

Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi

Sedat ÖZCANAN*
Muhammet Vefa AKPINAR**

ÖZ

Karayolu performanslarında tekerlek basıncı ve temas yüzey alanı ne kadar önemliyse, tekerlek temas nokta sayısı ve aralıkları da o kadar önem taşımaktadır. Bu çalışmada, arazide ağır taşıtlardan elde edilen veriler ışığında, ağır taşıtların tekerlek ve aks konfigürasyonları 3 boyutlu olarak sonlu elemanlar (Ls-Dyna) yöntemi ile modellenmiş ve dinamik analizi yapılmıştır. Tekerlek ve aks tiplerinin yol tabakalarında neden oldukları düşey ve yatay gerilme ve deformasyonların büyüklüklerine göre en kritik aks ve tekerlek tipleri tespit edilmiştir. Tekerlek izi hasarı ve yorulma çatlakları açısından en çok hasar verebilecek tekerleğin geniş yüzeyli ve tekil tekerleklerin olduğu, aks dingiller içerisinde ise motris (çekici) tek dingilin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekerlek ve aks konfigürasyonu, gerilme ve birim şekil değiştirme, mekanistik-ampirik tasarım.

ABSTRACT

Determining the Critical Tire and Axle Configuration for Flexible Pavements Based on Mechanistic Analysis

While the tire contact pressure and contact surface area are important concerns in pavement performance, the number of contact points per vehicle and their spacing are also critical. In this study axle loads from field measurements, heavy vehicle tire, and axle configurations were modeled by utilizing a 3D dynamic finite element. The most critical axle and tire types have been determined based on the vertical and horizontal stress and strain values. Single axle and single super tire were found to be the most critical tire and axle configuration in terms of rutting and fatigue damages.

Keywords: Tire and axle configurations, stress, strain, mechanistic-empirical design.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 25.01.2013 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2014 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ozcanan@itu.edu.tr

** Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Trabzon - mvakpinar70@yahoo.com

1. GİRİŞ

Asfalt kaplamalı yollar, yapım, bakım ve onarım yönünden yüksek maliyet gerektirmektedir. Özellikle tasarım ömrü açısından yirmi yıllık olarak tasarlanan bu yollar, birkaç sene sonra deforme olmakta ve bakım onarım gerektirmektedir. Asfalt kaplamalı yolların performansını artırmak amacıyla sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Yol gövdesinde veya herhangi bir yol tabakasındaki deformasyon, kaplamanın formunu değiştirebilmektedir. Örneğin trafik yükünden dolayı, yol tabakalarında meydana gelen gerilme ve deformasyonlar, kaplamada tekerlek izi hasarı veya çatlak olarak tezahür edebilmektedir. Bu problemlerin çözümü ve esnek üst yapı tasarımı ile ilgili AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) 1960'lı yıllardan bu yana çalışmalar yayınlamaktadır. Bu çalışmalar 1993'e kadar AASHTO'nun yol tasarımı rehberinde ampirik (deneysel) yöntemler olarak yer aldı; fakat 1993'ten sonra AASHTO mekanistik ampirik yöntemlere yönelik çalışmalar yapıp yine bu yönde araştırmaları desteklemektedir. Sadece ampirik (deneysel) yöntemler yol tasarımı açısından yetersiz kalmaktadır. Çünkü arazi koşullarının laboratuvar ortamında oluşturulması mümkün değildir. Yolun performansına etki eden birçok faktör mevcuttur (Trafik yükü, çevresel faktörler, malzeme, vb.). Bundan dolayı yol tasarımı ve analizi karmaşık hale gelmektedir. Ampirik yöntemlerin yanında mekanistik olarak yol tasarımı ve dizaynının desteklenmesiyle daha sağlıklı sonuçların alınabileceği tahmin edilmektedir. Özellikle son on yıldır bu yönde çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Mekanistik tasarım için literatürde kabul gören; sayısal yöntemler, sonlu elemanlar yöntemidir. Çünkü yol dizaynını etkileyen birçok parametre mevcuttur. Bütün bu karmaşık parametrelerin çözümü, bunları kolaylıkla modelleyebilen sonlu elemanlarla mümkün olabilmektedir. Bu yöntemle yaklaşık çözümler elde edilmesine rağmen, herhangi bir elemanı tanımlamak ve özelliklerini doğru şekilde tayin etmek sonlu elemanlar yöntemiyle mümkün olabilmektedir. Sadece mekanistik yöntemler yeterli midir? Bu tartışmalı bir konudur, fakat mekanistik yöntemlerin ampirik olarak desteklenmesi daha sağlıklı sonuçlara ulaşılmasını sağlar. Özellikle bunun için arazi şartlarına yakın veriler elde etmek amacıyla hızlandırılmış yol testleri (Accelerated Pavement Testing) günümüzde yaygın olarak uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizde bu konuda çalışmalar az olmakla birlikte Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Ulaştırma Anabilim Dalı, hızlandırılmış yol testi laboratuvarı kurarak bu konuda çalışmalar yapmaktadır.

Bu çalışmada araziden alınan veriler ışığında karşılaştırmalı olarak, mekanistik yöntem kullanılarak (Sonlu Elemanlar) ağır taşıtların aks ve tekerlekleri altında, yolda oluşan gerilme-deformasyonların analizi ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ

2.1. Mekanistik-Ampirik Tasarım

Ampirik tasarım; deneysel ve gözlemsel sonuçları temel almaktadır [1]. Günümüzde yol tasarımı için yaygın olarak Ampirik tasarım yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemle; belli bir trafik yükü, yol malzemesinin fiziksel özellikleri ve iklimsel koşulları göz önünde bulundurularak yolun belirli bir gerilme-deformasyon değeri için oluşacak hasarlara göre yolun performansı ve davranışı tahmin edilir [2]. Bu yöntemde önceki arazi tecrübeleri ve

gözlemlerden elde edilen sonuçlardan faydalanmak önemlidir. Ayrıca bu yöntemde kullanılan en yaygın deney CBR (California Bearing Ratio) deneyidir.

Mekanistik-ampirik tasarım yöntemi; yolda trafik yükü ve çevresel faktörlerden dolayı oluşan gerilme-deformasyonları mekanik teorilerle göre analiz eder. Bu yönüyle ampirik yöntemlerden bir adım öndedir. Çünkü bu yöntemde, tahmin ve gözlemden çok sayısal analiz mevcuttur, bu da daha reel sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır [1].

Mekanistik tasarım yöntemlerle ilgili ilk çalışmada; Kerkhoven et al (1953) tarafından, taban zemini üstünde oluşan düşey basınç deformasyonunun asfaltta kalıcı hasarlara neden olduğu ve bu yüzden yol tabakaları tasarımında kriter olarak kullanılması önerilmiştir. Saal et al (1960) asfalt tabakası altında oluşan yanal çekme deformasyonunun hesaba katılmasıyla yorulma çatlaklarının minimize edilebileceğini savunmuştur. Yukarıda bahsedilen iki kriteri, düşey basınç ve yanal çekme deformasyonlarını, yol tasarımında aynı konseptte ilk olarak kullanan Dormon et al'dır (1965) [1].

Shell ve Asfalt Enstitüsü yöntemi (ABD), trafik yükünden dolayı yol tabakalarında meydana gelen deformasyonların hesabına yönelik kriterleri, kendi mekanistik-ampirik tasarım prosedürlerinde kullanmışlardır [3,4].

Mekanistik-ampirik tasarım yöntemi ile ilgili son yirmi yılda önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara paralel olarak önemli gelişmeler olmuştur. Bahsettiğimiz çalışmaların önemli bir kısmı Shell ve Asfalt Enstitüsü tarafından geliştirilen deformasyon kriterlerini temel alan çalışmalardır. Kendi mekanistik-ampirik tasarım yöntemlerini geliştiren birkaç isim ise şöyledir; Washington Eyaleti Ulaştırma Bölümü (WSDOT), Kuzey Carolina Ulaştırma Bölümü (NCDOT) ve Minnesota Ulaştırma Bölümü (MNDOT)'dür [1].

Mekanistik-ampirik tasarım yöntemi ile ilgili en son çalışma Ulusal Birleşik Yol Araştırmaları Programı (NCHRP) tarafından yapılan NCHRP 1-37A projesidir. Bu çalışmada; daha önce yapılan çalışmalarda bulunan trafik yükü ve iklimsel koşullar gibi kriterler tekrar kalibre edilmiştir. Örneğin; trafik yükünün standart tek dingil eşdeğerliğine çevrilmesi yerine (AASHTO, 1972, 1986, 1993), trafikte bulunan araçlar ve yük dağılımları sınıflandırılarak kullanılmıştır. İklimsel olarak, yolun mevsimsel sıcaklık farklarına bağlı yol malzemesinin davranış ve performansı ayrıca hesaplanmıştır [5,6].

Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, trafik yükünü standardize etmek ve yol malzemesinin davranış parametrelerini her mevsim için tek değer kabul ederek bu faktörleri özetlemek yerine, trafik yükünün ve yol malzemesi davranış parametrelerinin bütün kombinasyonlarının toplanması ile yol tabakalarının analiz edilmesi, daha sağlıklı sonuçların elde edilmesini sağlayabilmektedir.

2.2. Ülkemizde Esnek Üstyapı Tasarımı

Karayolları Genel Müdürlüğüne ait ilk üstyapı projelendirme rehberi 1969 yılında yayımlanan, Karayolları esnek üstyapı projelendirmesine ait fenni şartnamedir. Daha sonra 1984 yılında, AASHTO 72 projelendirme kriterleri baz alınarak, "Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi" hazırlanmıştır. Bu rehberde genel itibarıyla, sathi kaplamalı yollar ile asfalt betonu kaplamalı yolların projelendirmesi birbirinden ayrılmıştır. Ayrıca üstyapı projelendirmesinde standart tek dingil yükü tekerrür sayısı kullanılmaya

başlanmıştır. 1984-2002 yılları arasındaki dönemlerde ise takviye projelendirmesindeki eksiklikler, uygulamadan kaynaklanan aksaklıklar ve taşıt eşdeğerlik faktörleri revize edilmiştir. Karayolları son dönemlerde yapılan çalışmaları ve gelişmeleri “Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi 2006 ve 2010”da yayımlamıştır. Bu çalışmalarda; AASHTO 93 üstyapı projelendirme kriterleri esas alınmış ve mekanistik-ampirik tasarım yöntemine geçiş için hazırlıklar yapılmıştır. Karayolları tarafından AASHTO 93 üstyapı projelendirme kriterleri baz alınarak kullanılan servis kabiliyeti-davranış ilişkisine bağlı yöntemde, üstyapı tabaka kalınlıkları; zemin taşıma gücü, trafik yükü, coğrafi konum, iklimsel koşullar ve yol malzemesinin davranış özellikleri göz önünde bulundurularak tayin edilir. Esnek üstyapı tasarımında öncelikli olarak taşıt dingil tipleri, sayıları ve ağırlıklarını belirlemek amacıyla, yolun inşa olunacağı güzergâhta “Lodometre” çalışması yapılır. Bu çalışmada bütün trafik yükleri, dingil eşdeğerlik faktörleri yardımıyla standart tek dingil yükü olan 8,2 ton’a çevrilir. Dingil ve tekerlek yükü altında yol tabakalarında basınç ve çekme gerilme-deformasyonları oluşur. Oluşan bu gerilme-deformasyonların büyüklüğü, dingil ve tekerlek tipleri ile yüklerinin tekrürü ile birebir ilişkilidir. Taban zemininin taşıma gücü, üstyapı tabakalarının kalınlıklarını etkilemektedir. Bundan dolayı Lodometre çalışmasından sonra yol taban zemininin taşıma gücünü belirlemek amacıyla CBR (California Bearing Ratio) ve Esneklik Modülü (MR) deneyleri yapılır. Esneklik Modülü (MR) değeri; laboratuvar deneyi veya CBR değeri ile olan ilişkisinden abaklar veya formül yardımıyla tahmin edilebilmektedir. Esnek üstyapı tasarımında son olarak çevresel ve iklimsel faktörler göz önünde bulundurularak yolun gerekli servis kabiliyetinin sağlanması amacıyla, yol drenaj altyapısı projelendirilir. Şuan dünyada ve ülkemizde genel itibarıyla yol tasarımı ampirik yöntemlerle yapılmaktadır. Fakat mekanistik-ampirik yöntemlere geçiş için yoğun çalışmalar mevcuttur. Ülkemizde de bu yönde çalışmalar başlamıştır [7].

Mekanistik-ampirik yöntemde yolu etkileyen üç temel faktör vardır. Bunlar; trafik yükü, yol malzemesinin fiziksel özellikleri ve iklim faktörüdür [8]. Trafik yükü; yol tasarımı açısından en önemli faktördür. Çünkü trafik yükü, yol tabakalarını etkileyen en büyük fiziksel kuvvet ve yolda yapısal bozulmalara (tekerlek izi, yorulma çatlakları) neden olan etkili faktördür. Trafik yükleri çeşitlidir. Bu, trafikte seyreden araç tiplerinin ve ağırlıklarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Araç tipleri ve ağırlıklarının farklı olması dingil ve tekerlek tiplerini ile ağırlıklarını da etkilemektedir. Dingil ve tekerlekler araç yükünü yola dağıtan elemanlar olması hasebiyle dingil ve tekerlek tipleri ile ağırlıklarının farklılığı yolda gerilme-deformasyonlarda değişkenliğe sebep olabilmektedir. Mekanistik-ampirik yöntem açısından bakıldığında; trafik yükünün yola aktarımı sağlayan tekerlek ve dingil çeşitlerinin bilinmesi ve bu tekerlek, dingil çeşitleri içinde en kritik olanlarının tespiti, trafik yükünün sınıflandırılması ve modellenmesinde kolaylık sağlayacaktır.

2.3. Gerilme-Deformasyonlara Bağlı Yolda Oluşan Tipik Bozulmalar

Tekerlek yükü altında yolda meydana gelen tüm aksel gerilmeler asfalt yüzeyine yakın bölgelerde basınca neden olmaktadır. Bu gerilmeler asfalt yüzeyinde deformasyonlara sebep olmaktadır. Orta bölgelerde düşey gerilme (σ_z) basınç olarak mevcutken, yatay gerilmeler (σ_x, σ_y) basınç durumundan çekme durumuna geçer. Asfalt altında ise yatay gerilmeler (σ_x, σ_y) çekme iken, düşey gerilme (σ_z) basınçtır. Asfaltta meydana gelen basınç gerilmeleri yolda tekerlek izine (rutting), asfalt altında meydana gelen çekme gerilmeleri

ise yorulma çatlaklarına (fatigue cracking) neden olabilmektedir. Maksimum gerilme direk tekerlek altında meydana gelir. Bu gerilme; derinliğin ve tekerlek yatay mesafesinin artmasına bağlı olarak azalabilmektedir [9].

Huang, yolda meydana gelen tipik bozulmaları; tekerlek izi (rutting), yorulma çatlakları (fatigue cracking) ve termal çatlaklar (thermal cracking) olarak sınıflandırmıştır. Bunların içinden tekerlek izi (rutting) hasarı yolda en yaygın olarak karşılaşılan hasar tipidir [10].

2.3.1. Tekerlek İzi Hasarı

Tekerlek izi hasarı; asfalt betonu üzerinde, tekerlek izi boyunca meydana gelen boylamsal çöküntüdür. Bu çöküntü doğal zeminden kaplamaya kadar, bütün yol katmanlarında görülebilir. Genel olarak hareketli kümülatif trafik yükünden dolayı oluşur [10]. Trafik yükü altında kaplamada oluşan kesme gerilmesi, defleksiyon, düşey basınç gerilme-deformasyonları ile asfaltın visko-plastik davranışı sonucu oluşan kalıcı hasarlardır. Tekerlek izi nedeniyle asfalt yüzeyinde oluşan su birikintileri, arabada sarsıntı, hâkimiyet kaybı, kayma ve fren mesafesinde kısalma gibi sorunlara neden olabilmektedir [9,11]. Özellikle kış aylarında yolda, tekerlek izi hasarından dolayı biriken suyun donması, araba hâkimiyeti açısından ciddi problemler doğurur ki buda büyük kazalara sebebiyet verebilir [12].

Gün geçtikçe trafik yoğunluğunun artması, kamyonların yükleme hadlerinin büyümesi ve özellikle tekerlek basınçlarının artması, tekerlek izini yolda daha yaygın bir problem haline getirmektedir [12].

2.3.1.1. Tekerlek İzi Hasarının Nedenleri

Tekerlek izi hasarı özellikle esnek kaplamalı yollarda meydana gelen hasar tiplerinden biridir. Yukarıda da bahsedildiği gibi tekerlek altında, yol boyunca oluşan sürekli deformasyonlara bağlı oluşan tekerlek izidir. Tekerlek izi hasarı bütün kaplama tabakalarıyla beraber doğal zeminde de meydana gelebilmektedir. Tekerlek yükü yol malzemesinin yanıl hareketine ve şişmesine neden olabilmektedir. Yol malzemesinin yanıl hareketi ve şişmesi ise yapım esnasında yol katmanlarının iyi sıkıştırılmamış olması ve sıcak havalarda asfaltın plastik davranışından kaynaklanmaktadır [10].

Tekerlek izi hasarı en az iki nedenden dolayı istenmez; birincisi, eğer asfalt kaplaması geçirimsiz ise yüzeyde biriken sular 5 mm derinliği aştığında özellikle yolcu arabaları açısından oluşan sarsıntılar tehlike oluşturabilmektedir. İkincisi, yine tekerlek izi derinliğine bağlı olarak sürüş ve direksiyon hakimiyetinde azalmalar meydana gelebilmektedir [13].

2.3.2. Yorulma Çatlakları

Yorulma çatlakları; stabilize temel tabakası veya kaplama yüzeyinde, kümülatif tekrar eden tekerlek yükü altında meydana gelen ve sürekli ilerleyen çatlaklardır. Yorulma çatlakları; trafik yükünden dolayı, kaplama tabakası altında meydana gelen çekme gerilme-deformasyonları sonucu oluşur. İlk çatlaklar kaplama altından başlar ve yüzeye doğru

yayılarak devam eder. Nihai olarak bu çatlaklar kaplama yüzeyinde, tekerlek hareket yönü boyunca, timsah sırtı çatlakları (aligator) olarak meydana gelir. Asfalt tabakalarında meydana gelen yorulma çatlakları, asfalt yapısında meydana gelen temel yapısal hasarlardan biridir. Kaplama yüzeyinde meydana gelen bu hasarlardan dolayı yağmur suları, asfalt katmanlarına sızmakta ve asfaltta yapısal bozulmalara neden olabilmektedir. Asfaltta meydana gelen yorulma çatlakları hasarı, metrekaresine düşen çatlak oranı olarak ölçülmektedir [9].

Yorulma çatlakları üstyapı tasarımında ölçüt olarak alınan önemli faktörlerden biridir. Asfalt altında meydana gelen çekme deformasyonu ise; mekanistik tasarım açısından yorulma çatlaklarını tanımlayan ve çözümünü kolaylaştıran bir parametredir [14].

2.3.2.1. Yorulma Çatlaklarının Nedenleri

Yolda meydana gelen yorulma çatlaklarının başlıca nedenleri; tekerlek yükü tekrarı nedeniyle oluşan çekme gerilme-deformasyonları ile çevresel faktörlerdir [14]. Üstyapı servis ömrü boyunca tekerlek yüküne maruz kalır. Bunun sonucunda tekerlek tekrar yükü kümülatif olarak artar. Kümülatif artan tekerlek yükü, zamanla yolda deformasyonların oluşumuna sebep olur. Yol altında meydana gelen çekme deformasyonları ve malzemenin çevresel faktörler nedeniyle yaşlanması sonucunda, asfalt altında çok küçük çatlaklar meydana gelir, zamanla bu çatlaklar yüzeye doğru yayılarak asfalt üstünde geniş çatlakların oluşumuna neden olabilmektedir. Yorulma çatlaklarına neden olan çevresel faktörlerden biri olan sıcaklık ise mevsimsel ve gün içindeki farklılık nedeniyle malzemenin mukavemetini olumsuz etkiler, ayrıca sıcaklık farkından dolayı oluşan genişleme-büzülme gibi faktörler yorulma çatlaklarını tetikleyebilmektedir. Ayrıca yağışlarla beraber artan yeraltı su seviyesi nedeniyle yol katmanlarında oluşan şişme-çökme gibi faktörler, yol katmanlarının kaplamaya sağladığı desteği zayıflatabilmektedir. Buna bağlı olarak tekerlek yükü altında kaplamada oluşan sehim artmakta, buda çatlak oluşumuna neden olabilmektedir.

3. YOL ÜSTYAPISININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELİ

3.1. Sonlu Elemanlarla Yol Üstyapında Yapılmış Çalışmalar

Sonlu elemanların yolda uygulanması ile ilgili çeşitli bilgisayar programları mevcuttur. Genel itibarıyla bu programlar, Burmister'in (1945) çok katlı yol sistemleri teorisi göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir. Bunlardan en basiti ve en yaygın olarak bilineni Chevron Araştırma Şirketi tarafından geliştirilen CHEVRON programıdır. Önceleri bu program sadece lineer elastik malzemeler için kullanılabiliyorken, Asfalt Enstitüsü tarafından, DAMA programı kapsamında geliştirilerek lineer olmayan granüler malzemeler içinde uygulanabilir hale getirildi. Shell tarafından geliştirilen BİSAR programı yaygın olarak bilinen bir diğer programdır. Bu program, sadece düşey yükleri değil aynı zamanda yatayda oluşan yükleri de hesaba katmaktadır. ELSYM5 programı ise orijinal olarak Kaliforniya (Berkeley) üniversitesi tarafından geliştirildi, daha sonra mikrobilgisayarlara uyarlandı. Bu program, birden çok tekerlek yükü altındaki elastik beş katlı yollar için tasarlandı. Bir diğer program ise KENLAYER bilgisayar programıdır. Bu program elastik çok katmanlı sistemler için geliştirilmiştir. Ayrıca lineer olmayan ve viskoelastik tabakaları

sıralama yöntemiyle çözümler. Bununla beraber, bu program tekerlek izi hasarı ve yorulma çatlakları hesabı kriterlerini taşıyan bir programdır [10,12].

Katlı teorinin en büyük dezavantajı, bütün katmanların aynı özellikte kabul edilmesidir. Bu varsayım; lineer olmayan yol malzemesinin analizini zorlaştırmaktadır. Genel kanaat bu zorluğun; sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üstesinden gelinebileceği yönündedir [10].

Sonlu elemanlar yöntemi altmışlı yılların sonlarından itibaren yol mühendisliğinde kullanılmaya başlandı. Duncan et al (1968) ilk olarak sonlu elemanları yol analizlerinde kullanmaya başladılar. Geliştirdikleri bu program sonra ILL-PAVE bilgisayar programı olarak kullanılmaya başlandı. İlk başlangıçta bilgisayarların günümüzdeki gibi yeterince gelişmiş olmamasından dolayı, sonlu elemanlar analizlerini fazla zaman alması ve yüksek kapasite (bellek) gerektirmesi rutin analizlerde kullanma imkânı sağlamıyordu. Daha sonraları ILL-PAVE analiz eşitlikleri üzerinde yapılan birtakım değişiklikler ve eşitliklerin geliştirilmesi sonucunda, bu program yol analizlerinde rahatlıkla kullanılmaya başlandı. Lineer olmayan sonlu elemanlar yaklaşımı ilk olarak Michigan Eyalet Üniversitesi tarafından geliştirilen MICH-PAVE bilgisayar programında kullanılmaya başlandı. Bu programda ayrıca lineer özellikte olmayan yol malzemesinde, agrega temel ve toprak materyal seçenekleri de sunulmuştur [12].

Yukarıda tartışıldığı üzere tekerlek izi hasarı; asfalt karışımların visko-elastik ve visko-plastik özelliğiyle, toprak ve agreganın plastik özellikleri gibi yol malzemesinin lineer olmayan davranışlarından dolayı oluşur. Arazi koşullarına yakın analizler, katlı elastik teori dışındaki sayısal modellemelerle örneğin sonlu elemanlar yöntemi gibi modellemelerle asfalt tekerlek izi hasarı modeli; bütün lineer olmayan yol katmanları için modellenebilir ve daha reel sonuçlar elde edilebilir [12].

Yol araştırmalarında sonlu elemanlar yöntemi üzerine birçok kurum-kuruluş ve araştırmacı çalışma yayımlamıştır. İki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) lineer olmayan ve dinamik sonlu elemanlar analizleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok katlı yol sistemleri ile ilgili geçmişte yapılmış, lineer olmayan üç boyutlu (3D) analizler mevcuttur. Zaghoul et al (1994) sonlu elemanlar ile tasarladığı yol üstyapı tabakalarına etkileyen dinamik (hareketli) tekerlek yükünü; üstyapı kaplaması üzerine, hareketsiz tekerlek temas basınç alanı olarak modellemiş ve bu süreksiz problemde olumlu sonuç alamamıştır. Bu gibi problemlerde doğru sonuca ulaşmak için, yük meş'in üzerinde hareket etmeli ve yük ile meş sınırları arasındaki mesafe yeterince büyük olmalı ki hatalar sınırlı bölge içinde tanımlanabilsin. Sonuç olarak; bu yöntemin olumlu sonuçlar alabilmek için etkin bir yöntem olmadığı kanısına varılmıştır [12].

Kirkner (1994, 1996) visko-elastik ve visko-plastik yol katmanları üzerinde hareketli tekerlek yükünden dolayı oluşan kalıcı gerilme hasarlarını modelleyen sonlu elemanlar algoritması geliştirmeyi amaçlamıştır. Buna benzer bir çalışma daha önce Dang Van (1993) tarafından bağımsız olarak geliştirilmiştir. Bu algoritmalarda yük sabit bir hızla hareket ettiği kabul edilerek, problemlerin daha basite indirgenmesi amaçlanmıştır. Bunun için bir hareket koordinat sistemi kullanılmıştır. Hareket koordinat sistemi içindeki deplasmanlar zaman olarak veya yer olarak gösterilebilmektedir [12]. Bu şu anlama gelmekte; yüklemelerden sonra meydana gelen deplasman ve kalıcı deformasyonlar, uzun yük geçişlerinden sonra meydana gelebilmektedir. Bu hareketli yük yönünde tanımlanan koordinat; oluşan deplasmanların hareketli yük yönündeki koordinat boyunca

değişmemesini sağlamaktadır. Bu yöntem bilgisayar için daha az bellek gerektirir ki bu da sayısal olarak cihaz (donanım) için daha kolay analiz ve daha az zaman olanağı sağlayabilmektedir. Birçok araştırmacı tekerlek izi hasarı tahmin modeli için kendi sonlu elemanlar programını geliştirmektense hazır ticari sonlu elemanlar programını kullanmayı tercih etmektedir. Çünkü bilgisayar hızı ve kapasitesindeki inanılmaz gelişmelerden dolayı, ticari sonlu elemanlar kullanımının daha doğru ve ekonomik olduğu görülmektedir. Şimdilerde yaygın olarak kullanılan ticari sonlu elemanlar programlarından birkaçı; ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA vb. programlardır. Bunlar arasında en çok kullanılanı ABAQUS'tür [12].

Sonuç olarak günümüzde araştırmacılar yol malzemesinin ve katmanlarının nasıl en doğru şekilde sonlu elemanlara aktararak modelleneyeceği ve bununla birlikte en gerçekçi ve doğru sonuçların elde edilebileceği üzerine araştırmalarını hala sürdürmektedirler. Son zamanlarda bu araştırmalar artış göstermişse de bu konuda istenilen seviyeye gelinilememiştir.

3.2. Sonlu Elemanlar ve Modelleme Basamakları

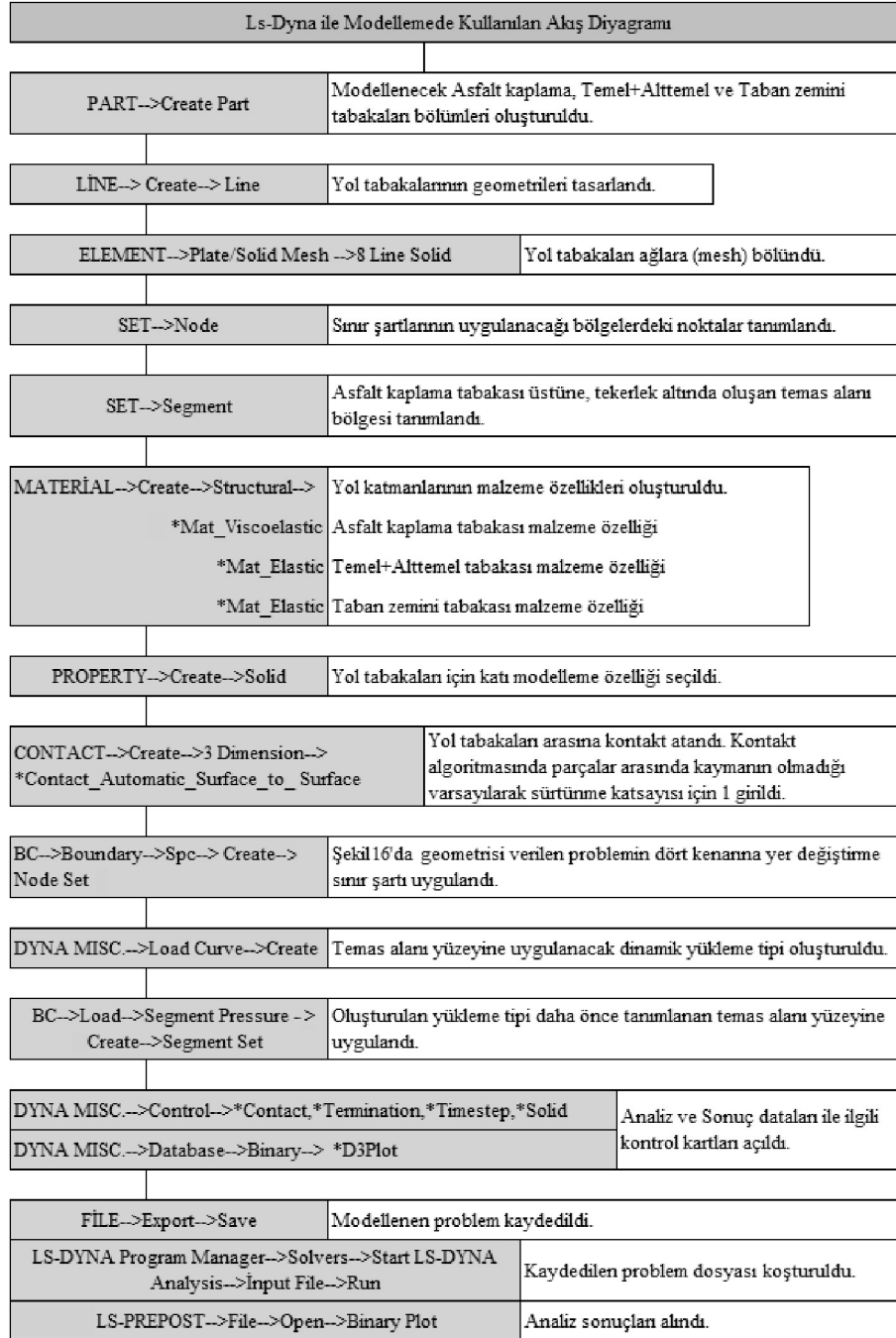
Birçok kuruluş ve araştırmacı günümüzde araştırmalarında sonlu elemanlar programını kullanmaktadır [12]. Sonlu elemanlarla; dinamik yükleme ve lineer olmayan malzeme davranışı gibi birçok değişken hesaba katılarak analiz yapılabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi; genellikle birinci sınır değeri problemlerin yaklaşık çözümünde sayısal yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde; çözümlenecek bölge, bir sonlu sayıda ki basit alt bölgelere (sonlu elemanlar) ayrılarak çözüm yapılmaktadır. Başka bir deyişle bu yöntemde; bir katı cisim veya sonsuz boyuttaki problem sonlu şekle çevrilerek, bu sonlu eleman yardımıyla yaklaşık çözüm elde edilmektedir. Sonlu elemanlarla yaklaşık çözüm elde edilmesine rağmen herhangi bir elemanı tanımlamak ve özelliklerini doğru şekilde tayin etmek imkânsız değildir. Çünkü, sonlu elemanların en önemli avantajı; her yükleme, şekil ve materyal özellikleri için yüksek uygulanabilirlik imkanı sunması ayrıca geleneksel yapı problemlerinde rahatlıkla kullanılmasıdır.

Genel itibarıyla sonlu elemanlar çalışma adımları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Analizi yapılacak geometrik bölgeyi, basit alt geometrik bölgelere ayırmak.
- Gerçek bölgeyle sonlu elemanlar parçaları arasında birebir eşleştirme yapmak.
- Her elementin ara değer hesabı için birkaç geometrik nokta veya düğüm tanımlamak.
- Her bir noktadaki durum değişkenlerinin (deplasmanların, açıların) düğümlerdeki ara değerlerinin hesabını yaparak değerlendirmek.

Hem geometrik şekil, hem de durum değişkenleri için ara değer hesabı fonksiyonları aynı ise, elementler “izoparametrik” elementlerdir. Ara değer hesabının iki önemli sonucu: Bir sonsuz boyuttaki problemin sonlu boyuta indirgemek, diğeri ise kısmi diferansiyel denklemleri, cebirsel eşitlikli denklemlere çevirerek çözmek.

- Elementleri cebirsel eşitlikler içinde global bir sistem olarak kurmak.
- Son olarak cebirsel eşitlikleri çözmek.



Şekil 1. Ls-Dyna ile modellemede akış diyagramı

3.3. Ls-Dyna ve Temel Çalışma Prensibi

Bu çalışmada; tekerlek, aks ve yol modellemeleri ve analizi için üç boyutlu sonlu elemanlar paket programı olarak LS-DYNA kullanılmıştır. LS-DYNA programının tercih edilmesindeki en önemli faktör dinamik analizler için geliştirilmiş bir program olması ve ayrıca yaklaşık 200 malzeme özelliği sunmasıdır [15]. Özellikle yoldaki yüklemelerin, dinamik yükleme olması ve yol materyal özelliği olarak elastik, visko-elastik, plastik materyal özelliklerine sahip olması ve bu materyal özelliklerinin LS-DYNA ile rahatlıkla modellenmesi bu programın özellikle seçilmesindeki temel nedendir. Ayrıca son dönemlerde sonlu elemanlarla yapılan araştırmalarda LS-DYNA kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bunlardan birkaçından bahsedecek olursak; Sarica et al (2004) trafik güvenliği ve kontrolü açısından yol bariyerlerinin tasarımını ve davranışını LS-DYNA ile analiz etmiştir. Bu analizde beton bariyerler ve araç LS-DYNA ile modellenip, aracın belirli açılarla bariyerlere çarpması sonucunda bariyerlerin ötelenme ve aracın savrulma durumları gözlemlenmiştir [16]. Diğer bir çalışmada ise; Uddin ve Ricalde (2006) tarafından FWD (falling weight deflectometer) testi ile statik ve dinamik yol analizi üzerine yapılan çalışmada; dinamik FWD yükleme analizleri ile viskoelastik malzeme özelliklerinin asfalt üzerindeki davranışları araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda; LS-DYNA da alt malzeme programı olarak kullanıcı tarafından özellikleri tayin edilebilen UMAT (User MATerial subroutine) malzemesi geliştirilmiştir. UMAT malzeme özellikleri olarak; asfalt davranışına en yakın davranış olarak varsayılan Maxwell viskoelastik davranış modeli ve mikroçatlak yayılımı metodolojisi baz alınarak modellenmiştir [17]. Shoukry et al (2007) donatılı beton yollarda; trafik yükü ve sıcaklık faktörlerinin, donatı çevresinde oluşan üç eksenli gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırdılar. Bu çalışmada donatılı beton yol ve yüklemeler LS-DYNA ile modellendi [18]. Shoukry et al (2008) tarafından termo-elastik asfalt yapısı ve lineer olmayan davranış sergileyen yol malzemesi problemlerinin çözümü ile ilgili yapılan çalışmada ise; sonlu elemanlarla yapılan modelleme ile araziden alınan veriler karşılaştırılarak yatay doğrultuda oluşan deformasyonlar araştırıldı [19]. Uddin (2001) tarafından yayınlanan bir çalışmada, otoyol ve havaalanı malzemesinin karakterizasyonu için FWD testi simülasyonu LS-DYNA ile modellendi. Bu çalışmada arazide ölçülen FWD değerleri, LS-DYNA da modellenip sonuçlar karşılaştırıldı. Simülasyondan elde edilen sonuçlarla, araziden alınan veriler arasında yüksek oranda tutarlılık olduğu görüldü [20].

LS-DYNA ile modelleme ve çözüm basamakları şöyle sıralanabilir;

- Problemi geometrik olarak tanımlamak.
- Geometrik alanı düğüm-nokta atayarak, alt bölgelere ayırmak.
- Bölgeleri kritik alanlarına göre meşlemek. Örneğin kritik bölgelerin sık meşlenmesi vb.

Sonlu elemanlar modellemelerinde meş genişlikleri veya sıklıkları önemli bir bölümdür. Çünkü yüksek yoğunlukta gerilmeye sahip bölgelerin sık meşlenmesi gerekmektedir [21].

- Problemi çözüm için, katı (Solid) veya kabuk (Shell) olarak tanımlamak.
- Problemin materyal özelliklerini tanımlamak.
- Katı veya kabuk olarak tanımlanan problemin özelliklerini aktifleştirmek.
- Probleme ait farklı geometrik parçalar arasına bağlantı (kontakt) atamak.
- Geometrik alanın sınır koşullarını tanımlamak.

- Problemin yükleme datalarını girmek.
- Son olarak kontrol kartlarını açmak ve problemi koşturmak.

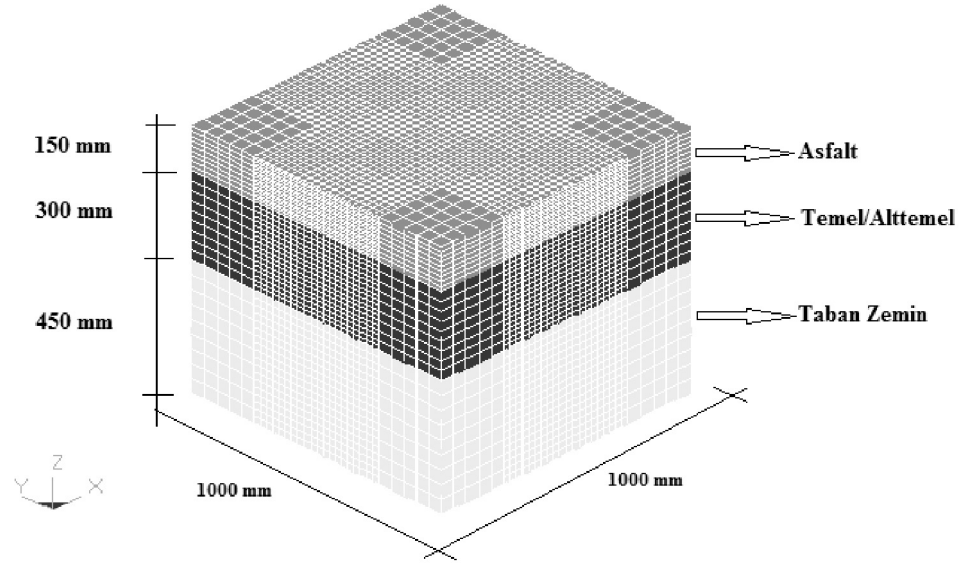
Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi için LS-DYNA kullanılmasının sebebi; yolda gerilme-deformasyonlara neden olan yükler genel itibariyle dinamik yüklerdir. Sonlu elemanlar yöntemi, sonlu veya sonsuz ölçüye sahip yol problemlerinin dinamik ve statik çözümlerine olanak sağlar. LS-DYNA programı ise explicit(açık=dinamik) ve implicit(kapalı=statik) çözüm seçenekleri ile hem dinamik hem de statik olarak yol problemlerini çözme ve bunları karşılaştırma imkânı sunması nedeniyle tercih edilmiştir.

3.4. Yol Tabakalarının Modellenmesi

Bu çalışmada üç tabakalı yol sistemi üç boyutlu olarak modellenip dinamik analiz yapılmıştır. Statik analiz yerine, dinamik analiz seçilmesinin sebebi, yoldaki yüklemelerin hareketli (dinamik) olmasıdır. Modellenen yol tabakaları; asfalt kaplama tabakası (AC), temel/alt temel tabakası (base/subbase) ve taban zemini (subgrade) olarak teşkil edilmiştir. Kaplama tabakası viskoelastik, diğer tabakalar ise elastik özellikte modellenmiştir. Kaplama tabakası (bitümlü tabaka) karmaşık malzeme özelliklerine sahiptir. Çünkü çevresel faktörler ve yük durumuna göre malzeme özellikleri farklılık gösterir. Örneğin yüksek sıcaklıkta viskoelastik özellikte davranış sergilerken düşük sıcaklıklarda ise elastik davranış sergilemektedir. Asfalt malzemesinin hareketli yük altında ki en doğru davranışını veren malzeme özelliği viskoelastik malzeme özelliğidir [22]. Bu nedenle, asfalt kaplama tabakası malzeme özelliği olarak viskoelastik özellik seçilmiştir. Asfalt kaplama tabakası dışındaki diğer yol tabakaları ise davranış olarak elastik davranış sergiledikleri için elastik özellikte modellenmiştir. Yol tabakalarının modellenmesinde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yol tabakaları ve tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	Değer
Kaplama Kalınlığı (h1) (mm)	150
Kaplama Yoğunluğu (d1) (kg/mm ³)	2400 x e-9
Kaplama Elastik Modülü (E1) (kg/mm ²)	550
Kaplama Poisson Oranı (v1)	0,35
Kaplama Bulk Modülü (K) (kg/mm ²)	611
Kaplama Kesme Modülü (G) (kg/mm ²)	204
Temel/Alt Temel Kalınlığı (h2) (mm)	300
Temel/Alt Temel Yoğunluğu (d2) (kg/mm ²)	2100 x e-9
Temel/Alt Temel Elastik Modülü (E2) (kg/mm ²)	19
Temel/Alt Temel Poisson Oranı (v2)	0,4
Doğal Zemin Kalınlığı (h3) (mm)	450
Doğal Zemin Yoğunluğu (d3) (kg/mm ³)	1800 x e-9
Doğal Zemin Elastik Modülü (E3) (kg/mm ²)	7,5
Doğal Zemin Poisson Oranı (v3)	0,4



Şekil 2. 3D-Sonlu elemanlar yol modeli

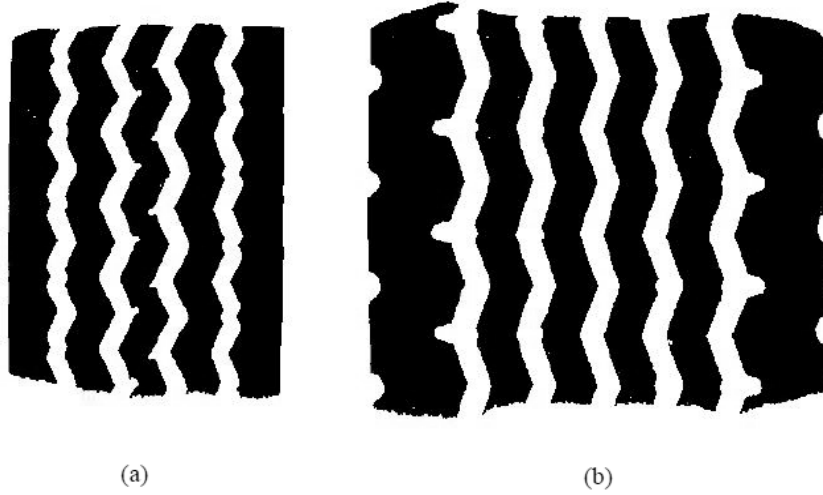
3.5. Aks ve Tekerlek Tiplerinin Modellenmesi

Bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar aks ve tekerlek modellerinde, aks ve tekerlek yükü için Van Karayolları 11. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü çalışmasından elde edilen, ortalama aks ve tekerlek yükleri baz alınmıştır (Bkz. Tablo 2). Ayrıca aks ve tekerlek modellerinde birebir aks veya tekerlek değil, bunların üzerine gelen yüklerden dolayı asfalt kaplama yüzeyinde oluşan temas alanı basınçları modellenmiştir. Çünkü tekerlek malzeme olarak kompozit ve birkaç tabakadan meydana gelmektedir. Bununla beraber jant ve dingil gibi diğer tekerlek elemanlarını göz önünde bulundurarak, bütün bu bileşenleri doğru bir şekilde modellemek başlı başına bir çalışma ve araştırma gerektirmektedir.

Tablo 2. Türkiye’de kullanılan aks tipleri (Dingil etüdü verileri, Van 11.KBM).

Aks Sınıfı	Aks Tipi	Aks Yeri	Ortalama Aks Yüğü (Kg)
Tek aks	Tek tekerlekli tek aks	Ön dingil	6710
	Tek tekerlekli tek aks	Çekici dingil	6863
	Dual tekerlekli tek aks	Çekici dingil	10552
Tandem aks	Dual tekerlekli tandem aks	Arka dingil	17284
Tridem aks	Geniş tek tekerlekli tridem aks	Arka dingil	19190

Genel itibariyle şimdiye kadar yapılan yol analizlerinde tekerlek temas alanı dairesel ve üniform olarak kabul ediliyordu [10]. Fakat son dönemlerde yapılan araştırmalarda tekerlek temas alanı basınçlarının üniform ve temas alanlarının da dairesel olmadığı kanıtlanmıştır. Şekil 2’de görüldüğü üzere, dual tekerleklerde genelde dıştan içe doğru basınç artmaktadır. Geniş tekerlekte ise kenarlarda meydana gelen basınç, tekerlek ortasında meydana gelenden daha büyük olmaktadır [23]. Ayrıca tekerlek temas alanları genel itibariyle dikdörtgen şeklindedir. Dual tekerlekte; tekerlek hareket yönü temas genişliği, yanal genişliğinden büyüktür. Geniş tekerlekte ise bu durum tam tersidir. Tekerlek temas alanı, tekerlek tipi, basıncı ve yükleme durumuna göre değişiklik arz etmektedir [23,24,25]. Bundan dolayı bu çalışmada tekerlek temas alanı basınçları non-üniform olarak modellenmiştir.



Şekil 3. (a) Klasik dual tekerlek izi, (b) Geniş tek tekerlek izi (Salgado and Kim).

MICHELIN (2010) firmasının Türkiye geneli satış temsilciliklerinin verilerine göre, ağır taşıtlarda en çok kullanılan lastik sınıfı ve ebatları yüzdeleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Türkiye’de ağır taşıtlarda kullanılan lastik tipleri ve oranları (MICHELIN).

Ebatlar	Kullanım Oranı (%)	Tavsiye Edilen Kullanım Yeri
12 R 22,5	31	Kamyon ve Otobüslerde Tüm Dingiller
315 / 80 R 22,5	27	Kamyon ve Otobüslerde Tüm Dingiller
215 / 75 R 17,5	8,4	Kamyonet ve Minibüs Dingilleri
295 / 80 R 22,5	8,1	Kamyon ve Otobüslerde Tüm Dingiller
385 / 65 R 22,5	6,5	Treylerde Arka Üç Dingiller

Tablo 3'te verilen yüzde rakamlarına bakıldığında, Şekil 7'de verilen ve KGM tarafından yapılan, "Taşıt Sınıfına Göre Dingil Tipleri Dağılımı" çalışması sonuçlarına yakın sonuçlar olduğu görülmektedir. Yine bu şekilden, kamyonlarda 1.22 ve 1.1+22 dingil tiplerinin, treylerde ise 1.2+111 dingil tipi yaygın olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. Tablo 4 ve 5'te ülkemizde genel itibarıyla en çok kullanılan dingil ve tekerlek tipleri ile yükleri verilmiştir.

Tablo 4. Dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdüne göre ortalama dingil yükleri (Van 11.KBM).

Ortalama Dingil Yükleri						
Kamyon Adedi	Dingil Tipi	1.Dingil Ağırlığı (kg)	2.Dingil Ağırlığı (kg)	3.Dingil Ağırlığı (kg)	4.Dingil Ağırlığı (kg)	5.Dingil Ağırlığı (kg)
31 (%58)	1.22	5145	8620	5947		
12 (%23)	1.2+111	6710	10552	6525	6227	6438
10 (%19)	1.1+22	6132	6863	10062	7222	

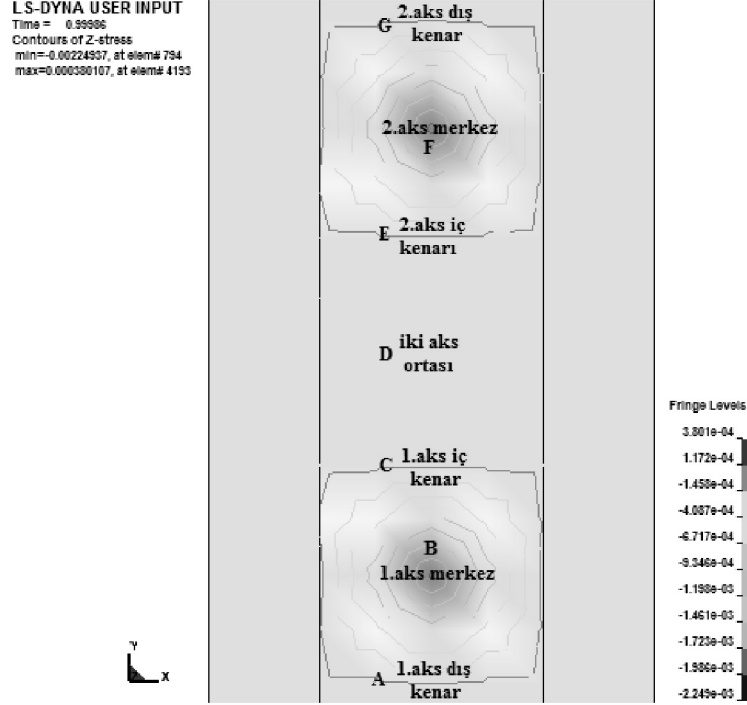
Not: Yukarıdaki veriler karayolları tarafından, araziden alınan ölçümlerden derlenmiştir.

Yukarıdaki bilgiler baz alınarak bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analizinde, dingil tipi olarak tek dingil, tandem dingil ve tridem dingil, tekerlek tipi olarak ise tek tekerlek (315/80 R 22,5), geniş tek tekerlek (385 / 65 R 22,5), yeni geniş tek tekerlek (455 / 55 R 22,5) ve dual tekerlek (12 R 22,5) kullanılmıştır (Bkz. Tablo 4,5). Yeni geniş tek tekerlek Avrupa da yaygın olarak kullanılmakta, ülkemizde ise yurtdışından gelen araçlar dışında fazla kullanılmamaktadır. Fakat daha kapsamlı bir çalışma sunmak amacıyla bu tekerlek tipide modellenmiştir. Bütün tekerlekler için şişme basıncı ise 0.0714 kg/mm² (700 kpa) olarak alınmıştır.

Tablo 5. Modellenen tekerlekler ve temas alanları

Modellenecek Tekerlek Tipi	Tekerlek Yüğü (kg)	Tekerlek Temas Alanı (mm ²) Uzunluk x Genişlik
315 / 80 R 22,5	3355 (Arazi)	225*225
	4100	250*225
385 / 65 R 22,5	3262,5 (Arazi)	225*300
	4100	250*300
455 / 55 R 22,5	5276 (Arazi)*	350*375
	4100	325*350
12 R 22,5	5276 (Arazi)	225*225+225*225
	4100	225*200+225*200

*Not: Geniş tek tekerlek yükleme haddi, dual tekerleğin yükleme haddi kadar kabul edilmiştir.



Şekil 4. Aks ara mesafesi değişimi analizinde gerilme değeri ölçülen noktalar

3.6. Trafik Yükünün Modellenmesi

Yol tabakalarının davranışını tahmin etmede trafik yükü önemli bir faktördür. Trafik yükü statik veya dinamik olabilir. Dinamik yüklerin modellenmesinde, zaman faktörü önemlidir. Çünkü asfalt üzerindeki sabit bir noktaya yük etki süresi uzarsa, bu noktadaki deformasyonlar da artar [26]. Yük etki süresini etkileyen faktör ise araç hızıdır. Araç hızının artması, yük etki süresini azaltır, araç hızının azalması ise tam tersi bir etki yaratmaktadır.

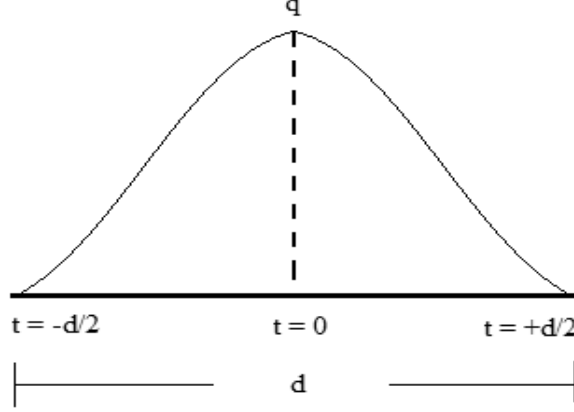
Hareketli bir aracın tekerleğinden dolayı asfalt üzerinde sabit bir noktadaki yük- zaman grafiği aşağıdaki gibidir [10].

Yukarıdaki fonksiyondan çıkarılan ve dinamik analizlerde yük tatbik süresini bulmak için kullanılan eşitlik, Formül 1'de verilmiştir.

$$d=12a/s \quad (1)$$

Burada;

- d : Yük tatbik süresi (saniye)
- a : Tekerlek temas alanı çapı (metre)
- s : Araç hızı (metre/saniye)'dir.



Şekil 5. Hareketli yük için zaman fonksiyonu (Huang).

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizleri için yukarıda ki dinamik (hareketli) yük modeli kullanılmıştır. Yük olarak ise Tablo 4'te verilen “standart tek dingil yükü” ile “dingil ağırlığı ve başlangıç-son etüdü” çalışması sonucu araziden elde edilen ortalama dingil yükleri kullanılmıştır. Tekerlek temas alanı olarak, Korkiala (2008) tarafından hızlandırılmış yol testleri ve laboratuvar çalışmalarından elde edilmiş verilerden yararlanılmıştır. Korkiala farklı tekerlek basıncı ve tekerlek yüklerinde, dual ve geniş tek tekerlek için temas alanı değişimleri kaydetmiştir. Ayrıca yine çalışmasında; yukarıdaki eşitliğe (Formül 1) göre bulunan dairesel temas alanlarının muadili olan dikdörtgenel temas alanlarını deneysel olarak bulmuştur [27].

Bu çalışmada modellediğimiz tekerlek tipleri ve boyutları farklı olduğu için, aynı yük altında temas alanları farklı olmaktadır. Bundan dolayı; Formül 1'e göre yük tatbik süreleri değişmektedir. Yaptığımız modellemede ise yük tatbik süresini standart tek dingil (STDY) yüklemesi için sabit alarak (0,5 saniye), aynı şartlarda analiz yapmayı amaçladık. Dingil ağırlığı etüdü (DAE) verileri yüklemesi için yükleme süreleri değişmektedir. Çünkü asfaltta ki farklı yükleme süresi, yol tabakalarında farklı gerilme-deformasyonlar oluşmasına neden olabilmektedir [26].

3.7. Araziden Alınan Verilerin Sonlu Elemanlar Modeli ile Karşılaştırılması

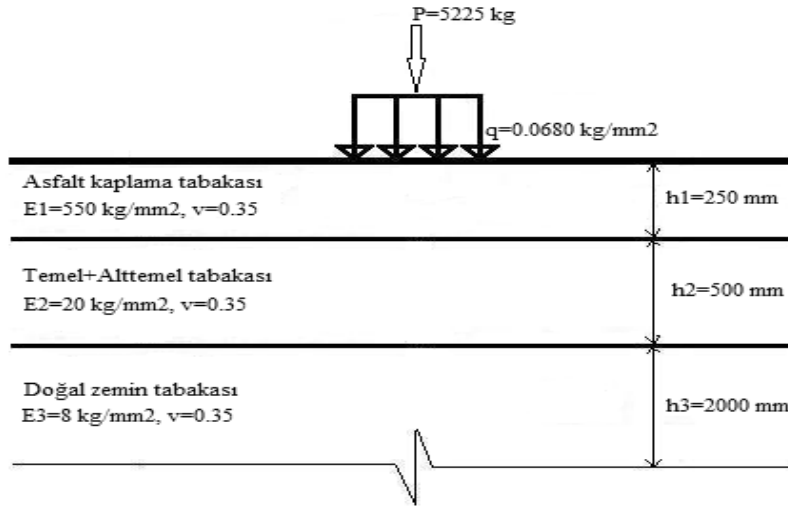
Bu çalışmada Van Karayolları 11. Bölge müdürlüğünün yaptığı dingil ağırlığı-son etüdü verileri ve MICHELİN lastik firmasından alınan en çok kullanılan lastik tipleri verileri ışığında sonlu elemanlar analizi yapıldı. Fakat yapılan çalışmanın tutarlı olup olmadığının anlaşılması amacıyla arazi çalışması yapıldı (Şekil 6). Bu çalışmada, Trabzon-Arsin karayolundan, 20 cm çapında basınçölçer ile 25 cm kalınlığındaki asfalt kaplama (AC) tabakasının üstünde ve altında oluşan basınç gerilmeleri ile tekerlek temas alanları ölçüldü (Tablo 4,5).



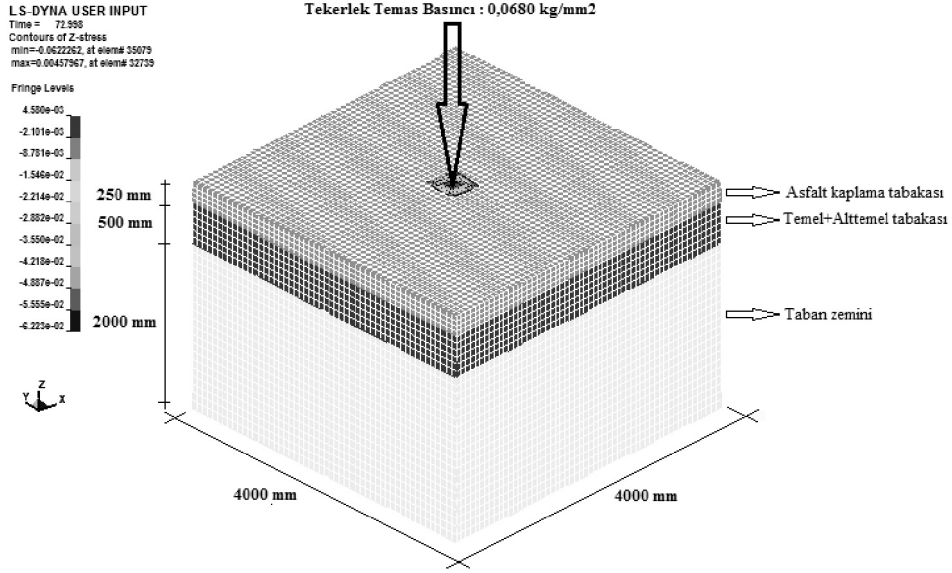
Şekil 6. Trabzon-Arsin karayolunda basınç ölçer ile gerilme ölçümü

Bu verilerin ışığında, sonlu elemanlarla asfalt modellemesi yapıldı. Bu modellemede kullanılan tekerlek temas alanı basıncı olarak araziden basınç ölçer ile tekerlek altında ölçülen basınç gerilmesi verilerinden, ortalama tekerlek basıncı olan 700 kPa'la (0.0714 kg/mm^2) yakın bir değer olan 667 kPa'lık (0.0680 kg/mm^2) temas alanı basıncı değeri ve tekerlek temas alanı için de yine araziden ölçülen $26.5 \times 29 \text{ cm}^2$ 'lik dikdörtgen temas alanı değeri seçildi.

Sonlu elemanlar yöntemi ile Şekil 7'de görülen üç tabakalı yol sistemi, Şekil 8'de görüldüğü gibi tasarlandı. Yol kaplama tabakası visko-elastik, diğer tabakalar elastik kabul edildi. Bu analizde Şekil 6'da görülen çalışma sonucu, basınçölçer ile arazide tekerlek altından alınan temas alanı basıncı ve tekerlek yükü değerleri kullanıldı (Tablo 4,5). Sonlu elemanlar modelinde kullanılan diğer parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

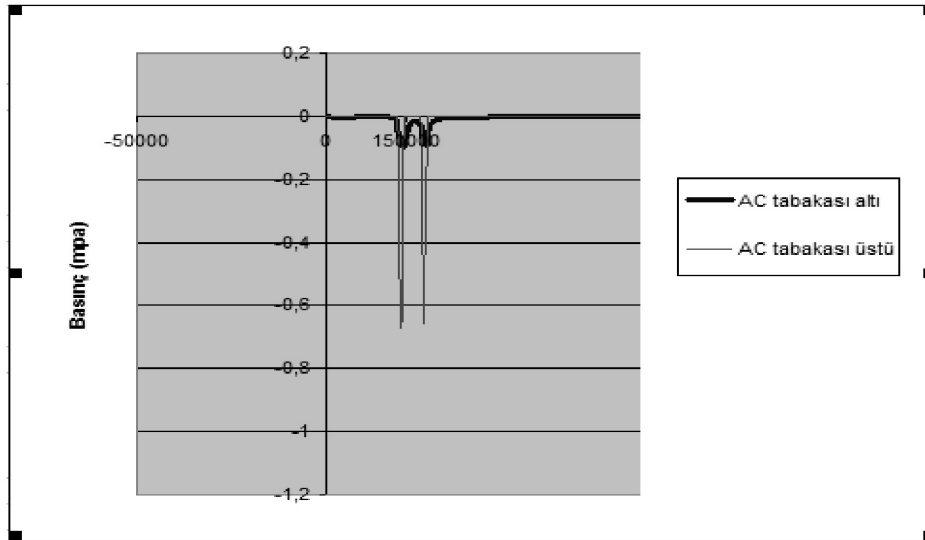


Şekil 7. Üç tabakalı yol sistemi



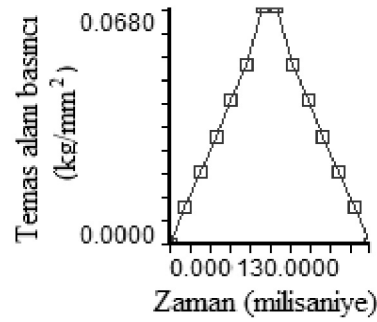
Şekil 8. 3D-Sonlu elemanlar modeli

Şekil 9'da görüldüğü üzere araziden alınan ölçümlerde kaplama yüzeyinde oluşan 0.0680 kg/mm² tekerlek temas alanı basıncı, kaplama altında 0.0100 kg/mm²'lik düşey basınç gerilmesine neden olmaktadır.

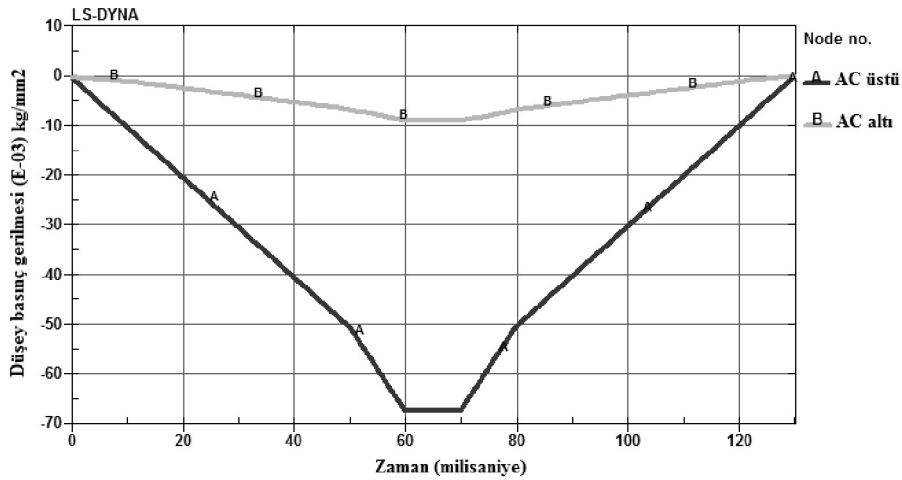


Şekil 9. Kaplama tabakası (AC) üstünde ve altında oluşan düşey basınç gerilmeleri (Trabzon-Arsin karayolu).

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan dinamik analizde; tekerlek temas alanı basıncı Huang (2004) tarafından hareketli yük için tanımlanan zaman fonksiyonu (Formül 1) kullanılarak, Şekil 10'da ki gibi tanımlanmıştır [10]. Zamanla 0.0680 kg/mm²'lik maksimum temas alanı basıncına ulaşan değer, Şekil 10'da görüldüğü gibi kaplama yüzeyinde kendisine eşit kaplama altında ise 0.0098 kg/mm²'lik düşey basınç gerilmesine neden oldu.



Şekil 10. Ls- Dyna hareketli yük için zaman fonksiyonu



Şekil 11. Sonlu elemanlar analiziyle kaplama tabakası üstünde ve altında elde edilen düşey basınç gerilmeleri

Asfalt kaplaması üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ile asfalt kaplaması altında oluşan düşey basınç gerilmesi arasında % 85 oranında düşüş olduğu görüldü. Bu düşüş oranı araziden alınan verilerde de %85 oranında olduğu Şekil 9'dan anlaşılmaktadır. Walubita ve F C van de Ven (2000) yaptıkları çalışmalarında 200 mm'lik asfalt kaplamanın üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ile asfalt kaplamanın altında oluşan düşey basınç gerilmesi

arasında % 75 oranında düşüş olduğu belirtilmiştir [9]. Bu iki çalışmada bulunan sonuçlar arasındaki % 10'luk fark, kaplama kalınlıkları arasındaki 50 mm'lik farktan kaynaklanmış olabilir.

Tablo 6. Arazi verileri ile sonlu elemanlar analizi değerlerinin karşılaştırması

Analiz Tipi	Kaplama Kalınlığı(mm)	Temas Alanı(mm)	Temas Alanı Basıncı(kg/mm ²)	Kaplama üstü Gerilme (kg/mm ²)	Kaplama Altı Gerilme (kg/mm ²)
Arazi	250	265x290	0.0680	0.0680	0.0100
S.E.M	250	265x290	0.0680	0.0680	0.0098

Sonlu elemanlar (S.E.M) analiziyle elde edilen gerilme değerleri ile araziden alınan gerilme verileri birbirine yakın bulunmuştur. Kaplama altında meydana gelen gerilme değerlerine bakıldığında, araziden alınan değer ile sonlu elemanlarla elde edilen değer arasında %2'lik bir hata mevcut ki bu da ihmal edilebilir bir değerdir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Tekerlek Konfigürasyonu İçin Düşey Gerilme-Deformasyon

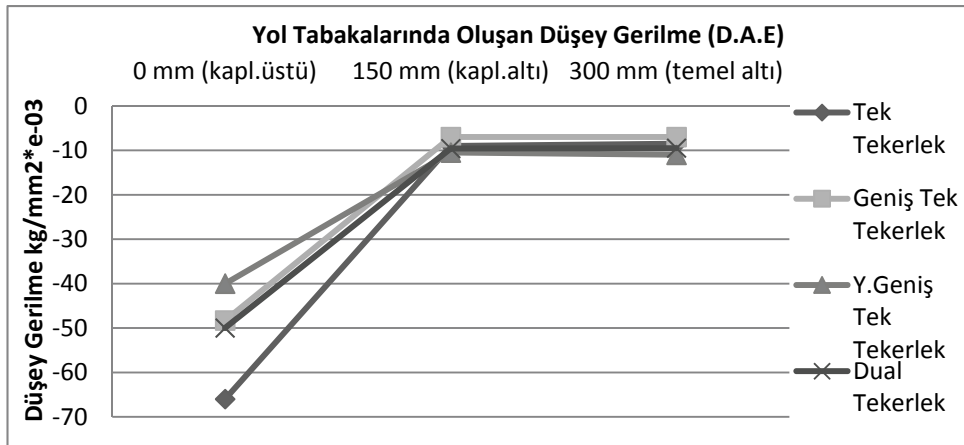
Asfaltta oluşan düşey basınç gerilmesi yolda kullanılan önemli tasarım kriterlerinden biridir. Düşey basınç gerilmesi yolda tekerlek izi hasarı oluşumuna etki eden önemli bir faktördür. Tekerlek izi hasarı; asfalt kaplama tabakası üzerinde, tekerlek izi boyunca meydana gelen boylamsal çöküntüdür. Bu çöküntü doğal zeminden kaplamaya kadar, bütün yol katmanlarında görülebilir. Genel olarak hareketli kümülatif trafik yükünden dolayı oluşur [10]. Trafik yükü altında yolda oluşan kesme gerilmesi, defleksiyon, düşey basınç gerilmesi ve deformasyonları nedeniyle, asfaltın visko-plastik davranışı sonucu oluşan kalıcı hasarlardır [9,11].

Tablo 7. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değerleri (DAE).

DAE Verileri Modeli Düşey Gerilme Değerleri (kg/mm ² x 10 ⁻³)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 mm (Kaplama Üstü)	-66	-48,3	-40	-50
150 mm (Kaplama Altı)	-9	-7	-10,5	-9,6
300 mm (Temel Altı)	-8,5	-6,8	-10,3	-9,5

(+) : Çekme, (-) : Basınç

Dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü (DAE) verileri göz önünde bulundurularak yapılan analize göre; kaplama üstünde en büyük basınç gerilmesine neden olan tekerlek, tek tekerlektir. Diğer tekerlekler sırasıyla şöyledir; dual tekerlek, geniş tek tekerlek ve yeni geniş tek tekerlektir. Kaplama altında ve diğer asfalt tabakalarında ise; neden oldukları gerilme büyüklüklerine göre bu sıra şöyledir; yeni geniş tek tekerlek, dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlektir (Bkz. Tablo 7 ve Şekil 12).



Şekil 12. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değişimi (DAE).

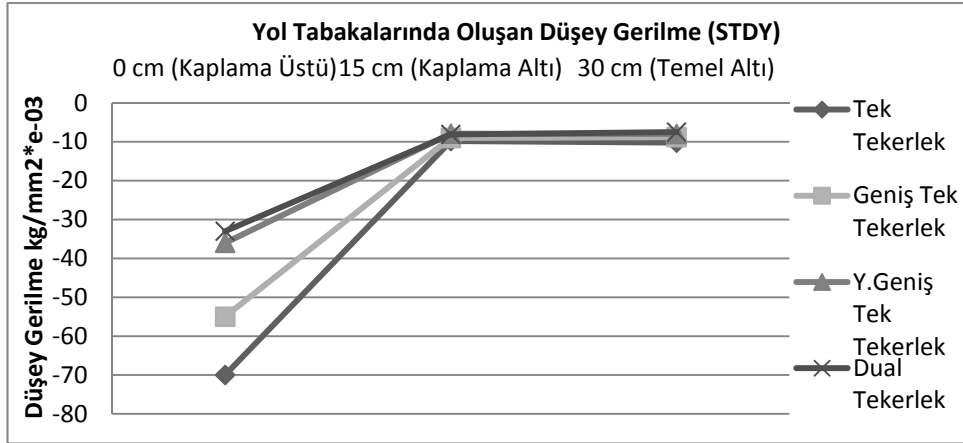
Standart tek dingil yükü (STDY) baz alınarak yapılan modellemede; bütün asfalt tabakalarında oluşan düşey basınç gerilmesi büyüklüğü bakımından, en kritik tekerlekler; tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlektir (Tablo 8 ve Şekil 13). Fernandes et al (2005) tarafından yapılan çalışmada; aynı yük altında düşey gerilme-deformasyon değerleri bakımından, dual tekerlek, geniş tek tekerlek ve tek tekerlekli aks tipleri üzerinde yapılan araştırmada, tek tekerlek ve geniş tek tekerleğin yük eşdeğerlik faktörü (zarar faktörü), dual tekerlekli aks tiplerine göre birkaç kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Burada aynı aks tiplerinin farklı tekerlek konfigürasyonlarında ki etkileri araştırılmış ve bütün aks tiplerinde en güvenli tekerlek, dual tekerlek olarak bulunmuştur [28]. Salgado ve Kim (2002) tarafından, dual tekerlek ve geniş tek tekerlek (super sinle) üzerinde yapılan çalışmada; taban zemini üzerinde, geniş tek tekerleğin bütün aks konfigürasyonları için, dual tekerlekten daha büyük düşey basınç gerilme-deformasyonlarına neden olduğu belirtilmiştir [23]. Kim et al (2005) geniş tek tekerleğin (super single), dual tekerleğe göre asfalt kaplama tabakası ve taban zemini üzerinde daha büyük basınç gerilmesine neden olduğunu belirtmiş, dual tekerlek kullanılarak yorulma-hasarı miktarının dörtte bir oranında azaltılabileceğini belirtmiştir [29]. Al-Qadi et al (2004) asfalt kaplama tabakası ve taban zemini üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ve tekerlek izi hasarı açısından, en tehlikeli tekerleğin tek tekerlek, en güvenli tekerleğin ise dual tekerlek olduğunu bildirmiştir [26]. Tablo 8'deki değerler ve Şekil 13'te grafik ile ifade edilen bulgular, yukarıda anlatılan çalışmalarını desteklemektedir.

Şekil 13 ve Tablo 8’de temel tabakası altında oluşan düşey basınç gerilme değerleri ile taban zemini üzerinde oluşan düşey basınç gerilme değerleri aynı olduğundan, taban zemini için düşey basınç gerilmeleri yazılmamıştır [10].

Tablo 8. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değerleri (STDY).

STDY Verileri Modeli Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Gerilme Değeri Ölçülen Noktanın Tekerlek Merkezine Olan Düşey Uzaklığı	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
0 mm (Kaplama Üstü)	-70	-55	-36	-33
150 mm (Kaplama Altı)	-9,8	-9	-7,9	-8,1
300 mm (Temel Altı)	-9,2	-8,8	-7,8	-7,5

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 13. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değişimi (STDY).

Walubita ve C van de Ven (2000) yaptıkları çalışmada, 200 mm kalınlığında asfalt kaplama tabakası üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmesi değeri ile altında meydana gelen düşey basınç değeri arasında %75 azalma olduğunu bildirmiştir [9]. Bu çalışmada ise 250 mm asfalt kaplama tabakası üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi değerleri ile altında oluşan düşey basınç gerilmesi değeri arasında; %75-86 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. Tekerlek çeşitlerine göre asfalt tabakası üstünde ve altında farklı düşey basınç gerilmesi değerleri oluşmaktadır (Tablo 7, 8). Ayrıca bu çalışmada; Walubita ve C van de Ven'nin (2000) çalışmasına göre, asfalt kaplama tabakası üstünde oluşan düşey basınç gerilmesi ile altında oluşan düşey basınç gerilmesi arasında daha büyük düşüş oranının sebebi, bu iki çalışmada kullanılan asfalt kaplama tabakası kalınlıkları arasındaki farktır. Dikkat edilmesi gereken başka bir durum ise düşey basınç gerilmesi, asfalt kaplama

tabakası kalınlığı ile hızla düşerken, diğer yol tabakalarında gerilme değeri düşmeden devam etmekte ve asfalt kaplama tabakası altı ile taban zemini üstünde meydana gelen düşey basınç gerilmesi değerlerinin yaklaşık aynı olduğu görülmüştür (Şekil 12, 13). Ayrıca Şekil 16'ya bakıldığında düşey gerilmeler sonucu en büyük deplasmanların taban zemininde olduğu anlaşılmaktadır.

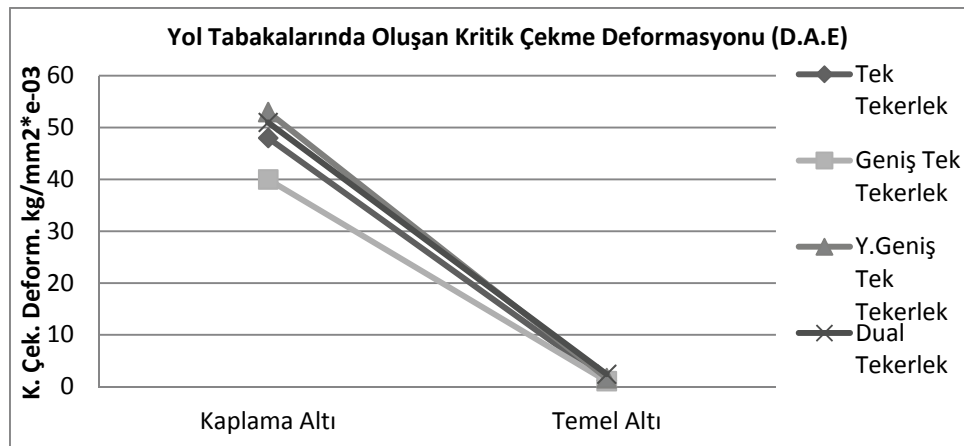
4.2. Tekerlek Konfigürasyonu İçin Kritik Çekme Deformasyonu

Asfalt tabakası (kaplama) altında oluşan kritik çekme deformasyonu, asfaltta oluşan yorulma çatlaklarını önlemek için tasarım kriteri olarak kullanılmaktadır. Tasarım kriteri olarak iki temel kritik çekme deformasyonu düşünülebilir. Bunlardan biri; altı eksenli normal ve kesme gerilmelerine bağlı oluşan “kapsamlı asal deformasyon”, diğeri ise çok popüler olan ve KENLAYER programında kullanılan ve yatayda oluşan normal ve kesme gerilmelerine bağlı oluşan “yatay asal deformasyon”dur [10]. Kapsamlı asal deformasyon, yatay asal deformasyondan daha büyük olduğundan, güvenli tarafta kalmak amacıyla “kapsamlı asal deformasyon” değerleri bu analizde kullanılmıştır.

Tablo 9. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değerleri (DAE).

DAE Verileri Modeli Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Yol Tabakaları	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
Kaplama Altı	48	40	53	51
Temel Altı	1,19	1,07	1,65	2,4

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 14. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi (DAE).

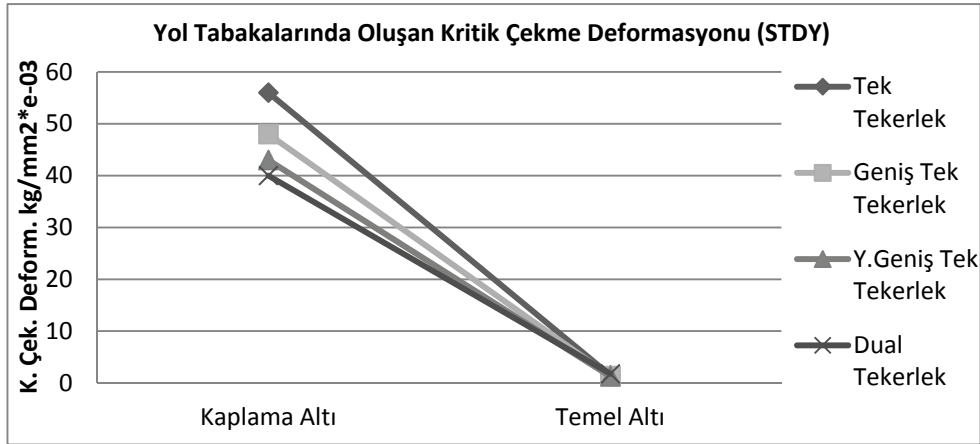
Dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü(DAE) verileri modelinden elde edilen sonuçlara göre; kaplama altında en büyük kritik çekme deformasyonuna neden olan tekerlek, yeni geniş tek tekerlektir. Bu tekerleği sırasıyla; dual tekerlek, tek tekerlek ve geniş tek tekerlek izlemektedir. Araziden alınan veriler ışığında, karayollarında en az kritik çekme deformasyonuna neden olan tekerlek geniş tek tekerlektir (Tablo 9 ve Şekil 14).

Aynı yükleme, tekerlek basıncı ve araç hızı koşulları ile tasarlanan standart tek dingil yükü (STDY) modelinden elde edilen sonuçlar, en büyük kritik çekme deformasyonu değerinin; tek tekerlek altında olduğu, en küçük değer ise dual tekerlek altında olduğu görüldü. Kritik çekme deformasyonu açısından en tehlikeli tekerlekten, en güvenli tekerleğe doğru sıralama; tek tekerlek, geniş tek tekerlek, yeni geniş tek tekerlek ve dual tekerlek şeklindedir (Bkz. Tablo 10 ve Şekil 15). Al-Qadi ve Wang (2008) eşit tekerlek yükü ve tekerlek iç basıncında, geniş tek tekerlek tipleri (425, 455) ile dual tekerlek üzerinde yaptığı

Tablo 10. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değerleri (STDY).

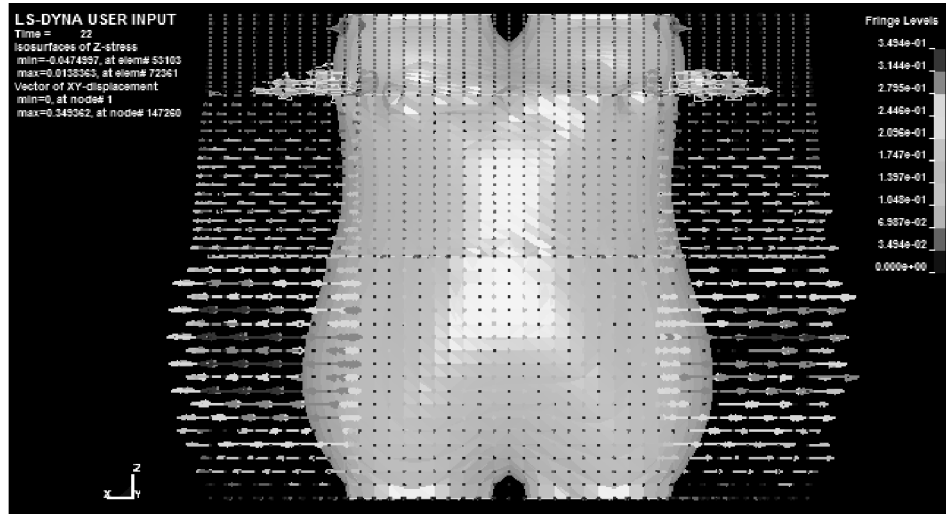
STDY Verileri Modeli Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)				
Yol Tabakaları	Tek Tekerlek	Geniş Tek Tekerlek	Y.Geniş Tek Tekerlek	Dual Tekerlek
Kaplama Altı	56	48	43	40
Temel Altı	1,45	1,3	1,25	1,75

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 15. Tekerlek tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi (STDY).

çalışmada, asfalt kaplaması altında en büyük kritik çekme deformasyonunun, geniş tek tekerlek (425) altında meydana geldiği ve en düşük kritik çekme deformasyonunun ise dual tekerlek altında meydana geldiği ifade edilmiştir [30,31]. Şekil 15'te görüldüğü üzere eşit şartlarda modellenerek analiz edilen tekerleklerden elde edilen sonuçlar; yukarıda yapılan çalışmaya benzer olarak, tek tekerlek, geniş tek tekerlek (super single) ve yeni geniş tek tekerleğe (455) göre dual tekerlek asfalt kaplama tabakası altında en düşük kritik çekme deformasyonuna neden olan tekerlek olduğu anlaşılmıştır [29]. Şekil 15'te verilen bulgulara benzer olarak, Al-Qadi et al (2004) tarafından yapılan araştırmada kritik çekme deformasyonu ve yorulma çatlakları açısından en tehlikeli tekerleği; tek tekerlek, en güvenli tekerleği ise; dual tekerlek olarak ifade etmiştir [26].



Şekil 16. Düşey gerilmeler sonucu asfalt tabakalarda oluşan deplasmanların yönü

4.3. Aks Konfigürasyonu İçin Düşey Gerilme-Deformasyon

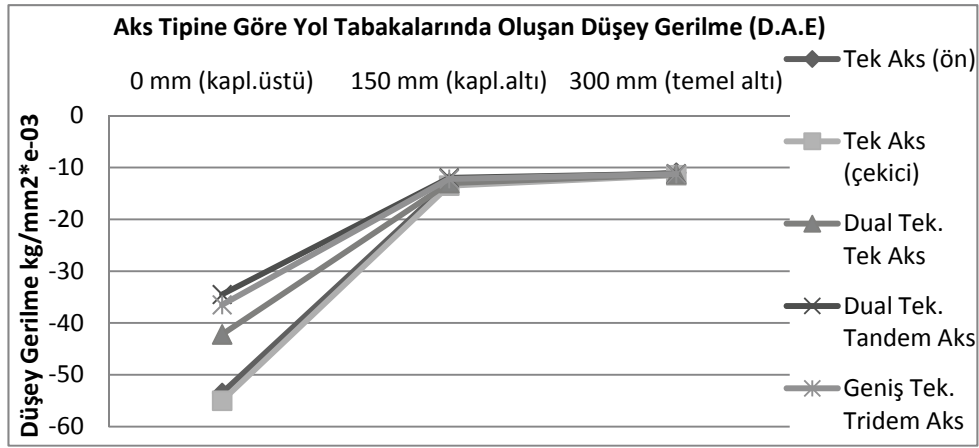
Şekil 17'ye bakıldığında aks tiplerine bağlı, yol tabakalarında meydana gelen düşey gerilmeler bakımından en tehlikeli aks tipleri; tek tekerlekli tek aks tipleridir. Düşey gerilmeler açısından en güvenli aks tipi dual tekerlekli tandem akstır. Fernandes et al (2005) tarafından yapılan çalışmada; farklı yük ve tekerlek konfigürasyonlarında aksların neden oldukları düşey basınç gerilme-deformasyonlarına göre, yük eşdeğerliği (zarar faktörü) açısından en güvenli aks tipleri sırasıyla, tandem aks, tridem aks ve tek aks olduğu belirtilmiştir. Ayrıca aynı aks tiplerinin farklı tekerlek konfigürasyonlarında ki etkileri araştırılmış ve bütün aks tiplerinde en güvenli tekerlek, dual tekerlek olarak bulunmuştur [28]. Şekil 17 ve Tablo 11'de görüldüğü gibi tek aks tipleri içinde, en az düşey gerilme değerlerine neden olan tek aks tipi, dual tekerlekli tek akstır. Tüm aks tipleri içinde ise yol tabakalarında en az düşey gerilmelere neden olan aks, dual tekerlekli tandem akstır. Yukarıda ki bulgulara paralel olarak, Al-Qadi et al (2004) tarafından yapılan araştırmada

yolda düşey basınç gerilmesinden dolayı oluşan tekerlek izi hasarı açısından, en tehlikeli akslar sırasıyla; tek tekerlekli akslar, geniş tekerlekli akslar ve dual tekerlekli akslardır [26].

Tablo 11. Aks tiplerine göre yol tabakalarında oluşan düşey gerilme değerleri (DAE).

DAE Verileri Modeli Düşey Gerilme Değerleri ($\text{kg}/\text{mm}^2 \times 10^{-3}$)					
Yol Tabakaları ve Derinlikleri	Tek Aks (ön)	Tek Aks (çekici)	Dual Tek. Tek Aks	Dual Tek. Tandem Aks	Geniş Tek. Tridem Aks
0 mm (Kaplama Üstü)	-53,5	-55	-42,2	-34,5	-36,5
150 mm (Kaplama Altı)	-13	-13,5	-13	-12	-12,2
300 mm (Temel Altı)	-11	-11,5	-11,3	-11,2	-11,25

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 17. DAE verilerine göre aks tipleri altında oluşan düşey gerilme değişimi

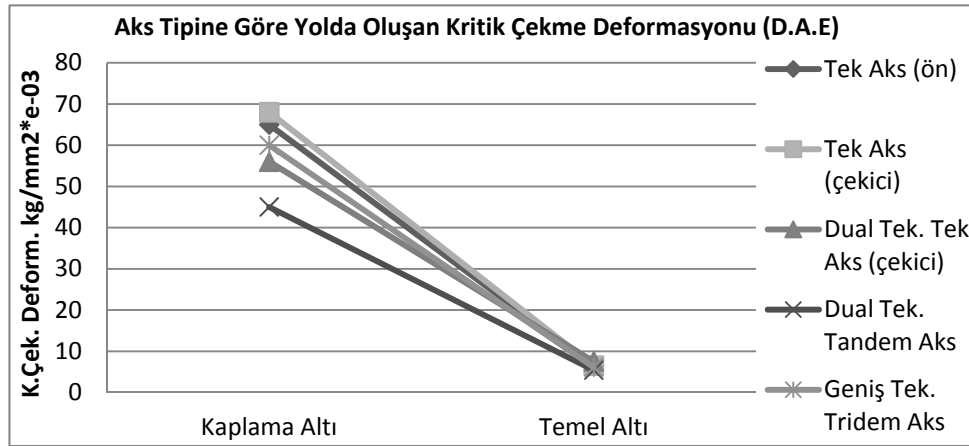
4.4. Aks Konfigürasyonu İçin Kritik Çekme Deformasyonu

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen kritik çekme deformasyon grafikleri Şekil 18’de verilmektedir. Şekil’de görüldüğü üzere; en büyük kritik çekme deformasyonuna neden olan aks tipi, tek aks tipleridir. Çekici tek aks üzerine, ön tek aks’a göre daha fazla yük bindiğinden, çekici tek aks yol açısından daha kritik hale gelmektedir. Düşey gerilmelerde olduğu gibi kritik çekme deformasyonları açısından da en güvenilir aks dual tekerlekli tandem aks olarak görülmektedir (Tablo 12). Özellikle kaplama altında oluşan kritik çekme deformasyonu açısından, en güvenilir aks tiplerinin dual tekerlekli aks tipleri olduğu anlaşılmıştır [28]. Al-Qadi et al (2004) tarafından yapılan araştırmada, kritik çekme deformasyonundan dolayı oluşan yorulma çatlakları açısından en tehlikeli aksları; tek tekerlekli akslar, geniş tek tekerlekli akslar ve dual tekerlekli akslar şeklinde bildirilmiş olup yukarıda ki bulgular ile paralellik arz ettiği görülmektedir [26].

Tablo 12. Aks tiplerine göre yol tabakalarında oluşan kritik çekme deformasyonu değerleri (DAE).

DAE Verileri Modeli Kritik Çekme Deformasyonu Değerleri(kg/mm ² x 10 ⁻³)					
Yol Tabakaları	Tek Aks (ön)	Tek Aks (çekici)	Dual Tek. Tek Aks (çekici)	Dual Tek. Tandem Aks	Geniş Tek. Tridem Aks
Kaplama Altı	65	68	56	45	60
Temel Altı	6,4	6,5	7,5	5,4	6,1

(+) : Çekme, (-) : Basınç



Şekil 18. DAE verilerine göre aks tipleri altında oluşan kritik çekme deformasyonu değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Karayolları 11. Bölge Müdürlüğü (Van) tarafından araziden Dingil Ağırlığı ve Başlangıç – Son Etüdü (DAE) çalışması sonucu elde edilen dingil yükleri ile Standart Tek Dingil Yüğü (STDY) baz alınarak, arazi şartları ile standart koşullar altında tekerlek ve aks davranışlarının gözlemlenmesi amacıyla, ağır taşıtların tekerlek ve aks konfigürasyonları sonlu elemanlar (Ls-Dyna) ile modellenerek analiz edildi. Yapılan analiz sonucunda;

Dingil Ağırlığı ve Başlangıç – Son Etüdü verileri tekerlek analizlerine göre; Tekerlek izi hasarı bakımından ve yorulma çatlakları (kritik çekme deformasyonu) açısından en çok hasar verebilecek tekerlek yeni geniş tek tekerlektir.

Standart tek dingil yükü verileri tekerlek analizine göre; Yol tabakalarında düşey basınç gerilmesinden dolayı oluşan tekerlek izi hasarı açısından en güvenli tekerlek; dual tekerlek, en çok zarar verebilecek tekerlek ise tekil tekerlektir. Kritik çekme deformasyonu açısından asfalt kaplama tabakası altında kritik çekme deformasyonundan dolayı oluşan

yorulma çatlaklarının en önemli sebebi tekil tekerlekler olup en güvenli tekerlek ise dual tekerlektir.

Dingil Ağırlığı ve Başlangıç – Son Etüdü verileri aks analizine göre; Düşey gerilme açısından, asfalt kaplama tabakası ve taban zemini üstünde düşey basınç gerilmesinden dolayı oluşan tekerlek izi hasarı bakımından en tehlikeli aks; çekici tek aks, en güvenli aks ise dual tekerlekli tandem akstır. Asfalt kaplama tabakası altında kritik çekme deformasyonu nedeniyle oluşan yorulma çatlakları bakımından en kritik aks; çekici tek aks, en güvenli aks ise dual tekerlekli tandem akstır.

Semboller

σ_x	: x yönündeki asal gerilmeler
σ_y	: y yönündeki asal gerilmeler
σ_z	: z yönündeki asal gerilmeler
ν	: poisson oranı
a	: tekerlek temas alanı çapı (metre)
D	: yol tabakası yoğunluğu
DAE	: dingil ağırlığı ve başlangıç son etüdü
d	: yük tatbik süresi (saniye)
E	: elastik modülü
h	: yol tabaka kalınlığı
K	: kaplama tabakası bulk modülü
G	: kaplama tabakası kesme modülü
s	: araç hızı (metre/saniye)
STDY	: standart tek dingil yükü

Kaynaklar

- [1] Carvalho, R.L., Mechanistic-Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study, Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, 2006.
- [2] Ali, O., Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37A), Report No: UR 3002.1, Contract No: Research Report 216, Program: Urban Infrastructure, National Research Council Canada, 2005.
- [3] Claussen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P., and Udge, P., Asphalt Pavement Design - The Shell Method, Proceedings of the 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 39-74, 1977.
- [4] Shook, J. F., Finn, F. N., Witczak, M. W., and Monismith, C. L., Thickness Design of Asphalt Pavements-The Asphalt Institute Method, Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 17-44, 1982.

- [5] NCHRP, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 1-37A, National Research Council, Washington, DC, 2004.
- [6] AASHTO, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1972, 1986, 1993.
- [7] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2006, 2010.
- [8] Schwartz, C. W., and Carvalho, R. L., Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide, Final Report, Volume 2: Evaluation of M-E Design Procedure, MDSHA Project No. SP0077B41, UMD FRS No. 430572, Office of Material Technology Maryland State Highway Administration Lutherville, MD 21093, 2007.
- [9] Walubita, L.F., and F C van de Ven, M., Stresses and Strains in Asphalt-Surfacing Pavements, South African Transport Conference: Action in Transport for the New Millennium, South Africa, 2000.
- [10] Huang, Y.H., Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 07632, New Jersey, 2004.
- [11] Yoder, E. J., and Witczak, M. W., Principles of Pavement Design, J. Willey and Sons, Inc., Second Edition, New York, 1975.
- [12] Wu, Z., Finite Element Simulation of Rutting on Superpave Pavements, Thesis of Doctor of Philosophy, Kansas State University, Department of Civil engineering, Manhattan, Kansas, 2001.
- [13] SHRP-A-415, Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes, Final Report, Stragic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1994.
- [14] Baburamani, P., Asphalt Fatigue Life Prediction Models—A Literature Review, ARRB Transport Research Ltd, Research Report ARR 334, Vermont, South Victoria, 1999.
- [15] LS-DYNA, Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, 2006.
- [16] Sarica, R. Z., Ulker, M. B. C., Rahman, M.S., and Mirmiran. A., Traffic Control Design for Portable Concrete Barriers, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, NC State University, USA, 2004.
- [17] Uddin, W., and Ricalde, L., İmplementation of a User Material Routine in 3D-FE Codes for Viscoelastic Modeling and Simulation of Highway and Airport Pavements, Department of Civil Engineering, The University of Mississippi, Mississippi, USA, 2006.
- [18] Shoukry, S. N., William, G. W., and Riad, M., Application of LS-DYNA in İdentifying Critical Stresses Around Dowel Bars, 8ht İnternational LS-DYNA Users Conference, West Virginia University, Morgantown, WV 26506-6103, USA, 2007.
- [19] Shoukry, S. N., William, G. W., and Riad, M., Application of Dynamic Relaxation in Thermo-Elastic Structural Analysis of Highway Pavement Structures, 9ht İnternational LS-DYNA Users Conference, West Virginia University, Morgantown, WV 26506-6103, USA, 2008.

- [20] Uddin, W., Simulation of Falling Weight deflectometer for In-Situ Material Characterization of Highway and Airport Pavements, Department of Civil Engineering, The University of Mississippi, Mississippi 38677, USA, 2001.
- [21] Uddin, W., Application of Finite Element Dynamic Analysis for In Situ Material Characterization of Pavement Systems, Fifth International Conference on The Bearing Capacity of Roads and Airfields. Department of Civil Engineering, The University of Mississippi, Mississippi 38677, USA, 2002.
- [22] Sousa, J.B., Craus, J., and Monismith, C.L., Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A, 1991.
- [23] Salgado, R., and Kim, D., Effects of Heavier Truck Loadings and Super-Single Tires on Subgrades, Joint Transportation Research Program Project No: C-36-52R, File No: 6-20-17, SPR-2402. Final Report: FHWA/IN/JTRP-2002/20, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2002.
- [24] Douglas, R.A., Alabaster, B., Charters, N., Measured Tire/Road Contact Stresses Characterized by Tire Type, Wheel Load, and Inflation Pressure, Introducing Innovation into Pavement Design and Rehabilitation, 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Ontario, Toronto, Canada, 2008.
- [25] Xie, S., Zheng, C., October, Effects of The Tire-Pavement Contact Pressure on Asphalt Pavement, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4, China, 2003.
- [26] Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., Yoo, P. J., Pavement Damage Due To Different Tires And Vehicle Configurations, Final Report, Submitted To: Michelin Americas Research and Development Corporation, 515 Michelin Road, Po Box 1987, Greenville, Sc 29602-1987, Virginia Tech Transportation Institute, Blacksburg, USA, 2004.
- [27] Korkiala, L., Calculation Method for Permanent Deformation of Unbound Pavement Materials, VTT Publications, 1235-0621 (soft back ed.), 1455-0849 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>), VTT Technical Research Centre of Finland, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, 2008.
- [28] Fernandes, J.L., Pais, J.C. and Pereira, P.A.A., Effects of traffic loading on Portuguese and Brazilian Pavements Performance, Paper Prepared for Presentation and Publication at The 85th Annual Meeting in January 22-26, 2006 of The T.R.B., Washington, D.C., 2005.
- [29] Kim, D., Salgado, R., and Altschaeffi, A.G., Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements, Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 10, ©ASCE, ISSN 0733-947X/2005/10-732-743, 2005.
- [30] Al-Qadi, I.L., Wang, H., Full-depth Flexible Pavement Fatigue Response under Various Tire and Axle Load Configurations, Center for Transportation, Illinois Center for Transportation, Conference Topic Selected: Modeling and analysis of pavement systems, ICT-R59, Submission Date: March 14, 2008, Urbana, USA, 2008.
- [31] Al-Qadi, I.L., Wang, H., Evaluation of Pavement Damage Due to New Tire Designs. Research Report ICT-09-048, Illinois Center for Transportation, Illinois Center for Transportation Series No. 09-048, UILU-ENG-2009-2019, ISSN: 0197-9191, Urbana, USA, 2009.