

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

DOKTORA TEZİ

**MODÜLER BETON YOL (MBY) KAPLAMA SİSTEMİ VE TEKRARLI
YÜKLER ALTINDA DİNAMİK DAVRANIŞI**

Egemen KAYA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2024**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	16
3.1. Materyal	16
3.1.1. Modüler yol betonlarının malzeme özellikleri	16
3.1.2. Yol tabakaları ve saha test araçlarının özellikleri	18
3.2. Yöntem	22
3.2.1. Optimizasyon çalışmasında kullanılan numunelerin üretilmesi	23
3.2.2. Optimizasyon çalışmasında kullanılan numunelerin laboratuvar testleri	31
3.2.3. Optimizasyon çalışması	33
3.2.4. MBY sisteminin sahada oluşturulması ve test alanının hazırlanması	34
3.2.4. Saha testinin yapılması	37
3.2.5. MBY sistemin üç boyutlu modeli ve 3B-SEM ile analizi	40
3.2.5.1. Üç boyutlu katı model	40
3.2.5.2. Malzeme parametreleri	42
3.2.5.3. Model geometrisi, sınır şartları ve tekerlek yükleri	43
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	47
4.1. Optimizasyon çalışmasında kullanılan numunelerin test sonuçları	47
4.2. Optimizasyon çalışması sonuçları	52
4.3. Saha testi ve 3B-SEM sonuçları	65
4.4. Parametrik 3B-SEM analizleri	73
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	81
5.1. Sonuçlar	81
5.2. Öneriler	83
KAYNAKÇA	84
ÖZGEÇMİŞ	92

ÖZET

Doktora Tezi

MODÜLER BETON YOL (MBY) KAPLAMA SİSTEMİ VE TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DİNAMİK DAVRANIŞI

Egemen KAYA

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN
Yıl: 2024, Sayfa: 92

Rijit ve esnek üstyapılar, karayolunun kullanıma açılması için geçen sürenin yanı sıra inşa tekniğinin pratikliği açısından çeşitli eksikliklere ve üstünlüklere sahiptirler. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında önceden üretilen modüler elemanların birleştirilmesi ile sahada pratik bir şekilde oluşturulabilen ve hemen kullanıma sunulabilen üstün mekanik özelliklere sahip bir kaplama olan Modüler Beton Yol (MBY) sisteminin uygulanabilirliği ve dinamik ağır taşıt yükü altındaki davranışı incelenmiştir. İlk aşamada modüler elemanların maliyet ve mekanik özellikleri açısından optimum sınırlarını belirlemek amacıyla laboratuvar ortamında bir dizi parametrik deneysel çalışma yapılmıştır. Modüler elemanlar, tabakalı şekilde üretilmiş olup üst ve alt tabakalarda farklı kalınlıklarda yüksek dayanımlı özel bir lifli beton türü olan Çimento Harcı Emdirilmiş Lifli Beton- (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) (SIFCON) kullanılmıştır. Tabaka kalınlıkları ve bu tabakalarda bulunan lif uzunlukları değiştirilerek laboratuvar ortamında üretilmiş ve test edilmiştir. Elde edilen deneysel verilere göre Tepki Yüzey Optimizasyon Metodu (Response Surface Method, RSM) kullanılarak tabaka kalınlığı ve lif uzunluğu optimum sınırları belirlenmiş olup kapsamlı parametrik çalışmanın deneysel sonuçları üzerinde çok amaçlı verimlilik analizi yürütülmüştür. Optimum verimlilik sınırları bir dizi çok amaçlı analize dayanan ikili optimizasyon dikkate alınarak belirlenmiştir. Sonraki aşamada optimum verimlilik sınırları içerisinde bulunan üstün mekanik özelliklere sahip pratik bir şekilde üretilen bir numune, arazide MBY kaplama sistemi olarak kullanılmak üzere modüler eleman olarak belirlenmiştir. Bu modüler elemanların sahada birleştirilmesi ile oluşturulan MBY kaplama sistemi üzerinden spesifik hale getirilmiş bir konumda yasal maksimum sınıra kadar yüklenmiş damperli kamyon nominal hız değerinde geçirilerek kaplama yüzeyindeki düşey deformasyonların ölçülmesi sağlanmıştır. Sahada gerçekleştirilen bu analiz, arazi ve yükleme koşullarına uygun üç boyutlu bir model oluşturularak tekrarlı yükler altında dinamik sonlu eleman analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen kaplama yüzeyi düşey deformasyon değerleri ile sahada ölçülen değerler karşılaştırılarak analiz kalibrasyonu ve doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, özgün MBY karayolu sistemi ve SIFCON kaplama uygulamasına yönelik verimlilik analizi konularına ek olarak 3B-SE çözümlenmeleri açısından da bu tez çalışmasında orijinal teknikler geliştirilmiştir. Örneğin, günümüzde yaygınlaşan mekanistik tasarımlar için kullanılacak, karayolunda farklı malzeme uygulamaları ve arazi koşullarında sayısal analiz temelli, süspansiyon ve dinamik dönüş hareketini dikkate alabilen karayolu tepkilerinin çözümüne yönelik bir teknik de geliştirilmiştir. MBY kaplama sistemi yüzeyinde meydana gelen düşey deformasyon değerlerinin, literatürdeki benzer çalışmalardaki düşey deformasyon değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Optimizasyon işlemleri sonucunda rijit yol üstyapı uygulaması konusunda sonraki çalışmalara yol gösterebilecek optimum verimlilik sınırlarına ulaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Rijit Yol Üstyapısı, Tepki Yüzey Metodu, Sonlu Elemanlar Metodu, Çimento Harcı Emdirilmiş Lifli Beton

ABSTRACT

PhD Thesis

MODULAR CONCRETE ROAD (MCR) WEARING COURSE SYSTEM AND DYNAMIC BEHAVIOUR UNDER THE REPETITIVE LOADING

Egemen KAYA

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Halil Murat ALGIN
Year: 2024, Page: 92

Rigid and flexible pavements have various shortcomings and advantages in terms of the time it takes to put the highway into use as well as the practicality of the construction technique. In this study, the applicability of Modular Concrete Road (MCR) system, which is a pavement with superior mechanical properties that can be practically constructed in the field by combining prefabricated modular elements in the laboratory and can be immediately put into use, and its behavior under dynamic heavy vehicle loading were investigated. In the first stage, a series of parametric experimental studies were carried out in the laboratory to determine the optimum limits of the modular elements in terms of cost and mechanical properties. The modular elements were produced in layers and Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), a special type of high strength fiber concrete, was used in different thicknesses in the upper and lower layers. Samples were produced and tested in the laboratory by varying the layer thicknesses and fiber lengths in these layers. Based on the experimental data obtained, the Response Surface Method (RSM) was used to determine the optimum limits of layer thickness and fiber length, and a multi-objective efficiency analysis was performed on the experimental results of the comprehensive parametric study. The optimum efficiency limits were determined by considering binary optimization based on a series of multi-objective analyses. In the next stage, a practically manufacturable sample with superior mechanical properties within the optimum efficiency limits was determined as a modular element to be used as an MBM coating system in the field. By combining these modular elements in the field, a dump truck loaded to the legal maximum limit at a specific location was passed over the MBY pavement system at the nominal speed value and the vertical deformations on the pavement surface were measured. This analysis performed in the field was subjected to dynamic finite element analysis under repetitive loads by creating a three-dimensional model suitable for the terrain and loading conditions. The obtained pavement surface vertical deformation values were compared with the measured values in the field to calibrate and validate the analysis. Thus, in addition to the efficiency analysis for the original MBY highway system and SIFCON pavement application, original techniques have been developed in this thesis in terms of 3D-SE analysis. For instance, a technique for solving highway responses based on numerical analysis for varying material applications and site conditions, taking into account suspension and dynamic rolling motion, has also been introduced for mechanistic design implementations that are currently becoming more common practice. It was observed that the vertical deformation values occurring on the surface of the MBY pavement system are consistent with the vertical deformation values in similar studies in the literature. As a result of the optimization process, optimum efficiency limits have been reached that can guide future studies on rigid pavement application.

KEY WORDS: Rigid Pavement, Response Surface Method, Finite Element Method, Slurry Infiltrated Fiber Concrete

TEŞEKKÜR

Tez hazırlama sürecimde her aşamada bana yol gösteren ve hiçbir yardımı esirgemeyen çok değerli bir akademisyen olmanın yanında çok kıymetli bir insan olan danışmanım Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN'a (Harran Üniversitesi), büyük katkılarından dolayı değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÇALIŞICI'ya (İskenderun Teknik Üniversitesi), Dr. Öğr. Üyesi Arda Burak EKMEN'e (Harran Üniversitesi), Dr. Öğr. Üyesi M. Fethi GÜLLÜ'ye (Harran Üniversitesi), Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne, Mersin Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge birimine, sayın Ergun YALÇIN'a, sayın Mustafa BELEN'e ve personellerine, Şanlıurfa Haliliye Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığına, sayın Halil GÖKTAŞ'a ve personellerine, değerli eşim Dr. Öğr. Üyesi Rabia KAYA'ya teşekkür ederim.



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 3.1. Çelik lif (a), silis dumanı (b), doğal kum (c).....	17
Şekil 3.2. Test alanı.....	19
Şekil 3.3. Tabaka kalınlıkları	19
Şekil 3.4. Modüler beton yol (MBY) kaplaması	21
Şekil 3.5. Çelik gijon tijler (a), plaklar ve somunlara (b) ait görseller	21
Şekil 3.6. Damperli kamyon dingil ve tekerlek konfigürasyonu	22
Şekil 3.7. Yayılma çapı deneyi.....	27
Şekil 3.8. Alt tabaka liflerin serimi	28
Şekil 3.9. Ara tabaka tamamlanana kadar sürdürülen beton dökümü	29
Şekil 3.10. Üst tabaka liflerin serimi.....	29
Şekil 3.11. Üst tabaka tamamlanana kadar sürdürülen beton dökümü.....	30
Şekil 3.12. Kür havuzunda bekletilen numuneler	30
Şekil 3.13. Eğilme test cihazı	31
Şekil 3.14. Basınç test cihazı.....	32
Şekil 3.15. Deforme olmuş eğilme dayanımı testi numuneleri	32
Şekil 3.16. Deforme olmuş basınç dayanımı testi numuneleri	33
Şekil 3.17. SIFCON tabaka kalınlığı parametrelerinin değişimine ait görsel	34
Şekil 3.18. Beton yol modülü üstten (a) ve yandan (b) görünüşü	35
Şekil 3.19. Test alanının yüklemeye hazır halini.....	37
Şekil 3.20. Yükleme ve deformasyon ölçüm şeması.....	38
Şekil 3.21. Damperli kamyonun hareket halinde iken modüler beton yol kaplama üzerindeki durumu	39
Şekil 3.22. Analiz edilecek sistemin katı modeli (önden görünüş)	40
Şekil 3.23. Analiz edilecek sistemin katı modeli (yandan görünüş).....	41
Şekil 3.24. Analiz edilecek sistemin katı modeli (kaplama detayları).....	41
Şekil 3.25. Model tabanı ve kenarları sınır şartları	44
Şekil 3.26. Büyük ölçekli kesme kutusu testi.....	45
Şekil 3.27. Sonlu elemanlar ağı yandan görünüş	45
Şekil 3.28. Sonlu elemanlar ağından bir kesit	46
Şekil 4.1. Eğilme dayanımı sonuçları – 7 günlük.....	47
Şekil 4.2. Eğilme dayanımı sonuçları – 28 günlük.....	48
Şekil 4.3. Basınç dayanımı sonuçları – 7 günlük	48
Şekil 4.4. Basınç dayanımı sonuçları – 28 günlük	49
Şekil 4.5. Numunelerin üretim maliyeti değerleri.....	50
Şekil 4.6. 7 gün tokluk değerleri	51
Şekil 4.7. 28 gün tokluk değerleri	51
Şekil 4.8. Optimizasyon işlemine ait girdilerin çıktılar ile olan ilişkisi	59
Şekil 4.9. Tabaka kalınlığı ile maliyet ilişkisi	59
Şekil 4.10. RSM yüzeyleri üzerindeki arzu edilebilirlik çözümlerinin değişimi.....	60
Şekil 4.11. Çizelge 4.2.'de tanımlanan hedeflere ve eğilme dayanımının ikili optimizasyonuna dayalı optimum verimlilik sınırları (a) f_{28-day} ve σ_{28-day} uzayında, (b) Cost ve f_{28-day} uzayında, (c) K_{28-day} ve f_{28-day} uzayında, (d) t_l ve K_{28-day} uzayında.....	61
Şekil 4.12. Modüler beton yol üzerindeki noktalardan ölçülen düşey deformasyonlar (saha sonuçları)	65
Şekil 4.13. Modüler beton yol üzerindeki noktalardan ölçülen düşey deformasyonlar (sonlu elemanlar analizi sonuçları).....	66
Şekil 4.14. Ön ve arka dingillerde bulunan tekerleklerin, modüler beton yol sistemi üzerindeki hareketi	67
Şekil 4.15. Ön dingildeki tekerlek kaplama üzerinde.....	68
Şekil 4.16. Birinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde	68
Şekil 4.17. İkinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde	69

Şekil 4.18. Ön dingildeki tekerlek kaplama üzerinde (yakından görünüş).....	69
Şekil 4.19. Birinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde (yakından görünüş)	70
Şekil 4.20. İkinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde (yakından görünüş)	70
Şekil 4.21. 10 farklı nokta için saha ve sonlu elemanlar analizi düşey deformasyon sonuçlarının karşılaştırılması	72
Şekil 4.22. Gijon tijlerde oluşan maksimum gerilmeler	73
Şekil 4.23. 3B-SEM parametrik analizlerinden düşey deformasyon değeri açısından en kritik olanların sonuçları.....	74
Şekil 4.24. Düşey deformasyonların karşılaştırılması	75
Şekil 4.25. Üç kademede hızın sabit kaldığı durumda gerilme ve tekerrür sayısına bağlı olarak deformasyon değişiminin üç boyutlu gösterimi a) Hız= 5 km/s b) Hız= 10 km/s c) Hız= 15km/s.....	76
Şekil 4.26. Üç kademede gerilmenin sabit kaldığı durumda hız ve tekerrür sayısına bağlı olarak deformasyon değişiminin üç boyutlu gösterimi a) Gerilme=3.7 (MPa) b) Gerilme=7.4 (MPa) c) Gerilme=11.1 (MPa).....	78
Şekil 4.27. Üç kademede tekerrür sayısının sabit kaldığı durumda gerilme ve hıza bağlı olarak deformasyon değişiminin üç boyutlu gösterimi a) 1 tekerrür b) 5 tekerrür c) 10 tekerrür	79
Şekil 4.28. MBY kaplama sistemi için alternatif olarak kullanımını öngördüğümüz ve patentini aldığımız paternlerin görselleri	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	17
Çizelge 3.2. Çimento ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	18
Çizelge 3.3. Taban zemini, seçme malzeme ve temel tabakaları özellikleri	20
Çizelge 3.4. Asfalt betonun mekanik özellikleri	20
Çizelge 3.5. Çelik gijon tijlerin boyutları ve mekanik özellikleri	22
Çizelge 3.6. Karışım oranları	23
Çizelge 3.7. Eğilme numune kodları, tabaka kalınlıkları ve lif uzunlukları.....	25
Çizelge 3.8. Basınç numune kodları, tabaka kalınlıkları ve lif uzunlukları.....	26
Çizelge 3.9. Taban zemini, seçme malzeme, temel ve asfalt tabakaları için kullanılan malzeme parametreleri	42
Çizelge 3.10. Taban zemini, seçme malzeme, temel ve asfalt tabakaları için kullanılan malzeme parametreleri	42
Çizelge 3.11. Beton yol modülleri ve çelik gijon tijler için kullanılan malzeme parametreleri	43
Çizelge 3.12. Süspansiyon parametreleri	44

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SIFCON	Çimento Harcı Emdirilmiş Lifli Beton- (Slurry Infiltrated Fiber Concrete)
MBY	Modüler Beton Yol
RSM	Tepki Yüzey Optimizasyon Metodu (Response Surface Method)
3B-SEM	Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu
HPFRC	Yüksek Dayanımlı Lifli Beton (High Performance Fiber Reinforced Concrete)
RC	Geleneksel Beton (Reinforced Concrete)
FRC	Lifli Beton (Fiber Reinforced Concrete)
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı (California Bearing Ratio)



1. GİRİŞ

Karayolları Genel Müdürlüğü Kurumsal Yol Ağı bilgilerine göre 01.01.2023 tarihi itibarıyla Türkiye Otoyol, Devlet ve İl Yollarının toplam uzunluğu 68 689 km'dir. Bu uzunluğun, yaklaşık yüzde 43'ü asfalt betonu, yüzde 53'ü sathi kaplama olmak üzere toplamda yüzde 90'dan fazlasını asfalt kaplamalar teşkil etmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2024). Benzer şekilde, Avrupa Asfalt Kaplama Birliği'ne göre, Avrupa yol ağının yüzde 90'ından fazlası asfaltla kaplıdır. Sürekli artan trafik hacmi ve iklim değişikliği mevcut kaplamaların bozulmasını hızlandırmaktadır. Onarım ve rehabilitasyon çalışmaları, trafiğin yoğun olduğu yollarda ve kentsel caddelerde en önemli sorunlardan biri olan trafik sıkışıklığına yol açmaktadır. Prekast beton plakalardan oluşan beton modüler kaplamalar, hem yapıları hem de onarımları zaman tasarrufu sağladığından yol işlerinin üstesinden gelmek için makul bir çözümdür. Onarım çalışmaları genellikle trafiğin az olduğu bir dönemde (genellikle geceleri) gerçekleştirilir. Beton modüler kaplamaların birincil amacı yoğun trafiğe sahip yollar ve diğer ulaşım alanlarıdır. (Vatkus ve ark., 2019). Bu tez çalışmasında tercih edilen modüler kaplama, prekast olup özel bir beton türü kullanılarak oluşturulmuştur. Yüksek dayanımlı özel bir lifli beton türü olan çimento harcı emdirilmiş lifli beton- (slurry infiltrated fiber concrete) (SIFCON), ilk olarak Lankard tarafından 1979 yılında büyük miktarda çelik lifler yerleştirilen kalıplara çimento harcı içeren akıcı bulamaç uygulanarak geliştirilmiştir (Lankard, 1984). Bu lifler, çimento esaslı kompozit malzemenin sünek davranış sergilemesini sağlamakta ve enerji tutma kabiliyetini arttırmaktadır (Taşdemir ve ark., 2002). Yalın betona kıyasla SIFCON, basınç, çekme, eğilme, kesme dayanımı, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikler açısından üstün performans göstermektedir (Tuyan ve Yazıcı, 2012; Beglarigale ve ark., 2016). Bu üstün mekanik özellikler, çelik liflerin geometrisi, narinliği, hacim oranı, yayılımı ve çimento harcı içeren bulamacın dayanım performansı ile ilişkilidir (Naaman ve ark., 1992; Beglarigale ve ark., 2016). Geleneksel lifli betonlarda kullanılan lif miktarı hacimce yüzde 1 ile 3 arasında olmasına rağmen özel teknikler ile hazırlanan SIFCON numunelerde çelik lifler, geometrik özelliklere bağlı olarak, hacimce yüzde 5 ile 20 aralığında olmaktadır (Sharma ve ark., 2008; Tuyan ve Yazıcı, 2012; Taşdemir ve ark., 2002). Hem geleneksel lifli betonda hem de SIFCON'da liflerin karışık bir şekilde kalıba yerleştirilmesi söz konusudur fakat lif kullanım oranı,

geleneksel lifli betonlar ile SIFCON arasındaki bir farklılık meydana getirmektedir. Ek olarak döküm şekli ve matris birleşimi de diğer farklılıkları oluşturmaktadır çünkü SIFCON’da geleneksel lifli betondaki agreganın aksine çimento harcı içeren akan bir bulamaç bulunmaktadır (Rao ve ark., 2010; Akçaözoğlu ve Kılılı, 2021). SIFCON bulamacı, portland çimentosu, su, çok ince agrega, süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanının karışımı ile elde edilir. Kullanılan çimento miktarını düşürmesi, bulamacın işlenebilirliğini arttırması ve rötreyi azaltması sebebiyle bazen ek bir bileşen olarak uçucu kül de kullanılabilir. Üretim aşamasında çelik lifler kalıba rastgele bir şekilde serpildikten sonra SIFCON bulamacı serili haldeki liflerin üzerine dökülür (Wang ve Maji, 1992; İpek ve Aksu, 2019). Enerji tutma kapasitesinin yüksek olması sebebiyle SIFCON, endüstriyel döşemelerde, güçlendirme işlemlerinde, darbe etkisine uğrayan yapılarda olduğu gibi rijit karayolu kaplamalarında (Naaman ve ark., 1992; Akçaözoğlu ve Kılılı, 2021), rijit kaplamaların ve köprülerin onarımında da kullanılabilir (Rao ve ark., 2010; Tuyan ve Yazıcı, 2012; Bayrak ve ark., 2019).

Çevresel etkiler ve trafik kaynaklı yükler sebebiyle karayolu üstyapısında, birtakım tahribatlar ve şekil değiştirmeler olmakta ve karayolunun servis ömrü azalmaktadır. Üstyapıda meydana gelen tepkilerin sınır değerleri aşmaması amacıyla gerekli tabaka kalınlıklarının ve üstyapı kesitinin tespit edilmesi, üstyapı tasarımı olarak ifade edilebilir (Huang, 2004; Tunç, 2007; Chen, 2009; Bostancıoğlu, 2021). Karayolu üstyapı tabakalarının tasarımı için dünyada genellikle ampirik yaklaşımlar kullanılmaktadır (Şengün ve ark., 2020). Bu yaklaşımlar, gözlem ve deneylere dayanmaktadır (Carvalho, 2006; Özcanan, 2011). Malzeme sayısının, çevre kaynaklı etkilerin ve trafik yüklerinin sınırlı olduğu karayolu testlerinden sağlanan veriler bu yaklaşımlara temel oluşturmaktadır (Huang, 2004; Zheng ve ark., 2012; Lu ve ark., 2014; Ahmed ve Erlingsson, 2016; Bostancıoğlu, 2018). Karayolu üstyapılarını analiz etmek için ise yaygın olarak doğrusal elastik malzeme özelliklerini ve statik yükleme koşullarını kabul eden yaklaşımlar kullanılmaktadır. Gerçekte, üstyapıyı meydana getiren tabakalarda bulunan malzemeler lineer elastik malzemeler değildir. Buna örnek olarak, asfalt karışımların visko-elastik malzemeler ve kohezyonlu zeminlerin elastik-plastik malzemeler oluşu verilebilir. Bunların yanında taşıt yükleri statik değil dinamik yüklerdir. Lineer elastik malzeme kabulü ve statik yükleme varsayımı ile gerçek üstyapı şartları arasındaki farklar, ölçülen ve tahmin edilen üstyapı tepkisi

arasında önemli bir farka sebep olur (Zaghloul, 1993). Günümüzde, teknolojik ilerlemelere bağlı olarak karayolu üstyapı tasarımı konusunda ampirik yöntemlere kıyasla daha gerçekçi ve gelişmiş olması sebebiyle mekanistik yöntemlere yönelik geçişlerin adımları atılmaktadır (Şengün ve ark., 2020). Bu süreç 1960'lı yılların başından itibaren devam etmektedir (Brown, 1977; Huang, 1993; Medina, 1997; Evangelista ve ark., 2006).

Bu çalışmada hem üst hem alt bölgelerinde değişen kalınlıkta SIFCON tabakalar içeren beton yol modüllerinin karayolu üstyapı kaplama tabakası olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır ve dinamik ağır taşıt yükü altındaki performansı incelenmiştir. Öncelikle laboratuvarında beton yol modülleri üretilmiştir. Tabakalar dökülürken epoksi ile yapıştırma, ankraj ile birleştirme gibi tekniklerin aksine farklı bir üretim tekniği tercih edilmiştir. Bu teknik sayesinde SIFCON tabakaların ve bu tabakaların barındırdığı çelik liflerin konumları korunmuş böylelikle numune üretimini kolaylaştırılmıştır. SIFCON tabakaların, konumlarının, kalınlıklarının ve çelik lif uzunluklarının, beton yol modüllerinin, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, tokluk ve üretim maliyeti gibi özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla kapsamlı parametrik çalışmanın deneysel sonuçları üzerinde çok amaçlı verimlilik analizi yürütülmüştür. Optimum verimlilik sınırları, RSM kullanılarak, bir dizi çok amaçlı analize dayanan ikili optimizasyon dikkate alınarak belirlenmiştir (Algin ve ark., 2022). Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü Beton Yollar Teknik Şartnamesi (BYTŞ, 2016) ile sınırlandırılan minimum eğilme ve basınç dayanımı değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Optimizasyon çalışması sonucunda verimlilik sınırları içerisinde kalan ve üretimi nispeten kolay bir numune tipi saha testi için belirlenmiştir. Söz konusu numune tipi laboratuvarında saha testine uygun şekilde üretilerek MBY kaplama sisteminin oluşturulması sağlanmıştır. SIFCON tabakalar içeren modüllerden oluşan, belli bir paterne sahip MBY kaplama sistemi, yapımı devam etmekte olan bir karayolu inşaatının kaplama tabakasını teşkil edecek şekilde serilmiştir. Bu sistem, dinamik damperli kamyon yüküne maruz bırakılarak oluşan düşey deformasyonlar kaydedilmiştir. Ardından söz konusu bu MBY sistemi bilgisayar ortamında modellenmiş ve dinamik yük altında analiz edilmiştir. Saha testinden elde edilen sonuçlar ile bilgisayar ortamında yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak bilgisayar ortamındaki 3B-SEM analizleri doğrulanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Modüler beton kaplamalar 40 yıl boyunca zaman zaman araştırılmıştır. Enine öngerilmeli beton elemanlara sahip prekast öngerilmeli beton kaplamalar (PPCP), güçlendirilmiş veya öngerilmeli beton elemanlara sahip eklemlili prekast beton kaplamalar (JPCP) ve güçlendirilmiş veya öngerilmeli beton elemanlara sahip artımlı bağlantılı prekast beton kaplamalar (ICPCP) olmak üzere üç tip prekast beton kaplama geliştirilmiştir (Vaitkus ve ark., 2019). Prekast öngerilmeli beton kaplama (PPCP), bir dizi enine öngerilmeli elemanın (elemanların üretimi sırasında) şantiyede uzunlamasına yönde birbirine ard-germe ile bağlandığı prekast beton kaplama olarak tanımlanır (Vaitkus ve ark., 2019). Bu ard-germeli paneller bir döşeme oluşturur. Ard-germe çok daha uzun döşemeler (yaklaşık 19,5-99,0 m uzunluğunda) elde edilmesini sağlar ve bu döşemeler etkin bir şekilde derzsizdir. Öngerilmeli beton elemanlara sahip eklemlili prekast beton kaplamalarda (JPCP) ise döşemeler ard-germeli değildir ve her bir döşeme bağımsız olarak, yani her derzde genişler ve daralır. Bu döşemeler üretim sırasında ya güçlendirilir ya da öngerilir. Güçlendirilmiş veya öngerilmeli beton elemanlara sahip artımlı bağlantılı prekast beton kaplamalarda (ICPCP) deforme olmuş dübel çubukları, 18,3-30,5 m'lik bir kesit elde etmek için 4,6-9,1 m uzunluğundaki güçlendirilmiş veya öngerilmeli döşemeleri imalat sırasında bağlamak için kullanılır. Aktif bağlantılar yalnızca bölümler (bağlı döşeme serileri) arasında inşa edilir (Smith ve Snyder, 2017, Vaitkus ve ark., 2019).

Anarım ve rehabilitasyon çalışmaları nedeniyle trafiğin kesintiye uğraması trafik sıkışıklığına yol açmaktadır. Avrupa'da 19 ülkede 200.000'den fazla trafik sıkışıklığının analiz edildiği bir çalışma, trafik sıkışıklığının toplam ekonomik etkisinin 2025 yılına kadar 160 milyar Avro'dan fazla olacağını göstermiştir (Cookson, 2016; Vaitkus ve ark., 2019). ABD Ulaştırma Bakanlığı Federal Karayolu İdaresi Federal Transit İdaresi'ne göre, tüm trafik sıkışıklıklarının yüzde 10'u yol çalışmalarıyla ilgilidir (FTA, 2013; Vaitkus ve ark., 2019). Dolayısıyla, yol çalışmalarının asgari düzeye indirilmesi, önümüzdeki on yıl içerisinde trafik sıkışıklığının ekonomik maliyetini 16 milyar Avro'dan fazla azaltacaktır. Prekast beton kaplamalar olarak da bilinen modüler beton kaplamalar, yapımları zaman kazandırdığı

için yol inşasının pratikleştirilmesinde makul bir çözümdür. Bu çözüm, prekast betonun laboratuvar ortamında önceden üretilmesi ile büyük ölçüde sağlanmaktadır. Tipik prekast beton kaplamalar, geceleri yaklaşık akşam 8'den itibaren ve sabahları yaklaşık sabah 6'ya kadar da inşa edilebildiği gibi soğuk havalarda ve hafif bir yağmur sırasında da inşa edilebilir böylelikle inşaat sezonu zaman aralığı genişler. Doğu ve Kuzey Avrupa'da hızlı bir inşaat çok önemlidir çünkü soğuk sonbahar ve kış mevsimleri nedeniyle kısa bir inşaat süresi vardır (Vaitkus ve ark., 2019). Ülkemizde de soğuk sonbahar ve kış mevsiminin uzun sürdüğü bölgeler söz konusudur. Modüler beton kaplamalar prekast olduğundan ötürü üreticide önceden üretildiğinden, yüksek bir kalite tutarlılığı sağlanır ve tipik olarak yerinde dökme beton kaplama için kullanılan betondan daha yüksek bir beton mukavemeti elde edilir. Buna ek olarak, asfalt karışımının taşınması ve serilmesi sırasında asfalt kaplamalarda söz konusu olan malzeme ayrışması riski de ortadan kalkmaktadır (Vaitkus ve ark., 2019). Belirtilen tüm hususlar göz önünde bulundurulduğunda, modüler beton kaplama, onarım ve rehabilitasyon çalışmalarını azaltmak için umut verici bir çözümdür ve özellikle trafik hacminin yüksek olduğu bölgelerde daha az trafik sıkışıklığına yol açmaktadır (Vaitkus ve ark., 2019). Prekast betonların 183 m uzunluğa kadar sürekli inşaatı ve 24 adet prekast elemana kadar olan aralıklı onarımı yaklaşık 6-8 saat sürmektedir (Smith ve Snyder, 2017, Tayabji ve ark., 2013, Vaitkus ve ark., 2019). Prekast beton plakların kullanıldığı beton kaplamaların aralıklı onarımları belirli, arızalı alanlarda gerçekleştirilir. İki tür aralıklı onarım mevcuttur: tek veya birkaç arızalı döşemenin tamamen değiştirilmesi ve bozulmuş derzlerin veya çatlakların tam derinlikte onarımı. Onarım türünden bağımsız olarak, onarımlar her zaman tam şerit genişliğindedir (Tayabji ve ark., 2013, Vaitkus ve ark., 2019). Bu tez çalışması kapsamında üretilen MBY sistemde ard-germe işlemi enine yönde yapıldığı için onarım her zaman tam şerit genişliğinde yapılmak zorunda değildir. Sorunlu bölgedeki ard-germe elemanları sökülerek, değişimi gereken prekast elemanların yerine yenileri yerleştirilir. Daha önce de belirtildiği gibi MBY kaplamadaki elemanlar SIFCON ile üretilmiştir.

SIFCON, çelik lif içeren bir beton türüdür. Çelik lifli betonlar hava alanı ve karayolu kaplamalarında kullanılarak aşınma ve çekme dayanımı yüksek beton elde edilmesini sağlayıp kaplama kalınlığının azaltılabilmesine imkan vermektedir (Kutlu, 2007). Kaplamada kullanılan malzemenin niteliği ve kaplama kalınlığı tespiti, rijit

karayolu kaplama tasarımının amacını oluşturmaktadır (Bayrak ve Hınıslioğlu, 2017). Çoğu şartnamede bir gereklilik olarak minimum değerler ile sınırlandırılan yol kaplama betonu eğilme dayanımı, karayolu rijit kaplama tasarımında diğer karakteristik özellikler gibi önemli bir parametredir (Hınıslioğlu ve Bayrak, 2004). Beton kaplamada kullanılan lif türü ile eğilme dayanımı ve kaplama kalınlığı ilişkisini araştıran çalışmalar bulunmaktadır. Hussain ve ark. (2020), üç farklı tür lif (çelik, polipropilen, cam) kullanarak lif türüne bağlı değişen mekanik özellikler ile beton kaplamanın kalınlığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Servis ömrü, taban zemini özellikleri, trafik yükü gibi tasarım girdileri tüm karışımlar için sabit tutularak lif tipinin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri ne şekilde etkilediği çalışılmış ve bu mekanik özelliklere bağlı olarak normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı beton kaplama için kalınlıklar belirlenmiştir. Normal dayanımlı beton kaplama kalınlığının 183 mm'den 120 mm'ye, yüksek dayanımlı beton kaplama kalınlığının 155 mm'den 105 mm'ye düşürülebilmesinin yüzde 1 çelik lif katkısı ile mümkün olduğu ve en iyi eğilme performansına bağlı olarak çelik lifin kaplama kalınlığını azaltma açısından en efektif lif türü olmasına karşın aynı trafik yükü altında diğer lif tiplerinin daha ekonomik olduğu ifade edilmiştir. Daha ekonomik bir çalışma olması açısından Yaowarat ve ark. (2021), beton yol kaplamasının eğilme performansını iyileştirme amacıyla atık kauçuk lateks kullanmış olup eğilme ve basınç dayanımlarının farklı su/çimento oranı ve kauçuk/çimento oranlarına ile değişimini araştırmıştır. Çalışmada kaplama kalınlığı, malzeme maliyeti, işletme maliyeti, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasında bir tasarım abağı sunulmuştur. Bayrak ve ark. (2019), yol kaplama malzemesi olarak kullanılabilen SIFCON numunelerin mekanik özellikleri üzerine bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Su/çimento, silis dumanı oranı, çelik lif hacimleri ve narinliklerinin değiştiği çalışmada optimizasyon tekniği olarak Taguchi Metodu tercih edilmiştir. Optimum şartlarda numunelerin sahip olduğu malzeme miktarları belirlenmiş olup 145.72 MPa basınç dayanım ve 31.58 MPa eğilme dayanım değerine ulaşılmıştır.

Çelik fiberlerin birim ağırlığına ve kullanımındaki artışa bağlı olarak SIFCON, geleneksel fiber katkılı betona kıyasla birim ağırlık açısından yüksek değerlere ulaşmaktadır (Naser ve Abeer, 2020). Ek olarak bir SIFCON karışımı ele alındığında çelik lifler, maliyet açısından en büyük payı kapsamaktadır (İpek ve Aksu, 2019).

Literatürde çelik lifler içeren tabakaların kesitte lokal şekilde kullanıldığı ekonomik çözümler elde etmeyi amaçlayan ve geleneksel yapı malzemelerinin güçlendirilmesini sağlayan kompozit yapıları örnekleri barındıran çalışmalar bulunmaktadır. Geleneksel betonarme elemanların güçlendirilmesi ve onarılması için farklı birtakım metotlar kullanılmaktadır (Oehlers, 1992; Souza ve Appleton, 1997; Daly ve Witarnawan, 1997; Hameed ve ark., 2020). SIFCON tabakalar ile güçlendirme de gelişmiş bir teknik olarak bu metotlar arasında yer almaktadır (Hameed ve ark., 2020). SIFCON, yüksek lif içerikli bir yüksek dayanımlı lifli beton (high performance fiber reinforced concrete) (HPFRC) türü olarak kabul edilebilir (Farnam ve ark., 2010). Bu sebeple HPFRC katmanlar barındıran kompozitler içeren çalışmalar ve bu katmanlar arası bağ türleri araştırılarak bu çalışmada üretilecek numuneleri meydana getiren katmanların döküm şekli üzerine bir yaklaşım geliştirilmiştir. HPFRC ve geleneksel betonun birlikte kullanılması ile üretilen güçlendirilmiş elemanlarda, HPFRC tabakanın üstün özelliklerinin tüm kesite yayılabilmesi için tabakalar arasında yeterli bir bağın sağlanabilmesi gerekmektedir (Aaleti ve Sritharan, 2019; Farzad ve ark., 2019; Valikhani ve ark., 2020; Zanuy ve ark., 2020). Söz konusu bağın sağlanabilmesi için tabakalar birbirinin hemen ardı sıra dökülebilir (Nguyen ve ark., 2021), tabakalardan biri döküldükten sonra yüzeyi çekiç yardımı ile pürüzlü hale getirilip bir süre beklendikten sonra buna ek kumlama yapılarak sonraki tabaka dökülebilir (Zanuy ve ark., 2020; Paschalis ve ark., 2018), tabakalar birbirine epoksi ile yapıştırılabilir (Tanarşlan ve ark., 2017; Tanarşlan, 2017; Al-Osta ve ark., 2017), priz süresi sona eren tabakalar birbirine ankrajlar ya da saplama ve dübel elemanlar ile bağlanabilir (Tanarşlan ve ark., 2017; Tanarşlan, 2017; Hussein ve Amleh, 2015), sertleşmiş tabakaların yüzeyi basınçlı su ile aşındırıldıktan sonra bir sonraki tabakanın dökümü yapılabilir (Safdar ve ark., 2016). Bu çalışmalarda 20, 30, 35, 40, 50, 60 milimetre kalınlığında HPFRC tabakalar üretilmiştir.

Shannag ve ark. (2001), kayma direnci düşük betonarme kirişleri özel tasarlanan kalıplarda üretilen 25 mm kalınlığın SIFCON ceketler ile iyileştirerek betonarme referans kirişler ile karşılaştırmış bu kirişlerin kayma kapasitelerini tahmin etmeye yönelik analitik bir yaklaşım geliştirmiştir. Referans numunelere kıyasla dışarıdan yapılan sürekli kaplamanın kayma dayanımını yüzde 25 ile 55 aralığında attırdığı ve gevrek davranışı önlediği ifade edilmiştir. Hameed ve ark. (2020), 15-25-35 mm gibi

faklı kalınlıklardaki SIFCON tabakaları kullanarak geleneksel betonun (RC) özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada geleneksel betonun (RC) yüzeyleri pürüzlü hale getirilmiş, yıkanmış ve daha sonra SIFCON tabakalar bu yüzeylere epoksi ile yapıştırılmıştır. En üstün sünek davranışın ve en yüksek tokluk değerinin yüzde 98 lif içeriğine sahip 35 mm kalınlıkta SIFCON ile ceketlenmiş numunelerden elde edildiği ifade edilmiş olup SIFCON tabaka kalınlığının artışına bağlı olarak eğilme dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerin de iyileştiği belirtilmiştir. Balaji ve Thirugnanam (2018), yüzde 9 oranında sabit lif içeriğine sahip SIFCON tabakaları geleneksel betonarme (RC) elemanın farklı konumlarında kullanarak boyuna donatı ve etriye içeren kompozit kirişler üretmiş ve bu kirişlerin eğilme performansını araştırmıştır. Birtakım numuneler 20 milimetre kalınlığındaki SIFCON tabakaların, kirişin alt bölgesinde ve alt-üst bölgesinde karşılıklı olacak şekilde kullanımı ile, birtakım numuneler ise basınç bölgesinde veya çekme bölgesinde 75 mm kalınlığında SIFCON tabaka olacak şekilde üretilmiş olup bu kompozit kirişleri kıyaslama amacıyla full kesit geleneksel beton (RC), lifli beton (FRC) ve SIFCON numuneler de üretilmiştir. Çekme bölgesinde SIFCON bulunan kompozit kirişlerde maksimum yük taşıma kapasitesi RC'ye göre yüzde 100, FRC'ye göre yüzde 55 oranında, enerji tutma kapasitesi RC'ye göre yüzde 90, FRC'ye göre yüzde 55 artmıştır. RC'nin farklı bölgelerinde SIFCON kullanımının sünekliliği, enerji tutma kapasitesini ve maksimum yük taşıma kapasitesini arttırdığı rapor edilmiştir. Müsevitoğlu ve ark. (2021), farklı türde lifleri kademeli kullanarak lifli betonlu kompozit kirişler üretmiş olup bu kompozit elemanların eğilme dayanımları ve enerji tutma kapasitelerini incelemiştir. Lif içeren ve içermeyen tabakalar kademeli şekilde 1 saat arayla aynı kalıba dökülmüş ve bu numuneler, testler uygulanmadan 7 gün süresince suda kürlenmiştir. Lifli beton içeren kompozit kirişlerin eğilme dayanımının yalın betona kıyasla arttığı ve en sünek davranışın alt bölgede lifli beton içeren numunelerden elde edildiği ifade edilmiştir. Çelik lif içeren numunelerde, yalın betona kıyasla mekanik özelliklerin (eğilme dayanımı, basınç dayanımı, enerji tutma kapasitesi) iyileştiği fakat çelik liflerin pahalı oluşundan dolayı numunelerin maliyetinin yükseldiği literatürde bilinen bir gerçektir (İpek ve Aksu, 2019; Müsevitoğlu ve ark., 2021). SIFCON elemanlarda çelik lif kullanımı, mekanik özelliklerin maksimize edilmesine karşın maliyetin minimize edilmesi amacını barındıran, SIFCON elemanların üretimi açısından ikili imalat

problemi anlamına gelmektedir ve söz konusu ikili imalat problemi, SIFCON elemanların mekanik özelliklerine ve üretim maliyetine yönelik maksimizasyon ve minimizasyon yoluyla yapılacak optimizasyon analizi aracılığıyla aşılabileceği düşüncesi oluşmaktadır. Bu sebeple genellikle bir veya daha fazla bağımsız ve bağımlı değişken arasındaki ilişkilerin ampirik çalışmasında kullanılan RSM (Cornell, 1990; Algin, 2016), laboratuvar testlerine dayanan bu tez çalışmasındaki parametrik araştırmanın deneysel sonuçlarına uygulanmıştır.

Karayolu üstyapısının ampirik tasarımında, belirli bir gerilme ve deformasyon değeri doğrultusunda, üstyapı malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri, iklim ve çevre koşulları, trafik yükleri dikkate alınarak meydana gelecek bozulmalara göre karayolu performansı açısından tahminde bulunulur (Ali, 2005; Özcanan, 2011; Özcanan ve Akpınar, 2014). Karayolu üstyapısını meydana getiren tabakaların uygun şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi için mekanik teorilere dayanan gelişmiş sayısal yöntemlerin kullanılması ihtiyacı söz konusu olmuştur (Diallo, 2019). Çünkü mekanik teorilere dayanan gelişmiş sayısal yöntemlerde, gözlem ve tahmin yaklaşımlarından öte sayısal analizlerin bulunması, sonuçları daha gerçekçi hale getirmektedir (Carvalho, 2006; Özcanan, 2011). Mekanistik yöntemlerin etkinliği, gerilme ve deformasyonlar konusundaki sonuçların doğruluğuna dayanmaktadır (Wang, 1996; Karadağ ve ark., 2022). Karayolu üstyapı katmanlarının, maruz kalınan yüklere karşı, ortaya koyduğu tepkiyi analiz etmek için analitik metotlar, Çok Tabakalı Elastik Teori, Sonlu Elemanlar Metodu, Ayrık Elemanlar Metodu gibi birtakım yöntemler bulunmaktadır (Özsoy ve Fırat, 2023). Mekanistik metotların ampirik yaklaşımlar ile desteklenmesi yani mekanistik-ampirik yöntem, elde edilecek sonuçları daha sağlıklı hale getirmektedir fakat mekanistik metotların ampirik yaklaşımlarla desteklenmesi gerekliliği üzerinde tartışmalar söz konusu olmaktadır (Özcanan ve Akpınar, 2014). Mekanistik-ampirik yöntemlerin mekanistik kısmında, sayısal modeller ile üstyapı performans ölçütleri veya gerilme, birim şekil değiştirme ve deplasman olarak bilinen üstyapı mekanik tepkileri belirlenmekte, ampirik kısmında ise belirlenmiş olan mekanik tepki verileri ampirik denklemler ile üstyapıda oluşan tekerlek izi ve yorulma vb. bozulmalarla bağlantılı hale getirilmektedir (Carvalho ve Schwartz, 2006; Mashayekhi ve ark., 2011; Behiry, 2012; Mousa ve ark., 2015; Bostancıoğlu, 2021). Teknolojik gelişmelerle uyumlu olacak şekilde, mekanistik

yöntemler, taşıt tipleri, yükleme durumları, malzeme özellikleri, tasarım ve imalat ile ilgili parametrelere bağlı değişimler doğrultusunda güncellenebilmektedir (Mashayekhi ve ark., 2011; Bostancıoğlu, 2021). Yol üstyapı katmanlarının, ideal olmayan heterojen yapısı ve davranışları, trafik kaynaklı yüklerin farklı geometrideki alanlar üzerine temas etmesi ve bahsi geçen yüklerin statik olmayıp dinamik, tekrarlı olması, kompleks sınır koşullarının sebep olduğu zorluklar ve gelişen teknoloji ile problem çözümlerinin hızlanması, üstyapı tepkilerini tespit edebilmek için sonlu elemanlar metodunun tercih edilmesine sebep olmaktadır (Hadi ve Bodhinayake, 2003; Abd Alla, 2006; Yoo ve ark., 2006; Ambassa ve ark., 2013; Beskou ve ark., 2016; Sarkar, 2016; Bostancıoğlu, 2018). İki, üç boyutlu üstyapı modellerinin dinamik ve statik analizlerinde, visko-elastik, lineer elastik vb. şekilde tanımlanan malzeme türlerinde, değişen yükleme hızları altında, farklı tip aks yükleri durumlarında sonlu elemanlar metodu etkili bir şekilde kullanılmıştır. (Al-Azzawi, 2012; Beskou ve ark., 2016; Ahmed ve Erlingsson, 2016; Sarkar, 2016; Ahirwar ve Mandal, 2017; Bostancıoğlu, 2018). Belirtildiği üzere, sonlu elemanlar metodu, mekanistik tasarım açısından çoğunlukla kabul edilen sayısal yöntem olup bunun yanında karayolu üstyapı katmanlarının analizine yönelik yaygın kullanılan bir metot haline gelmiştir (Özcanan ve Akpınar, 2014; Diallo, 2019). Sonlu elemanlar metodu, çok tabakalı elastik teori yoluyla analiz edilemeyen karayolu karmaşık üstyapı problemlerini gerçeğe yakın bir şekilde bilgisayar ortamına yansıtılabilmeye ve analiz edilebilmeye olanak tanımaktadır (Asim ve ark., 2021; Özsoy ve Fırat, 2023).

Karayollarında genellikle rijit ve esnek olmak üzere iki tip üstyapı çeşidi bulunmaktadır (Özsoy ve Fırat, 2023). Dolayısıyla iki üstyapı türü için de sonlu elemanlar metodu tercih edilebilmektedir. Rijit üstyapıların Portland çimentolu bir kaplama tabakasına sahip olmasına karşın esnek üstyapılar, bitümlü malzemeleri içeren kaplama tabakasına sahiptirler (Ağar ve ark., 1998; Taunk, 1998; Saltan ve Fındık, 2008; Mohod ve Kadam, 2016; Tanyıldızı ve Çınar, 2023). Bu iki üstyapı türünden biri olan rijit kaplamalar, zorlu iklim koşullarına dayanabilmekte, zayıf zeminlerin meydana getirdiği problemlerin üstesinden gelebilmekte ve durabilite açısından iyi bir davranış sergilemektedir. Bu ve benzeri sebeplerle rijit kaplamalar yaygın bir kullanım alanı bulmuştur (Channakeshava ve ark., 1993). Rijit bir kaplamanın yapısal yeterliliği tahmin edilirken uygulanan yüklere karşı yapısal tepkisi

göz önünde bulundurulabilir fakat uygulanan bu yüklerin statik veya dinamik olması durumunda hangi yük türünün tabanda daha yüksek defleksiyona sebep olduğu ve daha yüksek eğilme gerilmesi değerleri meydana getirdiği konusunda farklı görüşler bulunmaktadır (Darestani ve ark., 2006a). Karayolu üstyapısının trafik sebebiyle maruz kaldığı yüklerin ve çoğu defleksiyon ölçüm aygıtlarının dinamik yapıda olduğu bilinen bir gerçektir (Crisman ve Facchin, 2005; Evangelista ve ark., 2006). Karayolu üstyapı yüzeyindeki bir noktaya uygulanan bir yükün, tekerlek ve kaplama yüzeyindeki karşılıklı etkileşimin tesiri ihmal edilecek olursa, taşıt hızının fonksiyonu olarak frekanslı darbe türünde olduğu düşünülebilir (Crisman ve Facchin, 2005). Rijit üstyapıya yönelik yapılan geçmişteki deneyler ve dinamik analizler, dinamik yüklerin üstyapı tepkileri üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını gösterdiğinden, araç yükleri, rijit üstyapı tasarım yönergelerinde statik yükler olarak kabul edilmiştir (Darestani ve ark., 2006a). Bunun aksine, dinamik yüklere maruz bırakılan rijit üstyapılarla ilgili yapılan daha yeni çalışmalar, yüzey pürüzlülüğü dikkate alındığında dinamik yüklerin önemli etkilere sebep olabileceğini göstermiştir (Bhatti ve Stoner, 1998; Liu ve Gazis, 1999; Darestani ve ark., 2006a). Düşük rijitlikteki bir alttemel üzerinde bulunan yalın beton üstyapıdaki taban defleksiyon ve gerilme değerlerinin, çok ağır kamyon yükleri altında taşıt hızına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmüştür (Izquierdo ve ark., 2002; Darestani ve ark., 2006a). Kaplamaların ömrü boyunca oluşacak dinamik yorulma çatlamlarının, statik durumdaki çekme gerilmesi değerlerine bağlı olarak oluşacak yorulma çatlaklarından daha büyük değerler meydana getirebileceği düşünülmektedir (Hendrick ve ark., 1992; Gillespie ve ark., 1993; Darestani ve ark., 2006b). Dinamik analizlerin göz ardı edilebilecek şekilde değerlendirilmesi doğru değildir (Darestani ve ark., 2006b). Hareketli tekerlek yükleri altındaki karayolu üstyapı-altyapı sisteminin yapısal tepki analizini statik yüklü ve lineer elastik kabul ederek yapmak, sorgulanabilir bir yaklaşımdır (Uddin ve ark., 1994). Serbest granüler malzemeden oluşan üstyapı tabakalarında ve yol tabanında non-lineer davranış beklendiği zaman, tahmin edilen lineer elastik tepki değerleri, dinamik yükleme altında ölçülen defleksiyonlardan önemli derecede farklılaşmaktadır (Uddin ve ark., 1994). Sonlu elemanlar metodu ile lineer malzeme modellerinin dışında non-lineer malzeme modelleri de kullanılarak analizler yapılabilmektedir (Evangelista ve ark., 2006). Bu metot kullanılarak yapılan analizlerde, gerilmeler ile elastik, plastik, viskoz ve visko-

elastik birim şekil değiştirmeler arasındaki non-lineer olmayan ilişkiyi dikkate almak mümkün hale gelmiştir (Khiavi ve Bakhshi, 2021). Literatürde karayolu ile ilgili hem rijit üstyapıların hem de esnek üstyapıların analizinde sonlu elemanlar metodunun kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır.

Channakeshava ve ark. (1993), derzli donatılı beton yolları non-lineer sonlu elemanlar metodu ile analiz etmiştir. Non-lineer davranış, çekme altındaki çatlamlar, basınç altındaki akma durumları ve kaplamalarda sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşan bozulmaların sebep olduğu kayıplar şeklinde ele alınmıştır. Çalışmada analiz için seçilen konfigürasyon tipik iki döşemeli bir sistemdir. Analiz sistemini oluşturan levhalar, 6100 mm uzunluğunda, 3660 mm genişliğinde ve 254 mm kalınlığındadır. Derz genişliği 7,6 mm olup donatı çapları 25,4 mm 'dir. Taban zeminini simüle etmek için Winkler yay modeli kullanılmıştır. Taşıt yükleri, aralarında 1,83 m mesafe bulunan iki tekerleği yansıtacak noktasal yükler şeklinde bir hat boyunca uygulamıştır. Chatti ve ark. (1994), derzli beton kaplamaların geçici hareketli yükler altında sonlu elemanlar metodu ile dinamik analizlerini yapmıştır. Dinamik çözümler hem zaman tanım alanında hem de frekans tanım alanında formüle edilmiştir. Beton kaplama altındaki tabakalar sönümlü Winkler temeli ile simüle edilerek analiz edilmiştir. Aynı model daha sonra yine sönümlü ve elastik parametreler kullanarak tekrar analiz edilmiş ve her iki analiz sonucu karşılaştırılarak modeller doğrulanmıştır. Darestani ve ark. (2007), iki derzli betonarme kaplama ve iki derzli yalın beton kaplamadan meydana gelen bir test kesiti inşa etmiş ve bu test kesitini hem yarı statik hem de dinamik kamyon yükleri altında test etmiştir. Söz konusu kamyon yüklerinin kaplama üzerinde önceden belirlenen noktalarda 5 km/saat ile 55 km/saat arası nominal hızlarda hareket etmesi sağlanmıştır. Kaplamada oluşan tepki değerlerini ölçme amacıyla test kesiti boyunca 120 adet elektrikli birim şekil değiştirme ölçer ve 15 adet lineer deplasman ölçer yerleştirilmiştir. Ölçülen tepki değerleri, test edilen bu rijit üstyapı sistemini analiz etmek üzere oluşturulan sonlu elemanlar modelini doğrulamak için kullanılmıştır. Test alanı 32 m uzunlukta ve 5,1 m genişlikte olup rijit kaplama 250 mm kalınlıktadır. Rijit kaplamanın altında Kaliforniya Taşıma Oranı (California Bearing Ratio (CBR)) değeri %14 olan taban zemini üzerinde uzanan 150 mm kalınlığında beton alttemel bulunmaktadır. Alttemel betonun 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla 7,3 MPa ve 1,55 MPa, kaplama betonun 28 günlük basınç

ve eğilme dayanımı sırasıyla 50,5 MPa ve 5,45 MPa olarak belirlenmiştir. Betonarme kaplama, 9 mm'lik donatılar içeren hasır şeklindeki bir yapıyla güçlendirilmiştir. Her bir enine derz, 300 mm x 50 mm x 6 mm boyutlarındaki düz plaka şeklindeki bağlantı demirleri (dowel) ile sabitlenmiştir. Test alanının uzun kenarlarından biri banket tarafından sınırlandırılmıştır. Sekiz adet betonarme kaplamada ve dört adet yalın beton kaplamada olmak üzere boyuna birleşimlerin orta derinlikteki bölgelerinden geçecek şekilde 1000 mm uzunluğunda 12 mm çapında donatılar yerleştirilmiştir. Bağlı ve kısmen bağlı sınır koşullarının kaplama tepkileri üzerindeki etkilerini belirlemek için, test bölümünün yarısında kaplama ile alttemel arasında tek katmanlı bir polietilen levha kullanılmıştır. Trafik yükü tek yönde brüt ağırlığı 477,3 kN olan bir yarı römork kamyon ile uygulanmıştır. Bu kamyon sırasıyla 60,6 kN, 206,2 kN ve 210,5 kN yüklere sahip tek dingilli tek lastikli, tandem dingilli çift lastikli ve üç dingilli çift lastikli üç farklı dingil grubunu taşımaktadır. Tüm lastiklerin lastik şişirme basıncı 750 kPa olarak ayarlanmıştır. Lastik temas alanı, lastiğin etrafına boya püskürtülerek, izin kaplama üzerindeki boyutunun ölçülmesi yoluyla, belirlenmiştir. Kaplama tabakası ve alttemel tabakası için lineer elastik malzeme parametreleri, taban zemini için Drucker-Prager malzeme parametreleri kullanılmıştır. Sahadaki testlerden elde edilen defleksiyon ve gerilme değerleri, sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizden elde edilen defleksiyon ve gerilme değerleri ile karşılaştırılmış ve bu şekilde analizler doğrulanmıştır. Özcanan (2011), standart dingil yükünü referans alarak ve arazi verilerinden yola çıkarak en kritik dingil ve tekerlek tipini belirlemeyi amaçladığı tez çalışmasında esnek üstyapı sisteminin analizi için üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanmıştır. Ağır taşıt aksları ve tekerlekleri altında esnek üstyapıda oluşan gerilemeler ve deformasyonlar araziden elde edilen veriler ile karşılaştırılarak kritik edilmiştir. Sahada yapılan çalışmalarda asfalt kaplamanın üst ve alt kısımlarındaki basınç gerilmeleri ile tekerlek temas alanları ölçülmüştür. Tekerlek temas basıncı için ortalama değere (700 kPa) yakın olan 667 kPa değeri ve temas alanı için de 26.5 x 29 cm² boyutlarında dikdörtgen bir yapı elde edilmiştir. Esnek üstyapı sistemi üç tabaka şeklinde modellenmiş, taşıt yükleri için dinamik yük modeli oluşturulmuş ve malzemelerin lineer davrandığı kabul edilmiştir. Shafabakhsh ve ark. (2014), 20 x 10 x 10 cm boyutlarında 50 adet beton bloğu kullanarak 1,18 m uzunluğunda 1,08 m genişliğinde 1,5 m yüksekliğinde bir rijit üstyapı oluşturmuş ve sonlu elemanlar

metodu ile 8.2 tonlu tek dingil yükü altında oturma davranışı açısından analiz etmiştir. Daha sonra model geometrisini ve tabaka malzeme parametrelerini değiştirmeden beton kaplama tabakası yerine asfalt kaplama tabakasını kullanarak analiz etmiş ve beton kaplama tabakasından elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Kaplama ile temel tabakası arasında 2 cm kalınlığında bir kum tabakası yerleştirilmiş olup kaplama tabakası ile kum tabakası arasındaki arayüz, temas elemanı (contact elements) olarak tanımlanmıştır. Beton kaplama tabakasındaki elemanlar lineer elastik kabul edilmiştir. Kum tabakası, temel tabakası ve taban zemini için Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmış ve bu tabakalar arasında tamamen temas kabulü yapılarak relatif defleksiyonlar engellenmiştir. Wu ve ark. (2014), 3 cm kalınlığında bir asfalt tabakası ile temel tabakasından yalıtılmış beton kaplamalı üstyapı sisteminin dinamik tepkisini 3B-SEM modeli kullanarak analiz etmiştir. Beton kaplama 4,50 x 3,75 m boyutlarında ve 22 cm kalınlığındadır. Hareketli taşıt yükleri, sabit hızlı yüzey yüklemesi şeklinde uygulanmıştır. Taban zemini derinliği, yakınsama çalışmaları sonucu 2 m olarak belirlenmiştir. Tabakalar arası etkileşim tamamen bağlı olacak şekilde belirlenmiş ve tabakalar için elastik malzeme parametreleri kullanılmıştır. Model geometrisinin dip bölgesi X,Y,Z yönlerinde kısıtlanmış olup tabakalar sadece düşey deformasyonların gerçekleşeceği doğrultuda serbest bırakılmıştır. Beton kaplama tabakasından boyuna derzlerin orta bölgesine 75 cm aralıklarla 70 cm uzunluğunda ve 18 mm çapında bağlantı donatıları gömülmüştür. Karatağ ve ark. (2018), sonlu elemanlar metodu ile esnek üstyapılı bir otoyol dolgusunun tekrarlı tekerlek yükü altındaki deformasyon davranışını analiz ettikleri çalışmada, asfalt betonu için lineer elastik malzeme parametrelerini, temel, alttemel ve taban zemini için Hardening Soil Small Strain Stiffness malzeme modelini kullanmıştır. Diallo (2019), üzerinde asfalt kaplama bulunan donatısız derzli beton plaklardan oluşan bir sistemin davranışını, üç boyutlu modelleyerek, sonlu elemanlar tabanlı bir yazılım ile simüle etmiştir. Farklı kalınlıklara sahip tabakaların malzeme özellikleri lineer elastik ve izotropik kabul edilmiştir. Taşıt yükleri, iki tekerleğin merkezleri arasında 180 cm bulunacak şekilde 20 x 30 cm² boyutlarında dikdörtgen yapılı temas alanı ile 689 kPa değerindeki tekerlek temas alanı basıncı olarak kaplama tabakası yüzeyine uygulanmıştır. Asim ve ark. (2021), tekerlek izi derinliğini tespit etme amacıyla farklı malzeme özellikleri, sıcaklık ve yükleme koşullar altında esnek bir üstyapı sistemini 3B-SEM ile analiz

etmiştir. Üstyapı sistemi çok tabakalı bir sistem olarak kabul edilmiş, her tabaka esneklik modülü (M_r) ve poisson oranı (μ) ile belirtilmiştir. Dinamik taşıt yükleri, 25 x 35 cm² boyutlarında dikdörtgen yapılı temas alanı ile 690 kPa değerindeki tekerlek temas alanı basıncı olarak kaplama tabakası yüzeyine uygulanmıştır. 3B-SEM modelinin sınır şartları, taban zeminin alt bölgesi ankastre olacak ve tüm tabakaların sadece düşey yönde hareket etmesine izin verilecek şekilde belirlenmiştir. Kaplama tabakası, temel tabakası, alttemel tabakası ve taban zemini arasındaki etkileşim, temas bağlantısı (tie-contact) yoluyla simüle edilmiştir. Karadağ ve ark. (2022), tekrarlı yükler altında kalıcı deformasyonları belirlemek amacıyla doğal taban zemini üzerinde bulunan asfalt betonu, temel ve alttemel tabakalarından meydana gelen tipik bir esnek üstyapı enkesitini, temel ve alttemel tabakalarında farklı malzeme ikameleri ile iki boyutlu dört farklı model oluşacak şekilde sonlu elemanlar metodu ile analiz etmiştir. Model geometrisinin tabanı her iki yönde sabitlenmiş olup yükleme sebebiyle oluşacak düşey deformasyonların belirlenebilmesi için model geometrisi düşey yönde serbest bırakılmıştır. Temel ve alttemel tabakalarında Hardening Soil Small Strain Stiffness malzeme modeli, asfalt betonu tabakasında ise Mohr-Coulomb malzeme modeli tercih edilmiştir. Tanyıldızı ve Çınar (2023), taban zeminin taşıma kapasitesinin sathi kaplamalarda üstyapı maliyetine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. İki boyutlu olarak modellenen üstyapı sisteminde taban zemini, alttemel, temel ve kaplama tabakaları için Mohr-Coulomb malzeme modeli tercih edilmiştir. Tekrarlı trafik yüklerinin değişimi ile kaplama kalınlığı arasındaki ilişki incelenmiştir. Özsoy ve Fırat (2023), bir esnek üstyapı sisteminin temel ve alttemel tabakalarında atık malzeme (çelîf cüruf) kullanımının etkisini araştırmıştır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen iki boyutlu dinamik analizlerin bulunduğu bu çalışmada Mohr-Coulomb malzeme modeli asfalt tabaka için, Hardening Soil Small Strain Stiffness malzeme modeli ise temel ve alttemel tabakaları için kullanılmıştır. Lastik ekseninden belirli uzaklıklarda okunan düşey deformasyon değerleri zaman bağılı olarak sunulmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

SIFCON tabakalar içeren modüler betonlar kullanılarak MBY kaplama sisteminin uygulanabilirliği ele alındığından kaplamada kullanılacak eleman tipini belirlemek amacıyla ilk etapta laboratuvarında numuneler üretilmiş ve bu elemanların mekanik, ekonomik özellikleri dikkate alınarak bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışması sonunda sahada kullanılacak numune tipine karar verilmiştir. İkinci etapta sadece bu numune tipi laboratuvarında tekrar üretilmiş ve sahada test edilmek üzere testin yapılacağı alana taşınmıştır. MBY kaplama sistemi sahada oluşturulmuş ve test edilmiştir. Saha test sonuçları ile bilgisayar ortamında yapılan analiz sonuçları kıyaslanmıştır.

3.1. Materyal

Aşağıdaki bölümlerde modüler betonların üretiminde kullanılan malzemelerin bilgileri, saha test alanı ve MBY kaplama sisteminin özellikleri sunulmuştur.

3.1.1. Modüler yol betonlarının malzeme özellikleri

Optimizasyon çalışmasında kullanılmak üzere laboratuvarında numuneler tabakalı şekilde üretilmiştir. Numunelerin içerdiği SIFCON tabakalarda çelik lifler kullanılmıştır. Kemerli şirketi tarafından TS EN 14889-1 standardına uygun üretilen iki farklı uzunluğa sahip çelik lifler (KMX 40/30 ve KMX 80/60) temin edilmiştir (Soylu ve Bingöl 2019; Bayrak ve ark. 2019; Kılılı 2018). Şekil 3.1. a'da çelik lifler görülmektedir. Çizelge 3.1.'de çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 3.1. Çelik lif (a), silis dumanı (b), doğal kum (c)

Çizelge 3.1. Çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

	KMX 40/30 BL	KMX 80/60 BL
Çap (mm)	0.75	0.75
Uzunluk (mm)	30	60
Görünüş oranı (Aspect ratio (l/d))	40	80
Çekme dayanımı (N/mm ²)	1200	1200

Tüm numuneler, SIFCON tabakalar dahil, çimento, kum, silis dumanı, su ve süper akışkanlaştırıcının sabit oranlarda karıştırılması ile elde edilen harç kullanılarak aşamalı şekilde dökülmüştür. Tüm numunelerde harç karışım oranları sabit olup sadece SIFCON tabakaların konumları, kalınlıkları ve SIFCON tabakaların içerdiği çelik liflerin uzunlukları değişmektedir. Harç karışımında kullanılan çimento Şanlıurfa Limak Çimento Fabrikasından temin edilen PÇ 42.5 CEM II tipi çimentodur (Soylu ve Bingöl 2019). Silis dumanı Antalya Eti Elektrometalurji Tesisinden alınmıştır (Soylu ve Bingöl 2019; Bayrak ve ark. 2019) (Şekil 3.1. b). Arzu edilen akışkanlığı sağlaması ve harcın çelik liflerin arasına boşluk kalmayacak şekilde yerleşebilmesi için polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı Polycar 300 tercih edilmiştir (İpek 2018; Doğan 2017). Çimento ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çimento ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Çimento		
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.15	
SO ₃ (%)	2.73	
Cl- (%)	0.012	
Katkı maddeleri toplamı (%)	19.80	
Hacim genleşme – Le Chatelier (mm)	0.1	
Özgül yüzey – Blaine (cm ² /g)	3922	
Kalıntı – 45 mic. sieve (%)	3.6	
Kalıntı – 32 mic. sieve (%)	13.6	
Basınç dayanımı (N/mm ²)	2 gün	25.1
	7 gün	38.2
	28 gün	48.9
Priz süresi (min.)	Başlangıç	139
	Bitiş	181
Silis Dumanı		
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.30	
SiO ₂ (%)	91.92	
Al ₂ O ₃	0.42	
Fe ₂ O ₃	0.20	
CaO	2.06	
MgO	3.28	
SO ₃	0.83	
Özgül yüzey – Blaine (cm ² /g)	200000	

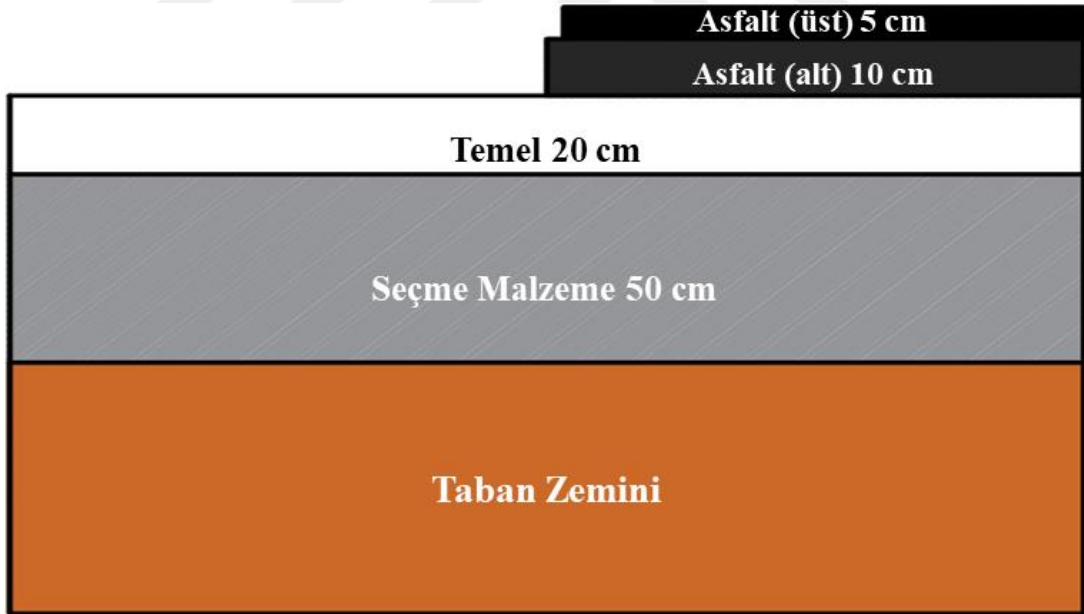
Harç karışımlarında agrega olarak doğal kum kullanılmıştır (Şekil 3.1. c) ve tanelerin tamamı 1 milimetreden küçüktür (Bingöl, 2017). Tüm harçlarda aynı çimento, silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı ve agrega kullanılmıştır.

3.1.2. Yol tabakaları ve saha test araçlarının özellikleri

Saha testi, bir kısmı henüz tamamlanmamış olan esnek kaplamalı iki şeritli bölünmüş bir karayolu kesiminde yürütülmüştür. Saha testinin yapıldığı karayolu kesiminin bir bölümü asfalt kaplama tabakası yüzeyine kadar tamamlanmış olup diğer bölümü sadece temel tabakası yüzeyine kadar tamamlanmıştır. Laboratuvarında üretilen modüler beton elemanların belirli bir paterne uygun birleştirilmesi ile oluşturulan MBY kaplaması, bu temel tabakasının üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.2.'de saha testinin yapıldığı karayolu kesiminin görüntüsü ve Şekil 3.3.'te tabakaların kalınlıkları verilmiştir.



Şekil 3.2. Test alanı



Şekil 3.3. Tabaka kalınlıkları

Taban zemini, seçme malzeme ve temel tabakalarının maksimum kuru birim ağırlık, optimum su içeriği ve CBR değerleri Çizelge 3.3.'te sunulmuştur. Bu çizelgede verilen temel tabakası seçme malzeme CBR değerleri sırasıyla Algin vd. (2022) tarafından alttemelde hidrolik kondüktiviteyi dikkate alarak yürütülen global

verimlilik sınırlarının belirlendiği çalışmadaki %25 RAP ikameli ve %60 RAP ikameli karışımların CBR (1 günlük) değerlerine denk gelmektedir.

Çizelge 3.3. Taban zemini, seçme malzeme ve temel tabakaları özellikleri

	Mak. kuru birim yoğunluk (t/m³)	Optimum su içeriği (%)	CBR (%)
Temel	2.215	5.9	140.0
Seçme malzeme	2.013	6.4	72.0
Taban zemini	1.638	17.7	2.8

Üst ve alt asfalt tabakalarında 50/70 penetrasyon aralığında bitüm kullanılmıştır. Asfalt tabakaların Marshall stabilite değerleri Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

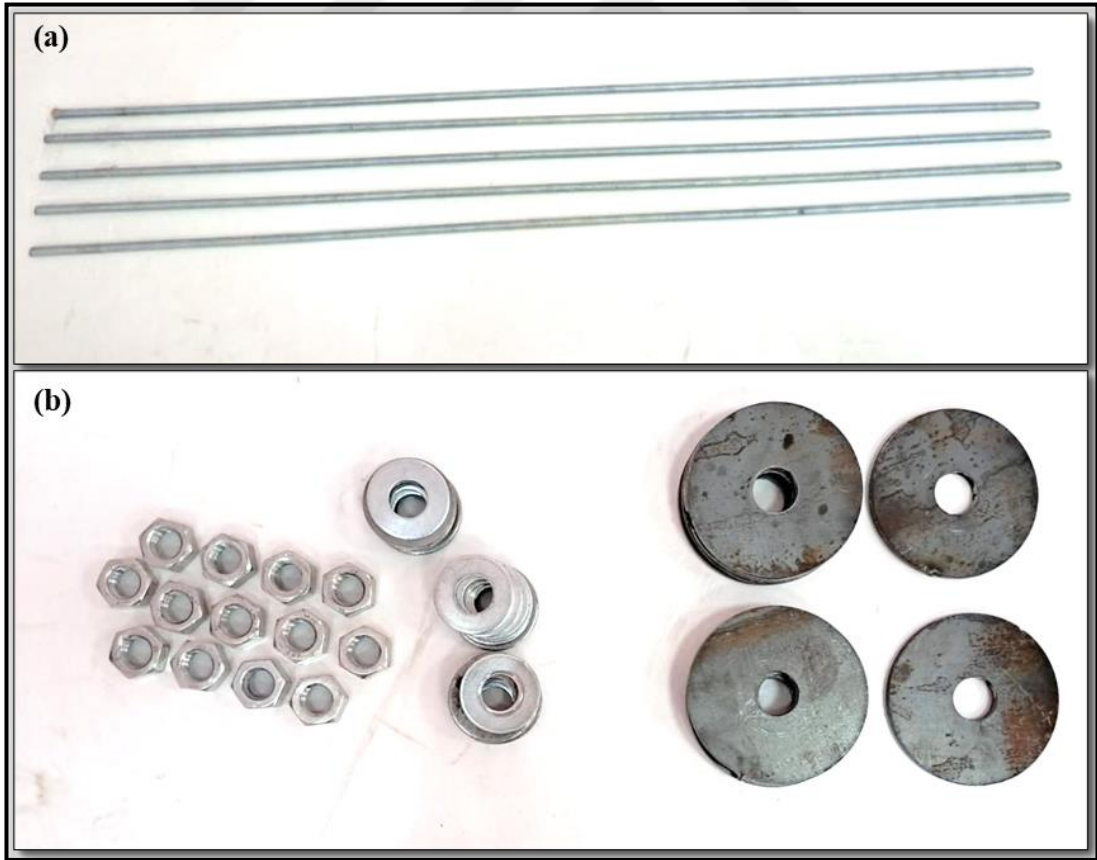
Çizelge 3.4. Asfalt betonun mekanik özellikleri

	Marshall stabilite (kg)
Asfalt tabakası (üst)	≥900
Asfalt tabakası (alt)	≥750

SIFCON tabakalar içeren beton yol modüllerinin birleştirilmesi ile meydana getirilen MBY sistemi 150 cm x 150 cm boyutlarında bir alanı kaplamaktadır. Beton yol modülleri kür havuzunda 28 gün kürlendikten sonra sahaya taşınmış ve birleştirilmiştir. Şekil 3.4.'te modüler beton yol kaplamasına ait görsel verilmiştir. Beton yol modülleri, yatayda çelik gijon tijler ve gijon tijlerin uç kısımlarına yerleştirilen somunlar kullanılarak sabitlemiştir. Somunların beton yol modüllerini tahrip etmesini önlemek amacıyla somunlar ile beton yol modülleri arasına çelik plaklar yerleştirilmiştir. Şekil 3.5.'da çelik gijon tijler (a), plaklar ve somunlara (b) ait görseller sunulmuştur. Çelik gijon tijlerin boyutları ve mekanik özellikleri Çizelge 3.5.'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Modüler beton yol (MBY) kaplaması

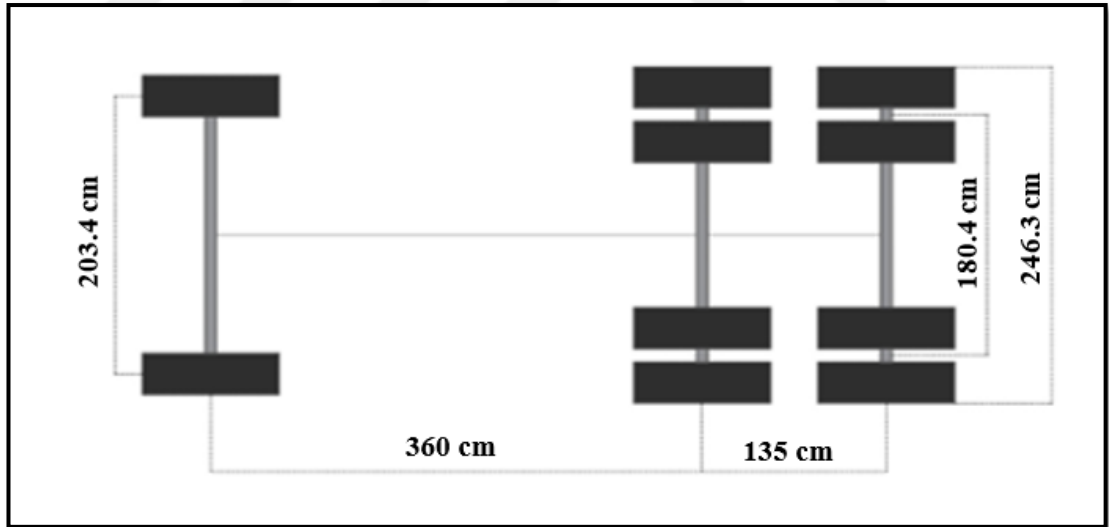


Şekil 3.5. Çelik gijon tijler (a), plaklar ve somunlara (b) ait görseller

Çizelge 3.5. Çelik gijon tijlerin boyutları ve mekanik özellikleri

	Çelik gijon tij
Uzunluk (cm)	170.0
Çap (cm)	1.7
Elastisite modülü (MPa)	200 000

Hem MBY kaplama tabası hem de üst ve alt asfalt kaplama tabakalarının toplam kalınlıkları eşit olup 15 cm'dir. Modüler beton yol kaplama tabakası yüzeyinin kot değeri ile üst asfalt kaplama tabakası yüzeyinin kot değerleri eşittir. Her iki kaplama türünün altında, aynı kalınlıklarda ve özelliklerde taban zemini, seçme malzeme ve temel tabakaları sürekli şekilde uzanmaktadır. Bu saha koşullarında modüler beton yol kaplamasını, ağır taşıt yükü altında test edebilmek için Mercedes-Benz Axor 2529 K damperli kamyonu kullanılmıştır. Damperli kamyon, bir adet ön dingil ve iki adet arka dingil barındırmaktadır. Ön dingilde tek, arka dingillerde dual tekerlekler bulunmaktadır. Tekerlek lastikleri 315/80 R 22,5 tipindedir. Şekil 3.6.'da damperli kamyon dingil ve tekerlek konfigürasyonu sunulmuştur.



Şekil 3.6. Damperli kamyon dingil ve tekerlek konfigürasyonu

3.2. Yöntem

Aşağıdaki bölümlerde, optimizasyon çalışmasında kullanılmak üzere numunelerin üretilmesi ve test edilmesi, optimizasyon çalışmasının tamamlanması,

MBY kaplamasının serilip teste hazır hale getirilmesi, saha testinin yürütülmesi ve 3B-SEM ile modüler beton yol sisteminin dinamik yükler altında analiz edilmesi konularına dair bilgiler sunulmuştur.

3.2.1. Optimizasyon çalışmasında kullanılan numunelerin üretilmesi

MBY kaplaması olarak kullanımı araştırılan numuneler farklı kalınlıklarda ve konumlarda SIFCON tabakalar barındırmaktadır. Beton yol modüllerinin içerdiği bu SIFCON tabakaların kalınlıkları ve konumları (hem üst hem alt) değişmektedir. SIFCON tabaka kalınlığı, toplam numune yüksekliğinin %20, %30 ve %40'ına denk gelecek şekilde seçilmiştir. Boyutları 100x100x400 mm olan eğilme numunelerinde bu kalınlıklar 20 mm, 30 mm, ve 40 mm değerlerine, boyutları 150x150x150 mm olan basınç numunelerinde bu kalınlıklar 30 mm, 45 mm ve 60 mm değerlerine karşılık gelmektedir. Beton yol modüllerinde kullanılan SIFCON harcının karışım oranları ve malzeme türleri tüm numunelerde sabit ve aynıdır. Dolayısıyla tüm numuneler için SIFCON harçları hazırlanırken tek bir reçete kullanılmıştır yani tüm numuneler aynı karışım oranlarına ve malzeme özelliklerine sahip tek bir harç tipi kullanılarak dökülmüştür. Bu sebeple tüm numunelerin içerdiği çimento dozajı ve silis dumanı, agrega, süper akışkanlaştırıcı, su miktarı eşittir. Tüm SIFCON tabakalar, hacimce yüzde 5 sabit oranında çelik lif içermektedir. Tabaka kalınlığı değiştikçe kullanılan çelik lif miktarı, kalınlığa bağlı hacim değişiminden ötürü, değişmektedir. SIFCON harcı karışım oranları literatürdeki çalışmalar doğrultusunda laboratuvar da denemeler yapılarak belirlenmiştir (İpek ve ark. 2014; İpek ve Aksu 2019; Soylu ve Bingöl 2019; Bayrak ve ark. 2019; İpek 2018; Doğan 2017; Bozkırlı 2019; Bingöl 2017; Kılılı 2018). Bu denemeler sonucu nihai karışım oranları elde edilmiştir. Karışım oranları 1 m³ hacim için Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Karışım oranları

Malzeme	Miktar (kg)
Çimento	1000
Su	300
Silis dumanı	100
Süper akışkanlaştırıcı	17
Kum	785
Su/Çimento	0.30
Süperakışkanlaştırıcı/Çimento	0.017

MBY kaplamasının oluşturulması amacıyla tercih edilecek numune tipine karar vermek üzere yapılan optimizasyon çalışması için sertleşmiş beton numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının bilinmesi gerekmektedir. Eğilme dayanımı testlerinde kullanılan numuneler (genişlik x derinlik x uzunluk) 100x100x400 mm boyutlarındaki çelik kalıplar, basınç dayanımı testlerinde kullanılan numuneler (genişlik x derinlik x uzunluk) 150x150x150 mm boyutlarındaki plastik kalıplar ile üretilmiştir. Her bir numune, içerdiği farklı tabaka özellikleri ve kalınlıkları sebebiyle, aşamalı şekilde dökülmüştür. Eğilme dayanımı testi için üretilen numunelerde hem alt hem üst bölgede karşılıklı olacak şekilde 20-30-40 milimetrelik farklı kalınlıkta SIFCON tabakaların kombinasyonu, basınç dayanımı testi için üretilen numunelerde, hem alt hem üst bölgede karşılıklı olacak şekilde 30-45-60 milimetrelik farklı kalınlıkta SIFCON tabakaların kombinasyonu söz konusudur. Numune kesitlerinde SIFCON tabakaların bulunmadığı bölgedeki tabakalarda yine SIFCON tabakalarda tercih edilen harç kullanılmıştır fakat bu sözü edilen bölgeler çelik lif içermemektedirler. Lif içermeyen harçtan meydana gelen bu bölgeler yalın birer tabaka olarak düşünülmüştür. Numune kalıplarının yüksekliği sabit olduğundan kesit boyutları da sabit olmakta hem alt hem üst bölgelerdeki SIFCON tabakaların kalınlığı değiştiği bu tabakalar arasındaki yalın tabakaların da kalınlığı değişmektedir.

Numunelerde SIFCON tabaka kalınlıkları ve konumlarının değişimine ek olarak bu tabakalarda sabit çapta fakat farklı uzunluktaki iki çelik lif türünün kullanılması yoluyla lif uzunlukları da değiştirilerek kombinasyonlar meydana getirilmiştir. Bu sayede 36 farklı numune tipi oluşturulmuştur. Her numune tipinden, eğilme dayanımı testi ve basınç dayanımı testi için ayrı ayrı olmak üzere 3 adet numune hazırlanmış ve toplamda dökülen numune sayısı 216 adet olmuştur. Numuneler, tiplerine göre adlandırılmıştır. Çizelge 3.7.'de eğilme dayanımı testi için üretilen numune kombinasyonları, Çizelge 3.8.'de basınç dayanımı testi için üretilen numune kombinasyonları sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Eğilme numune kodları, tabaka kalınlıkları ve lif uzunlukları

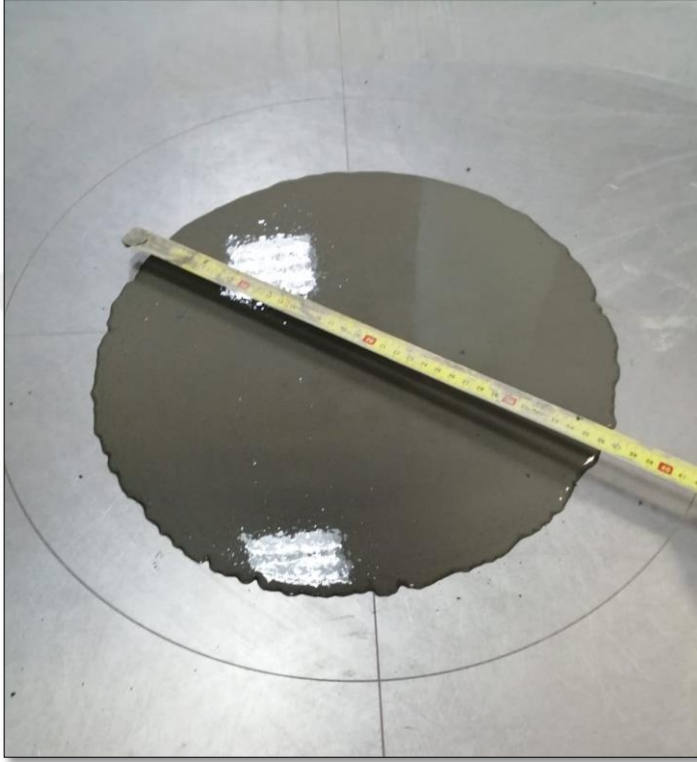
Numune kodu	Alt tabaka kalınlığı (mm)	Alt tabaka lif uzunluğu (mm)	Üst tabaka kalınlığı (mm)	Üst tabaka lif uzunluğu (mm)
LB20-LT20	20	60	20	60
LB20-LT30	20	60	30	60
LB20-LT40	20	60	40	60
LB30-LT20	30	60	20	60
LB30-LT30	30	60	30	60
LB30-LT40	30	60	40	60
LB40-LT20	40	60	20	60
LB40-LT30	40	60	30	60
LB40-LT40	40	60	40	60
SB20-ST20	20	30	20	30
SB20-ST30	20	30	30	30
SB20-ST40	20	30	40	30
SB30-ST20	30	30	20	30
SB30-ST30	30	30	30	30
SB30-ST40	30	30	40	30
SB40-ST20	40	30	20	30
SB40-ST30	40	30	30	30
SB40-ST40	40	30	40	30
LB20-ST20	20	60	20	30
LB20-ST30	20	60	30	30
LB20-ST40	20	60	40	30
LB30-ST20	30	60	20	30
LB30-ST30	30	60	30	30
LB30-ST40	30	60	40	30
LB40-ST20	40	60	20	30
LB40-ST30	40	60	30	30
LB40-ST40	40	60	40	30
SB20-LT20	20	30	20	60
SB20-LT30	20	30	30	60
SB20-LT40	20	30	40	60
SB30-LT20	30	30	20	60
SB30-LT30	30	30	30	60
SB30-LT40	30	30	40	60
SB40-LT20	40	30	20	60
SB40-LT30	40	30	30	60
SB40-LT40	40	30	40	60

Çizelge 3.8. Basınç numune kodları, tabaka kalınlıkları ve lif uzunlukları

Numune kodu	Alt tabaka kalınlığı (mm)	Alt tabaka lif uzunluğu (mm)	Üst tabaka kalınlığı (mm)	Üst tabaka lif uzunluğu (mm)
LB30-LT30	30	60	30	60
LB30-LT45	30	60	45	60
LB30-LT60	30	60	60	60
LB45-LT30	45	60	30	60
LB45-LT45	45	60	45	60
LB45-LT60	45	60	60	60
LB60-LT30	60	60	30	60
LB60-LT45	60	60	45	60
LB60-LT60	60	60	60	60
SB30-ST30	30	30	30	30
SB30-ST45	30	30	45	30
SB30-ST60	30	30	60	30
SB45-ST30	45	30	30	30
SB45-ST45	45	30	45	30
SB45-ST60	45	30	60	30
SB60-ST30	60	30	30	30
SB60-ST45	60	30	45	30
SB60-ST60	60	30	60	30
LB30-ST30	30	60	30	30
LB30-ST45	30	60	45	30
LB30-ST60	30	60	60	30
LB45-ST30	45	60	30	30
LB45-ST45	45	60	45	30
LB45-ST60	45	60	60	30
LB60-ST30	60	60	30	30
LB60-ST45	60	60	45	30
LB60-ST60	60	60	60	30
SB30-LT30	30	30	30	60
SB30-LT45	30	30	45	60
SB30-LT60	30	30	60	60
SB45-LT30	45	30	30	60
SB45-LT45	45	30	45	60
SB45-LT60	45	30	60	60
SB60-LT30	60	30	30	60
SB60-LT45	60	30	45	60
SB60-LT60	60	30	60	60

Granüler malzemelerin kuru halde karıştırılmasının ardından aşamalı şekilde su ve süper akışkanlaştırıcı ilave edilerek bir süre daha bu karıştırma işlemine devam edilmesi ile döküme hazır hale getirilen harcın akışkanlığı mini slump flow testi ile tespit edilmiştir (Şengül 2018; İpek ve Aksu 2019; Tuyan ve Yazıcı 2012). Testte

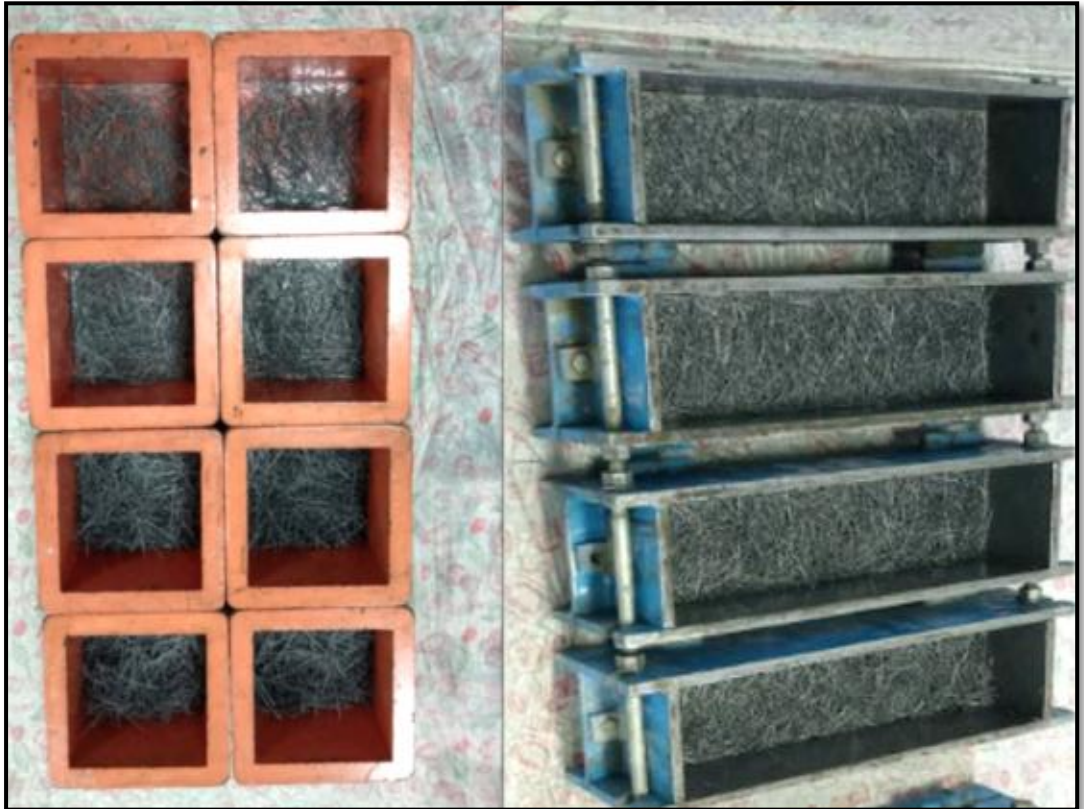
kullanılan kalıp ASTM C230'a uygun seçilmiş ve taze harcın akışkanlığı belirlenirken ASTM C1437 dikkate alınmıştır (Şengül 2018). Tüm numune tiplerinde kullanılan bu harcın yayılma çapı 37 milimetre olarak ölçülmüştür (Şekil 3.7.). Taze harcın yayılma çapı değeri literatürdeki çalışmalarda kullanılan harçların sergilediği akışkanlık değerleri ile uyumludur. (Şengül, 2018; İpek ve Aksu, 2019; Tuyan ve Yazıcı, 2012).



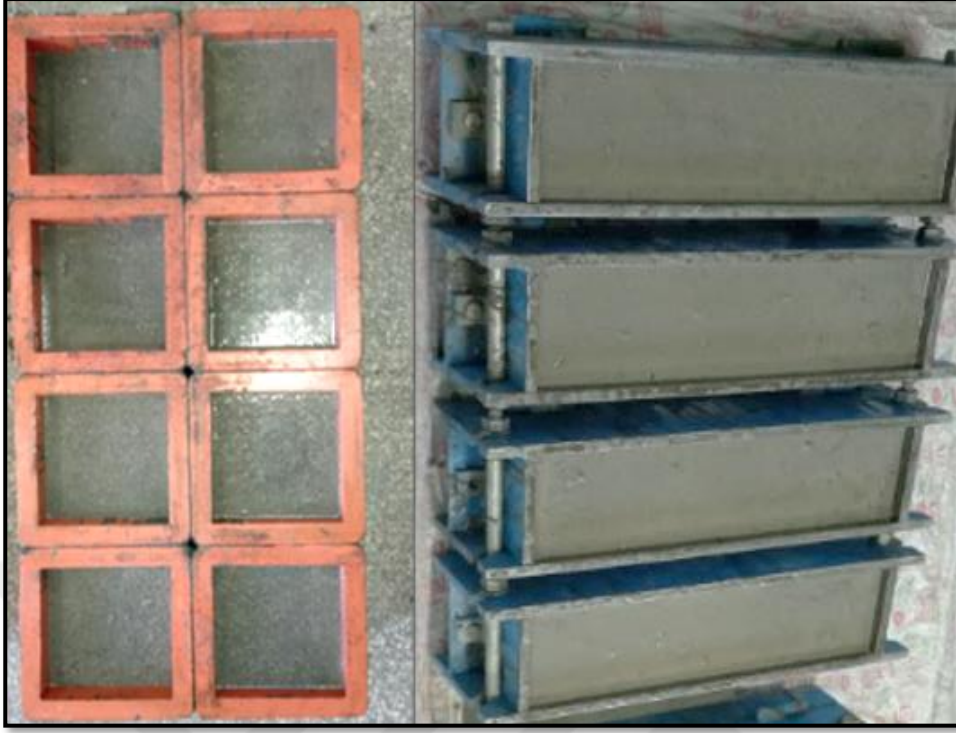
Şekil 3.7. Yayılma çapı deneyi

İpek ve Aksu (2019), taze haldeki harcın tablaya döküldüğü andaki yayılma çapını ölçmüş ve belirli zaman aralıklarınca bekletilen harcın yayılma çapının değişimini inceleyip rapor etmiştir. Çalışmaya göre 60 dakikaya kadar SIFCON harcın kıvamını koruduğu ve döküme uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu uygulamadan yola çıkılarak bu çalışmada, beton yol modül numunelerinin üretiminde kullanılan harç 10 dakika aralıklarla bekletilmiş, bekletilen bu karışımların yayılma çapı değişimi incelenmiş olup kıvamını yaklaşık 55 dakikaya kadar koruduğu ve bu süre içinde döküme uygun olduğu görülmüştür. Bu durum tespit edildikten sonra numunelerin üretimine başlanmıştır. Numunelerin kalıplardan hasarsız bir şekilde çıkarılabilmesi için kalıp yüzeyleri yağlanmıştır. Kalıplara, tabakalar yaklaşık 55 dakika aralıklarla aşamalı şekilde dökülmüştür. İlk etapta kalıba alt tabakayı oluşturan SIFCON'un

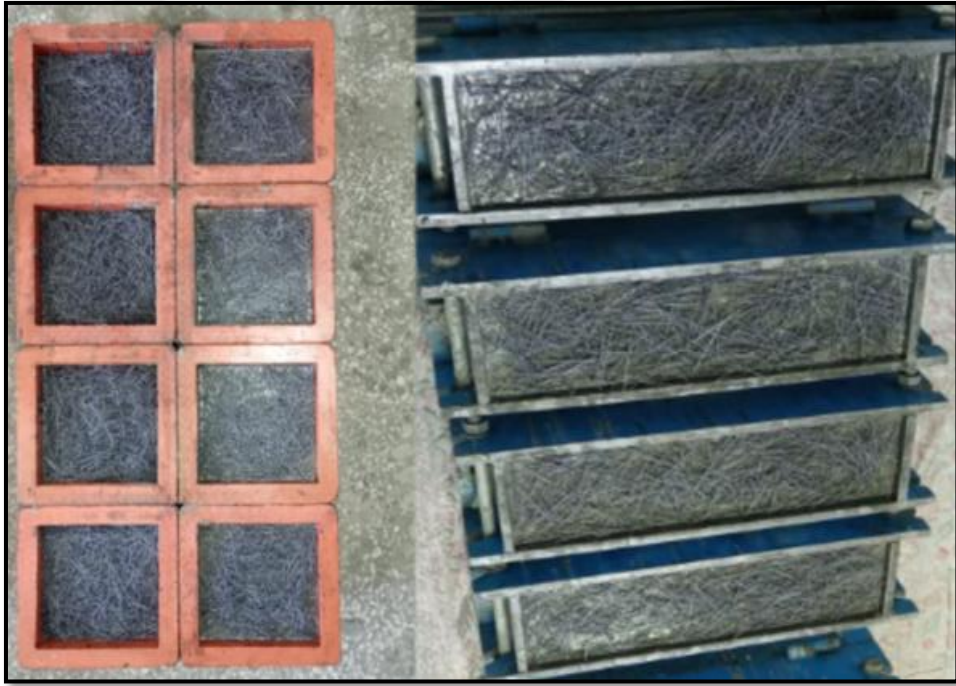
barındırdığı çelik lifler rastgele şekilde serilmiş (Şekil 3.8.) ve kalıbın iç yüzeyi alt tabakanın kalınlığını yansıtacak noktadan işaretlenmiştir. İşaretlenen noktadaki kalınlığa ulaşacak kadar harç hazırlanmış ve beklemeden dökülmüş olup alt SIFCON tabaka tamamlanmıştır. Hemen ardından herhangi bir süre beklemeden çelik lif barındırmayan ara tabaka aynı şekilde belirlenmiş kalınlığa ulaşacak kadar dökülmüştür (Şekil 3.9.). Aradaki yalın tabaka tamamlandıktan sonra yaklaşık 55 dakika beklenmiş ve üst SIFCON tabakada bulunan çelik lifler bu süre içerisinde rastgele şekilde kalıba serilmiştir (Şekil 3.10.). Üst tabaka kalınlığı tamamlanana kadar kalıbın üst yüzeyine ulaşacak şekilde harç dökülmesi ile tüm döküm süreci tamamlanmıştır (Şekil 3.11.). Numuneler tüm bu döküm aşamalarından sonra bir gün süre ile kalıplarda bekletilmiştir. Bir gün süre ile kalıplarda bekletilmiş olan numuneler zarar görmeden çıkarılmış ve kür havuzuna 7 ve 28 gün bekletilmek üzere yerleştirilmiştir (Şekil 3.12.).



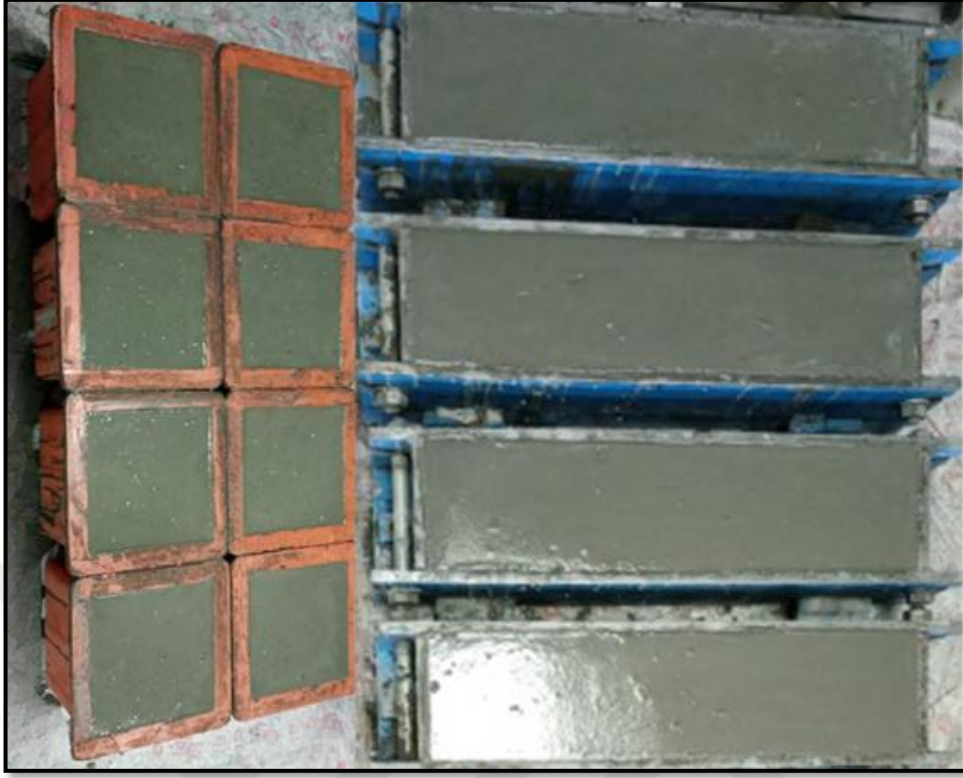
Şekil 3.8. Alt tabaka liflerin serimi



Şekil 3.9. Ara tabaka tamamlanana kadar sürdürülen beton dökümü



Şekil 3.10. Üst tabaka liflerin serimi



Şekil 3.11. Üst tabaka tamamlanana kadar sürdürülen beton dökümü



Şekil 3.12. Kür havuzunda bekletilen numuneler

3.2.2. Optimizasyon çalışmasında kullanılan numunelerin laboratuvar testleri

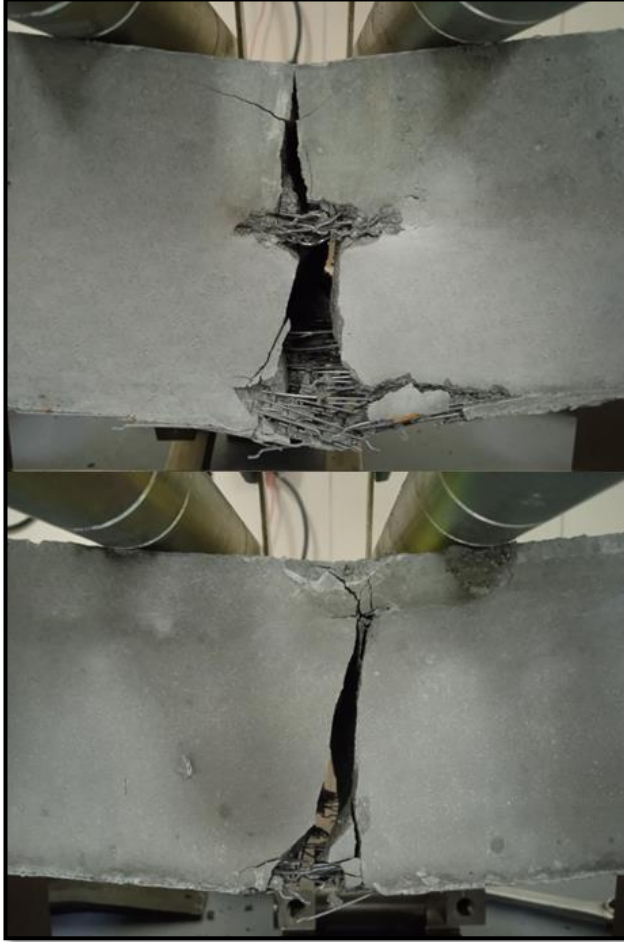
Numuneler kürlendikten sonra test aşamasına geçilmiştir. Eğilme testleri 100 kN maksimum yük kapasiteli Shimadzu marka eğilme cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.13.), ve bu testler ASTM C78 ve TS EN 12390-5'e uygun olacak şekilde yürütülmüştür. Eğilme testleri sonucunda elde edilen yük-deformasyon eğrileri kullanılarak numunelerin tokluk değerleri hesaplanmıştır (Beglarigale ve ark. 2016). Basınç dayanımı testleri Ele marka 3000 kN kapasiteli test cihazında yapılmıştır (Şekil 3.14.). Basınç dayanımı testleri yapılırken TS EN 12390-3 dikkate alınmıştır. Şekil 3.15.'te ve Şekil 3.16.'da test edilmiş numunelerin durumlarına ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.13. Eğilme test cihazı



Şekil 3.14. Basınç test cihazı



Şekil 3.15. Deforme olmuş eğilme dayanımı testi numuneleri



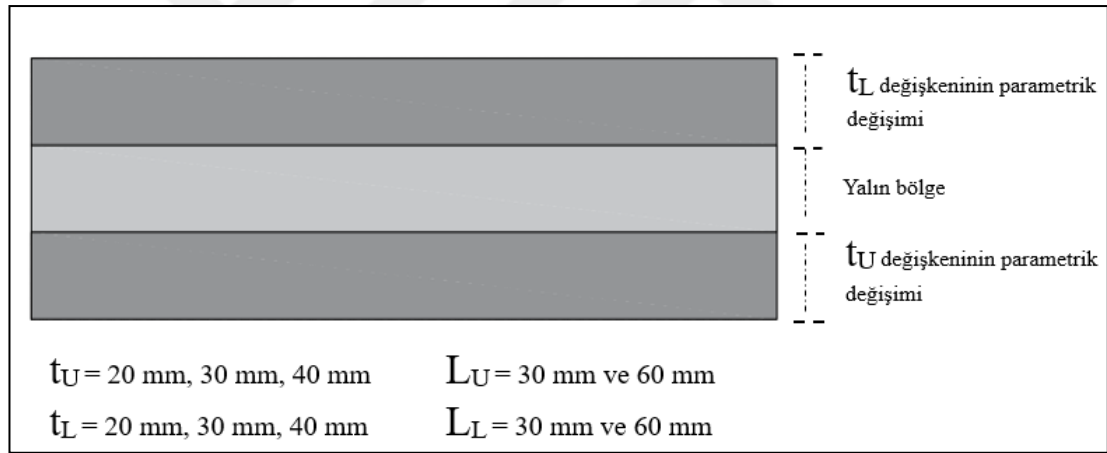
Şekil 3.16. Deforme olmuş basınç dayanımı testi numuneleri

3.2.3. Optimizasyon çalışması

Algin ve ark. (2022), tarafından yapılan alttemelde hidrolik kondüktiviteyi dikkate alan global verimlilik sınırlarının belirlendiği çalışmadaki optimizasyon tekniği ve optimizasyon temelli verimlilik akış diyagramı tasarım metodolojisi bu doktora tezini esas almış olup Algin ve ark. (2022), yayınındaki referans listesinde bu konuda teze de atıf yapılmıştır. Bu tezdeki kaplama tabakası eğilme dayanımını temel alan verimlilik sınır yaklaşımı bu yayında alttemel için hidrolik kondüktiviteyi temel olarak gerçekleştirilmiştir.

Beton yol modüllerinin hem üst hem alt bölgelerinde konumlandırılan SIFCON tabakaların kalınlıklarının ve bu tabakalardaki liflerin uzunluklarının, numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, tokluk ve maliyet gibi özelliklerini değiştirdiği beklenmektedir. Bu özelliklerin değişiminin tespit edilebilmesi için kapsamlı parametrik çalışmanın deneysel sonuçları üzerinde çok amaçlı verimlilik analizi yürütüldüğü ifade edilmiştir. RSM kullanılarak, optimum verimlilik sınırları, bir dizi çok amaçlı analize dayanan ikili optimizasyon dikkate alınarak belirlenmiştir (Algin ve ark., 2022). Eğilme dayanımı, basınç dayanımı testlerinden elde edilen sonuç

değerleri ile her bir numunenin maliyet değeri kullanılarak bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki bireysel ya da kombine edilmiş etkisini belirtmeye yönelik bağımlı değişkenler için regresyon analizleri yapılmıştır. SIFCON alt tabaka kalınlığı (t_L), üst tabaka kalınlığı (t_U), alt tabaka çelik lif uzunluğu (L_L) ve üst tabaka çelik lif uzunluğu (L_U) birer bağımsız değişken olarak düşünülmüştür. Bağımlı değişkenler olan 28 günlük eğilme dayanımı (f_{28-day} (Fs-28)), 28 günlük basınç dayanımı (σ_{28-day} (Cs-28)), 28 günlük tokluk değeri (K_{28-day} (K-28)), 7 günlük eğilme dayanımı (f_{7-day} (Fs-7)), 7 günlük basınç dayanımı (σ_{7-day} (Cs-7)), 7 günlük tokluk değeri (K_{7-day} (K-7)) ve üretim maliyeti (Cost) değerleri, bağımsız değişkenler ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 3.17.'de eğilme numunesi için SIFCON tabaka kalınlığı parametrelerinin değişimi görsel halinde özetlenmiştir.

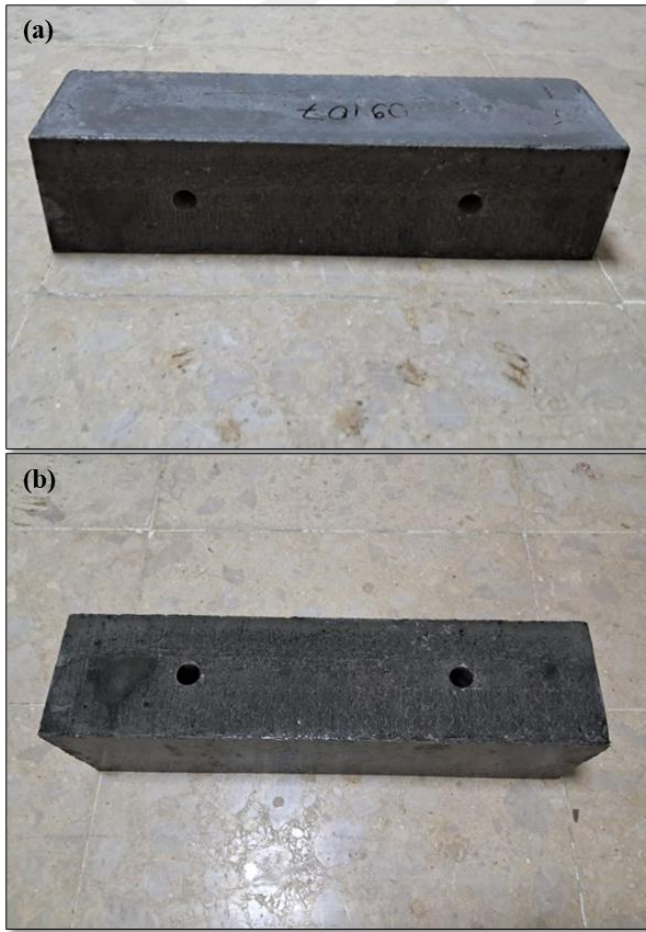


Şekil 3.17. SIFCON tabaka kalınlığı parametrelerinin değişimine ait görsel

3.2.4. MBY sisteminin sahada oluşturulması ve test alanının hazırlanması

İlk etapta laboratuvarında dökümü yapıp eğilme ve basınç dayanımı testleri tamamlanan numunelerden elde edilen veriler ile bir optimizasyon çalışması yürütülmüş olduğu ifade edilmiştir. Bu etaptan sonra MBY sisteminin sahada oluşturulması için üst tabakasında 20 mm kalınlığında ve kısa lif bulunan, alt tabakasında 40 mm kalınlığında ve uzun lif bulunan numunelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu çalışmadaki MBY kaplama elemanları ve elemanların meydana

getirdiği kaplama sistematığı tarafımızca geliştirilmiştir. Nihai MBY kaplama elemanı geometrisi ve paternine karar vermeden önce yayınladığımız Sızdırmazlık Contalı Birleşimli Ulaşım Modülü (TR201910455 B) ve Enjeksiyon Kanallı Birleşimli Ulaşım Modülü (TR201910451 B) adlarıyla iki adet patentimiz bulunmaktadır. 100 x 100 x 400 mm boyutlarındaki numunelerde 20-30-40 mm olan SIFCON tabaka kalınlıkları 150 x 150 x 600 mm boyutlarındaki kalıplarla üretilen numunelerde, toplam kalınlık/ SIFCON tabaka kalınlığı oranı sabit tutulduğundan, 30-45-60 mm olmaktadır. Şekil 3.18.'de sahada kullanılmak üzere 30-60 mm (üst-alt) kalınlığında SIFCON tabakalar içeren 150 x 150 x 600 mm boyutlarındaki numunelere ait görseller verilmiştir. Bu numunelerin tamamı tek tip olup optimizasyon çalışması sonucu seçilmiştir. Her bir numune üst bölgede 30 mm kalınlığında kısa lifli, alt bölgede 60 mm kalınlığında uzun lifli SIFCON tabaka içermektedir.



Şekil 3.18. Beton yol modülü üstten (a) ve yandan (b) görünüşü

MBY kaplama kalınlığının 150 mm değerinde olması amacıyla sahada kullanılacak numuneler için 150 x 150 x 600 mm boyutlarındaki kalıplar tercih edilmiştir. Beton yol modülleri yatayda çelik gijon tijler ile sabitlenmiştir. Bu tijlerin geçeceği delikler sabit 20 mm genişliğinde olup, beton dökümü yapılırken boş kalmasını sağlamak amacıyla kalıplar delinmiş ve bu deliklere silindir elemanlar yerleştirilmiştir. Tüm kalıplar bu elemanlarla birlikte yağlanmıştır. 150 x 150 x 600 mm boyutlarında kalıpların seçilmiş olması aynı zamanda numune boyutlarını da büyütmüş olup sabit 20 mm genişliğindeki deliklerin numune kesitlerinde kapladığı alan değerini küçültmüştür. Numune üzerinde bulunan deliklerin yarattığı boşluk hacimlerinin numune yüksekliğine oranla küçülmüş olması ile bu boşlukların numune üzerinde oluşturacağı olumsuz etkileri nispeten azaltmak hedeflenmiştir.

Saha testi, bir kısmı henüz tamamlanmamış olan esnek üstyapılı iki şeritli bölünmüş bir karayolunda yürütülmüştür. Saha çalışmasının yapıldığı yol kesiminin bir bölümü asfalt kaplama tabakası yüzeyine kadar tamamlanmış olup diğer bölümü sadece temel tabakası yüzeyine kadar tamamlanmıştır. Temel tabakasının açıkta bulunan yüzeyi temizlenip düzeltildikten sonra laboratuvarda üretilen MBY elemanlarının birleştirilmesi ile oluşturulan MBY kaplama tabakası, bu temel tabakasının üzerine yerleştirilmiştir. 150 x 150 x 600 mm boyutlarındaki beton yol modülleri 150 x 150 cm'lik bir kaplama alanı oluşturacak şekilde dizilmiştir. Modüller üzerindeki deliklerden çelik gijon tijler geçirilmiş, gijon tijlerin uç kısımlarına çelik plaklar ve somular takılıp el yordamıyla sıkılmıştır. Bu sayede beton modüller yatayda sabitlenmiştir. Şekil 3.19.'da modüller beton yol kaplamanın hazırlanış aşaması (a) ve test alanının yüklemeye hazır hali (b) sunulmuştur.

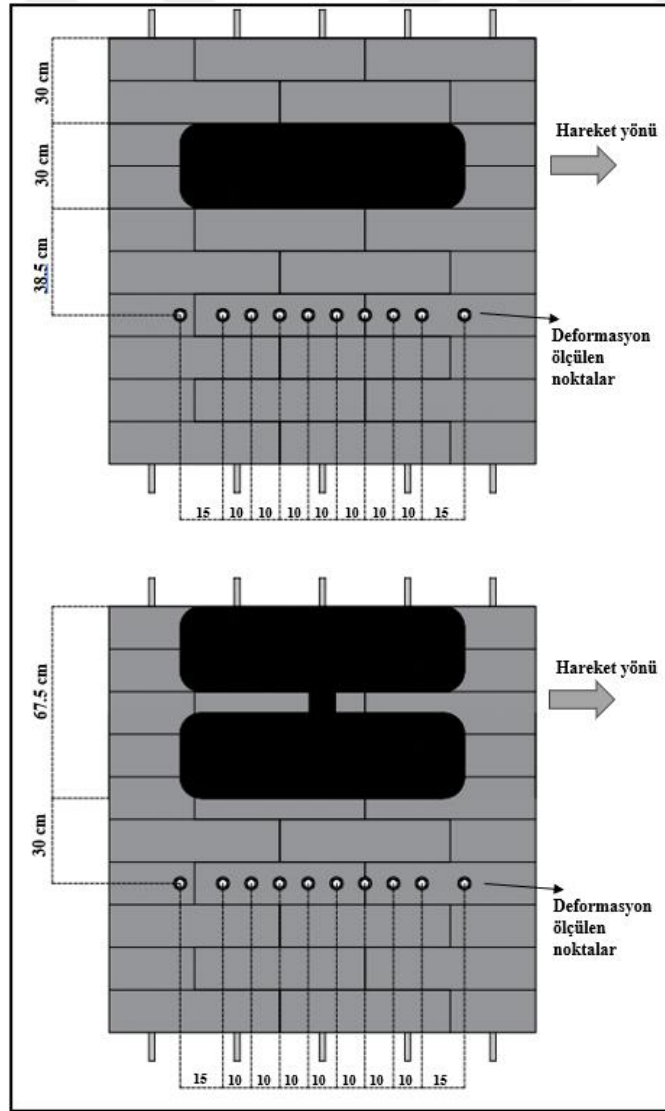


Şekil 3.19. Test alanının yüklemeye hazır hali

3.2.4. Saha testinin yapılması

Saha alanı, yüklemeye hazır hale getirildikten sonra Mercedes-Benz Axor 2529 K damperli kamyonu 5 km/sa'lik nominal hız değeri ile Şekil 3.20.'de şematize edilen konumdan ve yönde geçirilmiştir (Darestani ve ark., 2006a). Damperli kamyonun 2

adet arkada 1 adet önde olmak üzere 3 adet dingili bulunmaktadır. Arka dingillerde 315/80 R22,5 tipi dual, ön dingillerde 315/80 R22,5 tipi tek tekerlekler bulunmaktadır. Damperli kamyon Mercedes-Benz tarafından Axor 2529 K için belirlenen yasal maksimum sınıra (25 000 kg) kadar yüklenmiş ve bu halde test için kullanılmıştır. Damperli kamyonun yerden 150 mm yükseklikte bulunan MBY kaplamanın üzerine rahatça çıkabilmesi ve inebilmesi için MBY kaplamanın hemen başlangıcında ve hemen sonunda temel tabakasında kullanılan malzeme ile rampalar oluşturulmuştur. Şekil 3.21.'de yükleme esnasında damperli kamyonun modüler beton yol kaplama üzerindeki durumu verilmiştir. Damperli kamyon modüler beton yol kaplama üzerinden geçerken her akstaki tekerleğin kaplama üzerindeki görseli alınmıştır.



Şekil 3.20. Yükleme ve deformasyon ölçüm şeması



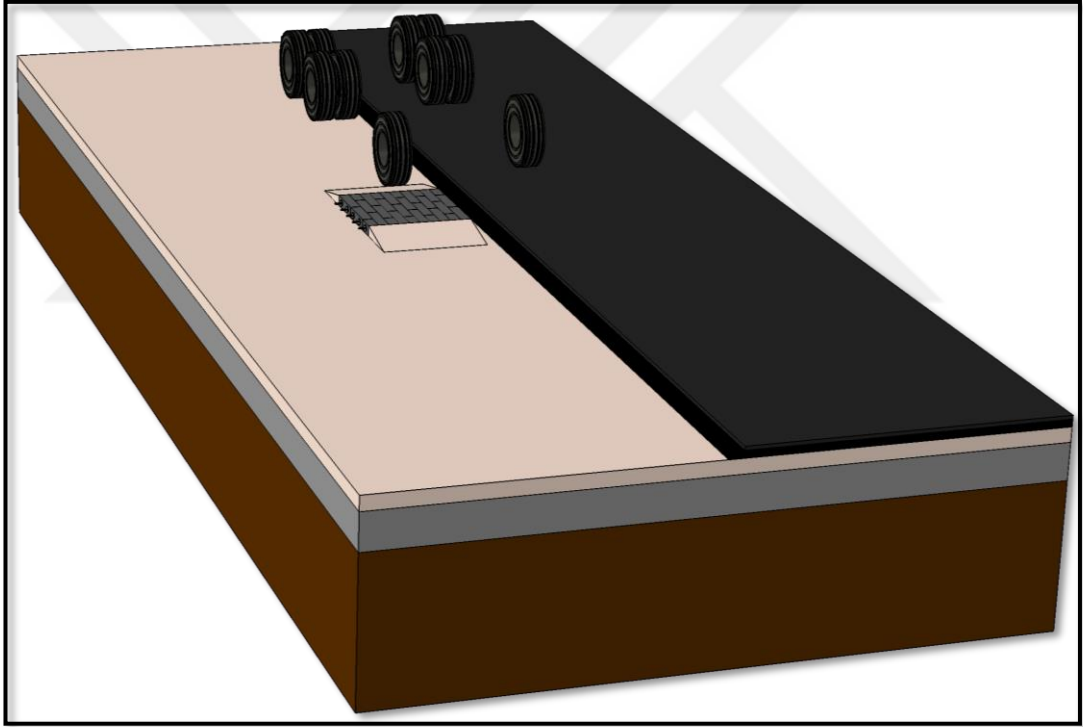
Şekil 3.21. Damperli kamyonun hareket halinde iken modüler beton yol kaplama üzerindeki durumu

Damperli kamyonun 5 km/sa'lik nominal hız ile geçtiği doğrultuya paralel şekilde belirlenen doğrultuda 10 adet lineer transdüserin bulunduğu bir platform ile düşey deplasmanlar ölçülmüştür. Bu platform rijit yapıda olup deformasyonun ölçüldüğü alanın dışında hareket etmeyen bir bölgeye sabitlenmiştir. Lineer transdüserlerin ölçtüğü düşey deplasman verileri toplamda 16 adet veri giriş kanalı bulunan veri toplama cihazları ile bilgisayar ortamındaki arayüze aktarılmış ve kaydedilmiştir. Şekli 3.21.'de lineer transdüserlerin bulunduğu platform, Şekil 3.20.'de düşey deplasmanların ölçüldüğü noktaların konumları verilmiştir.

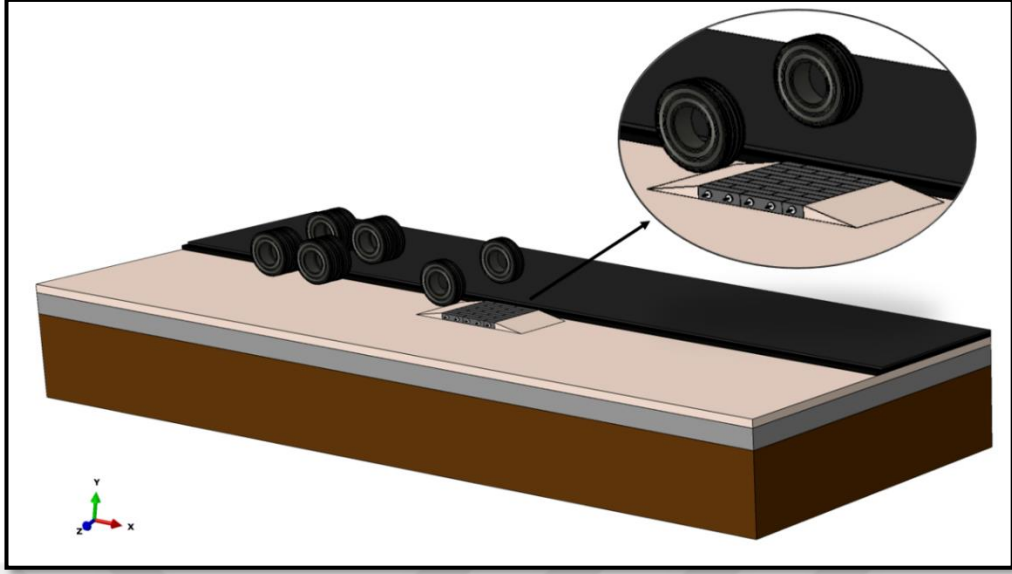
3.2.5. MBY sistemin üç boyutlu modeli ve 3B-SEM ile analizi

3.2.5.1. Üç boyutlu katı model

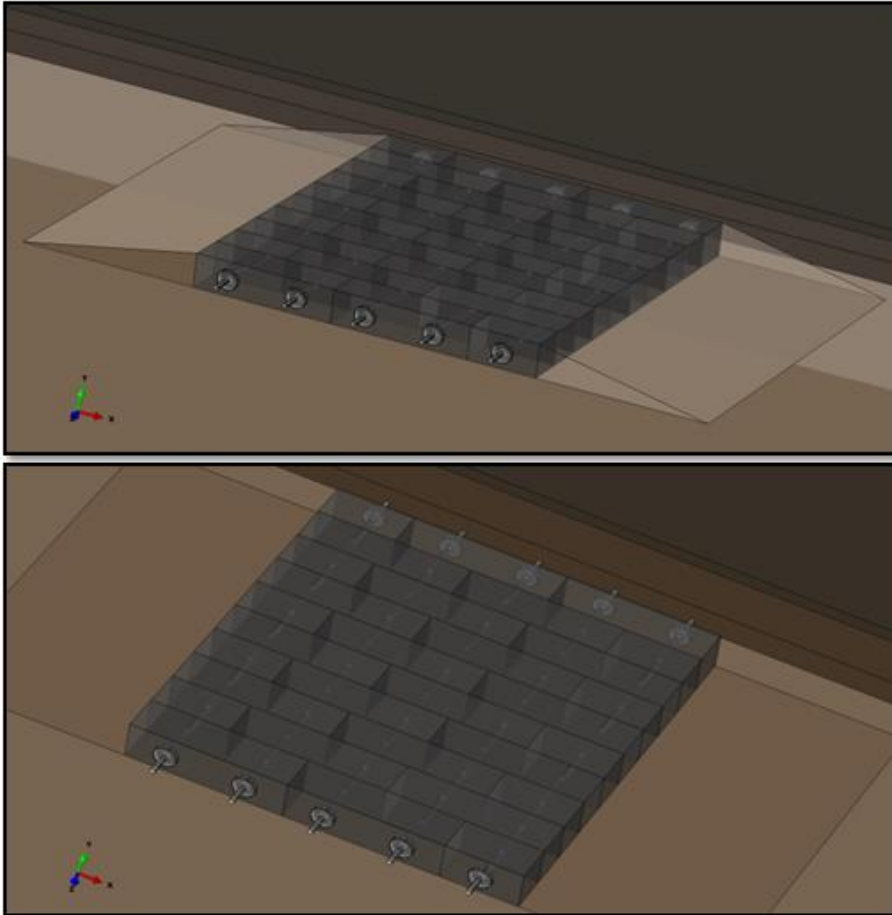
Saha testi tamamlanan MBY sistemi, bilgisayar ortamında karayolundaki diğer tabakalar ve damperli kamyon tekerlekleriyle birlikte üç boyutlu şekilde modellenmiş ve sahadaki test şartlarına uygun olarak analiz edilmek üzere sonlu elemanlar metodu ile çözümlene yapan ilgili programa aktarılmıştır. Analiz edilecek modelin uzunluğu 20 m, genişliği 9 m'dir. Şekil 3.22., Şekil 3.23. ve Şekil 3.24'te analiz edilecek sistemin katı modeli sunulmuştur.



Şekil 3.22. Analiz edilecek sistemin katı modeli (önden görünüş)



Şekil 3.23. Analiz edilecek sistemin katı modeli (yandan görünüş)



Şekil 3.24. Analiz edilecek sistemin katı modeli (kaplama detayları)

3.2.5.2. Malzeme parametreleri

Katı modeli oluşturulan sistem programa aktarıldıktan sonra tüm tabakalar için malzeme parametrelerinin belirlenmesi ve ilgili programa girilmesi gerekmektedir. Taban zemini, seçme malzeme ve temel tabakası için Mohr-Coloumb malzeme parametreleri (Meyerhof, 1956; Jon ve ark., 1989; Carter ve Bentley, 1991; Zaghoul ve White, 1993; Minnesota Department of Transportation, Pavement Design NAVFAC Design Manual 7.2, 2007; Obrzud ve Truty, 2012; Shakir ve ark., 2022; Tanyıldızı ve Çınar, 2023), asfalt tabakaları için lineer elastik malzeme parametreleri tercih edilmiştir (Zaghoul ve White, 1993; Bostancıoğlu, 2018; Diallo, 2019; Asim ve ark., 2021). Powell ve ark. (1984), tarafından elastisite modülü ve CBR değeri dönüşümü amacıyla sunulan korelasyon katsayıları kullanılarak taban zemini, seçme malzeme ve temel tabakalarının elastisite modülleri belirlenmiştir. Bu eşitlik denklem 3.1’de sunulmuştur (Putri ve ark., 2012; Gansonré ve ark., 2021; Khiavi ve Bakhshi, 2021). Çizelge 3.9.’da taban zemini, seçme malzeme, temel ve Çizelge 3.10.’da asfalt tabakaları için kullanılan malzeme parametreleri verilmiştir.

$$E = 17.6 \text{ CBR}^{0.64} \text{ (MPa)} \quad (3.1)$$

Çizelge 3.9. Taban zemini, seçme malzeme, temel ve asfalt tabakaları için kullanılan malzeme parametreleri

Tabaka adı	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	İçsel sürtünme açısı (°)	Kohezyon (kPa)
Temel tabakası	2.22	415.94	0.35	38	-
Seçme malzeme	2.01	271.77	0.35	35	-
Taban zemini	1.64	34.02	0.40	-	36

Çizelge 3.10. Taban zemini, seçme malzeme, temel ve asfalt tabakaları için kullanılan malzeme parametreleri

Tabaka adı	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı
Asfalt tabakası (üst)	2.40	1379.0	0.30
Asfalt tabakası (alt)	2.40	1379.0	0.30

Beton yol modülleri (Diallo, 2019; Shafabakhsh ve ark., 2014) ve çelik gijon tijler için lineer elastik malzeme parametreleri kullanılmıştır. Beton yol modüllerinin 28 günlük basınç dayanımı 150x150x150 mm boyutlarındaki kübik numunelerden elde edilmiştir. Riedel ve ark., 2019, tarafından yüksek dayanımlı betonlar (HPC) için sunulmuş olan 0.86 katsayısı ile 150x300 mm silindir basınç dayanımı dönüşümü yapılmıştır. ACI (American Concrete Institute) 363R’de verilen yüksek dayanım koşullarına yönelik eşitlik kullanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır (Suksawang ve ark., 2018). Bu eşitlik denklem 3.2’ de sunulmuştur. Çizelge 3.11.’de beton yol modülleri ve çelik gijon tijler (Riad ve ark., 2009) için kullanılan malzeme parametreleri verilmiştir. Elastisite modülü ve poisson oranı parametreleri literatürdeki çalışmalar ile uyumludur (Lankard, 1984; Kim ve ark., 2020; Balamuralikrishnan, 2015; Safna ve Anila, 2019; Alzamili ve Elsheikh, 2023). Beton yol modüllerin yoğunluk değeri ASTM C642-13’ e göre hesaplanmıştır (Naser ve Abeer, 2020; Jerry ve Fawzi, 2022).

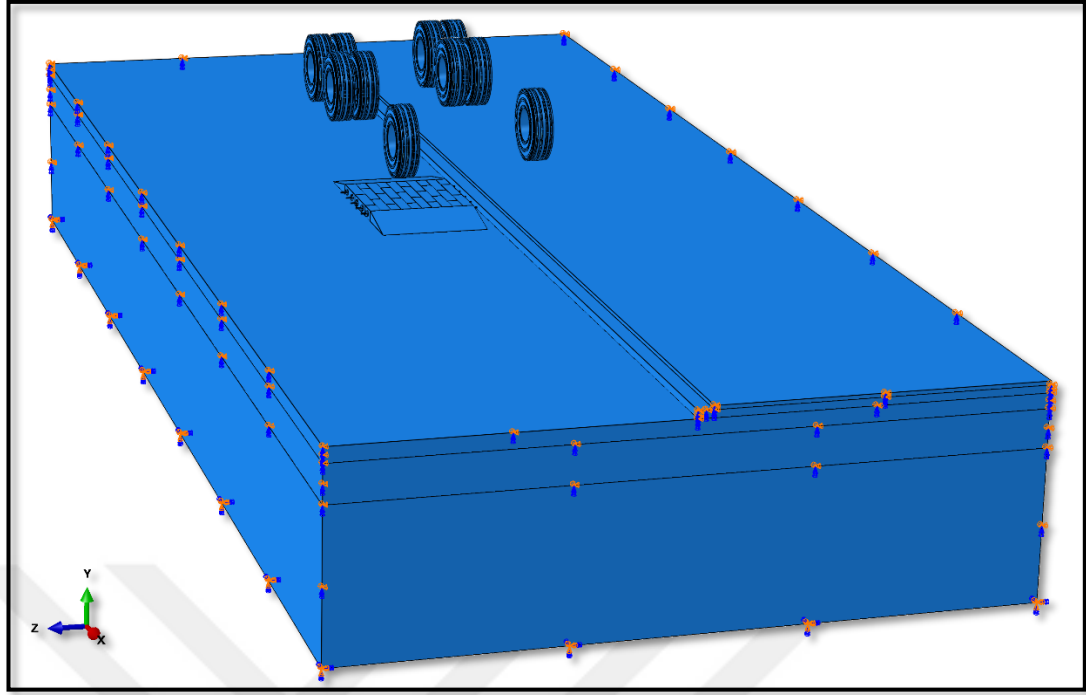
$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ (MPa)} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.11. Beton yol modülleri ve çelik gijon tijler için kullanılan malzeme parametreleri

	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı
Beton yol modülü	2.44	38 237.71	0.30
Çelik gijon tij	7.83	200 000	0.30

3.2.5.3. Model geometrisi, sınır şartları ve tekerlek yükleri

Analiz edilecek sistemin tabanına, deplasmanlar ve dönmeler engellenecek şekilde, ankastre sınır koşulları tanımlanmış, yan yüzeyler düşey doğrultuda serbest bırakılmıştır (Şekil 3.25.). Tekerleklerin ağırlık merkezleri referans noktaları yardımıyla spesifik hale getirilmiş ve referans noktalarına 5 km/sa değerine karşılık gelen hız ve dönme hareketleri girilmiştir. Tekerleklerin bu referans noktaları ile ortak hareket edebilmesini sağlamak amacıyla rigid ve coupling body sınırlamaları tanımlanmıştır ve tekerlekler, çelik malzeme olarak düşünülmüş olup elastisite modülü 200 GPa ve poisson oranı 0.3’tür (Khiavi ve Bakhshi, 2021).



Şekil 3.25. Model tabanı ve kenarları sınır şartları

Yasal maksimum kamyon yükü, dingillere maksimum dingil kapasitesine oranla dağıtılmış, dingil yükleri tekerleklere eşit şekilde bölünmüştür. Damperli kamyonun ön ve arka akslarında bulunan süspansiyonları temsil etmek için tekerleklerin ağırlık merkezlerine elastik “spring” ve “dashpot” elemanlar tanımlanmıştır (Park ve ark., 2014). Süspansiyonların parametreleri Çizelge 3.12.’de verilmiş olup bu değerler, Park ve ark. (2014), tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Yol temas yüzeyleri ile tekerlekler arasında yüzey kontaktı tanımlanmış olup MBY kaplama ile temel tabakası arasındaki etkileşim arayüz sürtünme katsayısı ile sağlanmıştır. Bu katsayı büyük ölçekli kesme kutusu kullanılarak yaklaşık 0.79 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.26). Üstyapı tabakaları birbirlerine tie bağlanmıştır (Khiavi ve Bakhshi, 2021).

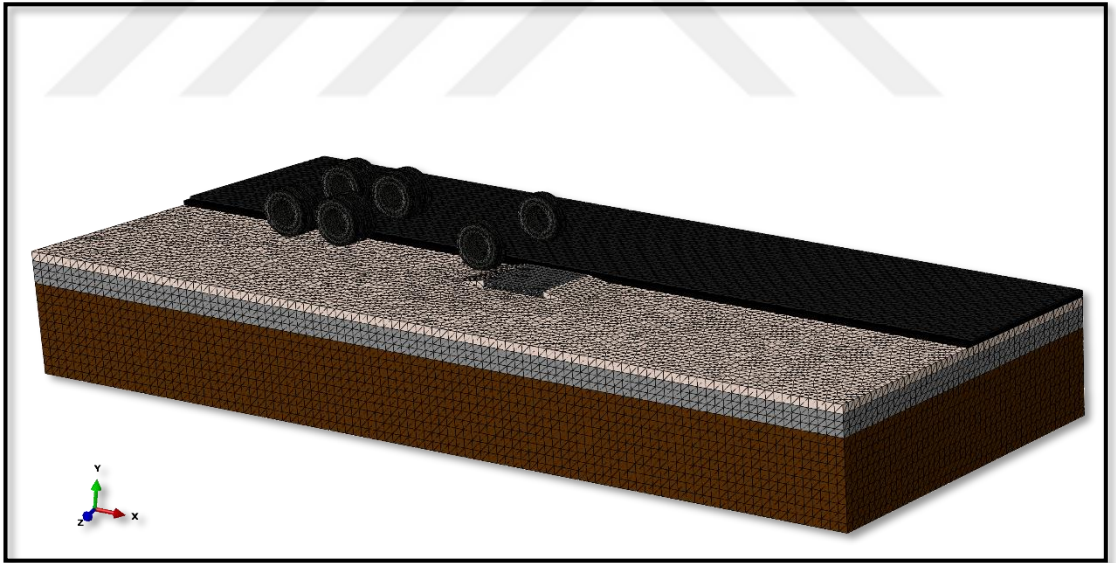
Çizelge 3.12. Süspansiyon parametreleri

	Elastik rijitlik (kN/m)	Elastik sönüm (kN.s/m)
Ön süspansiyonlar	525	5.6
Arka süspansiyonlar	1051	12.6

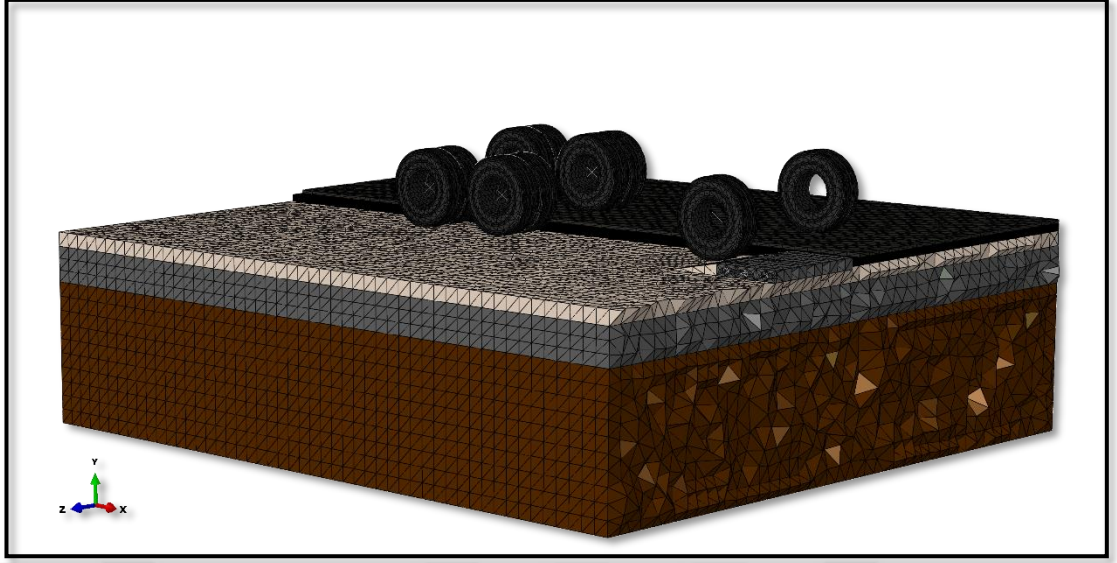
Model sonlu elemanlar ağı, yakınsama çalışması sonucunda belirlenmiştir. Şekil 3.27., 3.28.’de modelin sonlu elemanlar ağının genel görünümüne ait görseller verilmiştir. “Dynamic Explicit” analiz tipi kullanılarak analiz tamamlanmıştır.



Şekil 3.26. Büyük ölçekli kesme kutusu testi



Şekil 3.27. Sonlu elemanlar ağı yandan görünüş



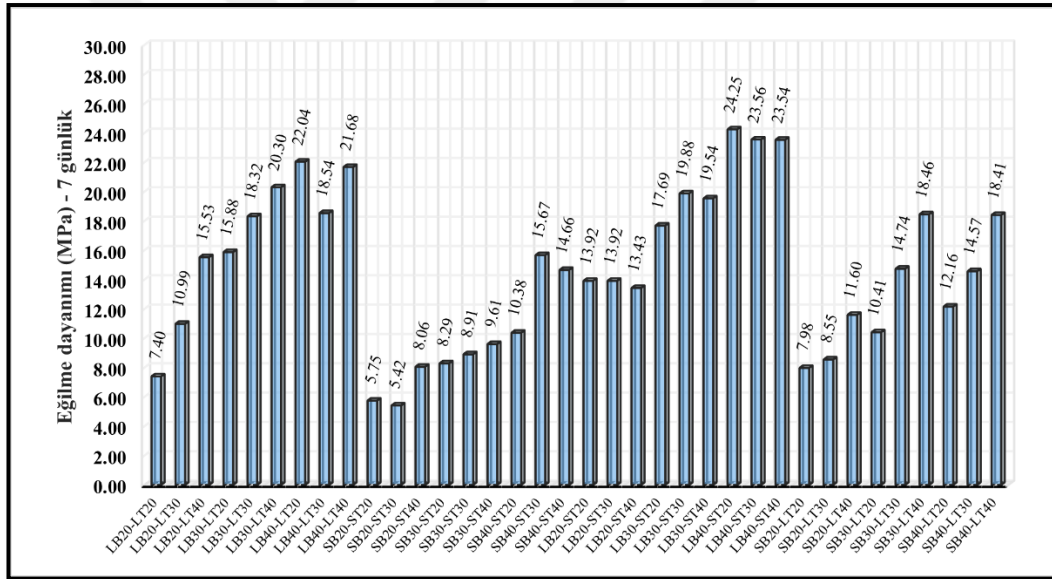
Şekil 3.28. Sonlu elemanlar ağından bir kesit

4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

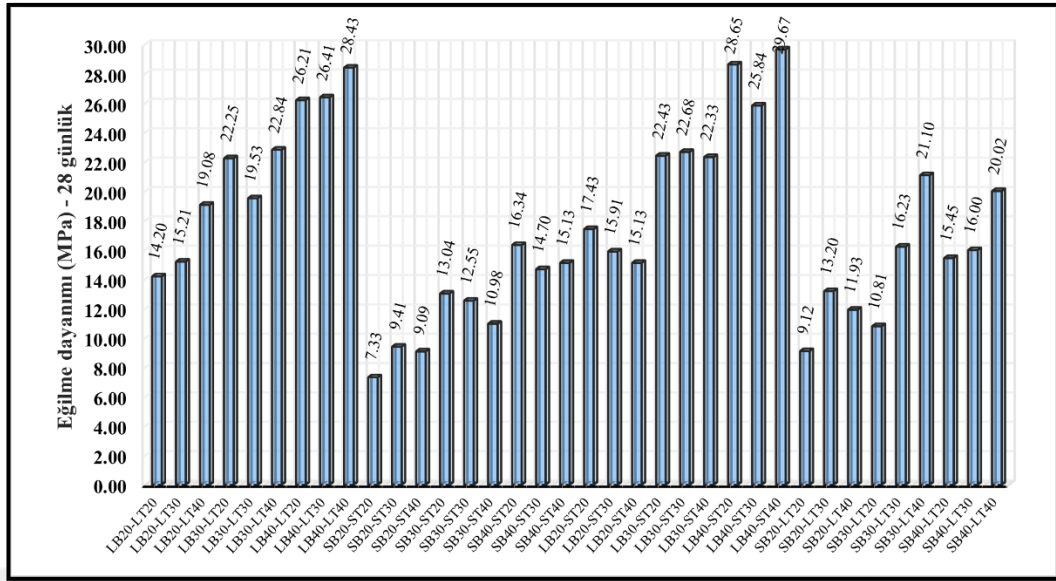
Aşağıdaki bölümlerde, laboratuvar, saha test sonuçları ve sonlu elemanlar metodu ile yapılan dinamik analizlerin sonuçları verilmiştir.

4.1. Optimizasyon çalışmasında kullanılan numunelerin test sonuçları

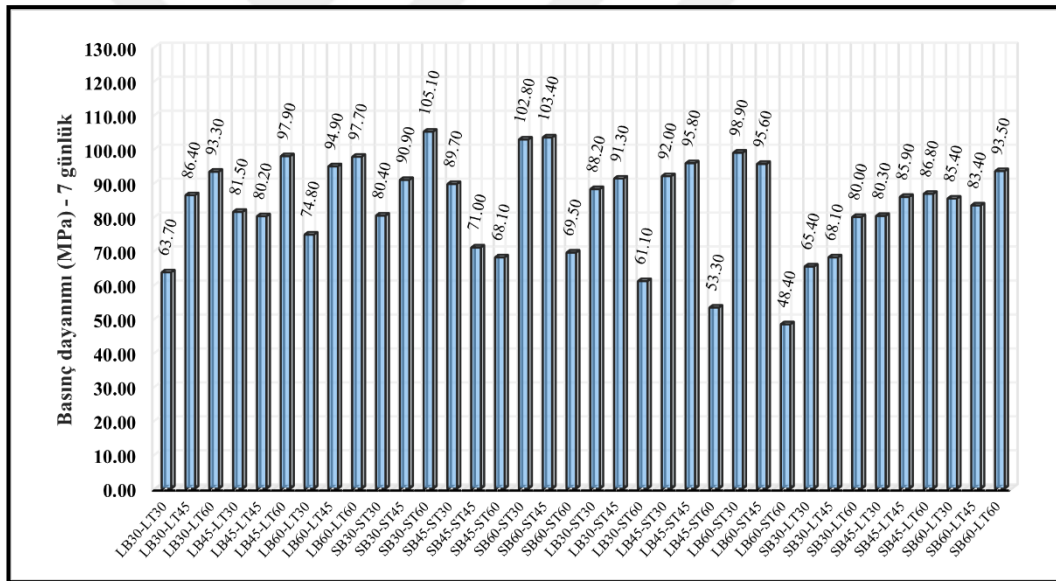
Optimizasyon çalışmasına yönelik laboratuvarda üretilen, 108 adet eğilme dayanımı numunesi, 108 adet basınç dayanımı numunesi olmak üzere, toplam 216 adet numunenin 7 günlük eğilme dayanımı, 28 günlük eğilme dayanımı, 7 günlük basınç dayanımı ve 28 günlük basınç dayanımı test sonuçları sırasıyla Şekil 4.1., 4.2., 4.3. ve 4.4.'te sunulmuştur.



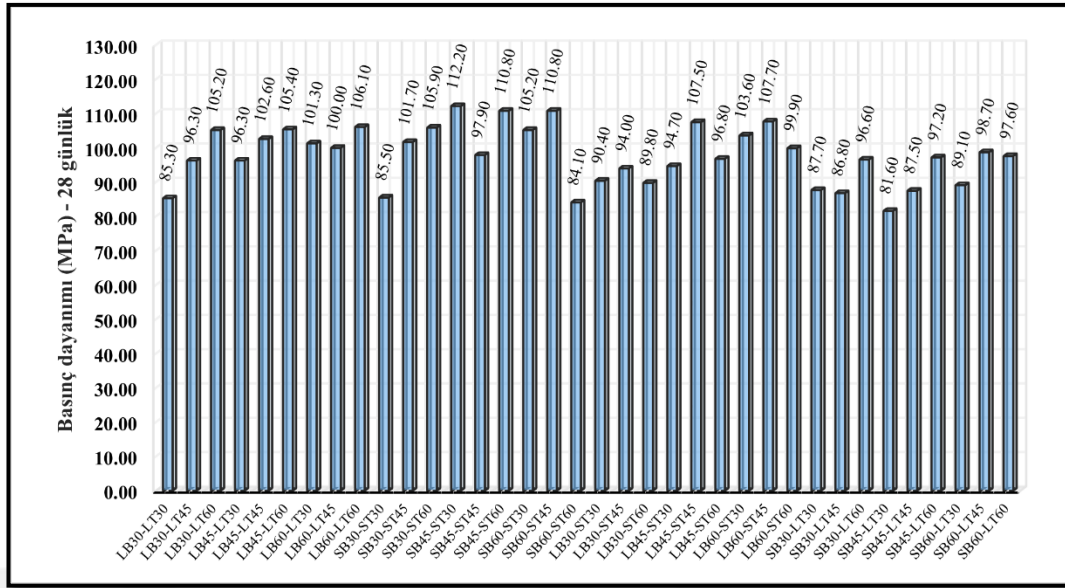
Şekil 4.1.Eğilme dayanımı sonuçları – 7 günlük



Şekil 4.2.Eğilme dayanımı sonuçları – 28 günlük



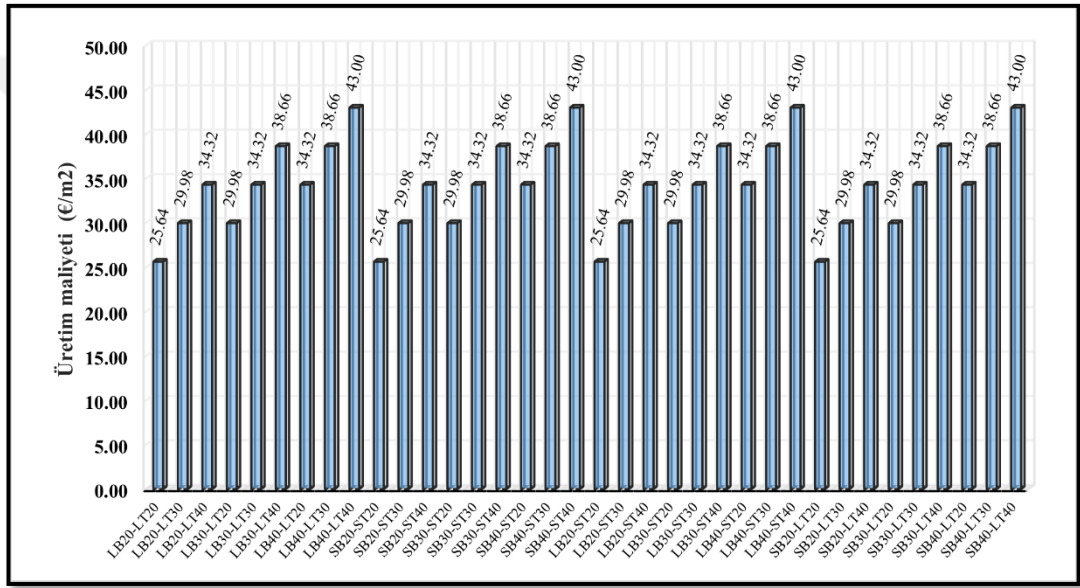
Şekil 4.3.Basınç dayanımı sonuçları – 7 günlük



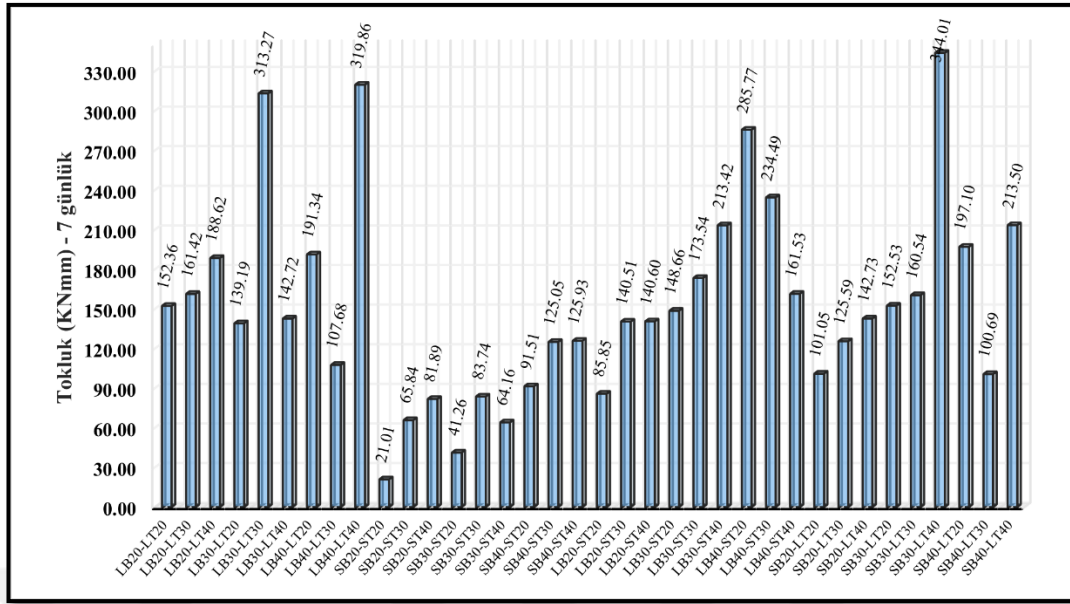
Şekil 4.4. Basınç dayanımı sonuçları – 28 günlük

Görüldüğü üzere, 28 günlük eğilme dayanımı en düşük olan numune SB20-ST20, en yüksek numune LB40-ST40 olmuştur. SB20-ST20'nin 28 günlük eğilme dayanımı 7.33 MPa, LB40-ST40'ın 28 günlük eğilme dayanımı 29.67 MPa değeridir. SB20-ST20 numunesinin, alt bölgesinde 30 mm uzunluğunda kısa lif içeren 20 mm kalınlığında SIFCON tabaka, üst bölgesinde 30 mm uzunluğunda kısa lif içeren 20 mm kalınlığında SIFCON tabaka bulunmaktadır. LB40-ST40 numunesinin, alt bölgesinde 60 mm uzunluğunda uzun lif içeren 40 mm kalınlığında SIFCON tabaka, üst bölgesinde 30 mm uzunluğunda kısa lif içeren 40 mm kalınlığında SIFCON tabaka bulunmaktadır. Numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değeri yaklaşık 7 MPa ile 30 MPa aralığında değişmektedir. 28 günlük basınç dayanımı en düşük olan numune SB45-LT30, en yüksek numune SB45-ST30 olmuştur. SB45-LT30'un 28 günlük basınç dayanımı 81.60 MPa, SB45-ST30'un 28 günlük basınç dayanımı 112.20 MPa değeridir. SB45-LT30 numunesinin, alt bölgesinde 30 mm uzunluğunda kısa lif içeren 45 mm kalınlığında SIFCON tabaka, üst bölgesinde 60 mm uzunluğunda uzun lif içeren 30 mm kalınlığında SIFCON tabaka bulunmaktadır. SB45-ST30 numunesinin, alt bölgesinde 30 mm uzunluğunda kısa lif içeren 45 mm kalınlığında SIFCON tabaka, üst bölgesinde 30 mm uzunluğunda kısa lif içeren 30 mm kalınlığında SIFCON tabaka bulunmaktadır. Numunelerin 28 günlük basınç dayanım değeri yaklaşık 81 MPa ile 113 MPa aralığında değişmektedir.

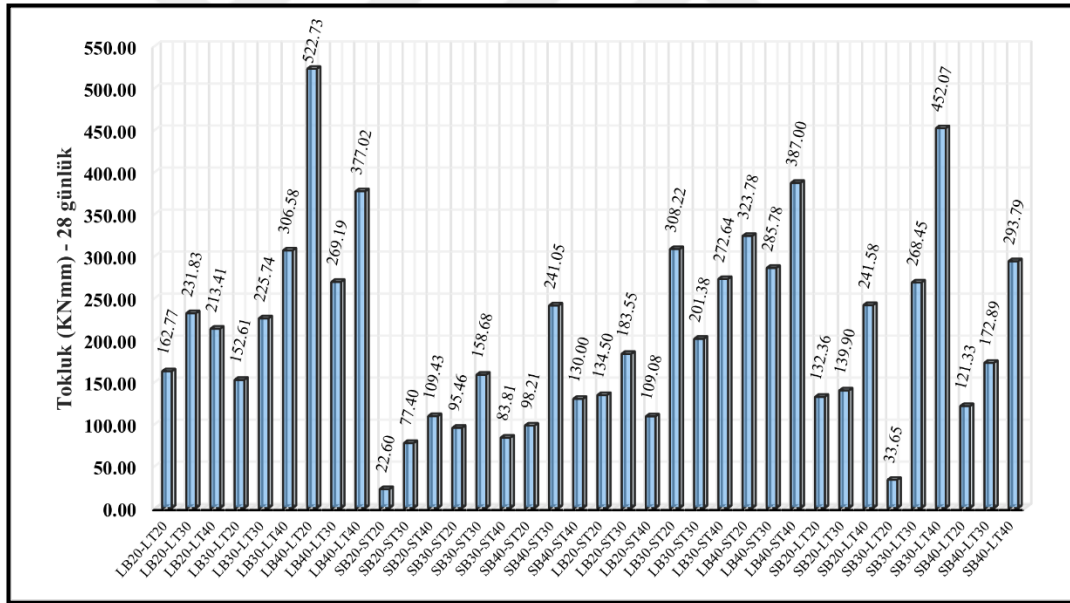
Numune üretim maliyetleri, alt ve üst bölgelerde bulunan SIFCON tabaka kalınlıklarına göre değişmektedir. Kısa ve uzun çelik liflerin kilogram maliyetleri aynı olup SIFCON tabakaların her 10 mm'si için yaklaşık 0.17 €'dur. Her bir numunenin tam hacmi için harç karışımı maliyeti yaklaşık 0.33 €'dur. Euro kur değeri 8.43 TL olarak dikkate alınmış ve hesaplamalar bu değere göre yapılmıştır. Şekil 4.5.'te numunelerin üretim maliyeti değerleri ve Şekil 4.6, 4.7. 'de 7 günlük ve 28 günlük tokluk değerleri sunulmuştur.



Şekil 4.5. Numunelerin üretim maliyeti değerleri



Şekil 4.6. 7 gün tokluk değerleri



Şekil 4.7. 28 gün tokluk değerleri

4.2. Optimizasyon çalışması sonuçları

Genel doğrusal model varyans analizi (ANOVA) sonuçları, %95 güven aralığında yürütülen analizden elde edilmiştir. ANOVA, bağımsız değişken olarak düşünülen SIFCON alt tabaka kalınlığı (t_L), üst tabaka kalınlığı (t_U), alt tabaka çelik lif uzunluğu (L_L) ve üst tabaka çelik lif uzunluğunun (L_U) istatistiksel anlamlılığını belirlemek için yürütülmüştür (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Varyans analizi sonuçları

Bağımlı Değişkenler	Varyasyon Kaynağı	İstatistiksel Parametreler					Anlamlılık	Bağımlı Değişkenler	Varyasyon Kaynağı	Statistical parameters					Anlamlılık
		Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Top. (SSx)	Ortalama Kare (MSx)	F	P- değeri				Serbestlik Derecesi (df)	Kareler Top. (SSx)	Ortalama Kare (MSx)	F	P- değeri	
f_{7-day}^{max}	t_L	1	294.0	294.0	32.9	<0.001	Evet	t_L	1	316.3	316.3	33.477	<0.001	Evet	
	L_L	1	292.8	292.8	32.8	<0.001	Evet	L_L	1	486.8	486.8	51.53	<0.001	Evet	
	t_U	1	46.0	46.0	5.2	0.03	Evet	t_U	1	21.7	21.7	2.2977	0.14	Hayır	
	L_U	1	0.0	0.0	0.0	0.94	No	L_U	1	8.0	8.0	0.8463	0.36	Hayır	
	Hata	43	383.7	8.9				Hata	43	406.2	9.4				
K_{7-day}	t_L	1	2.96E+04	2.96E+04	9.7	<0.004	Evet	t_L	1	7.54E+04	7.54E+04	11.788	<0.01	Evet	
	L_L	1	4.36E+04	4.36E+04	14.2	<0.001	Evet	L_L	1	8.09E+04	8.09E+04	12.65	<0.001	Evet	
	t_U	1	5.26E+03	5.26E+03	1.7	0.20	No	t_U	1	2.38E+04	2.38E+04	3.7278	0.06	Hayır	
	L_U	1	1.77E+04	1.77E+04	5.8	<0.05	Evet	L_U	1	2.37E+04	2.37E+04	3.7067	0.06	Hayır	
	Hata	43	1.32E+05	3.06E+03				Hata	43	2.75E+05	6.40E+03				
σ_{7-day}^{max}	t_L	1	457.8	457.8	2.6	0.11	No	t_L	1	4.24E+02	4.24E+02	6.5938	0.01	Evet	
	L_L	1	0.5	0.5	0.0	0.96	No	L_L	1	7.51E+01	7.51E+01	1.1676	0.29	Hayır	
	t_U	1	45.9	45.9	0.3	0.61	No	t_U	1	1.08E+03	1.08E+03	16.752	<0.001	Evet	
	L_U	1	211.5	211.5	1.2	0.28	No	L_U	1	3.22E-01	3.22E-01	0.005	0.94	Hayır	
	Hata	43	7589.7	176.5				Hata	43	2.77E+03	6.43E+01				
$Cost_{min}$	t_L	1	1.59E+03	1.59E+03	266.8	<0.001	Evet	t_L	1	1.59E+03	1.59E+03	266.8	<0.001	Evet	
	L_L	1	2.17E+01	2.17E+01	3.641	0.06	Hayır	L_L	1	2.17E+01	2.17E+01	3.641	0.06	Hayır	
	t_U	1	1.59E+03	1.59E+03	266.8	<0.001	Evet	t_U	1	1.59E+03	1.59E+03	266.8	<0.001	Evet	
	L_U	1	2.17E+01	2.17E+01	3.641	0.06	Hayır	L_U	1	2.17E+01	2.17E+01	3.641	0.06	Hayır	
	Hata	44	2.62E+02	5.96E+00				Hata	44	2.62E+02	5.96E+00				

Elde edilen p-değerleri 0.05'ten küçük olduğundan, 28 günlük eğilme dayanımı (f_{28-day} (Fs-28)), 28 günlük basınç dayanımı (σ_{28-day} (Cs-28)), 28 günlük tokluk değeri (K_{28-day} (K-28)), 7 günlük eğilme dayanımı (f_{7-day} (Fs-7)), 7 günlük basınç dayanımı (σ_{7-day} (Cs-7)), 7 günlük tokluk değeri (K_{7-day} (K-7)) ve üretim maliyeti (Cost) bağımlı değişkenleri üzerindeki faktörlerin etkileri, %95'lik bir güven aralığında istatistiksel anlamlılığa sahip olacak şekilde tanımlanmıştır. Bağımsız faktörler ile bağımlı değişkenler arasındaki korelasyonlar, regresyon modelleri ile kurulmuştur. Güç aktarımları, çıktıların regresyon modellerini iyileştirmek için uygulanmıştır. Başlangıçta, her bir bağımlı değişken için yürütülen regresyon analizlerine tam kübik model dahil edilmiş, ardından tam kübik modelin karmaşıklığını azaltmak için 0.05 düzeyinde geriye doğru adımsal teknik uygulanmıştır. Böylece, bağımlı değişkenler için anlamsız terimler ve bunların anlamsız etkileşim kombinasyonları, her bir regresyon modeli için %95 güven düzeyinde ANOVA ve sıfır hipotezi için t-istatistiği uygulanarak regresyon modellerinden elenmiştir. Daha sonra istatistiksel olarak anlamlı terimler içeren elenmiş modeller kullanılarak regresyon denklemleri hesaplanmıştır. Bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkenler üzerindeki etkinliğini tahmin eden katkı yüzdelerinin hesaplanmasında eta-kare (eta-squared) tekniği kullanılmıştır (Algin, 2016; Algin, 2018; Algin ve ark., 2022). Buna göre her bir bağımsız değişkenin güçlü etkisi bu hesaplama ile belirlenir. SIFCON tabaka kalınlığı ve lif uzunluğu faktörlerine yönelik katkı yüzdeleri ve hata terimlerinin toplamı % 100 olmuştur. Yapılan regresyon analizinden, 28 günlük eğilme dayanımı (f_{28-day} (Fs-28)), 28 günlük basınç dayanımı (σ_{28-day} (Cs-28)), 28 günlük tokluk değeri (K_{28-day} (K-28)), 7 günlük eğilme dayanımı (f_{7-day} (Fs-7)), 7 günlük basınç dayanımı (σ_{7-day} (Cs-7)), 7 günlük tokluk değeri (K_{7-day} (K-7)) ve üretim maliyeti (Cost) yanıtlarına ilişkin aşağıdaki modeller elde edilmiştir.

$$(\text{Cost})=8.2775+0.434t_L+0.434t_V \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} (\text{Fs} - 7)^{0.35}= & 0.0006 L_L^2 + L_L (-0.00001 L_V^2 + L_V (0.00001 t_L + 0.0005) - 0.00001 t_L t_V \\ & + 0.0001 t_L + 0.0001 t_V - 0.04) + 0.0006 L_V^2 + L_V (-0.00004 t_L^2 + 0.0017 t_L + 0.0003 t_V - \\ & 0.0555) + 0.0007 t_L^2 + 0.0005 t_L t_V - 0.0182 t_L - 0.0059 t_V + 2.574 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} (\text{K} - 7)^{0.41}= & -0.0011 L_L L_V + 0.1024 L_L + 0.0016 L_V t_V + 0.03951 L_V + 0.0887 t_L - 0.0073 t_V - \\ & 1.1284 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} (\text{Cs} - 7)^{0.77}= & L_V (1.0183 - 0.0067 t_V) + L_L^2 (0.0001 L_V - 0.0064) + L_L (L_V (0.0006 t_V - 0.0263) - \\ & 0.0008 t_V^2 + 0.0172 t_V + 0.6448) - 0.0081 L_V^2 + 0.0913 t_L + 0.0153 t_V^2 - 0.5027 t_V + 9.3833 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} (\text{Fs} - 28)^{0.63}= & L_L (-0.00003 L_V^2 + 0.0017 L_V + 0.0018 t_L - 0.0048) + 0.0004 L_V^2 + L_V (- \\ & 0.00005 t_L^2 + 0.003 t_L + 0.0016 t_V - 0.0774) + 0.002 t_L^2 - 0.1045 t_L - 0.05 t_V + 4.5867 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} (\text{K} - 28)^{0.31}= & (\text{K}-28)^{0.31}= L_L^2 (L_V (0.00002 t_V - 0.0008) - 0.001 t_V + 0.0347) + L_L (L_V \\ & (0.0003 t_L - 0.0021 t_V + 0.071) + t_L (0.00002 t_V^2 - 0.0006 t_V + 0.0022) - 0.0004 t_V^2 + 0.1085 t_V - \\ & 3.1458) + L_V^2 (0.00003 t_L^2 - 0.0019 t_L + 0.0292) + L_V (t_L^2 (-0.00004 t_V - 0.0012) + t_L \\ & (0.0029 t_V + 0.0742) + 0.0045 t_V - 2.739) + 0.0016 t_L^2 t_V - 0.0026 t_L^2 - 0.0004 t_L t_V^2 - 0.0903 t_L t_V \\ & + 0.1177 t_L + 0.0077 t_V^2 + 0.5925 t_V + 63.6172 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\text{Cs}-28)^{0.26}}= & -0.00006 L_L - 0.0001 L_V^2 + L_V (0.00001 t_L^2 - 0.0007 t_L + 0.00002 t_V + 0.0094) - \\ & 0.0002 t_L^2 + 0.0003 t_L t_V + 0.009 t_L + 0.00007 t_V^2 - 0.0051 t_V + 0.2025 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Yukarıdaki regresyon modelleri, tahmin edilen R^2 , düzeltilmiş R^2 , yeterli kesinlik ve tahmin edilen artık hata kareleri toplamı terimlerinin incelenmesi ile istatistiksel olarak doğrulanmıştır. Sunulan korelasyon denklemleri, çalışılan veri aralığı dahilinde ve kullanılan parametre birimleri için geçerlidir. Fs-7 için sunulan regresyon modeli, gerçek ve tahmin edilen veriler arasında yüksek seviyede bir korelasyon olduğunu gösteren yeterince yüksek bir R^2 (0.9777) değerine sahiptir. Tahmin edilen R^2 (0.9334) değeri, düzeltilmiş R^2 (0.9650) değeriyle makul ölçüde uyumludur. Fs-28 için sunulan regresyon modeli, gerçek ve tahmin edilen veriler arasında yüksek seviyede bir korelasyon olduğunu gösteren yeterince yüksek bir R^2 (0.9682) değerine sahiptir. Tahmin edilen R^2 (0.9442) değeri, düzeltilmiş R^2 (0.9574) değeriyle makul ölçüde uyumludur. Benzer şekilde K-7 (0.8224), K-28 (0.9578), Cs-

7 (0.6562) ve Cs-28 (0.8023) için de sunulan regresyon modelleri, gerçek ve tahmin edilen veriler arasında yüksek seviyede bir korelasyon olduğunu gösteren yeterince yüksek R^2 değerlerine sahiptir.

Çalışmada sunulan çok amaçlı optimizasyonlar, SIFCON alt tabaka kalınlığı (t_L), üst tabaka kalınlığı (t_U), alt tabaka çelik lif uzunluğu (L_L) ve üst tabaka çelik lif uzunluğunun (L_U) bağımsız değişkenleri ile 28 günlük eğilme dayanımı (f_{28-day} (Fs-28)), 28 günlük basınç dayanımı (σ_{28-day} (Cs-28)), 28 günlük tokluk değeri (K_{28-day} (K-28)), 7 günlük eğilme dayanımı (f_{7-day} (Fs-7)), 7 günlük basınç dayanımı (σ_{7-day} (Cs-7)), 7 günlük tokluk değeri (K_{7-day} (K-7)) ve üretim maliyeti (C_o) bağımlı değişkenlerine dayalı optimum çözüm kümesini belirlemek için yapılmıştır. Bu analizde birçok bireysel optimizasyon prosedürü gerçekleştirilmiştir. Her değişken için kullanılan optimizasyon hedefleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Çizelge 4.2’de tanımlanan birden fazla amaç fonksiyonu söz konusu olduğundan, tepki yüzey metoduna dayanan çok amaçlı optimizasyon tekniği (Whitcomb ve Anderson, 2004, Algin vd., 2022) 3-9 denklemlerinde belirtilen çok değişkenli regresyon modelleri kullanılarak yürütülmüştür. RSM optimizasyon sürecinde, Çizelge 4.2’de tanımlanan hedeflere dayanan amaç fonksiyonları, SIFCON alt tabaka kalınlığı (t_L), üst tabaka kalınlığı (t_U), alt tabaka çelik lif uzunluğu (L_L) ve üst tabaka çelik lif uzunluğunun (L_U) bağımsız değişkenleri ile ayrı ayrı şekilde optimize edilmiştir ve 3-9 denklemlerindeki regresyon modellerini kullanarak eş zamanlı şekilde çeşitlendirilmiştir. Çizelge 4.2’deki değerler için karakterize edilen aşağıdaki arzu edilirlik fonksiyonları (d_i), önceki çalışmalarda açıklanan metodolojiyi kullanarak bağımlı değişkenleri eş zamanlı şekilde optimize etmek için kullanılmıştır (Algin 2016; Algin, 2018).

Çizelge 4.2. Optimizasyon hedefleri

	Parametreler	Birimler	Hedefler	Alt Limit	Üst Limit
Faktörler	t_L	mm	aralıkta	0	40
	L_L	mm	aralıkta	0	60
	t_U	mm	aralıkta	0	40
	L_U	mm	aralıkta	0	60
Çıktılar	f_{7-day}^{max}	MPa	maksimize	2.86	24.25
	K_{7-day}	kNmm	aralıkta	1.71	344
	σ_{7-day}^{max}	MPa	maksimize	48.4	105.1
	f_{28-day}^{max}	MPa	maksimize	3.87	29.67
	K_{28-day}	kNmm	aralıkta	3.45	522.7
	σ_{28-day}^{max}	MPa	maksimize	66	112.2
	$Cost_{min}$	Euro/m2	minimize	16.96	43

$$d_i = \begin{cases} 0Y_i \leq \min f_i \\ \left[\frac{Y_i - \min f_i}{\max f_i - \min f_i} \right]^{wt_i} & \text{and } 0 < d_i < 1 \min f_i < Y_i < \max f_i \\ 1Y_i \geq \max f_i \end{cases} \quad (4.8)$$

$$d_i = \begin{cases} 1Y_i \leq \min f_i \\ \left[\frac{\max f_i - Y_i}{\max f_i - \min f_i} \right]^{wt_i} & \text{and } 0 < d_i < 1 \min f_i < Y_i < \max f_i \\ 0Y_i \geq \max f_i \end{cases} \quad (4.9)$$

Burada d_i arzu edilirlilik fonksiyonu, \min_{f_i} ve \max_{f_i} optimizasyondaki i numaralı bağımlı değişkenin minimum ve maksimum gerçek değerleridir. Y_i , uyumlu değer ve wt_i , i numaralı çıktı için ağırlık etkisinin güç değeridir. 0 ve 1 aralığında belirtilen yukarıdaki arzu edilirlilik fonksiyonları göz önüne alındığında bireysel arzu edilirlilik fonksiyonlarını birleştiren tekil kompozit bir çıktı (D) ayarlanır. Bu kompozit çıktı sonra Çizelge 4.2'deki hedefler dikkate alınarak maksimize edilir.

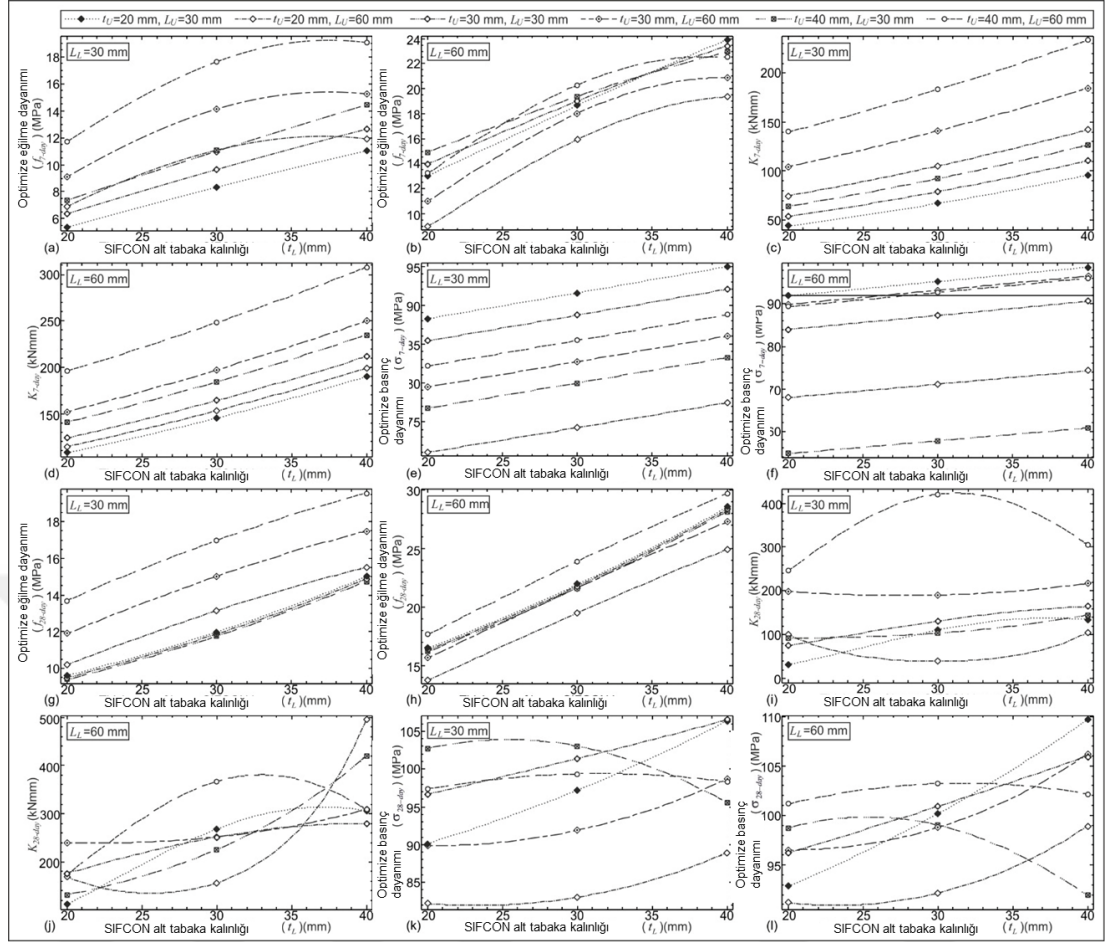
$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_n)^{1/k} \quad (4.10)$$

Kompozit çıktının sıfır olması, arzu edilen aralık dışında olduğunu gösterir. Kompozit çıktının bir olması, hedeflere tam olarak ulaşıldığı anlamına gelir. Çizelge 4.2'de tanımlanan hedefler ile tüm bağımlı değişkenler, Mayers ve ark. (2009)

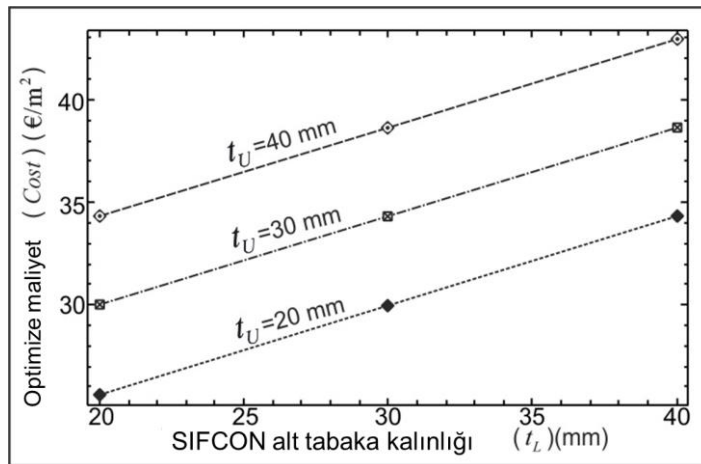
tarafından açıklanan prosedür kullanılarak kompozit çıktıda birleştirilir ki burada Çizelge 4.2’de ki her hedef için eşit önemde 3 ağırlık ayarlanır (Algin ve ark., 2022).

Beton yol kaplama performansını etkileyen mekanik özelliklerin göz önünde bulundurulmasıyla beraber düşük maliyetli ve yüksek dayanım değerlerine sahip beton yol kaplama inşası, uzun ömürlü bir üstyapı sisteminin ekonomik bir şekilde tasarımı için büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple dayanım hedeflerinin maksimize ve minimize edilmesinin arzu edilirligini içeren bir dizi çok amaçlı analize dayanan ikili optimizasyon gerçekleştirilmiş ve verimli bir şekilde malzeme tasarımı için global sınırlar belirlenerek gerekli parametreler elde edilmiştir. Eğilme dayanımı değerleri, bir beton yol kaplamanın temel tasarım karakteristiklerinden olduğundan (Hınıslıoğlu ve Bayrak, 2004), optimum sınırları elde etmek için bu karakteristikler ile doğrudan alakalı parametreler dikkate alınır. Buna göre, sınır belirleme bağlamında, 28 günlük eğilme dayanımı (f_{28-day} (Fs-28)), 28 günlük basınç dayanımı (σ_{28-day} (Cs-28)), 28 günlük tokluk değeri (K_{28-day} (K-28)), 7 günlük eğilme dayanımı (f_{7-day} (Fs-7)), 7 günlük basınç dayanımı (σ_{7-day} (Cs-7)), 7 günlük tokluk değeri (K_{7-day} (K-7)) ve üretim maliyeti (Cost) bağımlı değişkenleri çıktı olarak, SIFCON alt tabaka kalınlığı (t_l), üst tabaka kalınlığı (t_u), alt tabaka çelik lif uzunluğu (L_L) ve üst tabaka çelik lif uzunluğunun (L_U) bağımsız değişkenleri girdi olarak kullanılmıştır. Beton yol malzeme tasarımı performansının ölçülmesi, verimlilik analizinde de söz konusu olan girdilerin çıktılara dönüştürülmesi ile doğrudan ilgili olabilmektedir. Optimizasyon uygulamasında, girdi seviyelerinden maksimum çıktının elde edilmesi gerekir ama elde edilen çözüm, mutlaka global optimize edilmiş çözüm ve verimli çözüm olmak zorunda değildir. Çünkü önerilen kombinasyon, verimli çözümü elde etmek için ilgili sınırdaki çözümü refere etmelidir. Bu perspektifte, Hou ve ark., (2009) tarafından önerildiği üzere çok amaçlı optimizasyon probleminde optimum verimli sınırı aramak oldukça önemlidir (Algin ve ark., 2022). Belirtildiği gibi tüm girdi ve çıktı kombinasyonları setinin uygulanabilir çözümü önermesine rağmen çözüm setinin etkin bir çözüm kümesi olarak tanımlanabilmesi için sınırlar üzerinde olması gerekir.

Numunelerin 28 günlük basınç dayanım değeri yaklaşık 81 MPa ile 113 MPa aralığında değişmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, 28 günlük eğilme dayanımı en düşük olan numune SB20-ST20, en yüksek numune LB40-ST40 olmuştur. SB20-ST20'nin 28 günlük eğilme dayanımı 7.33 MPa, LB40-ST40'ın 28 günlük eğilme dayanımı 29.67 MPa değeridir. Numunelerin 28 günlük eğilme dayanım değeri yaklaşık 7 MPa ile 30 MPa aralığında değişmektedir. 28 günlük basınç dayanımı en düşük olan numune SB45-LT30, en yüksek numune SB45-ST30 olmuştur. SB45-LT30'un 28 günlük basınç dayanımı 81.60 MPa, SB45-ST30'un 28 günlük basınç dayanımı 112.20 MPa değeridir. Şekil 4.1. ve 4.2.'de SIFCON alt tabaka kalınlığı arttığında 7 ve 28 günlük eğilme dayanımının arttığı görülmektedir. Bu durum, SIFCON alt tabaka kalınlığının artışına bağlı olarak MBY kaplama elemanın genelindeki toplam çelik lif miktarının artması ile ilişkilendirilebilir. Benzer bir genel eğilim, SIFCON üst tabaka kalınlığı ile 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı arasında da söz konusudur. Bu durum da SIFCON üst tabaka kalınlığının artışına bağlı olarak MBY kaplama elemanın genelindeki toplam çelik lif miktarının artması ile ilişkilendirilebilir. SIFCON tabakaların ayrı şekilde 60 mm ve 30 mm boyunda çelik lifler kullanılarak üretildiği daha önce söylenmiştir. Çelik lif boyu açısından bakıldığında uzun lif içeren SIFCON tabakalardan oluşan beton yol modüllerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarının, kısa lif içeren SIFCON tabakalardan oluşan beton yol modüllerinin eğilme dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle SIFCON alt tabakada kullanılan çelik lif boyunun 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı üzerindeki bu etkisi daha belirgindir. Şekil 4.8. ve 4.9.'da yapılan optimizasyon işlemine ait girdilerin çıktılar ile olan ilişkisi grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.8. Optimizasyon işlemine ait girdilerin çıktılar ile olan ilişkisi



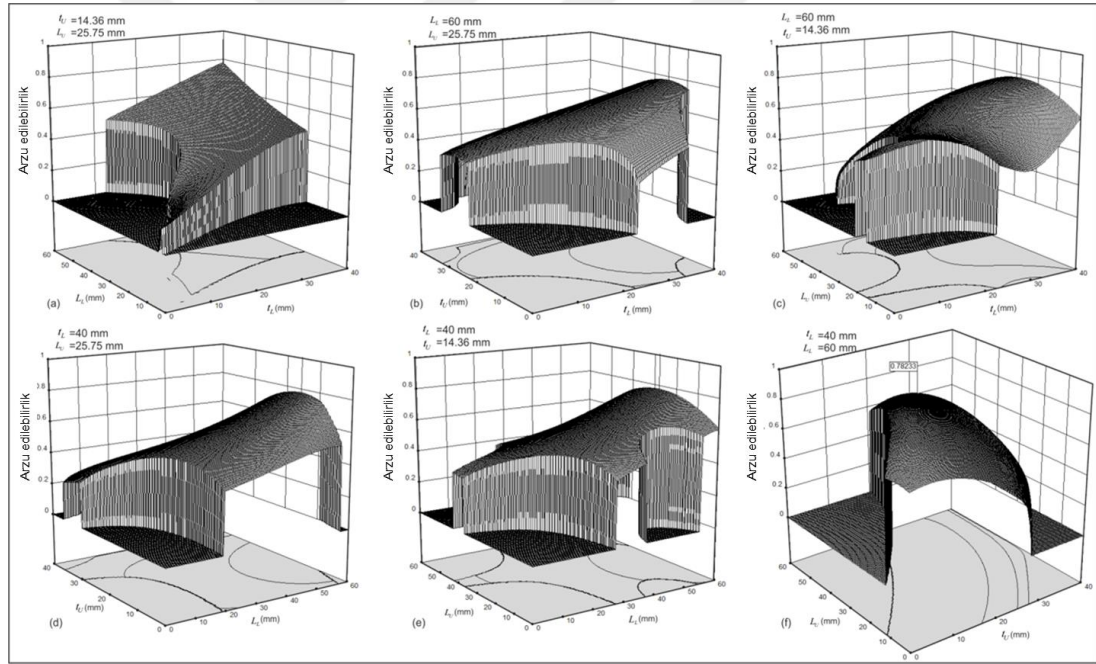
Şekil 4.9. Tabaka kalınlığı ile maliyet ilişkisi

Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi, alt tabaka çelik lif uzunluğu (L_L) bağımsız değişkeni, 7 günlük basınç dayanımı (σ_{7-day}) hariç tüm bağımlı değişkenler üzerinde

anlamli etki gosteren tek parametredir.7 günlük basınç dayanımı (σ_{7-day}) bağımlı değişkeni üzerinde hiçbir bağımsız değişkenin anlamli etkisi yoktur. Çizelge 4.2.'de optimizasyon hedefleri sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Optimizasyon çözüm sonuçları

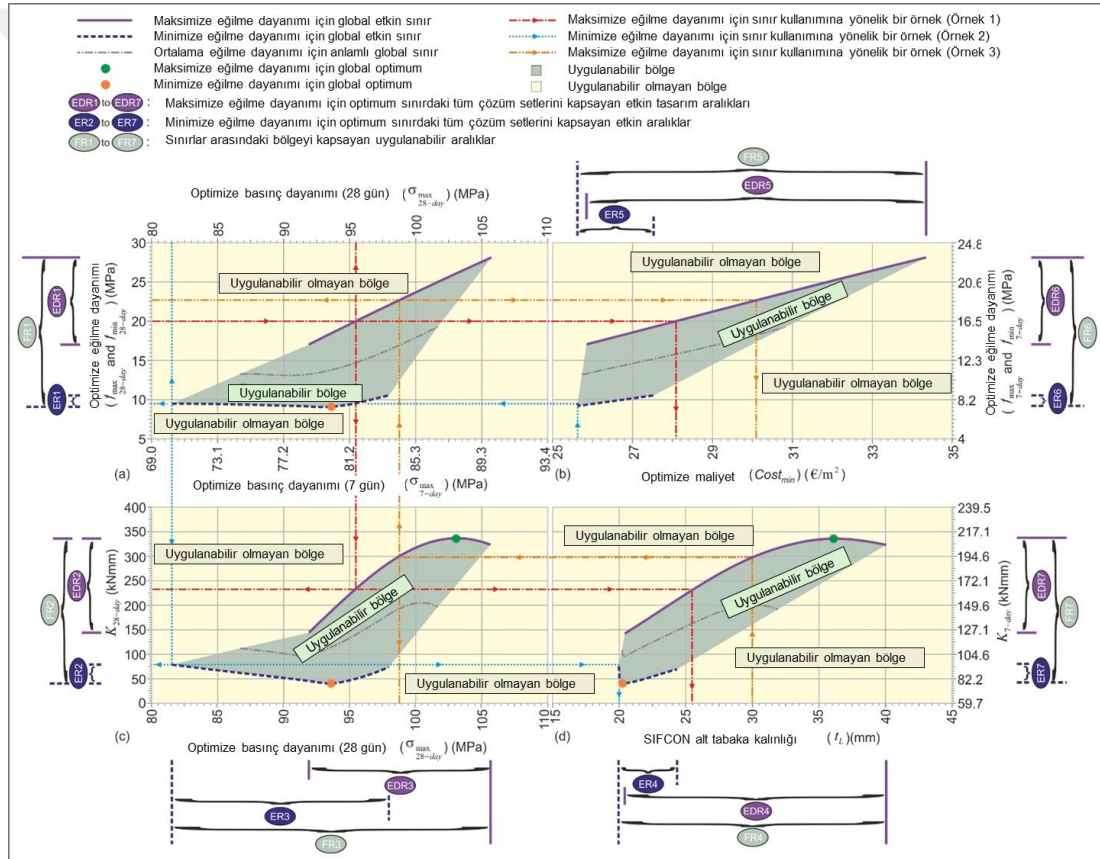
Çözümler	Faktörler				Çıktılar							Arzu Edilebilirlik
	t_L	L_L	t_U	L_U	$Cost_{min}$	f_{max}^{7-day}	K_{7-day}	σ_{max}^{7-day}	f_{max}^{28-day}	K_{28-day}	σ_{max}^{28-day}	
	40.00	60.00	14.36	25.74	31.87	24.24	184.14	94.68	28.28	354.45	107.03	0.7823
	40.00	60.00	14.39	25.47	31.88	24.23	184.25	94.79	28.25	350.47	107.05	0.7823
	40.00	60.00	14.19	25.03	31.80	24.24	183.98	94.65	28.21	348.94	106.90	0.7822
	40.00	60.00	14.51	26.53	31.93	24.25	184.27	94.65	28.35	360.94	107.15	0.7822
	40.00	60.00	14.63	25.51	31.99	24.21	184.65	95.06	28.24	346.44	107.23	0.7822
	40.00	60.00	14.83	26.84	32.07	24.23	184.80	94.97	28.37	358.57	107.38	0.7822
	40.00	60.00	14.56	26.81	31.96	24.25	184.33	94.64	28.38	363.32	107.18	0.7822
	39.98	60.00	14.46	26.00	31.90	24.23	184.17	94.73	28.29	355.69	107.08	0.7821



Şekil 4.10. RSM yüzeyleri üzerindeki arzu edilebilirlik çözümlerinin değişimi

Çizelge 4.3.'te optimizasyon çözüm sonuçları ve Şekil 4.10.'da gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon analizinden elde edilen birinci çözüm kümesine ait RSM yüzeyleri üzerindeki arzu edilebilirlik çözümlerinin değişimi gösterilmektedir. Optimum sonuca ait parametreler kullanılarak dökülen doğrulama numunesinin mekanik test sonuçları optimizasyon çalışmasından elde edilen mekanik değerleri sağlamaktadır. RSM tasarım uzayındaki, optimum çözümün, dikkate alınan en az bir

hedefi kötüleştirmeden arzu edilebilirliği iyileştirecek bir alternatifin olmadığı optimum çözümü yansıtan arzu edilebilirlik fonksiyonu ile bağlantılı olduğunu göstermektedir. Optimum verimlilik sınırları Şekil 4.11.'de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Buna göre, Şekil 4.10. yalnızca yerel optimizasyon çözümleri kümelerini gösterirken, Şekil 4.11. en yüksek arzu edilebilirliğe dayalı çözümleri ve eğilme dayanımının maksimizasyonu ve minimizasyonuna dayalı ikili optimizasyon hedeflerini kullanan sınırları göstermektedir. Şekil 4.11.'deki grafikte artık Çizelge 4.2.'de tanımlanan optimizasyon hedeflerine dayalı olarak verimli çözüm kümeleri elde edilebilir.



Şekil 4.11. Çizelge 4.2.'de tanımlanan hedeflere ve eğilme dayanımının ikili optimizasyonuna dayalı optimum verimlilik sınırları (a) $f_{28\text{-day}}$ ve $\sigma_{28\text{-day}}$ uzayında, (b) $Cost$ ve $f_{28\text{-day}}$ uzayında, (c) $K_{28\text{-day}}$ ve $f_{28\text{-day}}$ uzayında, (d) t_l ve $K_{28\text{-day}}$ uzayında

Maksimize ve minimize edilmiş eğilme dayanımı parametresi için global etkin sınırlar sırasıyla düz ve kesikli çizgilerle gösterilen üst ve alt bağlar olarak

belirtilmiştir. Verimli çözümler ancak çözümlerin bu çizgiler üzerinde olması halinde elde edilebilir. Başka bir deyişle, bu sınırlar, maliyet etkin tasarıma ulaşmak için sırasıyla SIFCON tabaka kalınlığının maksimum ve minimum kullanımlarına dayalı verimli MBY elemanı tasarımı çözümlerini elde etmek için kullanılır. Bu sınırlar, maksimum ve minimum eğilme dayanımı özelliklerine işaret etmektedir. Bunlar arasında, dikkate alınan parametre uzaylarındaki maksimum eğilme dayanımı sınırı, Şekil 4.11. (a-b-c-d)'de üst bağ olarak düz çizgilerle tanımlanmıştır. Bununla birlikte, Şekil 4.11. (a-b-c-d)'de alt bağ olarak kesikli çizgilerle gösterilen minimum eğilme dayanımı sınırı tasarım tablosuna dahil edilmiştir. Bunun nedeni, daha az arzu edilebilirlik aralığına sahip daha ekonomik çözümlerin uygulanabilir bölgesini belirlemektir. Bu üst ve alt bağ sınırları, üstün mekanik özelliklere ve düşük maliyete sahip olması gereken MBY kaplama elemanları için verimli SIFCON tabaka kalınlığı çözümleri sağlar. Bir çözümün uygulanabilir bölgeye girmesi, daha az arzu edilen ara eğilme dayanımı seviyesine sahip optimum sonucun elde edildiği anlamına gelir. Eğilme dayanımı seviyesi uygulanabilir çözüm bölgesinde olsa da bu verimli bir çözüm olarak adlandırılmaz, çünkü verimli çözüm ancak çözüm global sınırdayken elde edilebilir. Maksimum eğilme dayanımı için global optimum noktalar Şekil 4.11. (c-d)'de yeşil renkli olarak gösterilmektedir ve bu da genel global optimum çözümü göstermektedir. Bu değer yaklaşık olarak 335 kN.mm 28 günlük tokluk, 103.7 MPa 28 günlük basınç dayanımı, 31.8 €/m² üretim maliyeti, 27 MPa 28 günlük eğilme dayanımı ve 36 mm SIFCON alt tabaka değerlerine karşılık gelmektedir. Bu çözüm, maksimum eğilme dayanımı arzu edilirligi içindir. Şekil 4.11. (a-c-d)'deki minimize edilmiş eğilme dayanımı için global optimum noktalar turuncu renkli olarak gösterilmektedir. Bu değer yaklaşık olarak 43 kN.mm 28 günlük tokluk, 93.6 MPa 28 günlük basınç dayanımı, 25.6 €/m² üretim maliyeti, 9.2 MPa 28 günlük eğilme dayanımı ve 20.3 mm SIFCON alt tabaka değerlerine karşılık gelmektedir. Grafiğin eksenleri üzerindeki sınırlar arasındaki bölgenin izdüşüm mesafesi FR kısaltmasıyla uygulanabilir aralık olarak tanımlanır (yani yedi uygulanabilir aralık (FR1 ila FR7) Şekil 4.11.'de gösterilmiştir). Fizibilite aralıkları, bu aralıkta optimum bir çözümün mevcut olduğunu gösterir. Bu optimum çözüm, uygulanabilir bölgeye giriyorsa orta düzeyde eğilme dayanımına sahip olabilir veya sınırlar üzerindeyse verimli çözüm olabilir. Şekil 4.11.'de iki tür global etkin sınır gösterilmektedir. En yüksek eğilme

dayanımı özelliğini ifade eden maksimum eğilme dayanımı sınırı, MBY elemanları tasarım uygulamasında öncelikli olarak kullanılabilir. Buna göre, bu sınırın verimli aralığı, bu aralıkta verimli bir çözümün mevcut olduğu anlamına gelir; bu sınırın grafiğin eksenini üzerindeki izdüşüm mesafesini ifade eder ve EDR kısaltmasıyla verimli tasarım aralığı olarak tanımlanır (yani yedi verimli tasarım aralığı (EDR1 ile EDR7) Şekil 4.11.'de gösterilmiştir). En düşük eğilme dayanımı karakteristiğini ifade eden minimize edilmiş eğilme dayanımı sınırının grafik eksenini üzerindeki izdüşüm mesafesi ER kısaltmasıyla etkin aralık olarak tanımlanır (yani yedi etkin aralık (ER1 ile ER7) Şekil 4.11.'de gösterilmiştir). Bu sınırın verimli aralığı, eğilme dayanımının en aza indirilmiş verimli bir çözümünün bu aralıkta mevcut olduğu anlamına gelir. Çözüm kümesi, sınırlar üzerindeyse etkin çözüm olarak belirtilir; bu nedenle, etkin aralıklara (EDR veya ER) düşen çözüm kümelerinin, sınırlar üzerinde olduklarından emin olmak için net şekilde kontrol gerekmektedir.

Aşağıdaki örnekler, MBY elemanda SIFCON tabaka kalınlığı ile tasarımın nasıl yapılabileceğini göstermektedir. Aşağıdaki örneklerin çözüm prosesleri Şekil 4.11.'deki malzeme karışım tasarımı şemasında sunulmuştur.

Örnek 1: Modüler beton yol kaplama inşası için tasarım parametrelerinin etkin bir çözüm seti, 20 MPa'lık 28 günlük eğilme dayanımı değeri ve maksimum eğilme dayanımı sınırı aralığı için basınç dayanımı, tokluk değeri, üretim maliyeti ve SIFCON alt tabaka kalınlığı kullanılarak aranmıştır.

Çözüm 1: Çözüm prosesi, 28 günlük eğilme dayanımı (20 MPa) giriş parametresi ile başlatılan Şekil 4.11.'de kırmızı vurgulu noktalı çizgi ile gösterilmektedir. Maksimum eğilme dayanımı aralığı gerekli olduğundan, maksimum eğilme dayanımı için global verimli sınır (düz çizgi) kullanılır ve 28 günlük basınç dayanımı 95.5 Mpa olarak elde edilir. Tokluk değeri, üretim maliyeti ve SIFCON alt tabaka kalınlığı sırasıyla 232.5 kN.mm, 28.1 €/m² ve 25.5 mm olarak Şekil 4.11. yoluyla belirlenir. 7 günlük eğilme dayanımı ve 7 günlük basınç dayanımı değerleri de Şekil 4.11. (a) ve 4.11. (b)'den elde edilebilir.

Örnek 2: Minimum eğilme dayanımı sınırı aralığı kullanılarak minimize edilmiş üretim maliyeti için verimli bir çözüm seti aranmaktadır.

Çözüm 2: Çözüm prosesi, 25.6 €/m² üretim maliyeti giriş parametresi ile başlatılmış ve Şekil 4.11.'de mavi noktalı çizgi ile gösterilmektedir. Minimize edilmiş eğilme dayanımı için global verimli sınır (kesikli çizgi) kullanılır ve 28 günlük eğilme dayanımı değeri 9.5 MPa olarak elde edilir. Tokluk değeri, basınç dayanımı ve SIFCON alt tabaka kalınlığı sırasıyla 79 kN.mm, 81.5 Mpa ve 20 mm olarak Şekil 4.11. yoluyla belirlenir. 7 günlük eğilme dayanımı ve 7günlük basınç dayanımı değerleri de Şekil 4.11. (a) ve 4.11. (b)'den elde edilebilir.

Örnek 3: Maksimum eğilme dayanımı sınırı aralığı kullanılarak 30 mm SIFCON alt tabaka kalınlığı için verimli bir çözüm seti aranmaktadır.

Çözüm 3: Çözüm prosesi, 30 mm SIFCON alt tabaka kalınlığı giriş parametresi ile başlatılmış olup Şekil 4.11.'de turuncu vurgulu noktalı çizgi ile gösterilmektedir. Maksimum eğilme dayanımı için global verimli sınır (düz çizgi) kullanılır ve 28 günlük eğilme dayanımı 22.6 Mpa olarak elde edilir. Tokluk değeri, üretim maliyeti ve 28 günlük basınç dayanımı sırasıyla 299 kN.mm, 30.1 €/m² ve 98.8 MPa olarak Şekil 4.11. yoluyla belirlenir. 7 günlük eğilme dayanımı ve 7günlük basınç dayanımı değerleri de Şekil 4.11. (a) ve 4.11. (b)'den elde edilebilir.

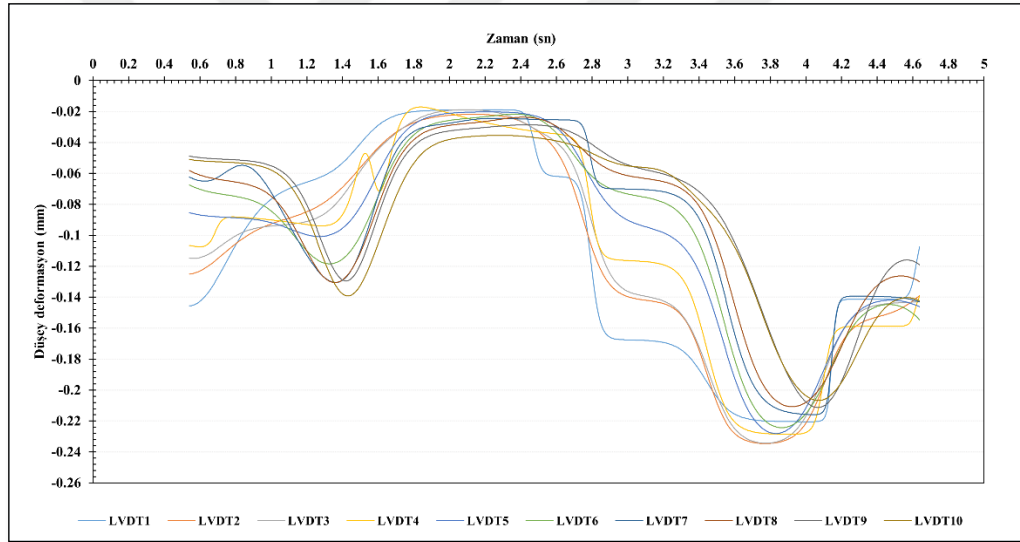
Elde edilen sınırdaki bazı eğrilerin belirgin dışbükeyliği, global optimumun verimli çözüm kümesi içinde bulunduğunu ve çok amaçlı verimlilik analizinin ikili optimizasyon değerlendirmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Buna göre, sunulan sınırlar, eğilme dayanımı özelliklerini dikkate alarak optimum maliyeti ve SIFCON alt tabaka kalınlığını seçmek için verimli MBY kaplama tabakası malzemesi karar verme sürecinde kullanılabilir.

Sunulan ikili global sınırlar, verimli çözüm kümelerinin uygulanabilir çözüm aralığını geçerken alt sınırdan üst sınırlara doğru değiştiğini açıkça göstermektedir. Üst ve alt bağ sınırları, üstün mekanik özelliklere ve optimum maliyete atıfta

bulunarak SIFCON alt tabaka kalınlığı ve 28 günlük eğilme dayanımı için verimli çözümler sağlar.

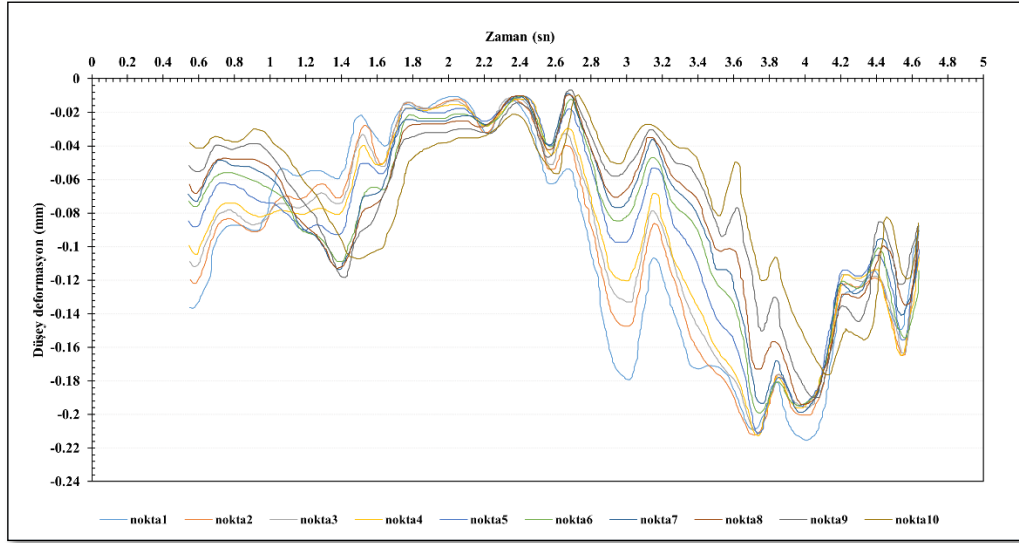
4.3. Saha testi ve 3B-SEM sonuçları

Damperli kamyonun tekerlekleri 5 km/sa'lik nominal hızla Şekil 3.19.'da belirtilen konumda ve yönde MBY kaplama sistemi üzerinde ilerlerken, 10 adet noktadan lineer transdüserler kullanılarak alınan zamana bağlı düşey deformasyon değerleri Şekil 4.5.'de sunulmuştur. 10 adet lineer transdüser, kamyon tekerleklerinin hareketi yönünde 1'den 10'a kadar numaralandırılmıştır. (Soldan sağa doğru LVDT1, LVDT2, LVDT3, LVDT4, LVDT5, LVDT6, LVDT7, LVDT8, LVDT9, LVDT10)



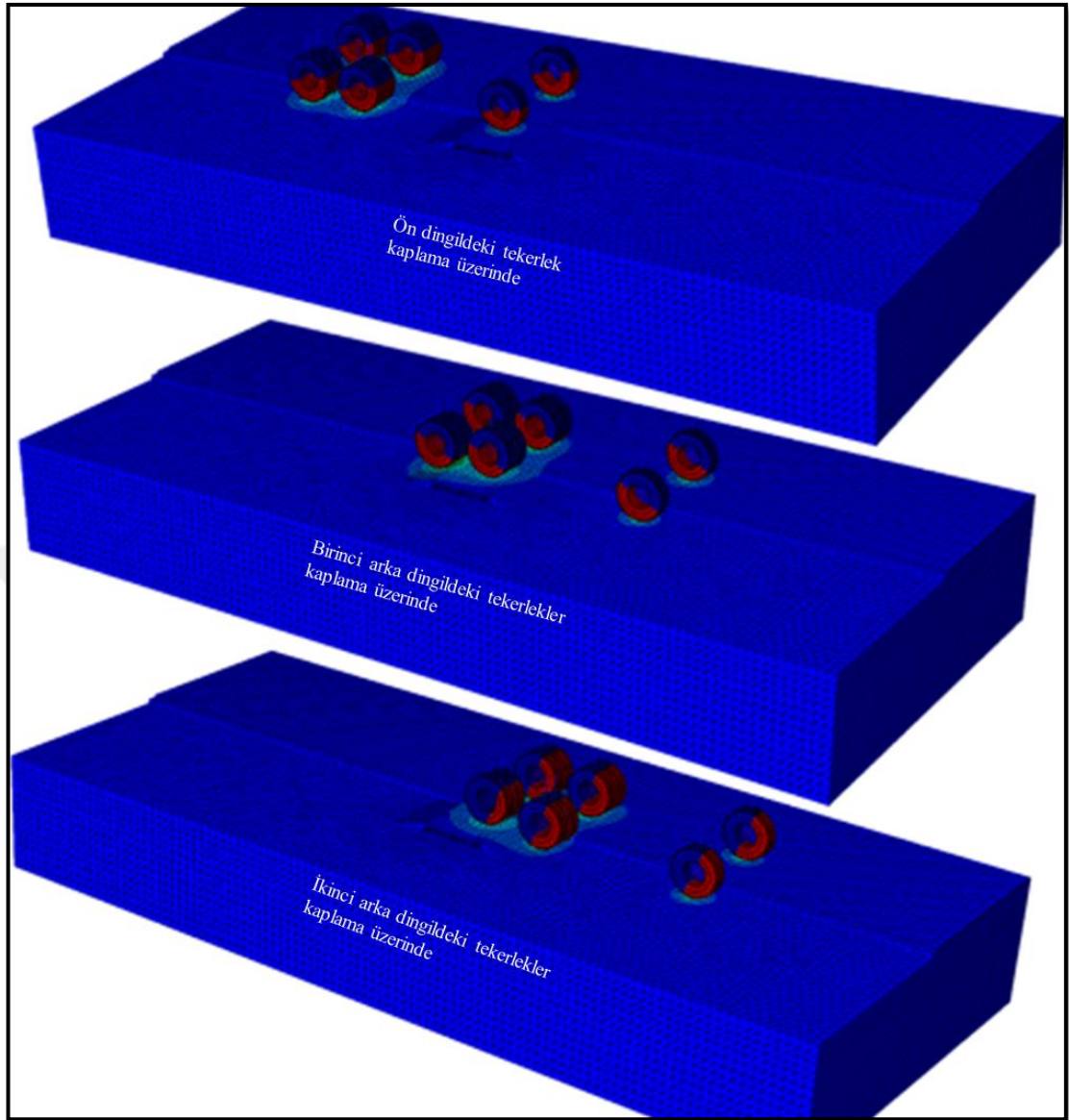
Şekil 4.12. Modüler beton yol üzerindeki noktalardan ölçülen düşey deformasyonlar (saha sonuçları)

Sonlu elemanlar modeli oluşturulup sahadaki koşullar ile uyumlu şekilde analiz edilen modüler beton yol sistemi üzerindeki noktalardan alınan zamana bağlı düşey deformasyon değerleri Şekli 4.12.'de sunulmuştur. Bu noktalar, saha testinde lineer transdüserlerin bulunduğu konumlara bire bir karşılık gelmektedir ve saha testinde olduğu gibi tekerleklerin hareket yönünde 1'den 10'a kadar numaralandırılmıştır. (Soldan sağa doğru nokta1, nokta2, nokta3, nokta4, nokta5, nokta6, nokta7, nokta8, nokta9, nokta10)

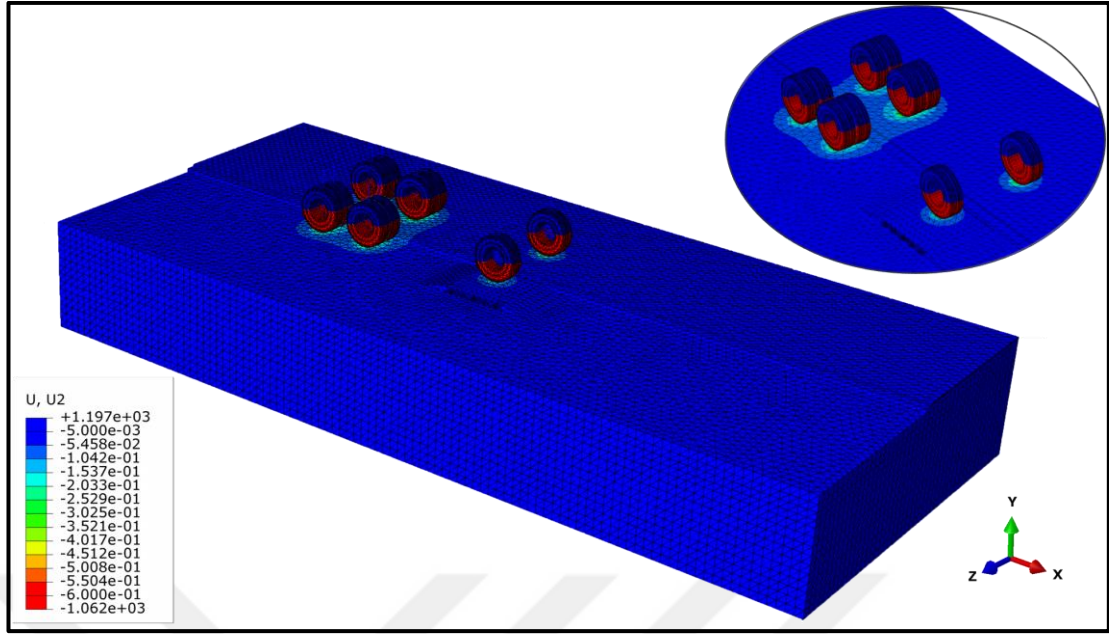


Şekil 4.13. Modüler beton yol üzerindeki noktalardan ölçülen düşey deformasyonlar (sonlu elemanlar analizi sonuçları)

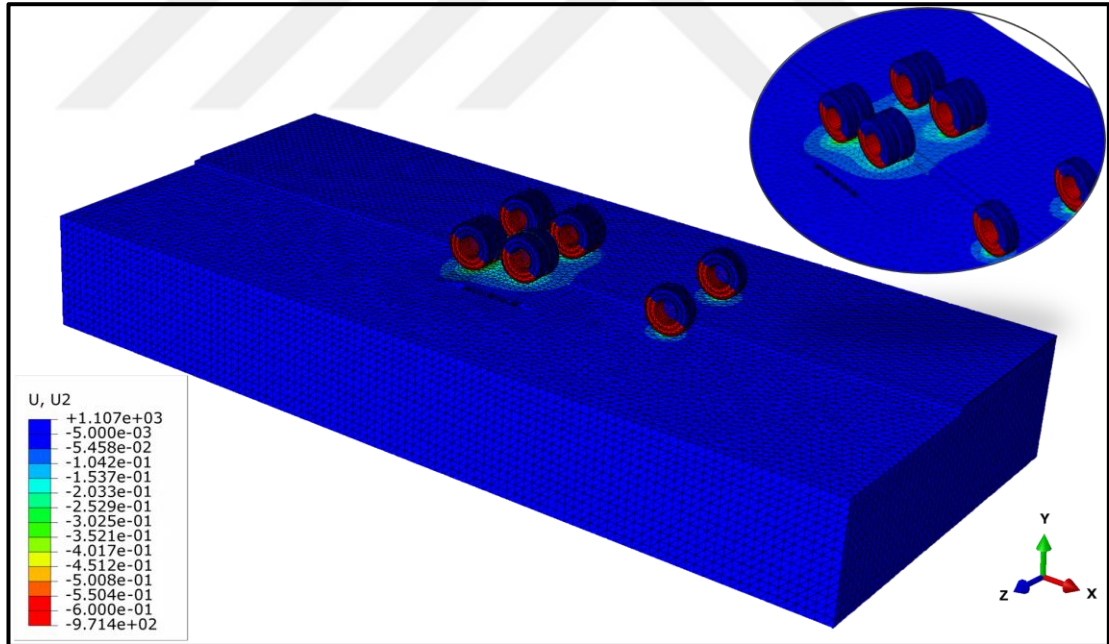
Şekil 4.14.'te ön ve arka dingillerde bulunan tekerleklerin, MBY sistemi üzerindeki hareketi 3B-SEM analizine ait sonuç görselleri ile şematize edilmiştir. Şekil 4.15., Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.'de MBY üzerinde tekerleklerin durumu ayrı ayrı olacak şekilde deformasyon değerleriyle birlikte sunulmuştur.



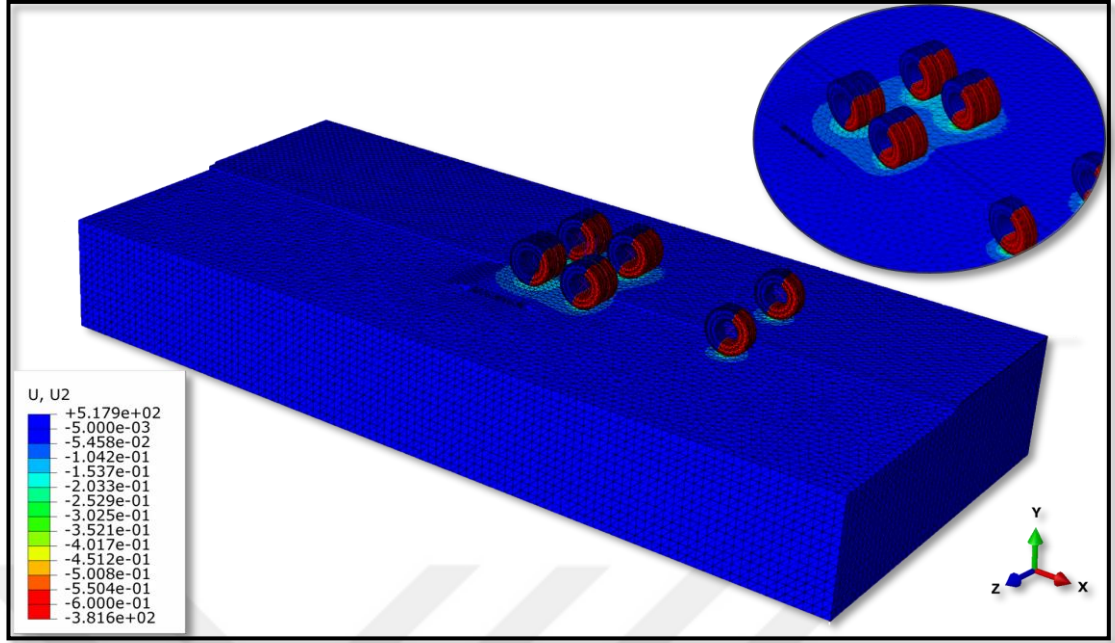
Şekil 4.14. Ön ve arka dingillerde bulunan tekerleklerin, modüler beton yol sistemi üzerindeki hareketi



Şekil 4.15. Ön dingildeki tekerlek kaplama üzerinde

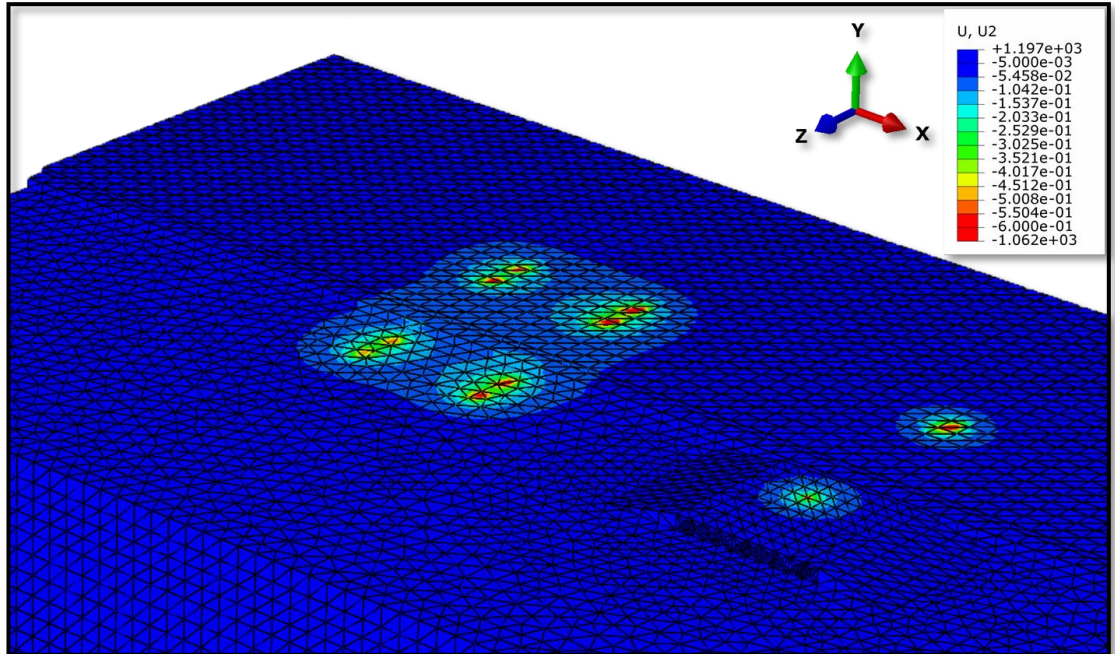


Şekil 4.16. Birinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde

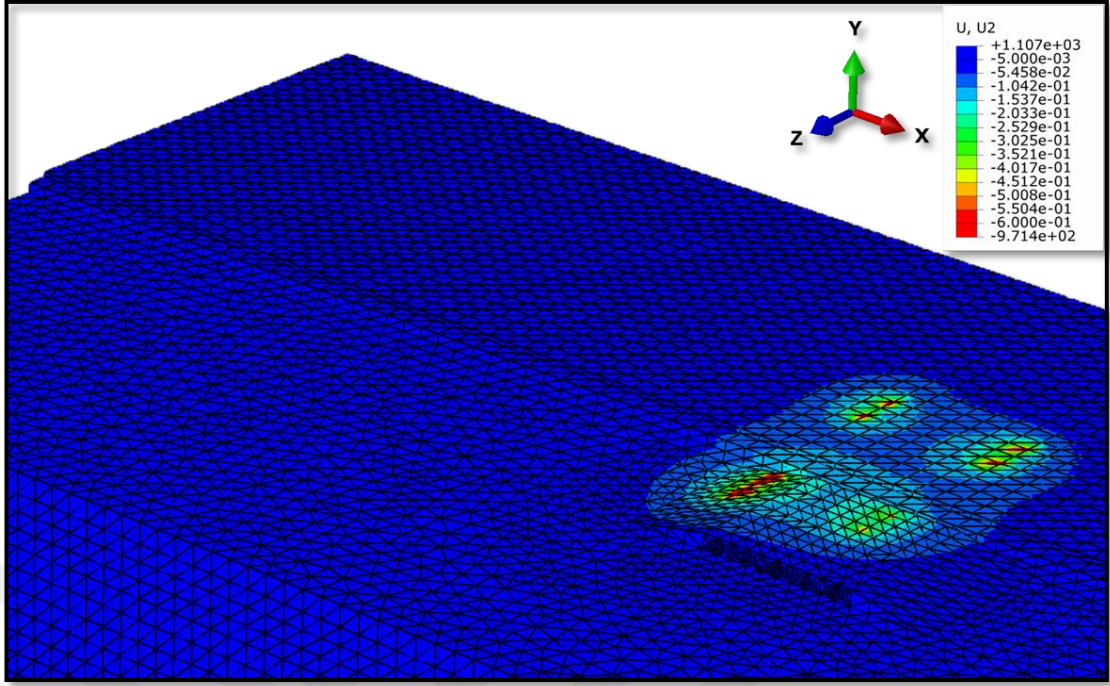


Şekil 4.17. İkinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde

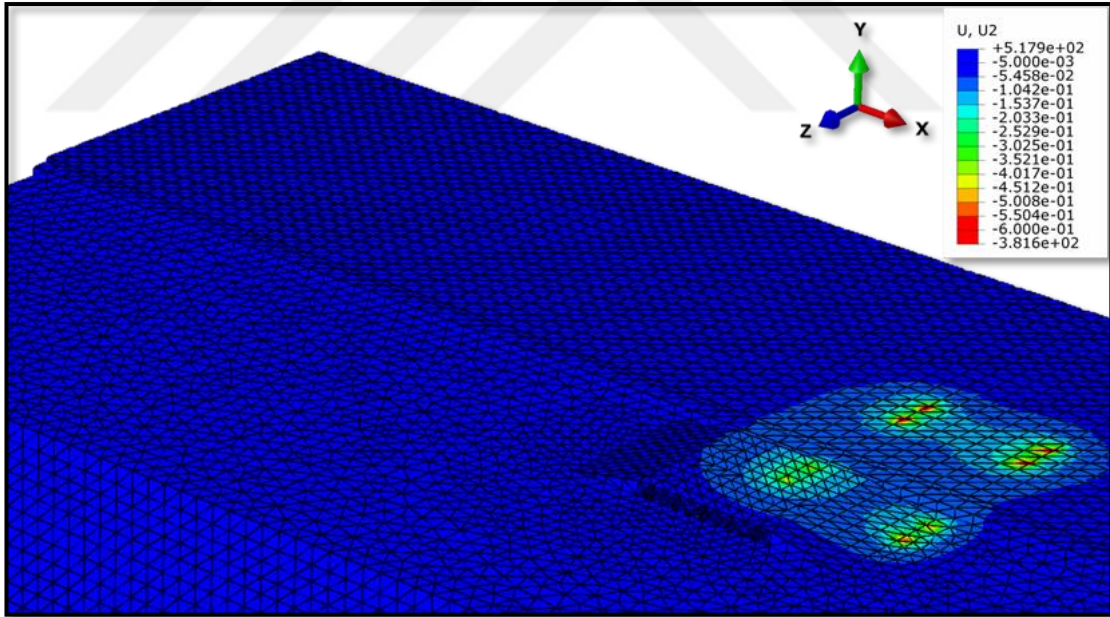
Şekil 4.18., Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'de tekerleklerin hemen altındaki deformasyonlar daha yakından sunulmuştur.



Şekil 4.18. Ön dingildeki tekerlek kaplama üzerinde (yakından görünüş)



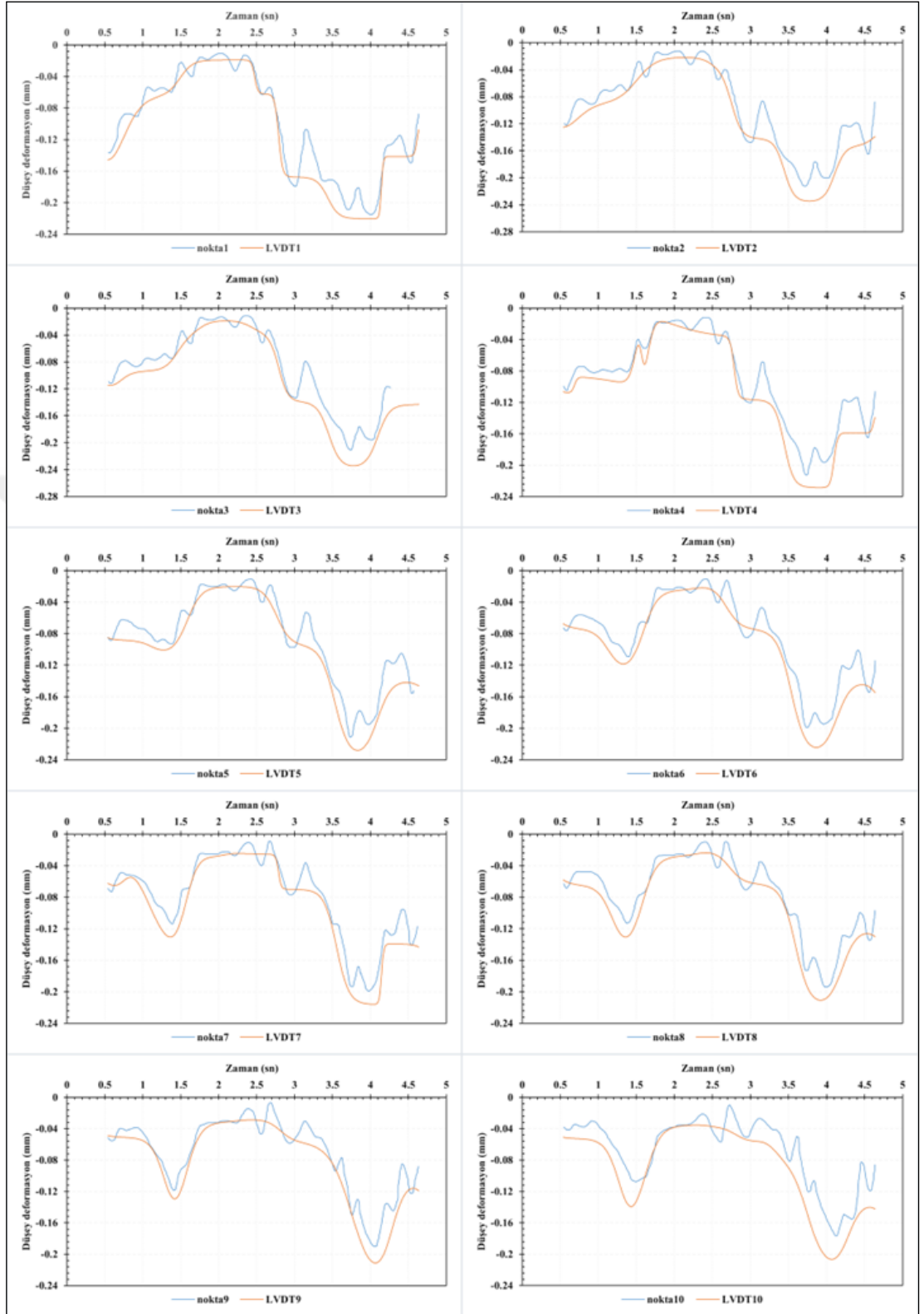
Şekil 4.19. Birinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde (yakından görünüş)



Şekil 4.20. İkinci arka dingildeki tekerlekler kaplama üzerinde (yakından görünüş)

Hem sahada hem de 3B-SEM analizinde verilen düşey deformasyon değerleri zamana bağlı değişmektedir. Bu zaman dilimi ön ve arka dingillerde bulunan tekerleklerin MBY üzerinde buldukları süreci kapsamakta olup deformasyon

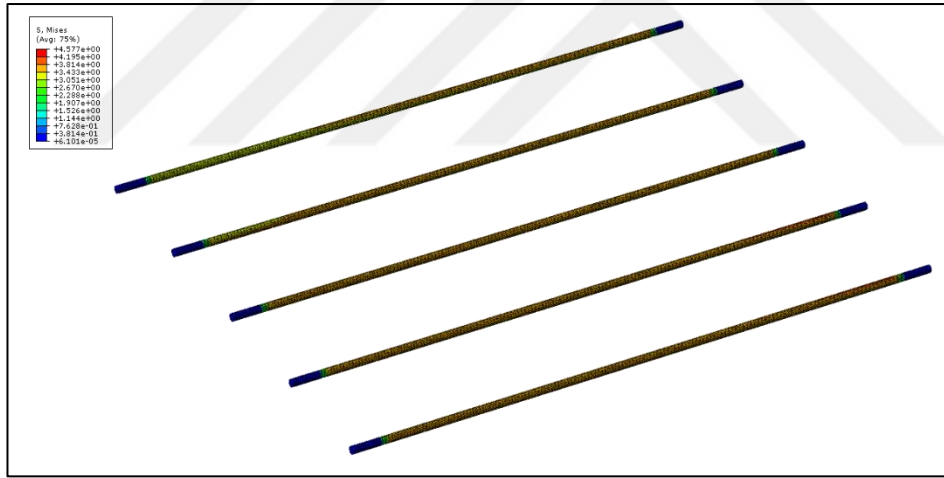
değerleri sadece MBY yüzeyindeki spesifik noktalardan alınmıştır. Sahadan alınan verilere göre düşey deformasyon değerlerinin ön dingilde bulunan tekerleğin MBY üzerindeki hareketi ile -0.15 mm dolaylarına ulaştığı, arka dingil grubundaki tekerleklerin modüler beton yol üzerindeki hareketi ile yaklaşık -0.24 mm değerine çıktığı görülmektedir. 3B-SEM analizinden alınan verilere göre düşey deformasyon değerlerinin ön dingilde bulunan tekerleğin modüler beton yol üzerindeki hareketi ile -0.14 mm dolaylarına ulaştığı, arka dingil grubundaki tekerleklerin modüler beton yol üzerindeki hareketi ile yaklaşık -0.22 mm değerine çıktığı görülmektedir. Saha testinde MBY kaplama sistemi yüzeyinde oluşan maksimum düşey deformasyon değeri yaklaşık -0.24 mm olmuştur. 3B-SEM analizinde MBY kaplama sistemi yüzeyinde oluşan maksimum düşey deformasyon değeri yaklaşık -0.22 mm olmuştur. Sahada MBY kaplama sistemi yüzeyindeki 10 adet noktadan alınan zamana bağlı düşey deformasyon değerleri ile 3B-SEM analizinde yine MBY kaplama sistemi yüzeyindeki 10 adet noktadan alınan zamana bağlı düşey deformasyon değerleri Şekil 4.21.'de karşılıklı olacak şekilde 10 adet ayrı grafik ile sunulmuştur. Hem sahadaki geometride hem de sonlu elemanlar modelindeki geometride sırasıyla karşılıklı olarak bire bir aynı konumlarda olan bu noktalardan alınan düşey deformasyon değerleri, sadece tekerleklerin MBY sistemi üzerindeki hareketini içeren zaman serisine karşılık oluşan kesiti kapsamaktadır. Sahadan elde edilen düşey deformasyon değerleri ile 3B-SEM kullanılarak yapılan dinamik analizden elde edilen düşey deformasyon değerlerinin bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Saha koşullarına uygun modellenen ve test sürecini gerçeğe yakın bir şekilde yansıtacak şekilde analiz edilen sonlu elemanlar modeli ve analizi sisteminin bütünü, sahada yapılan testten elde edilen veriler ile doğrulanmıştır. Benzer nominal hız değerinde rijit kaplamanın trafik yüklerine karşı tepkisinin incelendiği Darestani ve ark., (2007) tarafından yapılan çalışmada düşey deformasyon değerlerinin -0.15 ile -0.20 mm arasında değiştiği görülmektedir. İlgili değerler, bu çalışma kapsamında yürütülen analiz ve test sonuçları ile uyumludur.



Şekil 4.21. 10 farklı nokta için saha ve sonlu elemanlar analizi düşey deformasyon sonuçlarının karşılaştırılması

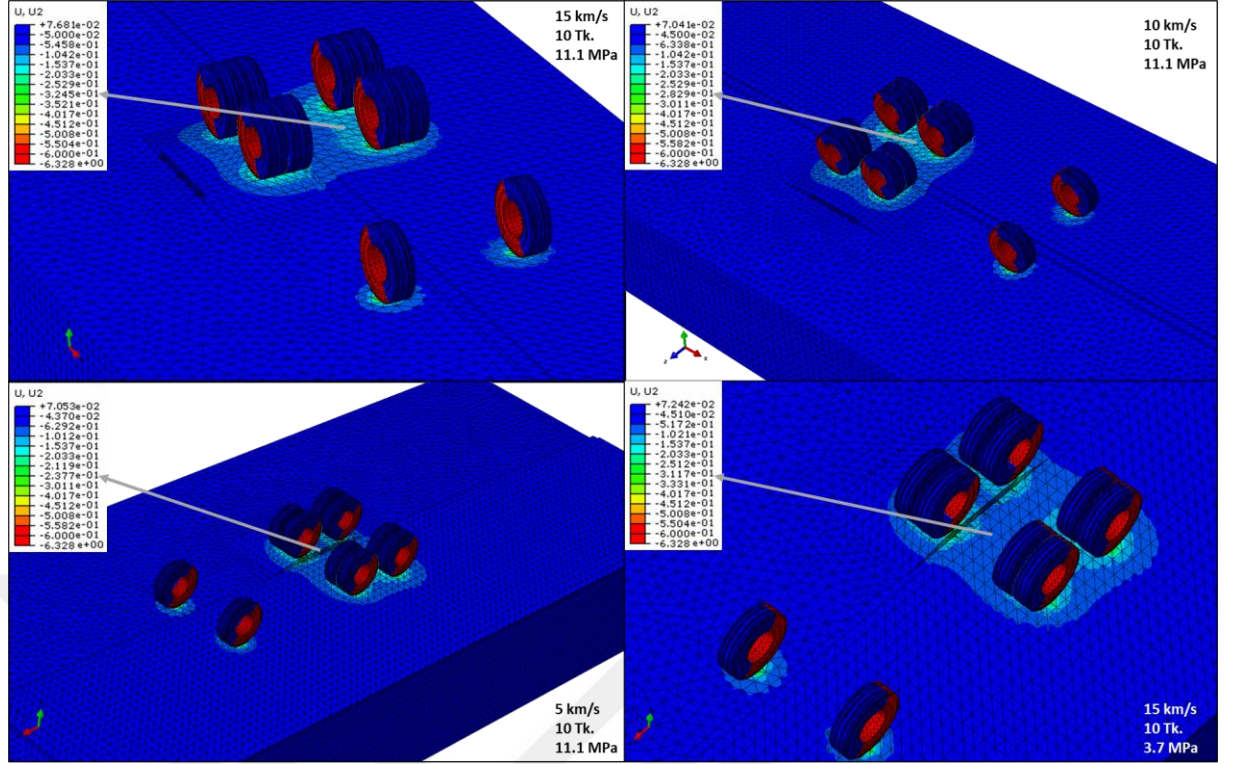
4.4. Parametrik 3B-SEM analizleri

Hız, tekerrür ve yanal gerilmedeki değişimin, MBY sistemimdeki düşey deformasyon üzerindeki etkisini araştırmak için bu tez çalışması kapsamında 27 farklı 3B-SEM parametrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Hız parametresi 5, 10 ve 15 km/s, tekerrür parametresi 1, 5 ve 10 tekrar, uygulanan yanal gerilme ise 3.7, 7.4 ve 11.1 MPa olarak analizlerde değiştirilmiş ve olası tüm kombinasyonlardaki analizler yürütülmüştür. Hız, tekerrür ve yanal gerilmedeki parametrik artışlar için ana modelin temel parametreleri 1. kombinasyon olarak kabul edilip geri kalan kombinasyonlar analiz süresi-çözüm doğruluğu dikkate alınarak ana modeldeki parametrelerin katsayılarla çarpımıyla belirlenmiştir. Yanal gerilme parametresinin kombinasyonları için ana modeldeki gijon tijlerde oluşan maksimum gerilmelere göre hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 4.22’de ana modelde oluşan maksimum gerilme durumunu yansıtan analiz görseli sunulmuştur.



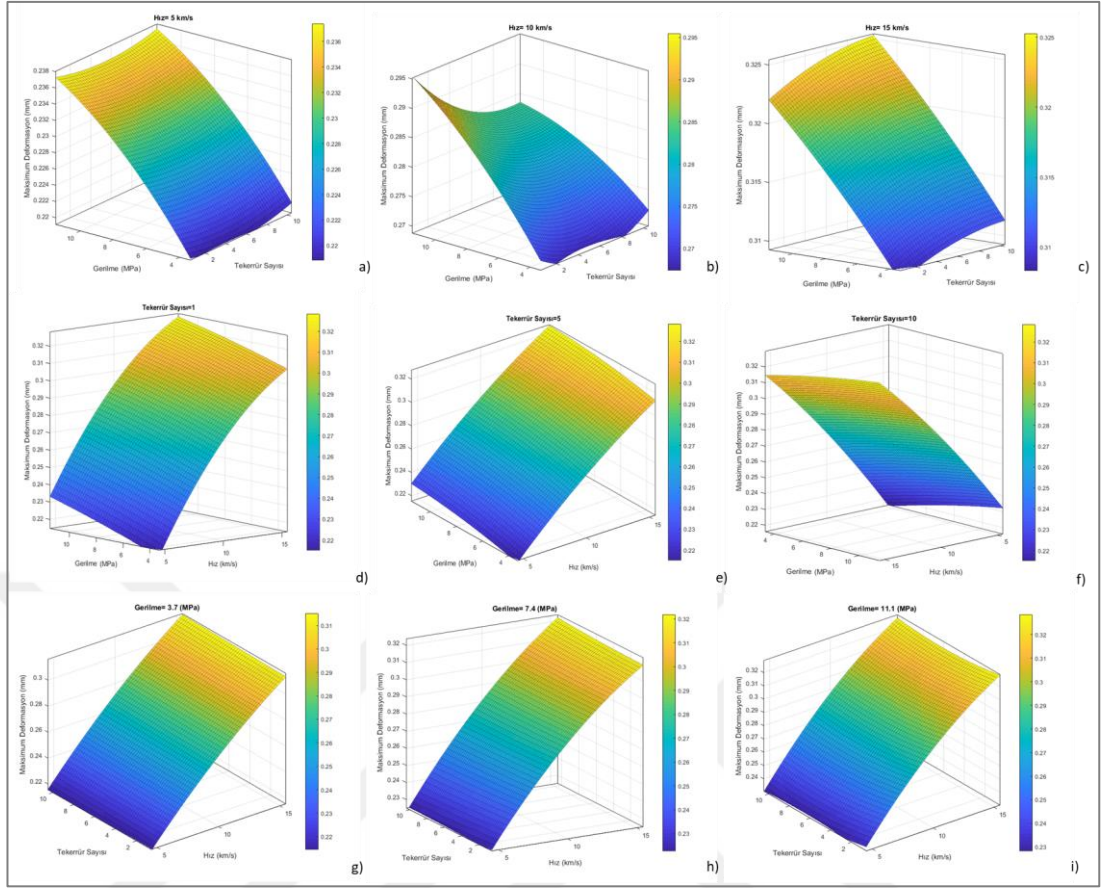
Şekil 4.22. Gijon tijlerde oluşan maksimum gerilmeler

Şekil 4.23.’te gerçekleştirilen 3B-SEM parametrik analizlerinden düşey deformasyon değeri açısından en kritik olanların sonuçları sunulmuştur.



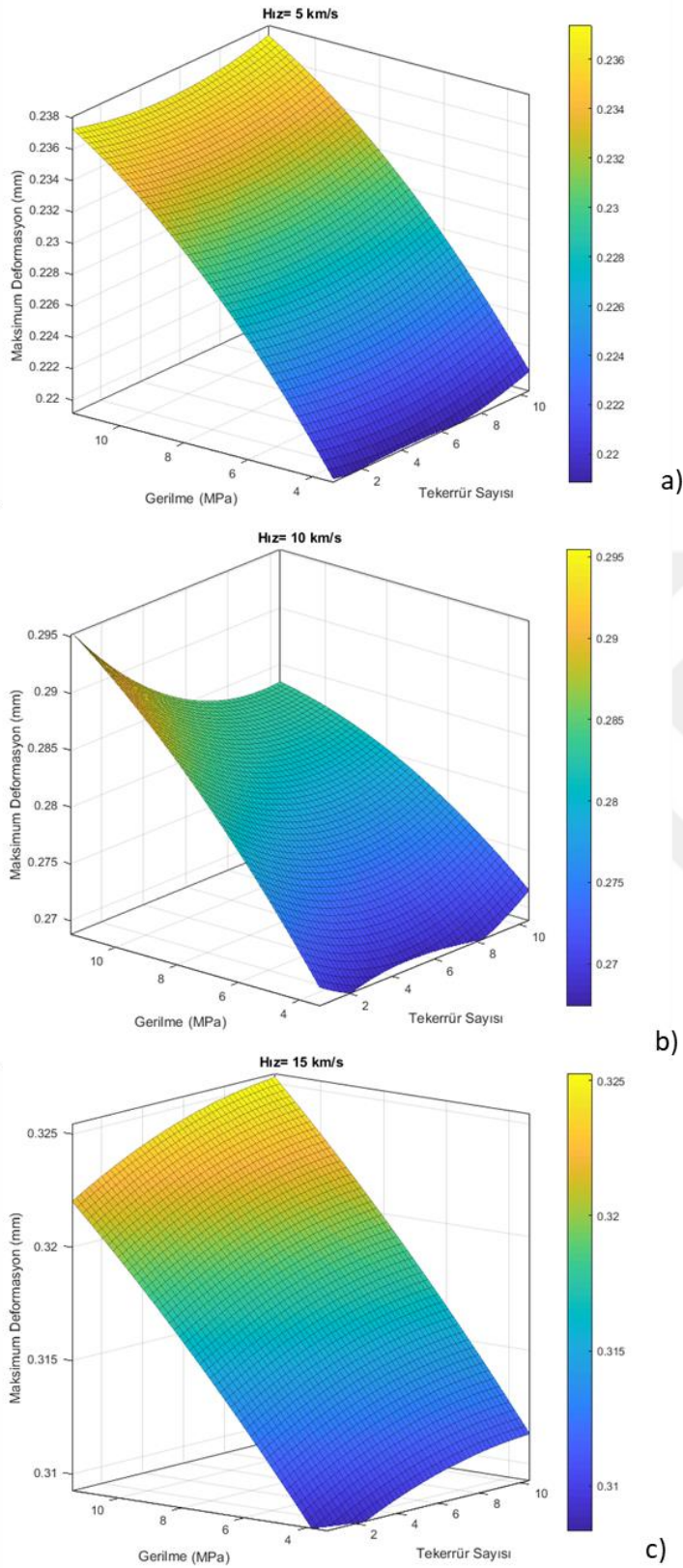
Şekil 4.23. 3B-SEM parametrik analizlerinden düşey deformasyon değeri açısından en kritik olanların sonuçları

Şekil 4.23.'teki sonuçlara göre düşey deformasyonu etkileyen en kritik parametrenin hız olduğu görülmektedir. Deformasyonu etkileyen diğer faktörlerin etki derecesi büyükten küçüğe sırasıyla gerilme ve tekerrür şeklindedir. Tekerrür parametresinin mevcut analizlerde en etkisiz parametre olduğu görülmüştür. Bu durum tekerrür sayısının mevcut analizdeki sayıya göre çok daha büyük değerlerde daha etkili olabileceğini göstermiştir. Şekil 4.24.'te değişen tüm kombinasyonlara bağlı olarak elde edilen düşey deformasyonlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



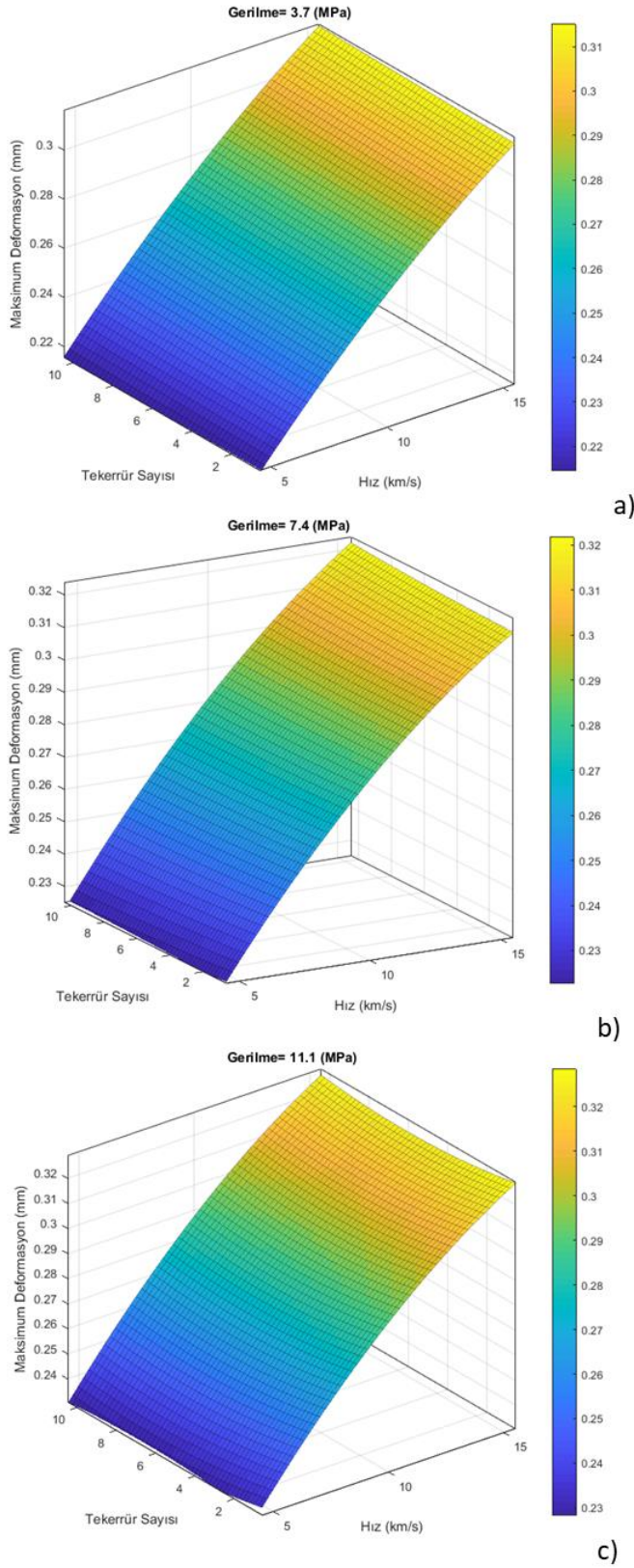
Şekil 4.24. Düşey deformasyonların karşılaştırılması

Şekil 4.24'te görüleceği üzere parametrelerdeki varyasyon düşey deformasyon üzerinde nonliner bir değişime sebep olmuştur. Şekil 4.25.,4.26. ve 4.27'de hız, tekerrür ve gerilme parametrelerinin detaylı incelenmesi sunulmuştur.

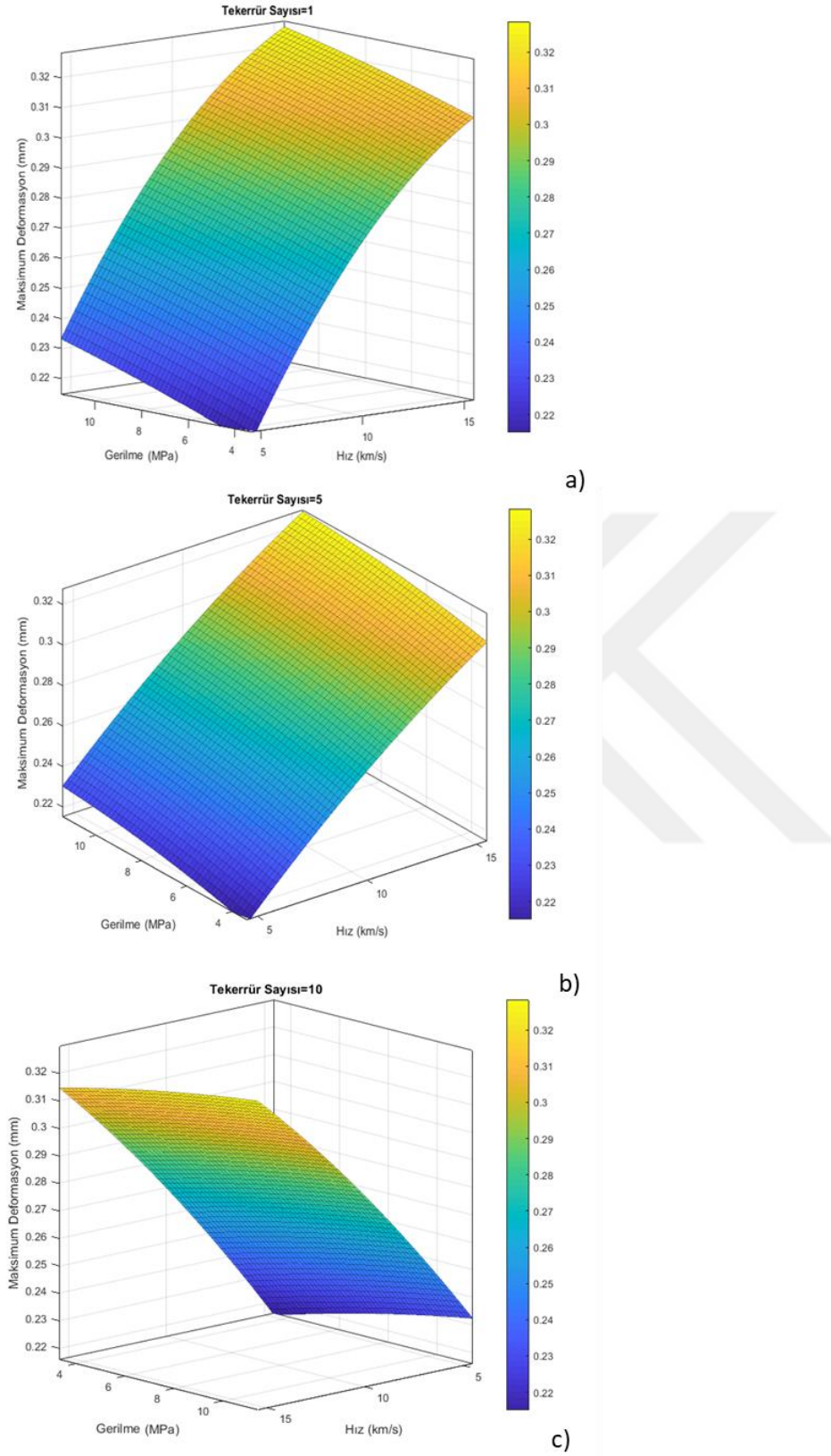


Şekil 4.25. Üç kademedeki hızın sabit kaldığı durumda gerilme ve tekrür sayısına bağlı olarak deformasyon değişiminin üç boyutlu gösterimi a) Hız= 5 km/s b) Hız= 10 km/s c) Hız= 15 km/s

Şekil 4.25'te görüleceği üzere hızın 5 km/s olarak sabit olduğu durumda ana modelin parametrelerinden elde edilen sonuca göre tekerrür sayısının 1'den 10'a ve uygulanan yanal gerilmenin 3.7 MPa'dan 11.1' MPa'ya getirilmesi %7.8 oranında maksimum deformasyonda artışa sebep olmuştur. Hızın aynı parametreler için 5 km/s'den 10 km/s'ye çıkarılması ise deformasyonda yaklaşık %20'lik bir artışa neden olmuştur. Hızın 15 km/s' e çıkarılması durumunda ise bu artış yaklaşık %37'ye tekabül etmektedir. Şekil 4.26'da gerilmenin 3.7 MPa olarak sabit olduğu durumda ana modelin parametrelerinden elde edilen sonuca göre tekerrür sayısının 1'den 10'a ve hızın 5 km/s'den 15 km/s'ye getirilmesi yaklaşık %42 oranında maksimum deformasyonda artışa sebep olmuştur. Gerilmenin aynı parametreler için 3.7 MPa'dan 7.4 MPa'ya çıkarılması ise deformasyonda yaklaşık %2.4'lük bir artışa neden olmuştur. Yanal gerilmenin 11.1 MPa'ya çıkarılması durumunda ise bu artış yaklaşık %4.2'ye tekabül etmektedir. Şekil 4.27'de görüleceği üzere tekerrür sayısının 1 olarak sabit olduğu durumda ana modelin parametrelerinden elde edilen sonuca göre gerilmenin 3.7 MPa'dan 11.1' MPa'ya getirilmesi ve hızın 5 km/s'den 15 km/s'ye getirilmesi yaklaşık %47 oranında maksimum deformasyonda artışa sebep olmuştur. Tekerrürün aynı parametreler için 1'den 5'e çıkarılması ise deformasyonda yaklaşık %0.22'lik bir artışa neden olmuştur. Tekerrür sayısının 10'a çıkarılması durumunda ise bu artış yaklaşık %0.51'e tekabül etmektedir. Şekil 4.25.,4.26. ve 4.27'de verildiği üzere düşey deformasyon sonuçlarında en büyük değişime sebep olan bütünleşik parametrelerden hız ve gerilmedeki beraber değişiminin %47 ile ilk sırada olduğu görülmektedir. Hız ve tekerrürün birlikte değişiminin %42, gerilme ve tekerrürün ise %7.8 oranında düşey deformasyon üzerinde değişime sebep olduğu belirlenmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında tekil parametrelerin değişimi düşünüldüğünde en kritik parametrenin hız olduğu görülmektedir. Düşey deformasyonu etkileyen diğer faktörlerin etki derecesi büyükten küçüğe sırasıyla gerilme ve tekerrür şeklindedir.

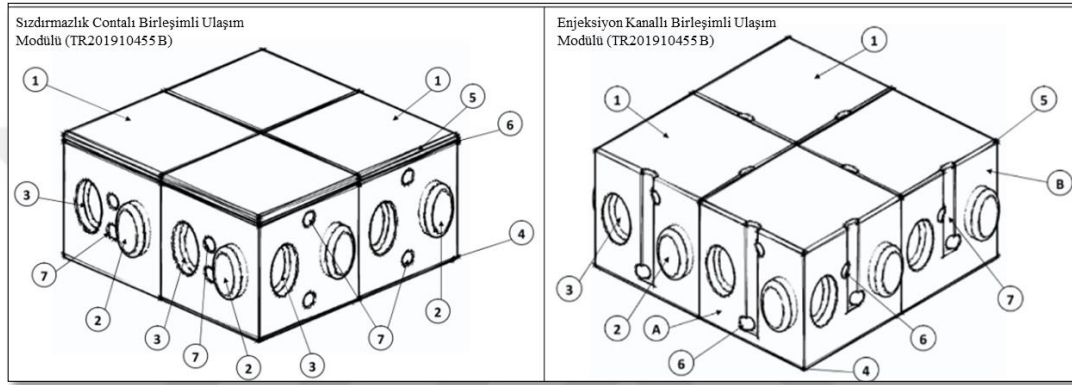


Şekil 4.26. Üç kademedeki gerilmenin sabit kaldığı durumda hız ve tekerrür sayısına bağlı olarak deformasyon değişiminin üç boyutlu gösterimi a) Gerilme=3.7 (MPa) b) Gerilme=7.4 (MPa) c) Gerilme=11.1 (MPa)



Şekil 4.27. Üç kademedeki tekerrür sayısının sabit kaldığı durumda gerilme ve hıza bağlı olarak deformasyon değişiminin üç boyutlu gösterimi a) 1 tekerrür b) 5 tekerrür c) 10 tekerrür

Nihai MBY kaplama elemanı geometrisi ve paternine karar vermeden önce yayınladığımız Sızdırmazlık Contalı Birleşimli Ulaşım Modülü (TR201910455 B) ve Enjeksiyon Kanallı Birleşimli Ulaşım Modülü (TR201910451 B) adlarıyla iki adet patentimizin bulunduğu daha önce söz edilmiştir. Dolayısıyla MBY konsepti alternatif patern ve malzemeler kullanılarak büyütülebilir. Bu amaçla Şekil 4.28.'de MBY kaplama sistemi için alternatif olarak kullanımını öngördüğümüz ve patentini aldığımız paternlerin görselleri sunulmuştur.



Şekil 4.28. MBY kaplama sistemi için alternatif olarak kullanımını öngördüğümüz ve patentini aldığımız paternlerin görselleri

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER**5.1. Sonuçlar**

Bu tez çalışması kapsamında üst ve alt bölgelerinde farklı kalınlıklarda SIFCON tabakalar bulunan beton yol modüllerinin karayolu üstyapı kaplama tabakası olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır ve dinamik ağır taşıt yükü altındaki performansı incelenmiştir. Tarafımızca geliştirilmiş olan Modüler Beton Yol (MBY) kaplama sistemi, önceden üretilen beton yol modüllerinin sahada birleştirilmesi ile hızlı ve pratik bir inşa tekniği ortaya koymuştur. Laboratuvarda, arazide ve bilgisayar ortamında yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Laboratuvarda yürütülen çalışmalar sonucunda beton yol modüllerindeki SIFCON tabakaların kalınlığındaki ve çelik lif uzunluğundaki artışın, eğilme dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Bu artış alt bölgedeki SIFCON tabakanın kalınlığı ile daha belirgin hale gelmiştir.
- Alt bölgedeki SIFCON tabakasında uzun çelik lif bulunan numunelerin eğilme dayanımının, alt bölgedeki SIFCON tabakasında kısa çelik lif bulunan numunelerin eğilme dayanımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- 28 günlük eğilme dayanımı değerleri 7.33 MPa ve 29.67 MPa arasında değişmiştir.
- 28 günlük basınç dayanımı değerleri 81.60 MPa ile 112.20 MPa arasında değişmiştir.
- SIFCON tabakaların kalınlığındaki ve çelik lif uzunluğundaki artışın, numunelerin 28 günlük tokluk değerini artırdığı belirlenmiştir.
- Parametrik deneysel çalışmadan elde edilen yeterli sayıdaki veri seti çok amaçlı optimizasyon analizlerinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır.
- RSM kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinde anlamlı derecede arzu edilebilirlik değerlerine ulaşılmıştır.

- Yürütülen ikili optimizasyon çalışması kapsamında maliyet ve performans dengesi dikkate alınarak optimum verimlilik sınırları belirlenmiştir.
- Optimum verimlilik sınırları içerisinde bulunan üstün mekanik özelliklere sahip modüler beton yol elemanı kullanılarak Modüler Beton Yol (MBY) kaplama sistemi sahada pratik bir şekilde uygulanmıştır.
- Yasal maksimum sınıra (25000kg) kadar yüklenmiş 315/80 R 22,5 tipi tekerleklere sahip 3 akslı damperli kamyon kullanılarak 5 km/sa'lik nominal hız değerinde yapılan yükleme sonucunda Modüler Beton Yol kaplama sisteminde oluşan düşey deformasyonların -0.24 mm değerine kadar ulaştığı görülmüştür.
- Saha ve test koşullarına uygun olarak yürütülen sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen düşey deformasyon değerlerinin, saha testinden elde edilen düşey deformasyon değerleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Böylelikle oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli başarılı bir şekilde kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır.
- Böylelikle günümüzde daha yaygın hale gelen mekanistik yaklaşımlarda kullanılmak üzere, karayolu üstyapısının trafik yüklerine karşı vereceği tepkileri sonraki araştırmalarda rehber olabilecek şekilde farklı malzeme, arazi koşullarında tahmin edebilecek kalibre edilmiş ve doğrulanmış sayısal analiz temelli, süspansiyon ve dinamik dönüş hareketini dikkate alabilen karayolu tepkilerinin çözümüne yönelik bir teknik geliştirilmiştir.
- Kalibre edilmiş ve doğrulanmış model üzerinde yapılan parametrik çalışmada tekil parametrelerin değişimi düşünüldüğünde en kritik parametrenin hız olduğu görülmüştür. Deformasyonu etkileyen diğer faktörlerin etki derecesi büyükten küçüğe sırasıyla gerilme ve tekerrür şeklinde olmuştur.

5.2. Öneriler

Üstün mekanik özelliklere sahip ve pratik bir şekilde kullanıma hazır hale getirilebilen tarafımızca geliştirilen Modüler Beton Yol kaplama sisteminin uygulanabilirliğinin araştırıldığı ve dinamik ağır taşıt yükü altındaki performansının incelendiği bu çalışmada, elde edilen sınırdaki eğriliğin belirgin dışbükeyliği, küresel optimumun verimli çözüm kümesi içinde bulunduğunu ve çok amaçlı verimlilik analizinin ikili optimizasyon değerlendirmesinde etkili olduğunu göstermektedir. Buna göre, sunulan sınırlar, sonraki çalışmalarda performans özelliklerini dikkate alarak optimum SIFCON tabaka kalınlığını ve çelik lif uzunluğunu seçmek için verimli Modüler Beton Yol kaplama sistemi karar verme sürecinde kullanılabilir.

Düşey deformasyonların karşılaştırılması ile başarılı şekilde kalibre edilmiş ve doğrulanmış olan üç boyutlu sonlu elemanlar analizi çözümleme tekniğinin farklı malzeme, arazi ve yükleme koşullarında kaplama tepkilerinin belirlenmesi amacıyla mekanistik yaklaşımlarda kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- AALETI, S., and SRITHARAN, S., 2019. Quantifying bonding characteristics between UHPC and normal strength concrete for bridge deck application. *J. Bridge Eng.* 2019, 24, 04019041.
- ABD ALLA, E.M., 2006. The rational use of finite element method in the analysis of flexible pavements. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, 34, 1185-1211.
- ACI COMMITTEE 363, 1992. Report on High Strength Concrete (ACI 363R-92), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1992, 23 pp
- AĞAR, E., SÜTAŞ, İ., ve ÖZTAŞ, G., 1998. Beton yollar: rijit yol üstyapıları; malzeme-tasarım-üretim-yapım-bakım teknikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- AHIRWAR, S.K. and MANDAL, J.N., 2017. Finite element analysis of flexible pavement with geogrids. *Procedia Engineering*, 189, 411- 416.
- AHMED, A., ERLINGSSON, S., 2016. Viscoelastic response modelling of a pavement under moving load. *Transportation Research Procedia*, 14, 748-757.
- AKÇAÖZOĞLU, K., and KILLI, A., 2021. The effect of curing conditions on the mechanical properties of SIFCON. *Revista de la construcción* 20.1 (2021): 37-51.
- AL-AZZAWI, A. A., 2012. Finite element analysis of flexible pavements strenghted with geogrid. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7, 1295-1299.
- ALGIN, H. M., 2016. Optimised design of jet-grouted raft using response surface method. *Computers and Geotechnics*, 74, 56-73.
- ALGIN, H. M., KAYA, E., and AMEEN, R. A. M., 2022. Hydraulic conductivity-based optimum efficiency frontiers for RAP aggregate utilization in subbase construction. *Construction and Building Materials*, 348, 128636.
- ALGIN, H.M., 2018. Optimised design of jet-grouted rafts subjected to nonuniform vertical loading, *KSCE J. Civ. Eng.* 22 494–508, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0841-1>.
- ALI, O., 2005. Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37A). Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.
- AL-OSTA, M. A., ISA, M. N., BALUCH, M. H., and RAHMAN, M. K., 2017. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 134, 279-296.
- ALZAMILI, H. H., ELSHEIKH, A. M., 2023. Performance of reinforced concrete elements retrofitted with SIFCON under elevated temperatures.
- AMBASSA, Z., ALLOU, F., PETIT, C., and EKO, R. M., 2013. Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM. *Construction and Building Materials*, 43, 443-452.
- ASIM, M., AHMAD, M., ALAM, M., ULLAH, S., IQBAL, M. J., and ALI, S., 2021. Prediction of rutting in flexible pavements using finite element method. *Civil Engineering Journal*, 7(8), 1310-1326.
- ASTM C642 A., 2013. Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International.
- ASTM, C1437, 2015. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, United States.
- ASTM, C230, 2014. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, United States.
- ASTM, C78/78M, 2018. Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). DOI: 10.1520/c0078-09.
- BALAJI, S., and THIRUGNANAM, G. S., 2018. Behaviour of reinforced concrete beams with SIFCON at various locations in the beam. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22.1: 161-166.

- BALAMURALIKRISHNAN, R., 2015. Cyclic behavior of reinforced concrete beams retrofitted with externally bonded SIFCON laminates. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(8), 1063-1075.
- BAYRAK, O. U., and HINISLIOGLU, S., 2017. A new approach to the design of rigid pavement: single axle loading. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 573-589.
- BAYRAK, O. Ü., BİNGÖL, M. Z., ve BAYATA, H. F., 2019. SIFCON ile Üretilen Beton Yolların Bazı Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 12.1 (2019): 411-424.
- BEGLARIGALE, A., YALÇINKAYA, Ç., YİĞİTER, H., and YAZICI, H., 2016. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature. *Construction and Building Materials*, 104, 99-108.
- BEHIRY, A. E. A. E. M., 2012. Fatigue and rutting lives in flexible pavement. *Ain Shams Engineering Journal*, 3(4), 367-374.
- BESKOU, N. D., TSINOPOULOS, S. V., and THEODORAKOPOULOS, D. D. 2016. Dynamic elastic analysis of 3-D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM treatment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 63-72.
- BHATTI, M. A., and STONER, J. W., 1998. Nonlinear Pavement Distress Model Using Dynamic Vehicle Loads, *ASCE, Journal of Infrastructure System*, Vol. 4, Issue 2, p
- BİNGÖL, M. Z., 2017. SIFCON ile üretilen yol betonlarının eğilme ve basınç dayanımının taguchi metodu ile optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.
- BOSTANCIOĞLU, M., 2018. Karayolu Kaplamalarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizinde Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22-30.
- BOSTANCIOĞLU, M., 2021. Mekanistik ampirik esnek üstyapı tasarım modellerinin tabaka kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 91-102.
- BOZKIRLI, Ö. E., 2019. Farklı lif türü ve hacminin SIFCON'un mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- BROWN, S. F., 1977. Achievements and challenges in asphalt pavement engineering. In *8th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP)*, pp. 1-23.
- CARTER, M., and BENTLEY, S., 1991. *Correlations of soil properties*. Penetech Press Publishers, London.
- CARVALHO, R. L., and SCHWARTZ, C. W., 2006. Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical versus NCHRP project 1-37A mechanistic-empirical. *Transportation Research Record*, 1947(1), 167-174.
- CHANNAKESHA, C., BARZEGAR, F., and VOYIADJIS, G. Z., 1993. Nonlinear FE analysis of plain concrete pavements with doweled joints. *Journal of Transportation Engineering*, 119(5), 763-781.
- CHATTI, K., LYSMER, J., and MONISMITH, C. L., 1994. Dynamic finite-element analysis of jointed concrete pavements.
- CHEN, Y., 2009. Viscoelastic modeling of flexible pavement. Doctor of Philosophy, The Graduate Faculty of The University of Akron. Ohio.
- COOKSON, G., 2016. Europe's Traffic Hotspots. Measuring the impact of congestion in Europe.
- CORNELL, J.A., 1990. How to Apply Response Surface Methodology, *The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques*, Volume number 8, ASQC, Wisconsin, 1990. (Cornell J.A. How to apply response surface methodology, the basic references in quality control: statistical techniques. Wisconsin (USA): ASQC Quality Press; 1990.)

- CRISMAN, B., and FACCHIN, G., 2005. Advanced numerical methods to evaluate pavements response: comparison and parametric analysis. In *Convegno SIIV BARI 2005* (Vol. 400, pp. 1-22). SIIV.
- DALY A. F., and WITARNAWAN, W., 1997. Strengthening of bridges using external posttensioning. Paper PA3307/97. Berkshire, UK: Transportation Research Laboratory; pp. 17
- DARESTANI, M. Y., THAMBIRATNAM, D. P., NATAATMADJA, A., and BAWEJA, D., 2007. Structural response of concrete pavements under moving truck loads. *Journal of transportation engineering*, 133(12), 670-676.
- DARESTANI, Y. M., THAMBIRATNAM, D., BAWEJA, D., and NATA-ATMADJA, A., 2006. Dynamic response of concrete pavements under vehicular loads. In *Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering. International Association for Bridge and Structural Engineering Symposium-Budapest 2006* (pp. 104-107). IABSE.
- DARESTANI, Y., M., THAMBIRATNAM, D., NATA-ATMADJA, A., and BAWEJA, D. 2006a. Experimental study on structural response of rigid pavements under moving truck load. In *Proceedings of the 22nd ARRB Conference: Research into Practice* (pp. 1-14). ARRB Group Ltd.
- DE CARVALHO, R. L. E., 2006. Mechanistic-empirical design of flexible pavements: a sensitivity study. University of Maryland, College Park.
- DIALLO, A. O., 2019. Beton yol üstü asfalt kaplamaların sonlu elemanlar yöntemi ile mekanistik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- DOĞAN, R., 2017. Farklı kayaç türlerinin SIFCON bulamacında agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- EVANGELISTA-JUNIOR, F., PARENTE JUNIOR, E., HOLANDA, A. S., ARAÚJO, T. D. P., and SOARES, J. B., 2006. Dynamic analysis of asphaltic pavements. In *XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*.
- FARNAM, Y., MOOSAVI, M., SHEKARCHI, M., BABANAJAD, S. K., and BAGHERZADEH, A., 2010. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression. *Cement and concrete research*, 40(11), 1571-1581.
- FARZAD, M., SHAFIEIFAR, M., and AZIZINAMINI, A., 2019. Experimental and numerical study on bond strength between conventional concrete and ultra high-performance concrete (UHPC). *Eng. Struct.* 2019, 186, 297–305.
- GANSONRÉ, Y., BREUL, P., BACCONNET, C., BENZ, M., and GOURVÈS, R., 2021. Estimation of lateritic soils elastic modulus from CBR index for pavement engineering in Burkina Faso. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, 348-356.
- GILLESPIE, T. D., KARAMIHAS, S. M., SAYERS, M. W., NASIM, M. A., HANSEN, W., and EHSAN, N., 1993. Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance”, Transportation Research Board, National Research Council, Report No. 353, National Academy Press, Washington D. C., pp. 24-34.
- HADI, M. N., and BODHINAYAKE, B. C., 2003. Non-linear finite element analysis of flexible pavements. *Advances in engineering software*, 34(11-12), 657-662.
- HAMEED, D. H., SALIH, S. A., and HABEEB, G. M., 2020. Upgrading of normal concrete service life by using SIFCON layers. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 737, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- HENDRICK, J. K., MARLOW, M. J., and BRADEMEYER, B. 1992. The Simulation of Vehicle Dynamic Effects on Road Pavements. Final Report (No. FHWA-RD-90-108).

- HINISLIOGLU, S., and BAYRAK, O. U., 2004. Optimization of early flexural strength of pavement concrete with silica fume and fly ash by the Taguchi method, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 21(2), 79-90.
- HOU, S., LI, Q., LONG, S., YANG, X., and LI, W., 2009. Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures. *Materials & design*, 30(6), 2024-2032.
- HUANG, Y. H., 1993. *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- HUANG, Y. H., 2004. *Pavement Analysis and Design (2nd ed.)*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- HUSSAIN, I., ALI, B., AKHTAR, T., JAMEEL, M. S., and RAZA, S. S., 2020. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case studies in construction materials*, 13, e00429.
- HUSSEIN, L., and AMLEH, L., 2015. Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members. *Construction and Building Materials*, 93, 1105-1116.
- IPEK, M., 2018. Examination of the usability of basalt aggregate in SIFCON. *Stavební obzor-Civil Engineering Journal*, 27(4).
- IPEK, M., AKSU, M., 2019. The effect of different types of fiber on flexure strength and fracture toughness in SIFCON. *Construction and Building Materials* 214 (2019): 207-218.
- IPEK, M., AKSU, M., YILMAZ, K., and UYSAL, M., 2014. The effect of pre-setting pressure on the flexural strength and fracture toughness of SIFCON during the setting phase. *Construction and Building Materials*, 66, 515-521.
- IZQUIERDO J. T., RODRIGUES L., and RIOS B. C., 2002, Structural Evaluation and Analysis of Instrumented In-Service Concrete Pavements Subjected to Heavy Dynamic Loads, *Transportation Research Record*, No. 1568, Transportation Research Board, Washington D. C., USA, p. 24-34.
- JERRY, A. H., and FAWZI, N. M., 2022. The effect of using different fibres on the impact-resistance of slurry infiltrated fibrous concrete (SIFCON). *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 135-142.
- JON W. K., SIGMUND, D. S., and DONALD W. T., 1989. *Geotechnical Properties of Geologic Materials, Engineering Geology in Washington, Volume 1*, Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78.
- KARADAG, H., FIRAT, S., ISIK, N. S., and YILMAZ, G. 2022. Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model. *Grđevinar*, 74(06.), 471-480.
- KARATAĞ, H., FIRAT, S., and IŐIK, N. S., 2018. Evaluation of flexible highway embankment under repetitive wheel loading using finite element analysis. In *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017) Volume 1 3 (pp. 705-716)*. Springer International Publishing.
- KGM, 2016. *Beton Yollar Teknik Şartnamesi*, Karayolları Genel M¼d¼rl¼ė¼ ARGE Daire BaŐkanlıėı, Ankara, T¼rkiye. Erişim Tarihi: 17 Ocak 2024. <https://www.betonyol.org.tr/uploads/otherpublications/kgm-beton-yol-kaplamalari-teknik-sartnamesi.pdf>
- KGM, 2023. Karayolları Genel M¼d¼rl¼ė¼, “Yol Ağı Bilgileri” Erişim Tarihi: 17 Ocak 2024. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>.
- KHIAVI, A. K., and BAKHSHI, B., 2021. Analytical evaluation of the rutting critical response function under the heavy vehicle’s moving in flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 308, 125052.
- KHIAVI, A. K., and BAKHSHI, B., 2021. Analytical evaluation of the rutting critical response function under the heavy vehicle’s moving in flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 308, 125052.

- KILLI, A., 2018. Kür şartlarının SIFCON'un mekanik özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- KIM, S., HAN, S., PARK, C., and YUN, K. K., 2020. Compressive behavior characteristics of high-performance slurry-infiltrated fiber-reinforced cementitious composites (SIFRCCs) under uniaxial compressive stress. *Materials*, 13(1), 159.
- KUTLU, E., 2007. Elastik Zemine Oturan Çelik Lif Donatılı Beton Plakların Deneysel Analizi ve Genel Bir Değerlendirme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- LANKARD, D. R., 1984. Properties, applications: slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON). *Concrete international*, December. p. 287–306.
- LIU C., GAZIS D., 1999. Surface Roughness Effect on Dynamic Response of Pavements, ASCE, *Journal of Transportation Engineering*, p. 332-337
- LU, P., BRATLIEN, A., and TOLLIVER, D., 2014. North Dakota implementation of mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) (No. MPC 14-274). Mountain Plains Consortium.
- MASHAYEKHI, M., AMINI, A. A., BEHBAHANI, H. and NOBAKHT, S., 2011. Comparison of mechanisticempirical and empirical flexible pavement design procedures of AASHTO: A Case study. 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements (pp. 319–328). Thessaloniki, Greece.
- MEDINA, J., 1997. Mecanica dos Pavimentos. COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 1st edition. in Portuguese.
- MEYERHOF, G. 1956. Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *J Soils Mechanics and Foundation Division ASCE*, 82(SM1).
- MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, PAVEMENT DESIGN, 2007. NAVFAC Design Manual 7.2 - Foundations and Earth Structures, SN 0525-LP-300-7071, REVALIDATED BY CHANGE 1 SEPTEMBER 1986
- MOHOD, M. V., and KADAM, K. N., 2016. A comparative study on rigid and flexible pavement: A review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(3), 84-88.
- MOUSA, M. R., ABO-HASHEMA, M. A., GADALLAH, A. A., and MOUSA, R. M. 2015. Evaluation of pavement performance prediction models under different traffic and climatic conditions. In 14th International Conference on Asphalt, Pavement Engineering, and Infrastructure (pp. 1-19).
- MÜSEVİTOĞLU, A., ÖZÜTOK, A., SALKIM, S., ÇAĞLAR, O., KIRCA, G., ERTÜRK, K., ve ACAR, M., 2021. Kademeli Lif Takviyeli Kompozit Beton Kirişlerin Eğilme Davranışı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 338-345.
- MYERS, R. H., MONTGOMERY, D.C., and ANDERSON-COOK, C. M., 2009. *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*, Wiley.
- NAAMAN, A. E., OTTER, D., and NAJM, H., 1992. Elastic modulus of SIFCON in tension and compression. *Materials Journal*, 88(6), 603-613
- NASER, F. H., and ABEER S. Z., 2020. Flexural Behaviour of Modified Weight SIFCON Using Combination of Different Types of Fibres. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 745. No. 1. IOP Publishing, 2020.
- NGUYEN, D. L., THAI, D. K., NGUYEN, H. T., NGUYEN, T. Q., and LE-TRUNG, K., 2021. Responses of composite beams with high-performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 270, 121814.
- OBRZUD, R., and TRUTY, A., 2012. THE HARDENING SOIL MODEL - A PRACTICAL GUIDEBOOK Z Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012
- OEHLERS, D. J., 1992. Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits. *Journal of Structural Engineering* 118.8 (1992): 2023-2038.

- ÖZCANAN, S., 2011. Tekerlek ve aks konfigürasyonuna bağlı olarak yolda oluşan deformasyonların sonlu elemanlarla analizi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ÖZCANAN, S., ve AKPINAR, M. V., 2014. Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi. *Teknik Dergi*, 25(121).
- ÖZSOY, M., ve FIRAT, S., 2023. Çelik Cürufu ile Yapılan Yol Katmanlarının Sayısal Analizleri. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- PARK, D. W., PAPAGIANNAKIS, A. T., and KIM, I. T., 2014. Analysis of dynamic vehicle loads using vehicle pavement interaction model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, 2085-2092.
- PASCHALIS, S. A., LAMPROPOULOS, A. P., and TSILOULOU, O., 2018. Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of full scale reinforced concrete members. *Construction and building materials*, 186, 351-366.
- PECK, R., HANSON, W., and THORNBURN, T., 1974. *Foundation Engineering Handbook*. Wiley, London.
- PUTRI, E. E., RAO, N. S. V. K., and MANNAN, M. A., 2012. Evaluation of modulus of elasticity and modulus of subgrade reaction of soils using CBR test. *Journal of Civil Engineering Research*, 2(1), 34-40.
- RAO, H. S., VAISHALI G. G., RAMANA, N.V., and GNANESWAR, K., 2010. Response of SIFCON two-way slabs under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 37(4), 452-458.
- RIAD, M. Y., SHOUKRY, S. N., WILLIAM, G. W., and FAHMY, M. R., 2009. Effect of skewed joints on the performance of jointed concrete pavement through 3D dynamic finite element analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(4), 251-263.
- RIEDEL, P., LEUTBECHER, T., PIOTROWSKI, S., and HEESE, C., 2019. Ratios of compressive strengths of ultra-high-performance concrete specimens of different shapes and sizes. *ACI Materials Journal*, 116(6), 139-149.
- SAFDAR, M., MATSUMOTO, T., and KAKUMA, K., 2016. Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC). *Composite structures*, 157, 448-460.
- SAFNA, A. M., and ANILA, S., 2019. Finite Element Analysis of RC Beams with Externally Bonded SIFCON and SIMCON Laminates using ANSYS. *International Journal of Engineering Research and Technology*, ISSN, 2278-0181.
- SALTAN, M., and FINDIK, F. S., 2008. Stabilization of subbase layer materials with waste pumice in flexible pavement. *Building and Environment*, 43(4), 415-421.
- SARKAR, A., 2016. Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. *International Journal of Pavement Engineering*, 17, 377-387.
- SENGUL, O., 2018. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*, 186, 1082-1091.
- SHAFABAKHSH, G., FAMILY, A., and ABAD, B. P. H., 2014. Numerical analysis of concrete block pavements and comparison of its settlement with asphalt concrete pavements using finite element method. *Engineering Journal*, 18(4), 39-51.
- SHAKIR, H. M., AL-AZZAWI, A. A., and AL-TAMEEMI, A. F., 2022. Nonlinear Finite Element Analysis of Fiber Reinforced Concrete Pavement under Dynamic Loading. *J. Eng.*, 28, 81-98.
- SHANNAG, M. J., BARAKAT, S., and JABER F., 2001. Structural repair of shear-deficient reinforced concrete beams using SIFCON. *Magazine of Concrete Research* 53.6: 391-403.

- SHARMA, H. K., SINGH, V. P., and KUMAR, M., 2008. Structural optimization and performance of SIFCON plates. Proc. Int. Conf.on Applied Computer & Applied Computational Science, Hangzhou, China, pp. 787-792.
- SMITH, P., and SNYDER, M. B., 2017. Manual for Jointed Precast Concrete Pavement.
- SOUZA R. H. F., and APPLETON, J., 1997 Flexural behavior of strengthened reinforced concrete beams, Material and Structures; Vol 30 (3), pp154–9.
- SOYLU, N., and BINGÖL, A. F., 2019. Research on effect of the quantity and aspect ratio of steel fibers on compressive and flexural strength of SIFCON. Challenge Journal of Structural Mechanics 5.1: 29.
- SUKSAWANG, N., WTAIFE, S., and ALSABBAGH, A., 2018. Evaluation of elastic modulus of fiber-reinforced concrete. ACI Materials Journal, 115(2), 239.
- ŞENGÜN, E., ÖZTÜRK, H. I., ve YAMAN, I. Ö., 2020. Mekanistik-ampirik ve geleneksel beton yol tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması: Afyon-Emirdağ deneme kesimi. Teknik Dergi, 31(5), 10251-10274.
- TANARSLAN, H. M., 2017. Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates. Engineering Structures 151 (2017): 337-348.
- TANARSLAN, H. M., ALVER, N., JAHANGIRI, R., YALÇINKAYA, Ç., and YAZICI, H., 2017. Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition. Construction and Building Materials, 155, 45-55.
- TANYILDIZI, M., and ÇINAR, M., 2023. The Effect of The Bearing Capacity of Sub-Grade Soil on The Thickness and Cost of The Superstructure of Chip Seals, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(2), 376-386.
- TAŞDEMİR, M. A., ve BAYRAMOV, F., 2022. Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. İTÜDERGİSİ/d 1.2.
- TAUNK, G. S., 1998. Rigid pavement vs. flexible pavement. Indian Highways, 26(2).
- TAYABJI, S., YE, D., and BUCH, N. 2013. Precast concrete pavements: Technology overview and technical considerations. PCI Journal, 58(1), 112–128.
- TS EN, 12390-3, 2019. Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens. Erişim Tarihi: 17.01.2022.
<https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073085099050050084115117079115055068>
- TS EN, 12390-5, 2019. Türk Standartları Enstitüsü. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5. Erişim Tarihi: 17.01.2022.
<https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073090086056098051080101089075048056>
- TS EN, 14889-1, 2016. Lifler–Betonda kullanım için–Bölüm 1: Çelik lifler–Tarifler, özellikler ve uygunluk, TSE, Ankara. Erişim Tarihi: 17.01.2022.
<https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073086121101067110056081068055075104>
- TUNÇ, A., 2007. Yol malzemeleri ve uygulamaları (2.Baskı). Ankara: Nobel Yayınevi.
- TUYAN, M., and YAZICI, H., 2012. Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix. Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 571-577, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012. 04.110.
- UDDIN, W., ZHANG, D., and FERNANDEZ, F., 1994. Finite element simulation of pavement discontinuities and dynamic load response. Transportation research record, (1448).
- VAITKUS, A., GRAŽULYTĖ, J., KLEIZIENĖ, R., VOROBOJOVAS, V., and ŠERNAS, O., 2019. Concrete modular pavements–types, issues and challenges. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 14(1), 80-103.

- VALIKHANI, A., JAHROMI, A. Z., MANTAWY, I. M., and AZIZINAMINI, A., 2020. Experimental evaluation of concrete-to-UHPC bond strength with correlation to surface roughness for repair application. *Constr. Build. Mater.* 2020, 238, 117753.
- WANG, J., 1996. Three-Dimensional Finite Element Analysis Of Flexible Pavements, The University of Maine, MSc., Main.
- WANG, M. L., and MAJĪ, A. K., 1992. Shear properties of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON). London: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites; 1992. p. 203–212
- WHITCOMB, P.J., and ANDERSON, M. J., 2004. RSM simplified: Optimizing processes using response surface methods for design of experiments, Taylor & Francis, New York.
- WU, J., LIANG, J., and ADHIKARI, S., 2014. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(6), 439-447.
- YAOWARAT, T., SUDDEEPPONG, A., HOY, M., HORPIBULSUK, S., TAKAIKAEW, T., VICHITTHOLCHAI, N., ... and CHINKULKIJNIWAT, A. 2021. Improvement of flexural strength of concrete pavements using natural rubber latex. *Construction and Building Materials*, 282, 122704.
- YOO, P. J., AL-QADI, I. L., ELSEIFI, M. A., and JANAJREH, I., 2006. Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces. *The International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), 73-86.
- ZAGHLOUL, S. M., 1993. Non-linear dynamic analysis of flexible and rigid pavements (Doctoral dissertation, Purdue University).
- ZAGHLOUL, S. M., and WHITE, T., 1993. Use of a three-dimensional, dynamic finite element program for analysis of flexible pavement. *Transportation research record*, (1388).
- ZANUY, C., IRACHE, P. J., and GARCÍA-SAINZ, A., 2020. Composite behavior of RC-HPFRC tension members under service loads. *Materials*, 14(1), 47.
- ZHENG, L., HAI-LIN, Y., WAN-PING, W., and PING, C., 2012. Dynamic stress and deformation of a layered road structure under vehicle traffic loads: Experimental measurements and numerical calculations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39, 100-112.