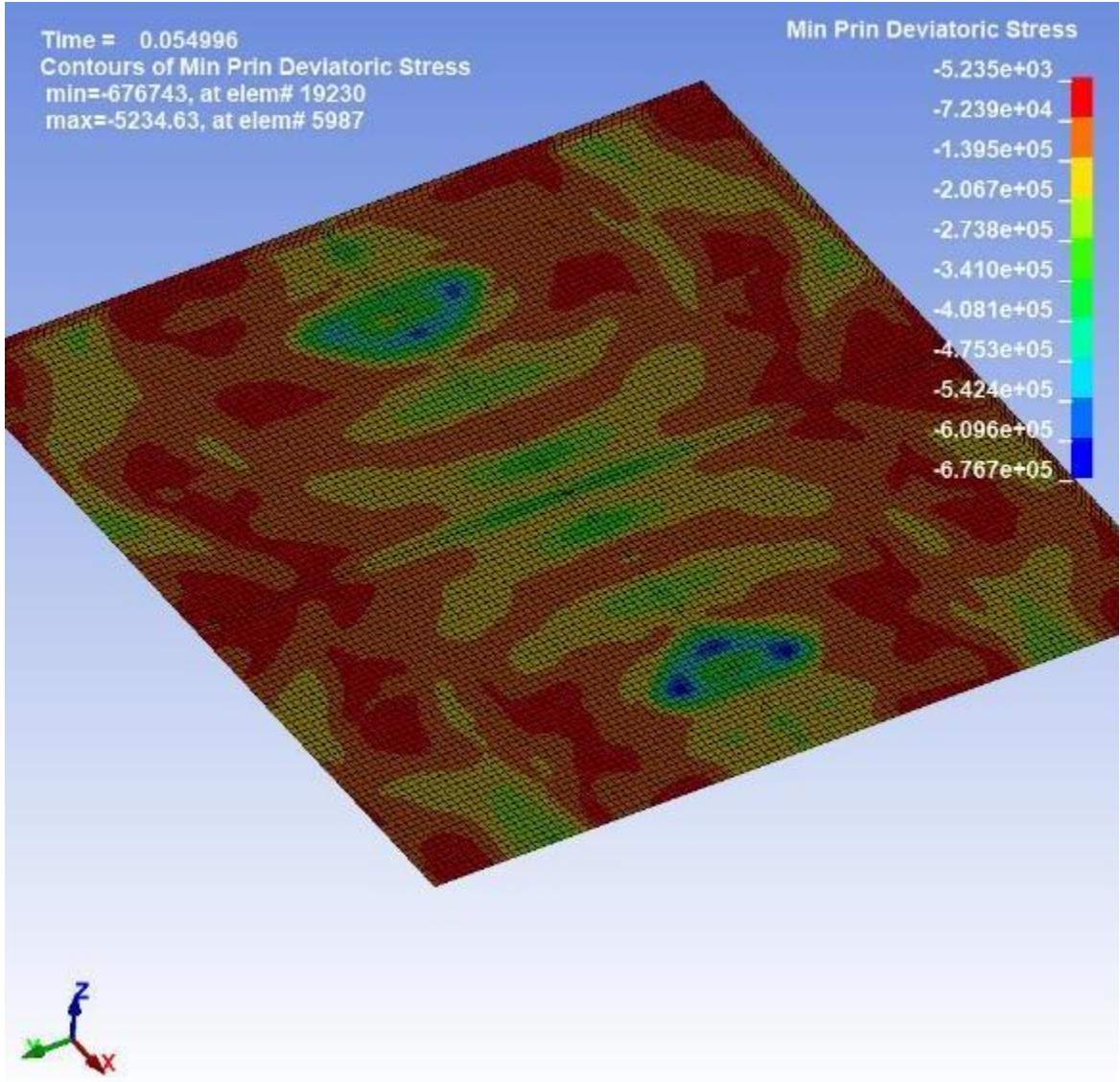
3.2. PCR'ın Yeterli Olduğu 1. Durumda Sonlu Elemanlar Analizi

Aşağıdaki basınç ve deplasman grafiklerinde basınç değeri megapaskal (MPa), deplasman değeri metre (m), zaman ise saniye cinsinden verilmiştir. Katman kesitlerinde katman alt yüzeyinde oluşan gerilmeler gösterilmiştir.



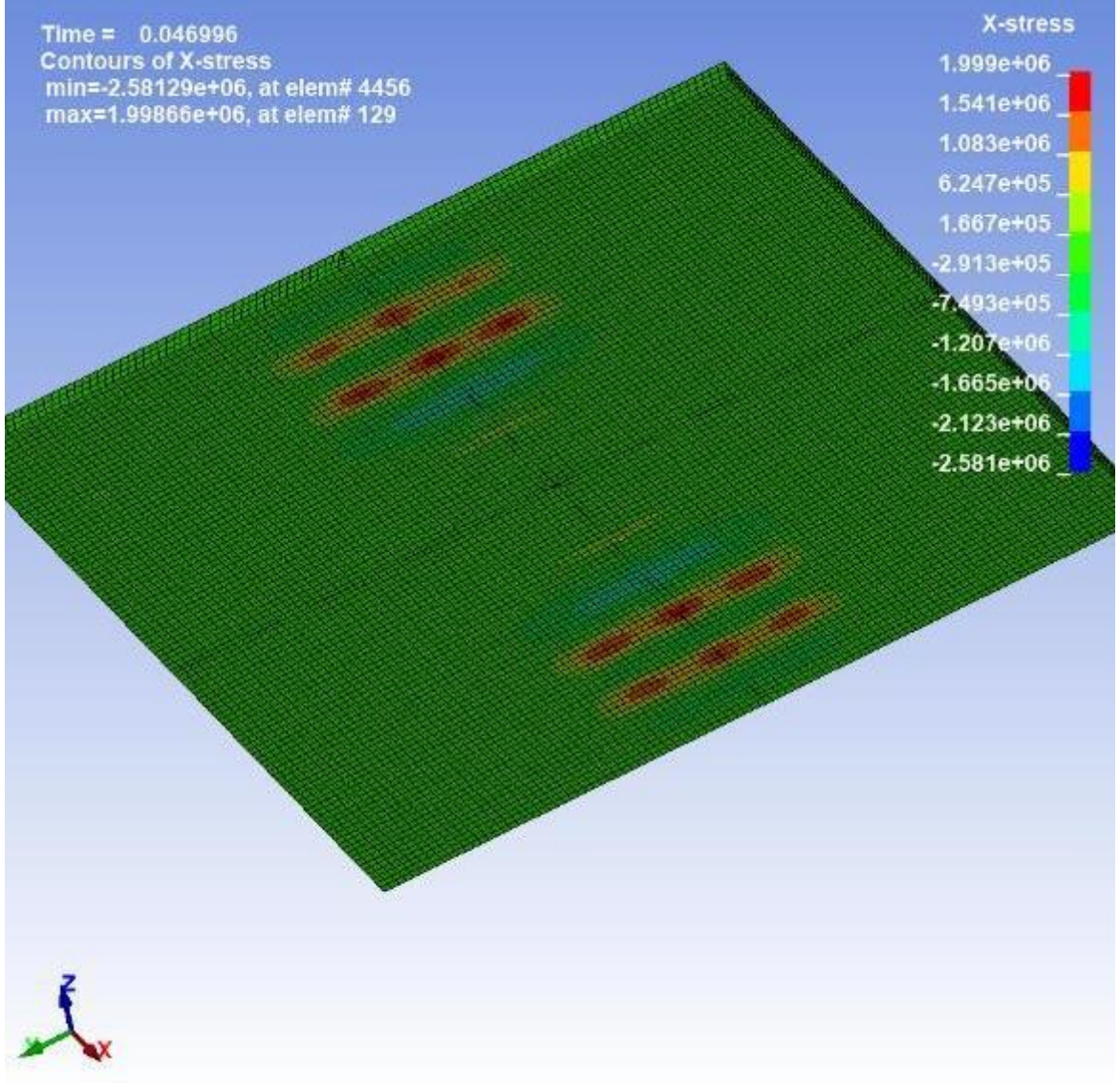
Şekil 54. Yükleme anında Z doğrultusundaki (düşey) basınç dağılımı (zaman: 0,047 sn)

Boeing 777-9 uçağının tek tekerlek temas alanı içerisinde kaplama üst yüzeyinde 1,544 MPa basınç olduğu hesaplanmıştır (Tablo 8). Bu basınç LS-DYNA programında kaplamaya etkittirildiğinde, yükleme anında kaplama altında düşey yönde 1,65 MPa basınç oluşmaktadır (Şekil 54). Kaplamanın kendi ağırlığı da düşünüldüğünde bu değer normal karşılanabilir.



Şekil 55. Yükleme sonrası kaplama altı basınç dağılımı (zaman: 0,054996 sn)

Yükleme sonrasında ise yükün kaplama alanına yayılarak kaplama altında oluşan maksimum gerilmenin 0,68 MPa'ya düştüğü gözlenmiştir (Şekil 55). Beton, basıncı karşılayan bir yapı elemanı olduğu için uçak tekerleğinden gelen yükün kısa süre içerisinde kaplama kesitine yayılarak basıncın düşmesi olağan bir durumdur.



Şekil 56. X ekseninde oluşan basınç ve çekme gerilmeleri kaplama altı görünümü

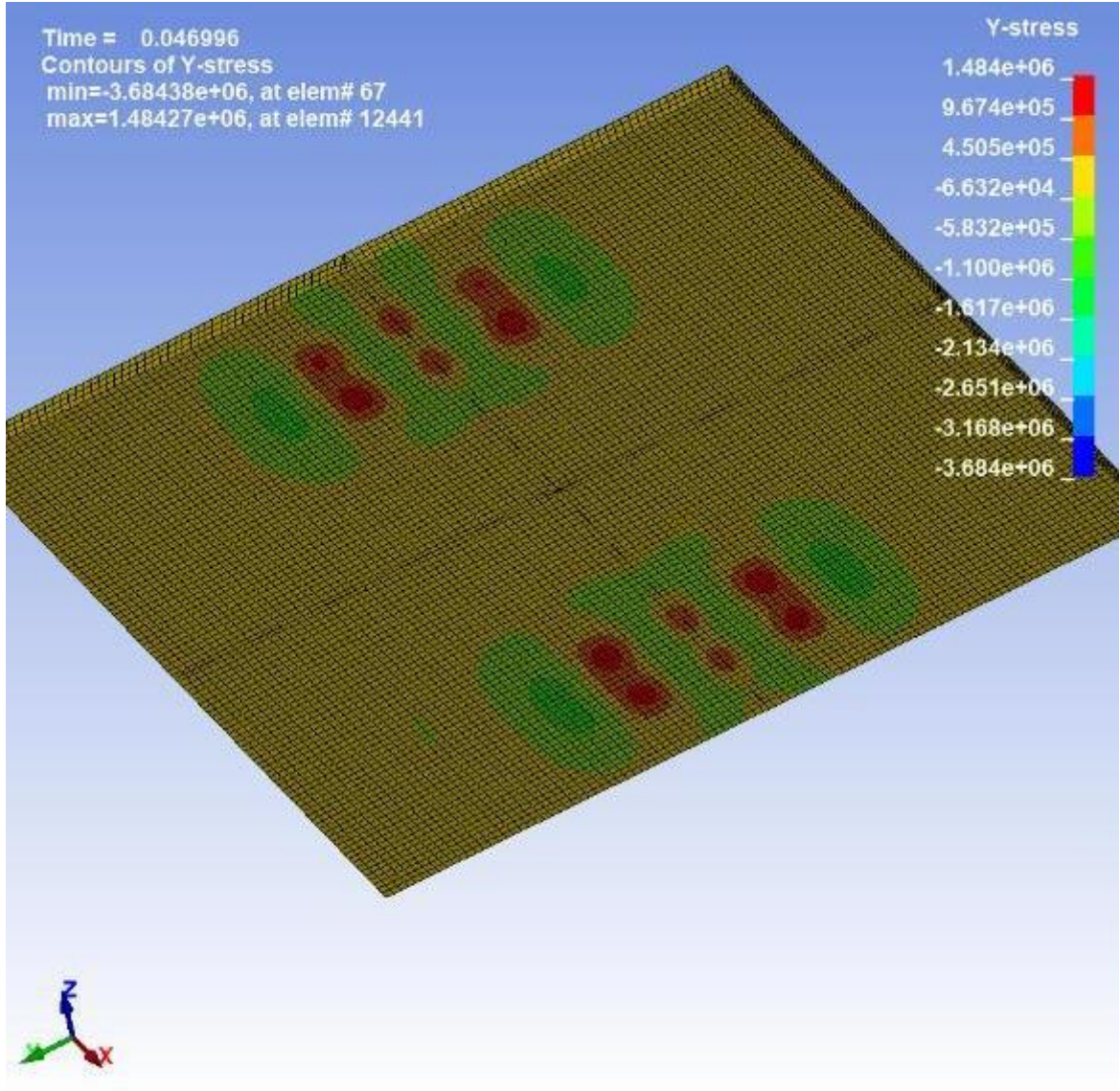
Şekil 56'da yer alan grafikte yeşil, mavi renkler kaplama kesitinde eksenel basınç gerilmesini; sarı, turuncu ve kırmızı renkler ise çekme gerilmesini ifade etmektedir. Bu grafikte, eksenel çekme gerilmesinin 2,0 MPa değerine ulaşarak C40 f_{ctk} dayanımını (Tablo 11) aşmadığı fakat C30 eksenel çekme değerini aştığı görülmektedir. Basınç oluşan yeşil ve mavi renkli alanlar ise beton kaplama için problem oluşturmamaktadır.

Analiz sonucu C40 betonun yeterli olduğu görülmektedir fakat bu durum için tasarlanan kaplamanın PCR değeri yüksek olduğundan beklenen sonuç, çekme gerilmesinin (2,0 MPa) daha düşük bir değerde olmasıdır. Kaplama imalatın etki eden çevresel etkenler (sıcaklık, hazır beton içeriği, zemin koşulları vb.) ve yapım şartları da düşünüldüğünde eksenel çekme gerilmesinin sınıra yakın olması istenilen bir durum

değildir. Burada FAARFIELD yazılımı ile elde edilen PCR değeri yanıltıcı olabilir. LS-DYNA yazılımının bu durumda, FAARFIELD'a göre daha güvenli tarafta kaldığı görülmüştür.

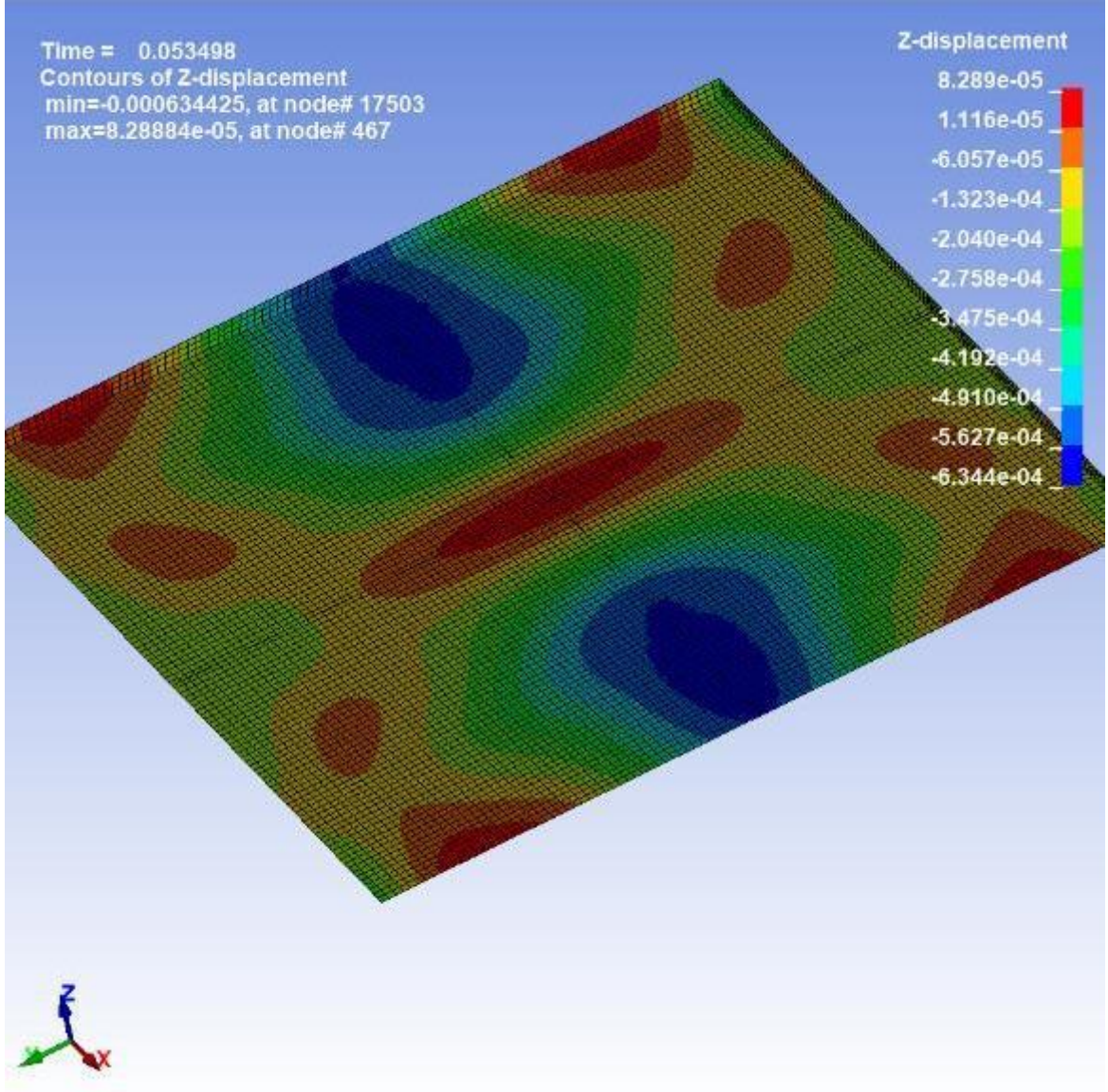
Tablo 11. TS500'e göre beton karakteristik basınç ve eksenel çekme değerleri (T.S.E., 2000)

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı, f_{ctk} MPa	Eşdeğer Küp (150 mm) Basınç Dayanımı MPa	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, f_{ctk} MPa	28 Günlük Elastisite Modülü E_c MPa
C16	16	20	1,4	27000
C18	18	22	1,5	27500
C20	20	25	1,6	28000
C25	25	30	1,8	30000
C30	30	37	1,9	32000
C35	35	45	2,1	33000
C40	40	50	2,2	34000
C45	45	55	2,3	36000
C50	50	60	2,5	37000

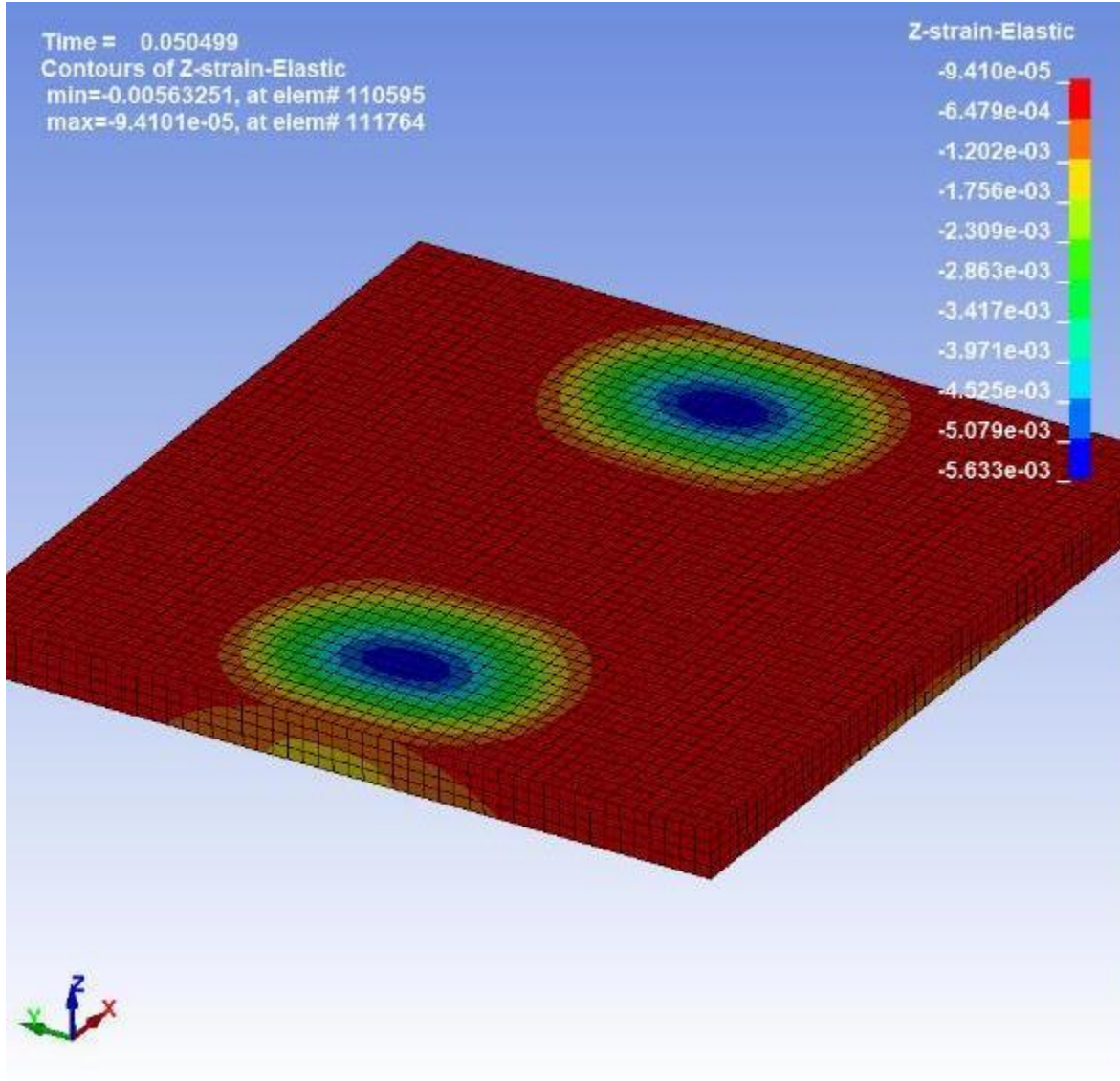


Şekil 57. Y ekseninde oluşan gerilmeler

Şekil 57’de Y ekseninde oluşan eksenel çekme değerlerinin 1,48 MPa olduğu görülmektedir. Derz bölgelerinde derz doğrultusuna dik yönde olan basınç veya çekme gerilmeleri diğer noktalara kıyasla (%32) daha düşük değerdedir (1,0 MPa). Kaplama derzleri genişleme alanı sağlaması ve anolar arasındaki farklı oturmalarda gerilme iletimini sınırlandırması sebebiyle çatlakları önler. Bu durumun yük aktarımındaki faydası Şekil 57’de görülmektedir.



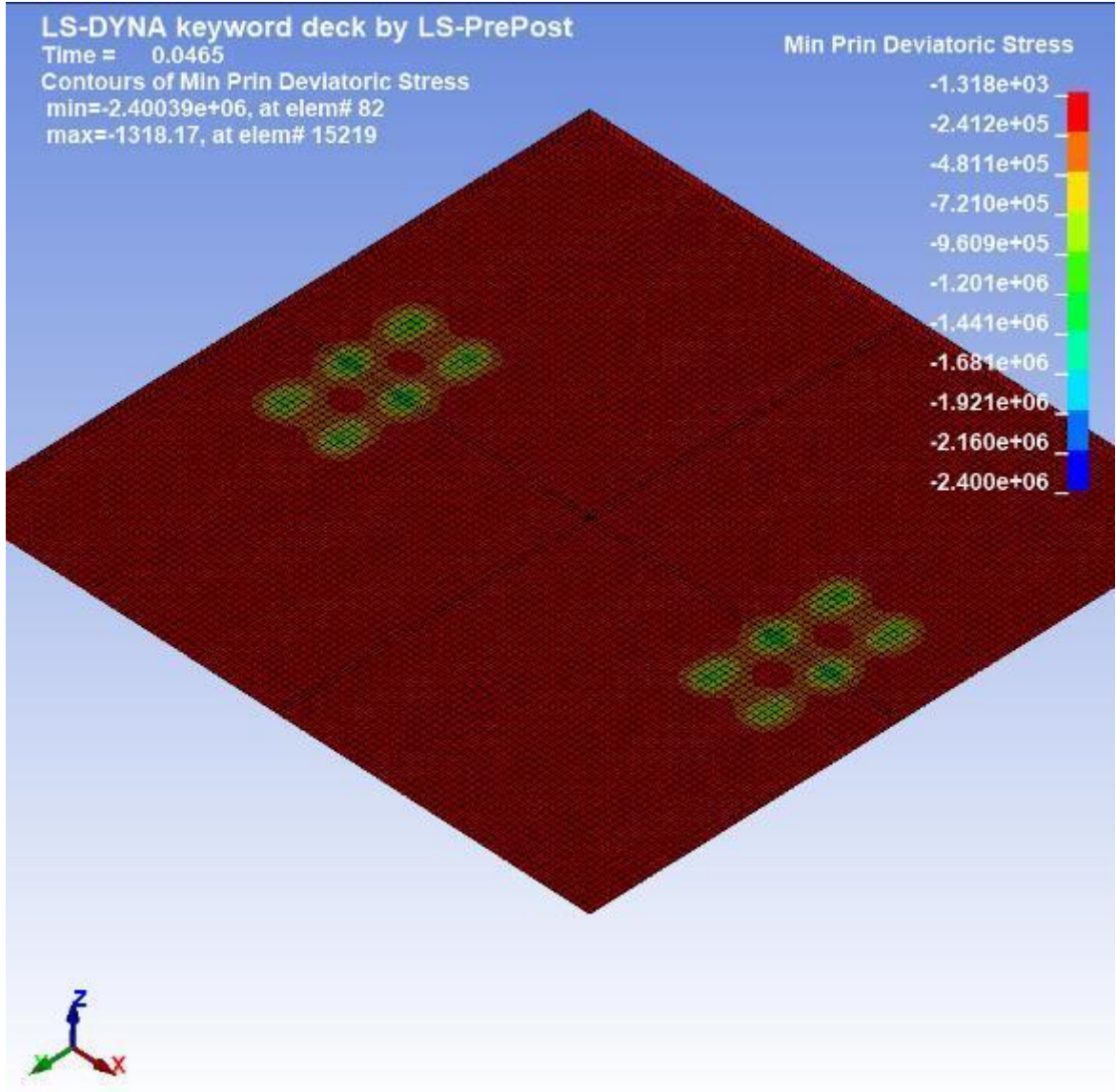
Şekil 58. Yükleme sonrası üst kaplama altında oluşan düşey deplasmanlar (0,63 mm)



Şekil 59. Taban zemininin üst kısmındaki birim şekil değiştirme, gerinim (ϵ) değeri ($5,63 \times 10^{-3}$)

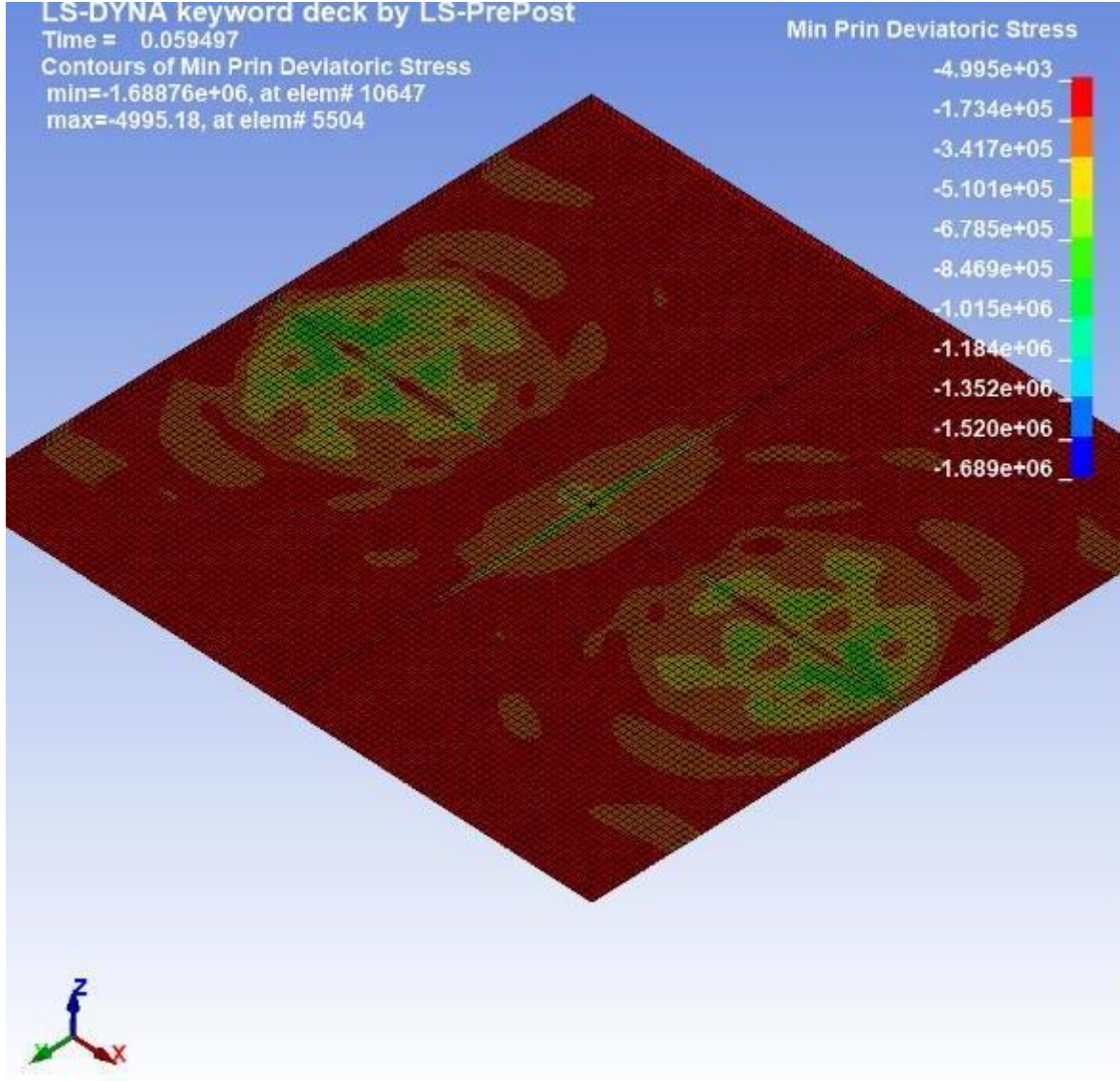
3.3. PCR'ın Yetersiz Olduğu 2. Durumda Sonlu Elemanlar Analizi

Aşağıdaki basınç ve deplasman grafiklerinde basınç değeri megapaskal (MPa), deplasman değeri metre (m), zaman ise saniye cinsinden verilmiştir. Katman kesitlerinde katman alt yüzeyinde oluşan gerilmeler gösterilmiştir.



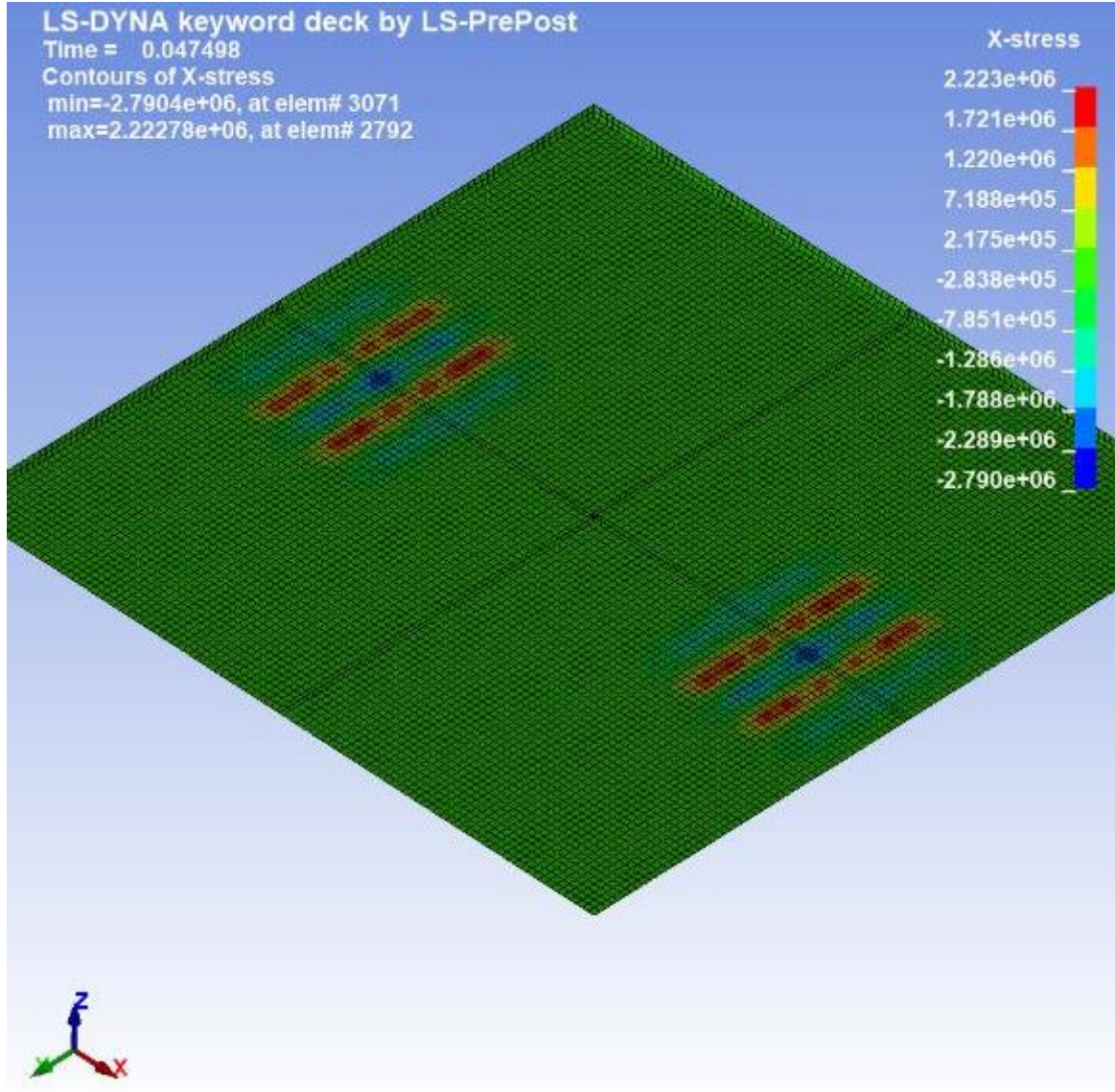
Şekil 60. Yükleme anında Z doğrultusundaki (düşey) kaplama altı basınç dağılımı (zaman: 0,0465 sn)

Yetersiz PCR katmanlarına aynı uçak yükleri uygulandığında yükleme anında kaplama altında düşey yönde ortalama 1,5 MPa basınç oluşmaktadır. Yeterli olan 1. durumda bu değerin 1,65 MPa olduğu görülmüştür. Bunun sebebi; beton kaplama kalınlığının 1. Durumda 2. Duruma göre 10 cm daha fazla olması sebebiyle, betonun kendi ağırlığının ayrıca yük oluşturmasıdır.



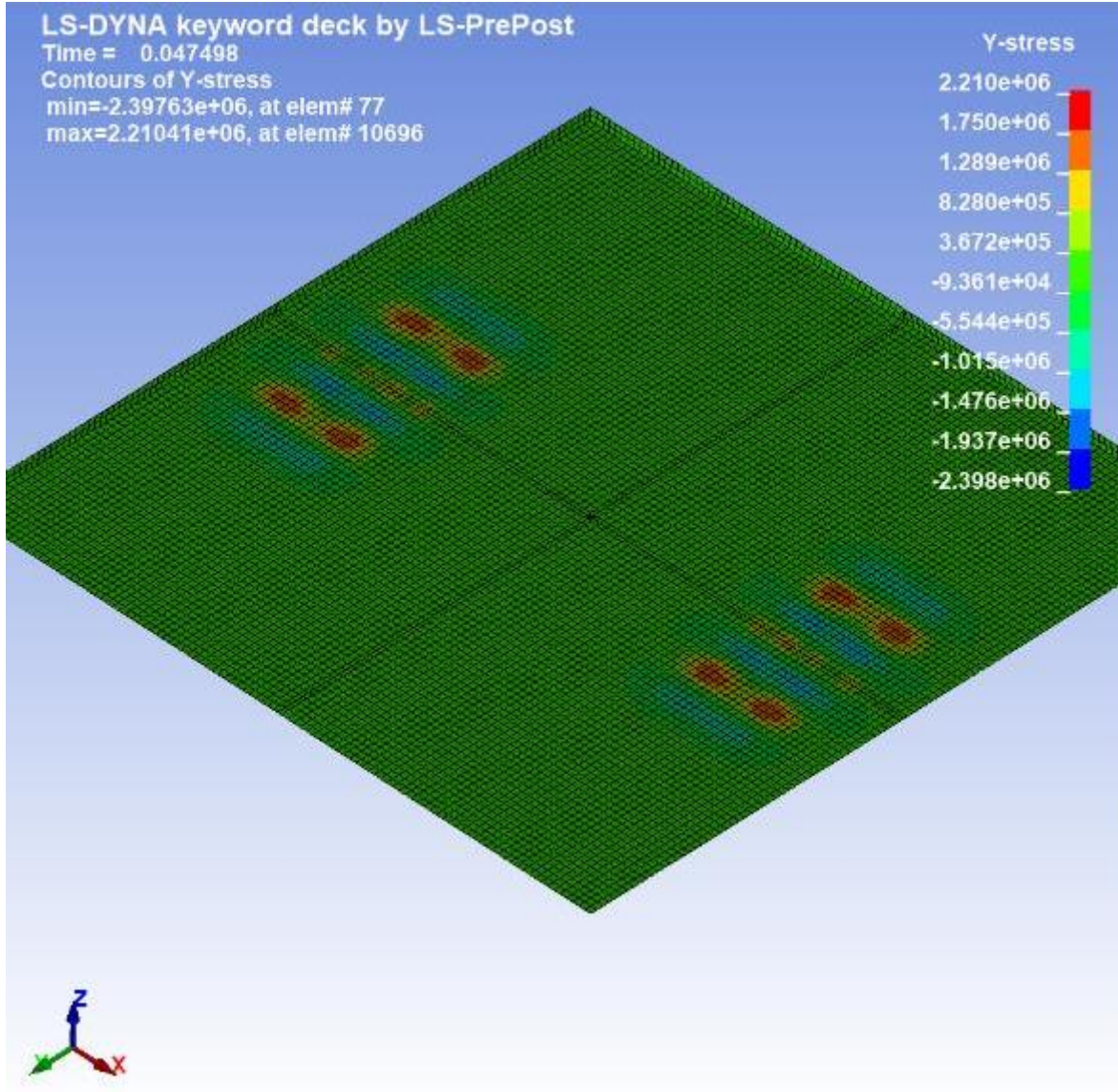
Şekil 61. Yükleme sonrası Z doğrultusundaki basınç dağılımı (zaman: 0,059497 sn)

Tekerlek yükü yükleme sonrasında kaplama alanına yayılarak maksimum basınç 1,5 MPa'dan 0,9 MPa'ya düşmüştür. 1. durumda ise tekerlek yükünün oluşturduğu gerilme 1,65 MPa'dan 0,68 MPa'ya kadar düşmüştür. Bunun sebebi PCR'ın yeterli olduğu 1. durumda kaplama kalınlığının 40 cm olmasıdır. Kalın kaplamalara etkiyen noktasal yüklerin, ince kaplamalara göre daha geniş bir kaplama kesitine yayılmasıyla yüklerin getireceği deformasyonların en aza indirgendiği sonucuna ulaşılmıştır.



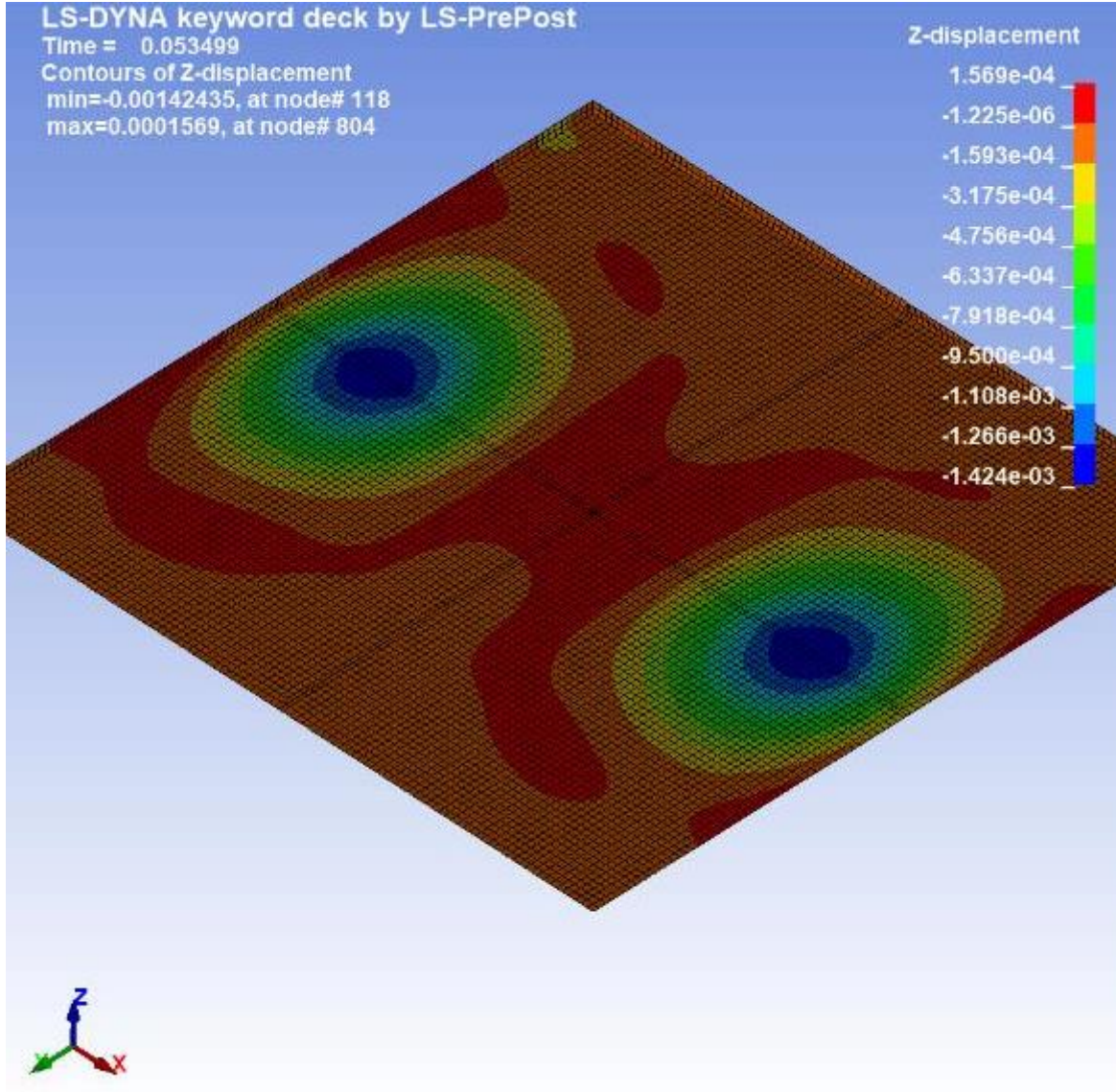
Şekil 62. X ekseninde kaplama altında oluşan gerilmeler

X ekseninde oluşan çekme gerilmesi 2,22 MPa değerine ulaşarak C40 betonun f_{ctk} dayanımını (2,2 MPa) aşmaktadır (Şekil 62). 1. duruma kıyasla beton kaplamanın 2. durumda dayanım yönünden yetersiz olduğu görülmektedir. Basınç oluşan alanlar ise (en fazla 2,79 MPa olduğu görülmektedir.) beton kaplama için problem oluşturmamaktadır. Kaplama kalınlığının 40 cm'den 30 cm'ye düşürülmesi, alt katman kalınlıkları ve zemin CBR değerinin düşük olması burada etkili olmuştur.



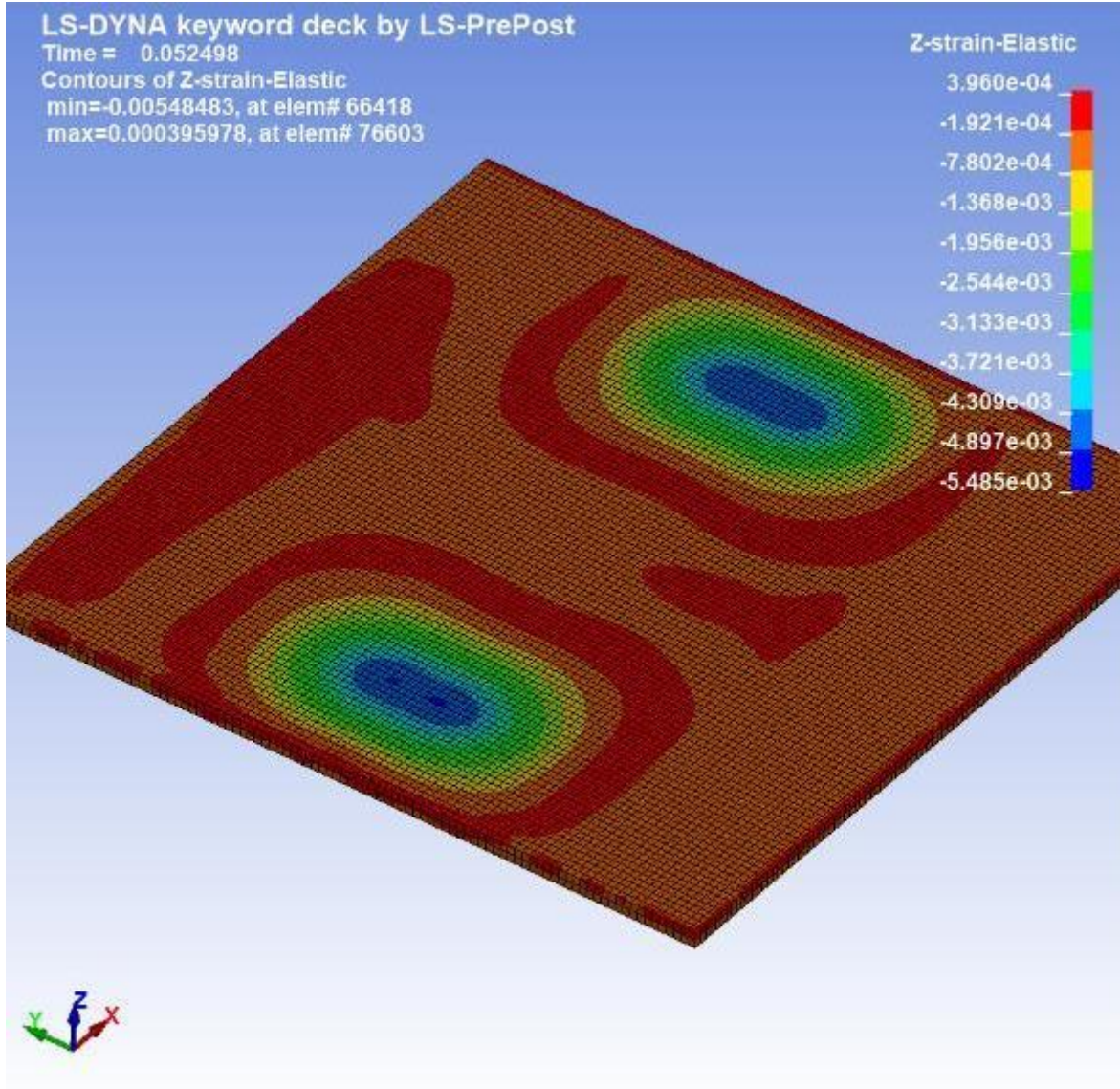
Şekil 63. Y ekseninde kaplama altında oluşan gerilmeler

Şekil 63'te Y ekseninde oluşan eksenel çekme değerlerinin 2,21 MPa olduğu görülmektedir. Derz bölgelerinde ise bu değer ortalama 1,5 MPa'dır. Derz bölgesinde derz doğrultusuna dik yönde olan basınç veya çekme gerilmelerinin diğer noktalara kıyasla %33 daha düşük olduğu sonucuna bu durumda da ulaşılmıştır.



Şekil 64. Yükleme sonrası üst kaplama altındaki düşey deplasman

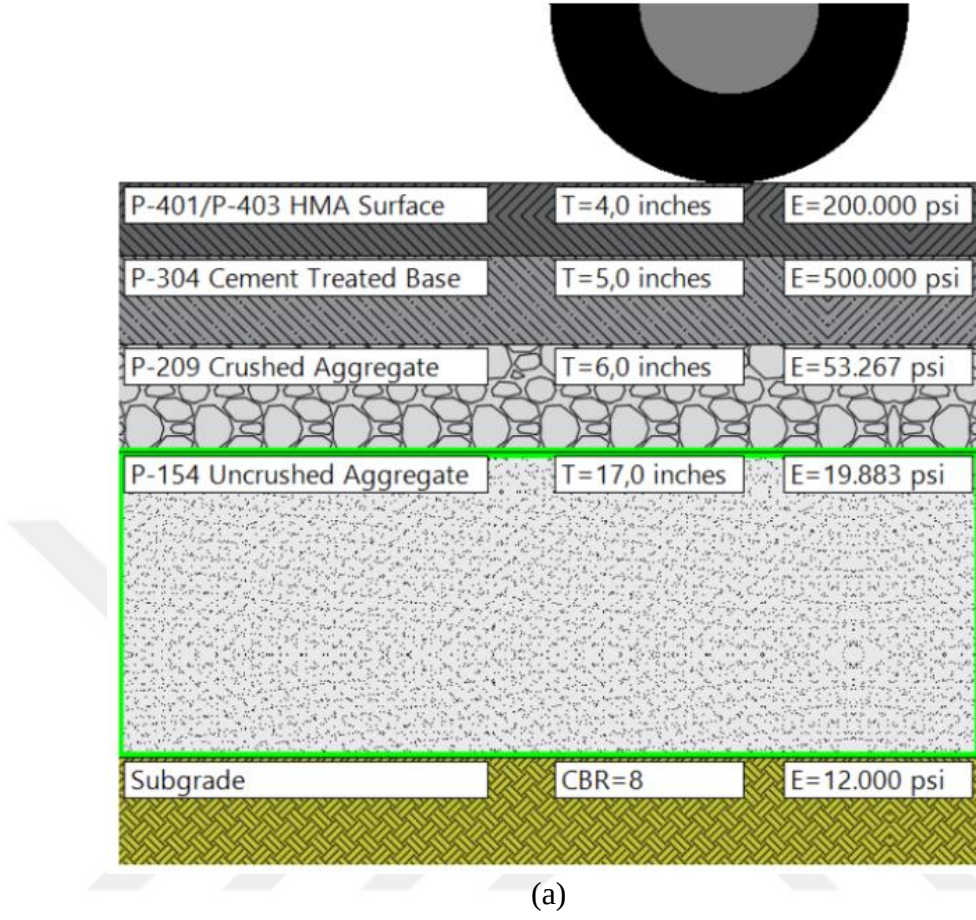
Yükleme sonrası üst kaplama altındaki düşey deplasmanın 1,424 mm'ye ulaştığı gözlenmiştir. 1. durumda bu değer 0,63 mm iken yetersiz PCR olduğu durumda düşey deplasmanın 2,26 katına çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 64). Basınç ve çekme dayanımının yanı sıra kaplamada deplasman durumu; çatlama, oturma gibi sorunların ortaya çıkmasında önemli bir etkindir. Bu durumda kaplama katman kalınlığının 10 cm daha az olması ve alt katman kalınlık ve elastik modül değerlerinin düşük olması sebebiyle düşey deplasman miktarı 2,26 katına çıkmıştır.



Şekil 65. Taban zemininin üst kısmındaki birim şekil değiştirme, gerinim (ϵ) değeri ($5,49 \times 10^{-3}$)

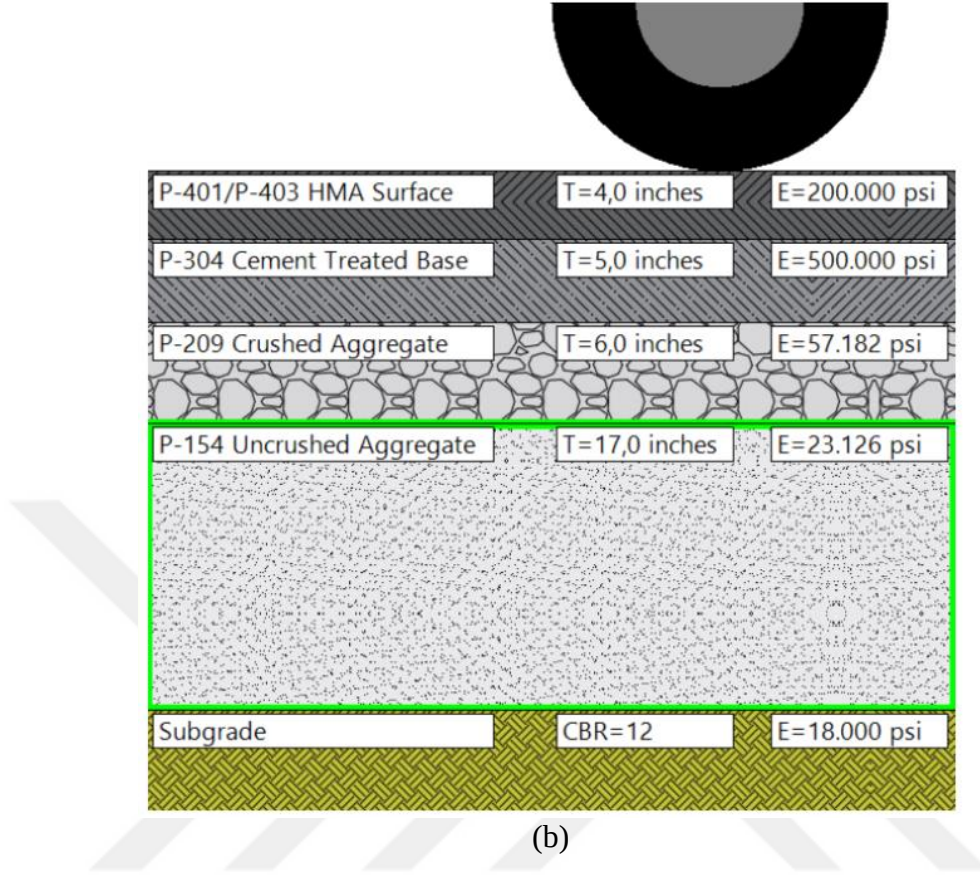
3.4. FAARFIELD Programının Dezavantajları

- FAARFIELD programında taban zemin CBR değeri, alt katman kalınlıklarının (h_3 ve h_4) artmasıyla alt agrega katmanlarının elastisite değerlerinin de kontrol dışı otomatik olarak arttığı görülmüştür. CBR 5 iken kırılmış agrega katmanı elastisite modülü 16.170 psi, CBR 10 iken 21.683 psi, CBR 20 iken 26.662 psi olmaktadır. CBR %100 artarken bir üst katman elastik modül değeri de değişken olarak (%23-34) artmaktadır. Bu durum karayollarında kullanılan yazılım programları ile tezat oluşturabilmektedir.

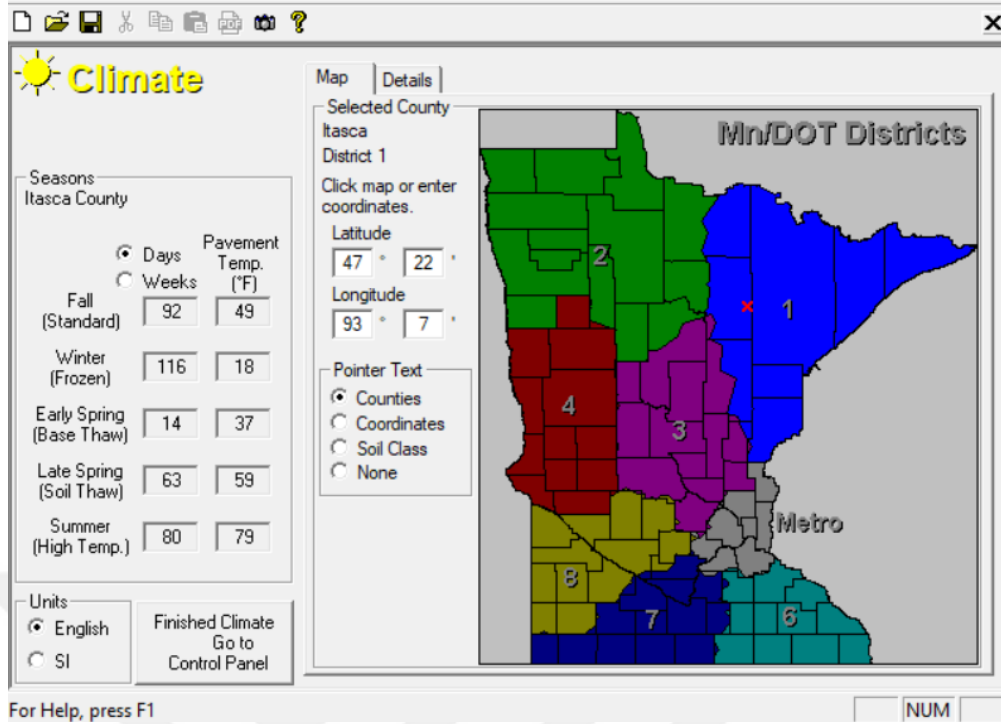


Şekil 66. Kaplama analiz kesitinde taban zemin CBR değeri 8'den (a) 12'ye (b) çıkarıldığında öğütülmüş ve öğütülmemiş agrega elastisite değerlerinin artışı

Şekil 66'nın devamı



- Yorulma (fatigue) etkisi ve tekerlek izi (rutting) deformasyonu FAARFIELD programında bulunmamaktadır.
- FAARFIELD programında katmanların birbiriyle tamamen kenetlenmiş (bonded) olduğu varsayılır ancak sahada bu durum mümkün değildir. Çatlak oluşumunun bir etkeni, tabakalar arası deplasmandan dolayı meydana gelmektedir. Diğer katman analiz programlarında farklı katmanların dış etkenlere, malzeme özelliklerine ve yapım şartlarına bağlı olarak birbiri üzerinde yer değiştirebildiği varsayılır.
- MnPAVE, KENLAYER, Kenslab, MichPAVE, Chevron gibi kabul görmüş yol tasarımı katman analiz programlarında bulunan bazı çevresel faktörlerin (hava-kaplama sıcaklığı, donma-çözünme vb.) etkisi FAARFIELD programında yer almamaktadır.



Şekil 67. MnPAVE programında mevsimsel koşulların düzenlendiği kontrol paneli

- FAARFIELD programında lineer elastik analiz yapılması ile malzemelerin elastik davranış sergilediği kabul edilmiştir. Sahada yapılan uygulamalar sonrasında her durumda elastik davranış mümkün olmamaktadır.

3.5. Kaplama Yazılımlarında Kullanılan Girdiler

Tablo 12’de FAARFIELD, MnPAVE, MichPAVE ve KENLAYER gibi kaplama yazılımlarında, analize esas olarak hangi girdilerin (teker aralığı, lastik basıncı, dingil yükü, hava sıcaklığı, yorgunluk vb.) kullanıldığı gösterilmektedir. Burada kaplama ömrü ve dayanımında etkili olan faktörlerin hangi yazılımlarda kullanılıp kullanılmadığı bilgisi yer almaktadır. Örnek olarak FAARFIELD programında hava sıcaklığı, kaplama sıcaklığı, yorgunluk ve tekerlek izi gibi girdiler kullanılmazken bu girdilerin MnPAVE programında kullanıldığı görülmektedir. Bu verileri kullanarak inşa edilmesi planlanan kaplamaya göre hangi programda analiz yapılacağına karar verilebilir aynı zamanda programların göz ardı ettiği etkenlerin tespiti yapılabilir.

Tablo 12. Kaplama yazılımlarında kullanılan girdiler

		Kaplama Yazılımları			
		FAARFIELD	MnPAVE	MichPAVE	KENLAYER
Girdiler	Tekerlek Aralığı	✓	✓	-	✓
	Lastik Basıncı	✓	✓	✓	-
	Dingil Yüğü	✓	✓	✓	✓
	Hava Sıcaklığı	-	✓	✓	-
	Kaplama Sıcaklığı	-	✓	-	✓
	Asfalt Kaplama	✓	✓	✓	✓
	Beton Kaplama	✓	✓	-	✓
	Periyot (Zaman Dilimi)	✓	✓	-	✓
	Araç Geçiş Sayısı	✓	✓	-	-
	Alt Katman	✓	✓	✓	✓
	Ana Katman	✓	✓	✓	✓
	Yorgunluk	-	✓	✓	-
	Tekerlek izi	-	✓	✓	-
	Tam Bağlı Katman	✓	-	-	✓
	Bağımsız Katman	✓	-	-	✓
	Poisson Oranı	✓	✓	✓	✓
	Elastisite Modülü	✓	✓	✓	✓

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın birinci bölümünde, havaalanı taksi yollarında sefer yapacak belirli bir uçak listesinin FAARFIELD 2.1 programında farklı tip kaplamalarda (esnek veya rijit) elastik modül, katman kalınlığı ve katman cinsinin değişken olması durumunda PCR değerine olan etkisi analiz edilmiştir.

- Farklı katmanlarda ACR değerlerinin kaplama tipi (esnek veya rijit) ve alt zemin kategorileri haricindeki katman kalınlık ve mukavemet değerlerine göre değişmediği, PCR değerinin ise uçak listesi, yıllık kalkış sayısı, katman elastik modülü, alt zemin CBR değeri vb. özelliklerine göre değiştiği görülmüştür.
- PCR, kısaca kaplamanın istenilen operasyonlara yeterliliği olarak belirtilebilir. Yüksek dayanım kriterlerine sahip bir kaplamanın PCR değeri daha fazladır.
- Özellikle ana zemin CBR değerinin PCR üzerinde %98 etkili olduğu gözlenmiştir.
- CBR'daki 1 birimlik artışın PCR üzerinde 74 birimlik artışa sebep olabildiği görülmüştür.
- Esnek kaplamada Elastik modül (E_1) değeri %100 artarken FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %10 arttığı görülmüştür. Bu durumda esnek kaplama elastik modül değişimi; PCR üzerinde CBR'a kıyasla %90 daha az etkili olmuştur.
- E_2 (çimento katkılı katmanın elastisite modülü) değeri %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerinin %4 arttığı görülmüştür. Bu durumda, çimento katkılı katmanın PCR değeri üzerindeki etkisi taban zemini (%98) ve kaplama katmanına (%10) kıyasla daha azdır.
- Esnek kaplama katman kalınlığı (h_1) %100 artarken PCR değerinin %38 arttığı görülmüştür. Kaplama katman kalınlığının PCR değeri üzerinde, kaplama elastisite modülüne kıyasla 4,75 kat daha etkili olduğu görülmüştür.
- h_2 katman kalınlığı (çimento katkılı katman) %100 artarken esnek kaplamada FAARFIELD analizinde PCR değerinin %52 arttığı görülmüştür. 2. katman kalınlığının artışı, h_1 'deki artışa göre PCR'ı yükseltmede %37 daha fazla etkilidir.
- Üst, orta ve alt katman (h_1 , h_2 ve h_3) kalınlıklarının %100 artmasıyla esnek kaplamalarda FAARFIELD 2.1 analizinde PCR değerlerinin sırasıyla %38, %52 ve %65 arttığı görülmüştür. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, katman kalınlığının

PCR değerine olan etkisi, alt katmanlara gidildikçe değişken olarak (%25-37) artmaktadır.

- Her bir alt zemin kategorisi için artan ACN ile sıralanan uçaklarda ACR değerlerinde aynı varyasyonun görülmediği, ACR'nin artış ve azalış şeklinde dalgalanmalar sunduğu gözlemlenmiştir. Bu da ACR'nin CDF varyasyonunu takip etmesi, ACR-PCR raporlama prosedürü için kullanılan modellemenin daha tutarlı olmasından kaynaklanmaktadır.
- Artan ACR değişimine göre sıralanan uçaklarda, dikey gerinim varyasyonunun ACR değerlerini kesin olarak takip etmediği ortaya çıkmıştır. Daha yüksek ACR değerine sahip uçakların kaplamada daha az hasara yol açabileceği gözlemlenmiştir. Bu durum, ACR-PCR sisteminin uygulanmasında bazı tutarsızlıkların mevcut olduğunu göstermektedir.
- Belirli bir uçak listesi için uygun PCN değerine sahip bir pistin, aynı uçakların ACR değerleri söz konusu olduğunda PCR değerinin yetersiz olduğu durum görülmüştür. Bu nedenle, PCR'nin PCN'ye eşdeğer olmadığı ve bu özel durum için uygulanması sırasında daha riske girmek istemeyen bir yöntem olduğu görülmüştür.
- ACR'nin CDF varyasyonunu takip etmesi, tasarım ve değerlendirme prosedürlerinin temel ilkeleriyle tutarlı olması sebebiyle, ACR-PCR raporlama prosedürü için kullanılan modellemenin, ACN için kullanılabilecek daha uygun olduğu görülmüştür.

İkinci bölümde ise FAARFIELD lineer elastik analiz programından elde edilen sonuçların doğruluğunun araştırılması amacıyla FAA uçak listesindeki en yüksek tekerlek yüküne (1,544 MPa) sahip uçaklardan seçilen (Boeing 777-9) yeterli ve yetersiz iki farklı katman kesitine etkisi, Ansys LS-DYNA sonlu elemanlar programıyla da analiz edilmiştir.

- FAARFIELD analizine göre 20 yıllık servis ömrü boyunca kaplamanın yeterli olduğu sonucuna varılan 1. durumda yapılan analiz sonucu C40 betonun karakteristik çekme dayanım sınırına (2,2 MPa) yakın olacak şekilde yeterli olduğu görülmektedir fakat bu durum için tasarlanan kaplamanın PCR değeri yüksek olduğundan (872/R/A/W/T) beklenen sonuç, çekme gerilmesinin (2,0 MPa) daha düşük bir değerde olmasıdır. Kaplamaya etki eden çevresel faktörler (sıcaklık, hazır beton içeriği, zemin koşulları vb.) ve yapım şartları da düşünüldüğünde eksenel çekme gerilmesinin sınıra yakın olması istenilen bir durum değildir. Burada LS-

DYNA modelinin FAARFIELD'a göre daha güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. Katmanlı elastik analizin yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi ile de kaplama analizinin yapılması faydalı olacaktır.

- 1. durumda, derz bölgelerinde derz doğrultusuna dik yönde olan basınç veya çekme gerilmelerinin diğer noktalara kıyasla %32 daha düşük değerde (1,0 MPa) olduğu görülmüştür. 2. durumda da çekme gerilmesi %33 daha düşük çıkmıştır. Genleşme alanı sağlaması ve anolar arasındaki farklı oturmalarda gerilme iletimini sınırlandırması sebebiyle beton kaplamalarda derz boşluklarının bırakılması önem arz etmektedir.
- 40 cm kalınlığındaki beton kaplamalara etkiyen tekerlek yükleri, 30 cm kalınlığındaki beton kaplamaya göre daha geniş bir kaplama kesitine yayılmaktadır. Bu sebeple yüklerin getireceği deformasyonlar kalın kaplamalarda en aza indirgenmektedir.
- Basınç ve çekme dayanımının yanı sıra kaplamada deplasman durumu; çatlama, oturma gibi sorunların ortaya çıkmasında önemli bir etkidir. Bu durumda kaplama katman kalınlığının 10 cm daha az olması ve alt katman kalınlık ve elastik modül değerlerinin düşük olması, düşey deplasman miktarının 2,26 katına çıkmasına sebep olmuştur.

FAARFIELD'da 50 yıldan fazla tasarım ömrü için hesaplama yapılamamaktadır. 20 yıllık ömür için tasarlanan bir kaplamada PCR değerinin en yüksek ACR değerine çok yakın olması durumunda bu pistin 20 yılın sonunda hizmet vermekte zorlanacağı öngörülmektedir.

Havalimanlarındaki pistlerin beklenen ömrü standart 20 yıl olarak öngörülmektedir. 30 yıllık pist ömrü için aynı pist ve uçak listesi kullanıldığında PCR değerinin %2,9 azaldığı görülmüştür. Bu durum, aynı pistten daha fazla hizmet ömrü beklenmesi durumunda, pistin bu hizmet yılına ulaşmasının daha güç olacağı anlamına gelmektedir.

Geçiş/Trafik Döngüsü (P/ TC) oranı arttıkça pist daha çok yıpranacağı için PCR değeri azalmaktadır (%2,8-%4). Paralel taksi yolu senaryosu olan pistlerde kaplamalar daha uzun süre hizmet verebilmektedir. Bu sebeple havalimanı projelerinde paralel tipte taksi yolu tasarlanması önerilmektedir.

Ortalama bir taban zemin değerine ($E=103,42$ MPa (15000 psi)) sahip havaalanı pistlerinde rijit kaplama yapılması durumunda kaplama kalınlığının, kaplama ömrü ve PCR yeterliliği açısından minimum 40 cm olması, rijit kaplama altına 50 cm kalınlığında öğütülmüş agrega katmanı yerleştirilmesi önerilmektedir.

Elde edilen sonuçlar öncülüğünde FAARFIELD programının dezavantajları aşağıda belirtilmiştir:

- Havaalanı kaplamalarında kuma, çatlamlar, çöküntüler, tekerlek izi deformasyonu vb. etkilerin artması, FAA ve benzeri yazılımlardaki hesaplamalarda (beklenen kaplama ömrü ve taşıma kapasitesi) hatalı sonuçlara ulaşılmasına yol açabilir. FAARFIELD yazılımında bu etkilerin yer alması gerektiği gibi havalimanı kaplamalarında da sürekli takip ve bakımların yapılması gerekmektedir.
- Taban zemin CBR değeri ve alt katman kalınlıkları artırıldığında alt agrega katmanlarının elastisite değerlerinin de kontrol dışı artması karayollarında kullanılan yazılım programları ile tezat oluşturabilmektedir.
- Yorulma (fatigue) ve tekerlek izi deformasyonu (rutting damage) FAARFIELD'da yer almamaktadır.
- FAARFIELD programında katmanların birbiriyle tamamen kenetlenmiş (bonded) olduğu varsayılır ancak sahada bu durum mümkün olmayabilir. Çatlak oluşumunun bir etkeni, tabakalar arası deplasmandan dolayı meydana gelmektedir. Diğer katman analiz programlarında farklı katmanların dış etkenlere, malzeme özelliklerine ve yapım şartlarına bağlı olarak birbiri üzerinde yer değiştirebildiği varsayılır.
- MnPAVE, KENLAYER, Kenslab, MichPAVE, Chevron gibi kabul görmüş yol tasarımı katman analiz programlarında bulunan bazı çevresel faktörlerin (hava-kaplama sıcaklığı, donma-çözünme vb.) etkisi FAARFIELD programında yer almamaktadır.
- FAARFIELD programında lineer elastik analiz yapılması ile malzemelerin elastik davranış sergilediği kabul edilmiştir. Sahada yapılan uygulamalar sonrasında her durumda elastik davranış mümkün olmayabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abdalfattah, I., Alabasey, R., Azam, A., El-Badawy, S. & Gabr, A. (2015). Evaluation of Polymer Modified Asphalt Mixtures in Pavement. 8. *Uluslararası Mühendislik Konferansı*, Sharm Al-Shiekh, Egypt.
- Armeni, A. & Loizos, A. (2022). Preliminary Evaluation Of The ACR-PCR System For Reporting The Bearing Capacity of Flexible Airfield Pavements. *Transportation Engineering*, 8, Athens.
- Brill, D. (2020). *ACR/PCR Overview*. Federal Aviation Administration, Washington, DC.
- Defence Estates, Ministry of Defence (2005). *Reflection Cracking on Airfield Pavements*. Sutton Coldfield.
- Faarfield 2.1 (2023, Ekim 19), Defining Pavement Structure, Material Library, General Layers. Federal Aviation Administration, Washington, DC.
- Garg, N., Guo, E. & McQueen, R. (2004), Operational Life of Airport Pavements Final Report. U.S. Department of Transportation, *Federal Aviation Administration*, Springfield.
- Khazanovich, L. & Wang, Q. (2007). MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Li, S., Tang, L. & Yao, K. (2020). Comparison of Two Typical Professional Programs for Mechanical Analysis of Interlayer Bonding of Asphalt Pavement Structure. *Advances in Materials Science and Engineering*, Urumuqi, Chengdu, China.
- Mahaffay, B., Robinson, J., Gagnon, J. & Norwood, G. (2019). Using Geosynthetics In Flexible Airport Pavements. *Geosynthetics Magazine*: www.geosyntheticsmagazine.com/2019/06/01/using-geosynthetics-in-flexible-airport-pavements adresinden alınmıştır.
- Muniandy, R., Aburkaba, E. & Thamer, N. (2013). Comparison of Flexible Pavement Performance Using Kenlayer and Chev PC Software Program. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 112-68, Selangor, Malaysia.
- Öztürk, T. & Komut, M. (2021), *Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamalar Çatlak Kapama Rehberi*. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Park, D., Buch, N. & Chatti, K. (2000). "Temperature prediction model and correction factors for AC modulus. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 97-111, East Lansing, Michigan.

- Paul, A. (2014, Mayıs 18). *D-Cracking (Durability Cracking) - Cause & Prevention*. Civil Digital: www.civildigital.com/d-cracking-durability-cracking-cause-prevention adresinden alınmıştır.
- T.S.E. (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. *TS-500*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Tuleubekov, K. & Brill, D.R. (2014), Correlation between Subgrade Reaction Modulus and CBR for Airport Pavement Subgrades. *ASCE, Second Transportation & Development Congress*, Orlando, Florida.
- U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (2006). *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN*. Washington, DC: Advisory Circular.
- U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (2021). *Airport Pavement Design and Evaluation*. Washington, DC: Advisory Circular.
- U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (2022). *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCR*. Washington, DC: Advisory Circular.
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2006). *Compilation and Evaluation of Results from High-Performance Concrete Bridge Projects, Volume I: Final Report*. Washington, DC.
- URL-1. (2024, Ocak 17). Federal Havacılık İdaresi: www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2023, Ekim 12). Federal Havacılık İdaresi: www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/Pavement-Design/Extended-Airport-Pavement-Life adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2023, Kasım 15). Federal Havacılık İdaresi: www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/Software-Program-Development-Support adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2023, Kasım 25). Turbosquid: www.turbosquid.com/3d-models/3d-boeing-777-9-aircraft-british-airways-model-1509754 adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Nisan 9). Glenn Research Center, NASA: www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-center-of-gravity/#aerodynamic-control-surfaces adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2023, Kasım 17) Tutorchase: www.tutorchase.com/answers/a-level/physics/how-does-the-thickness-of-a-wire-affect-its-young-s-modulus adresinden alınmıştır.
- Wu, S. & Sargand, S. (2007), Use Of Dynamic Cone Penetrometer In Subgrade and Base Acceptance. *Ohio Research Institute for Transportation and the Environment*, Ohio.

6. EKLER

Ek 1. Betonun Birim Ağırlığı ile Elastisite Modülü İlişkisi

Birim ağırlığı 0,090 ile 0,155 kcf arasında olan betonlar için elastisite modülü E_c şu şekilde alınabilir:

$$E_c = 33000 \cdot w_c^{1,5} \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ek 1})$$

w_c = betonun birim ağırlığı (kef)

f'_c = betonun belirtilen dayanımı (ksi)

Esneklik modülü için Denklem Ek 1 genellikle basınç dayanımı 60 MPa'dan yüksek olan HSC betonlar için uygun olmayabilir (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2022).

Tasarım kodunu seçin:

ACI 318-19 (Metrik)
ACI 318-19 (ABD)
ACI 363R-10 (Metrik)
ACI 363R-10 (ABD)
BS EN 1992-1-1:2004
AS3600-2018
AASHTO-LRFD 2017
IS 456:2000

Denklem seçin:

$E_c = 120,000K_1w_c^{2,0}f'_c{}^{0,33}$ Denklem 5.4.2.4-1
$E_c = 2,500f'_c{}^{0,33}$ Denklem C5.4.2.4-1
$E_c = 33,000K_1w_c^{1,5}\sqrt{f'_c}$ Denklem C5.4.2.4-2
$E_c = 1,820\sqrt{f'_c}$ Denklem C5.4.2.4-3

f'_c , concrete cylinder strength (ksi)

4.35

w_c , concrete density (kips/cu.ft)

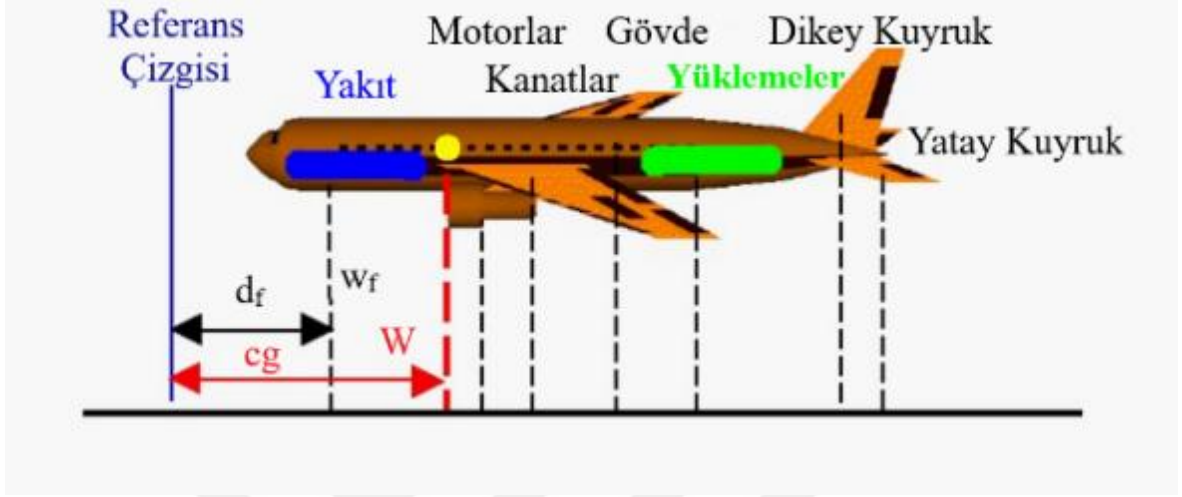
0.124848

Ek Şekil 1. AASHTO elastik modül denklemi

$f'_c=4,35$ ksi değeri (30 MPa silindirik dayanım), $2,4 \text{ gr/cm}^3$ beton yoğunluğu AASHTO denkleminde $E_c=3.036.000$ psi değerini vermektedir. Bu sonuç, FAARFIELD programındaki beton kaplama Elastisite Modülü ile paralellik göstermektedir.

Ek 2. Uçak Ağırlık Merkezi

Bir uçak, birçok parçanın birleşimidir; kanatlar, motorlar, gövde ve kuyruğun yanı sıra yük ve yakıt. Her parçanın, mühendisin Newton'un ağırlık denklemini kullanarak tahmin edebileceği veya hesaplayabileceği, kendisiyle ilişkili bir ağırlığı vardır.



Ek Şekil 2. Uçağın ağırlık merkezi (URL-5, 2024)

Her bileşenin referans çizgisinden belli bir mesafede (d_i) bulunan bir ağırlığı (w_i) vardır. Mesafe (cg) ile ağırlık (w) çarpımı, bileşen mesafeleriyle ağırlık çarpımlarının toplamına eşittir.

$$cg W = d_f w_f + d_e w_e + d_w w_w + d_p w_p + \dots \quad (\text{Ek 2})$$

$$cg W = \sum_i^n (wd)_i \quad (\text{Ek 3})$$

Bir uçak kanatlar, motorlar, gövde ve kuyruğun yanı sıra yük ve yakıttan oluşan birçok parçanın birleşimidir. Her parçanın, mühendisin Newton'un ağırlık denklemini kullanarak tahmin edebileceği veya hesaplayabileceği, kendisiyle ilişkili bir ağırlığı vardır.

$$w = m \cdot g \quad (\text{Ek 4})$$

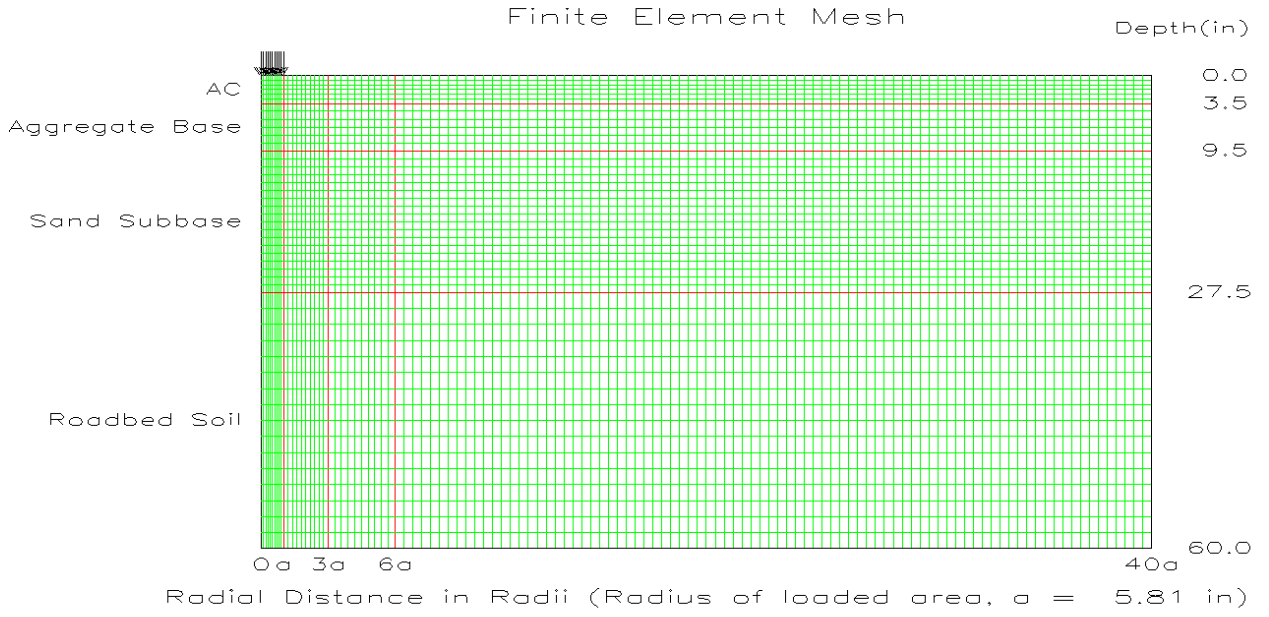
Denklem Ek 4'te; w ağırlık, m kütle ve g yer çekimi sabitidir; bu da İngiliz birimlerinde 32,2 ft/sn ve metrik birimlerde 9,8 metre/sn'dir. Cg ağırlık merkezini belirlemek için bir referans konumu veya referans çizgisi seçilir. Cg bu referans konumuna göre belirlenir. Uçağın toplam ağırlığı, bileşenlerin tek tek ağırlıklarının toplamıdır. Ağırlık merkezi, ağırlığın ortalama konumu olduğundan tüm uçağın ağırlığının W çarpı ağırlık merkezinin konumu cg 'nin; her bir bileşenin ağırlığı (w) çarpı d mesafesinin toplamına eşit olduğunu söyleyebiliriz. Ağırlık merkezi, bileşen konumlarının kütle ağırlıklı ortalamasıdır (URL-5, 2024).

FAA, uçak listesinde, uçak ağırlığının %95'inin iniş takımına aktarıldığını kabul etmektedir. Ön ve arka tekerleklerin kaplamaya uyguladığı basınç değerleri hesaplanırken bu oran dikkate alınmıştır.

Ek 3. MichPAVE

MichPAVE programında yer değiştirmeler, gerilmeler ve gerinimler yalnızca sonlu elemanlarla modellenen bölge içinde hesaplanır.

Tüm üst katmanlarda ve son katman (yol yatağı) için kullanıcı tarafından belirlenen derinlik boyunca doğrusal enterpolasyon fonksiyonlu dikdörtgen dört düğümlü aksinel simetrik sonlu elemanlar kullanılır. Tekerlek temas alanının merkezinden $15a$ ila $40a$ radyal mesafeye bir yanıl sınır yerleştirilir. Burada a , tekerlek temas alanının yarıçapıdır. Başlangıçta varsayılan bir kesit oluşturulur ancak bu kesit kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Varsayılan kesit Ek Şekil 3'te gösterildiği gibidir.



Ek Şekil 3. MichPAVE mekanik analiz kesiti

Radyal yönde, toplam genişlik; 0'dan a 'ya, a 'dan $3a$ 'ya, $3a$ 'dan $6a$ 'ya ve $6a$ 'dan yan sınıra olmak üzere dört bölgeye bölünür. Bir bölgedeki tüm elemanlar aynı yatay boyuta sahiptir. Yan sınırın varsayılan konumu, ilk (AC) katmanın kalınlığına bağlı olarak $15a$ ila $40a$ arasında değişir.

Ek 4. CHEV PC

Chev PC programı, kişisel bilgisayarlarda (PC) çalışmak üzere uyarlanmış bir bilgisayar programıdır (ilk olarak Chevron Oil Company tarafından geliştirilmiştir) ve Chevron Elastik Katman Analizi Programının Fortran programının PC versiyonudur. Bu program, bilinen tek bir tekerlek yükü, tabaka elastik modülleri ve ilgili kalınlığa bağlı olarak bir kaplama yapısına yönelik gerilimleri, gerinimleri ve sapmaları tahmin etmek için elastik analiz kullanır. Program, katmanlı bir kaplama sistemindeki statik yük(ler) nedeniyle gerilmeyi, gerinimi veya sapmayı tahmin etmek için kullanılabilir. Her katman için elastisite modülü, Poisson oranı ve kalınlığı tanımlanmalıdır. Ayrıca, dikkate alınan her yük (tekerlek) için yük büyüklüğü, temas basıncı (veya yük yarıçapı) ve konumu tanımlanmalıdır. Çok Katmanlı Elastik Sistem Bilgisayar Programı (CHEVPC), üç boyutlu bir idealde çeşitli bileşen gerilimlerini ve gerinimlerini belirleyecektir. Sistemin alt katmanı yarı sonsuzdur ve diğer tüm katmanlar aynı kalınlıktadır. Tüm katmanlar yatay yönde sonsuz bir şekilde uzanır. Sistemin üst yüzeyi kaymadan arındırılmıştır ve katmanlar arasındaki tüm arayüzler tam gerilim ve yer değiştirme sürekliliğine sahiptir. Dikey düzgün dairesel yük ile sistem, katmanlara dik olan ve yükün merkezinden uzanan Z eksenine göre simetriktir. Silindirik koordinatlar kullanılarak sistemdeki herhangi bir nokta Rand Z değerleri ile tanımlanabilir. R, yükün merkezinden dışarı doğru olan yatay radyal mesafedir ve Z, sistem yüzeyinden dikey olarak ölçülen noktanın derinliğidir. Yük, pound (lbs) cinsinden toplam dikey yük ve inç kare başına pound (psi) cinsinden temas basıncı ile tanımlanır. Yük yarıçapı program tarafından hesaplanır. Sistemin her katmanı esneklik modülü (E), Poisson oranı (ν) ve inç (h) cinsinden kalınlıkla tanımlanır. Her katman numaralandırılır; üstteki katman 1 olacak ve altındaki her katman ardışık olarak numaralandırılacaktır.

CHEV PC bilgisayar programındaki giriş parametreleri; katman sayısı, katmanların Young modülü, katmanların Poisson oranları, katmanların kalınlığı (yarı sonsuz taban katmanı hariç), yükün büyüklüğü, yüklerin konumlarının koordinatları, çıkışın gerekli olduğu konumların koordinatları olarak sıralanabilir. Yüklerin merkezi ve gerilmelerin, gerinimlerin ve yer değiştirmelerin hesaplanması gereken konumlar girilir.

CHEV PC bilgisayar programı; program ana gerilmeleri, gerinimleri, sehimleri ve bunlara karşılık gelen ana yönleri hesaplar (Muniandy vd., 2013).

Ek 5. Malzemelerin Kalınlığı ile Elastik Modül Arasındaki İlişki

Young modülü bir malzemenin sertliğinin bir ölçüsüdür ve çekme veya basma kuvvetleri altındaki gerilimin gerinime oranı olarak tanımlanır. Malzemenin kendisine ait bir özelliktir ve o malzemeden yapılan nesnenin boyutlarından etkilenmez. Bir telin kalınlığı, onun mukavemetini ve bükülme veya kopmaya karşı direncini etkileyebilir, ancak Young modülünü etkilemez. Bu, kalın tel ile aynı malzemeden yapılmış ince bir telin, kalın tel ile aynı Young modülüne sahip olacağı anlamına gelir. Ancak telin kalınlığı onun esnekliğini ve esnekliğini etkileyebilir. Daha kalın bir tel, daha ince bir tele göre daha az esnek ve daha sert olabilir; bu da belirli koşullar altında davranışını etkileyebilir.

Özetle, bir telin kalınlığı Young modülünü etkilemez ancak mukavemet ve esneklik gibi diğer özellikleri etkileyebilir (URL-6, 2023).



Ek 6. Orta Derinlik Sıcaklığının İstatistiksel Tahmini

AC katmanının orta derinliğindeki sıcaklığı yüzeyde ölçülen sıcaklıktan tahmin etmek için aşağıdaki ampirik denklem kullanılır (Park vd. 2000):

$$T_h = T_{surf} + (-0,3451h - 0,0432h^2 + 0,00196h^3) \sin(-6,3252t + 5,0967) \quad (\text{Ek 5})$$

T_h = h derinliğindeki AC sıcaklığı, °C cinsinden

T_{surf} = °C cinsinden yüzeydeki AC sıcaklığı

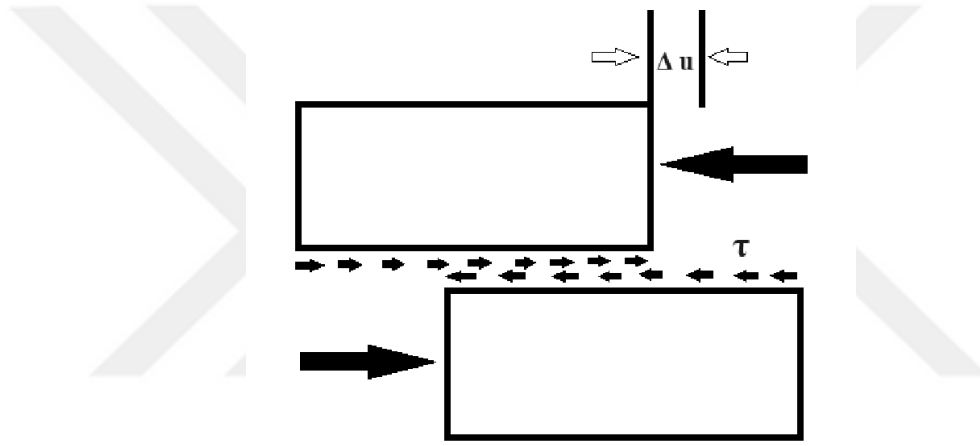
h = Sıcaklığın cm cinsinden belirleneceği AC'nin orta derinliği.

t = AC yüzey sıcaklığının gün cinsinden ölçüldüğü süre ($0 < t < 1$, örneğin 13:30 = 13,5/24 = 0,5625 gün)

Ek 7. Goodman Modeli

Goodman modeli, kesme yayı modeli ve Coulomb modeli, katmanlar arası bağlanma durumunun değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan üç modeldir. Goodman modeli üstyapının analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem BISAR3.0 hem de EverStressFE programları, katman arayüzünün simülasyonunda Goodman modelini temel almaktadır. Bu modelin ifadesi Ek Şekil 4'te gösterilmektedir. Direkt kesme testi ile birleştirildiğinde, belirli bir koşul altında test parçasının katmanlar arası ortalama kesme mukavemeti elde edilebilir ve bu durum katmanlar arası yapışma katsayısı K ile ifade edilir. Katmanlar arasındaki yer değiştirme Δu 'dur, katmanlar arası yapışma katsayısı K ve katmanlar arası kayma gerilimi τ , Denklem Ek 6'daki gibi ifade edilir:

$$\tau = k \cdot \Delta u \quad (\text{Ek 6})$$



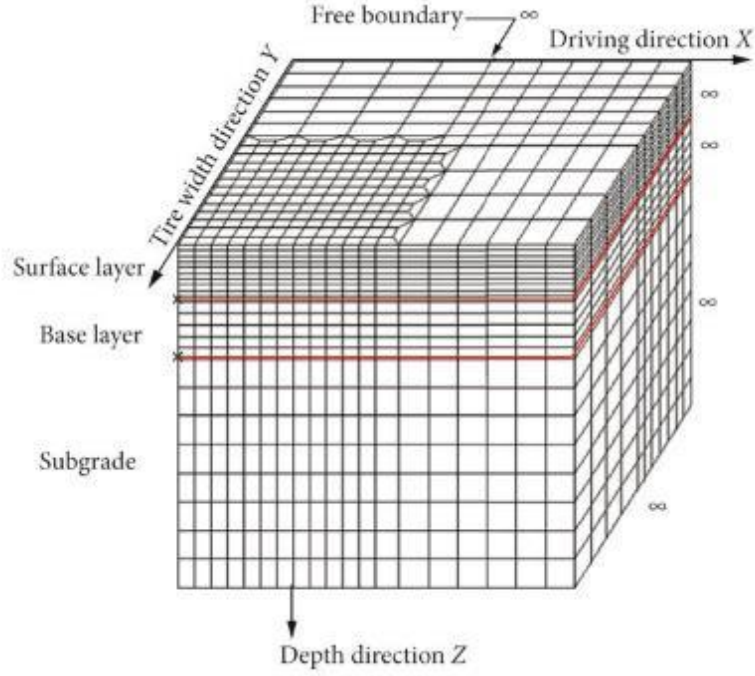
Ek Şekil 4. Goodman Modeli

Katmanlar arası bağlanma durumunu K katsayısı ile tanımlamanın açık bir fiziksel anlamı vardır. $K \rightarrow 0$ olduğunda, ara katman tamamen bağlanma eğilimindedir. $K \rightarrow \infty$ olduğunda ara katman tamamen kayma eğilimindedir. Ve $0 < K < \infty$ olduğunda, ara katman tamamen kayma ile tamamen bağlanma arasındaki durumdur. BISAR3.0 programı, Goodman mekanik modelinin temelini birleştirerek katmanlar arası bağlanmanın simülasyonunda küçük bir değişiklik yapar. Üst ve alt yatay yapısal katmanlar arasındaki arayüz sonsuz ince bir ara katman olarak kabul edilir. Katmanlar arası bağlanma durumunun değeri, Goodman modelinin katmanlar arası bağlanma katsayısı K 'nın tersi olan AK ile ifade edilir (Li vd. 2020).

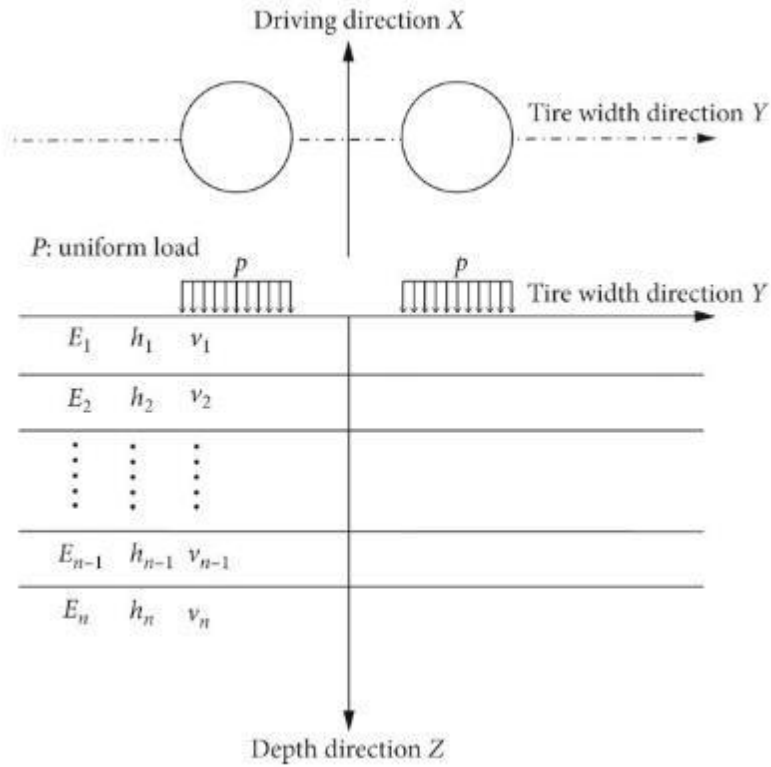
Bu tez çalışması kapsamında yapılan FAARFIELD analizlerinde katmanlar birbiri ile kenetlenmiş olarak varsayılır. Saha çalışmalarında bu durumun aksine katmanlar arası yer değiştirme söz konusudur. Bu da çatlak vb. deformasyonlara sebep olur.

Ek 7'nin devamı

AK=katmanların göreceli yatay yer değıştirmesi/ara yüzeyde etkili olan gerilmeler



Ek Şekil 5. 3 boyutlu sonlu elemanlarda katman gösterimi (Li vd. 2020)



Ek Şekil 6. Elastik katman analizinde (LEA) katman gösterimi (Li vd. 2020)

ÖZGEÇMİŞ

Hakan KILIÇASLAN, ilköğrenimini Trabzon Mimar Sinan İlköğretim Okulunda bitirdikten sonra lise eğitimini 2011 yılında Trabzon Kanuni Anadolu Lisesinde tamamladı. 2011-2012 öğretim yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2015 yılında bu bölümden mezun oldu. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim dalında başladığı tezsiz yüksek lisans programını 2018 yılında tamamladı. Aynı yıl içerisinde Devlet Su İşleri 22. Bölge Müdürlüğünde İnşaat Mühendisi olarak göreve başladı. Gölet, taşkın kontrol tesisi, hidroelektrik santral vb. projelerde kontrollük faaliyetlerini yürütürken 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. Halen DSİ'de görevine devam etmektedir. İyi derece İngilizce bilmektedir.