T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEMİRYOLLARINDA ESNEKLİK DEĞİŞİMLERİNİN DÜŞEY TEKERLEK KUVVETLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Erdem BALCI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Niyazi Özgür BEZGİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 04.10.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Doç. Dr. Nihazi Özgür BEZGİN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ilknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Mustafa GÜRSOY
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Danışmanlığında tez çalışmamı yürüttüğüm, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen ve demiryolu mühendisliğindeki mevcut donanımı borçlu olduğum saygıdeğer hocam Doç. Dr. Niyazi Özgür BEZGİN'e, lisans döneminde beni ulaştırma alanında akademik kariyere yönlendiren ve çalışmalarımı teşvik eden sayın hocam Prof. Dr. Atakan AKSOY'a teşekkür ederim.

T.C.D.D.'de çalışan ve demiryolarına ilgi duymamı sağlayan eniştem Özgün KASAPOĞLU'na, tez çalışmam sırasındaki yardımlarından dolayı arkadaşım Can ORUÇ'a ve maddi ve manevi her türlü yardımlarından dolayı aileme teşekkür ederim.

Eylül 2019 Erdem BALCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. HAT ESNEKLİĞİ 3
2.1.1. Esneklik Optimizasyonu 5
2.2.WINKLER TEORİSİ 7
2.2.1. Boyuna Bağlı Hatlar 8
2.2.2. Çapraz Bağlı Hatlar 9
2.3.DİNAMİK DARBE KUVVETLERİ 11
2.3.1. Talbot (AREA) 13
2.3.2. Eisenmann 14
2.3.3. ORE Formülü 15
2.3.4. İngiliz Demiryolları Formülü 17
2.3.5. Diğer Denklemler 18
2.4. HAT ESNEKLİĞİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ 19
2.4.1. Statik Ölçüm Yöntemleri 20
2.4.2. Devamlı Ölçüm Yöntemleri 23
2.5. BEZGİN YÖNTEMİ VE DENKLEMLERİ 28
2.5.1. Teker Hareketi ve Hareket Esnasında Etkiyen Faktörler 28
2.5.2. Hattaki Esneklik Değişimi Nedeniyle Oluşan Dinamik Yüklerin Tahmini 32
2.5.3. Hat Profil Bozuklukları Nedeniyle Oluşan Dinamik Yüklerin Tahmini 39
3. MALZEME VE YÖNTEM **42**
3.1. HATTIN ÇİFT DİNGİL ALTINDA GÖSTERDİĞİ ETKİN ESNEKLİĞİN HESAP YÖNTEMİ 42
3.2. SONLU ELEMANLAR MODELİYLE DİNGİL ETKİLEŞİMİNİN DİNAMİK YÜK ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DOĞRULANMASI 46
3.3. EN 13848-5 (2008) YÖNETMELİĞİNDE İZİN VERİLEN SINIR DÜŞEY DÜZENSİZLİK DEĞERLERİ 47
3.4. ALLTRACK V1 İLE HESAPLANAN DİNAMİK YÜKLER 49
4. BULGULAR **51**
4.1. HATTIN ÇİFT DİNGİL ALTINDA GÖSTERDİĞİ ESNEKLİK VE ESNEKLİĞİN DİNGİLLER ARASI MESAFEYLE DEĞİŞİMİ 51

4.1.1. Dingil Sehim Dalgalarının Girişimi....51
4.1.2. Farklı Ray Profilleri İçin Esneklik Değişimleri....53
4.1.3. Esnekliğin Dingiller Arası Mesafeyle Değişimi....54
4.1.3. Etkin Esneklikle Değişen Dinamik Darbe Kuvvetlerinin Sonlu Elemanlar Analizi....62
4.2. DÜŞEY DÜZENSIZLIK SINIR DEĞERLERINDE MEYDANA GELEN DINAMIK DARBE KUVVETLERI....65
4.2.1. Yükselen Hat Profilinde Meydana Gelen Dinamik Yükler....66
4.2.2. Alçalan Hat Profilinde Meydana Gelen Dinamik Yükler....69
4.3. GENİŞLETİLMİŞ BEZGİN DENKLEMLERİNİN SONUÇLANDIRILMASI....71
4.3.1. Tekerin İniş Hareketi (Düşük Esneklikten Yüksek Esnekliğe Geçiş ve Alçalan Hat Profili)....72
4.3.2. Tekerin Tırmanma Hareketi (Yüksek Esneklikten Düşük Esnekliğe Geçiş ve Yükselen Hat Profili)....74
5. TARTIŞMA VE SONUÇ....77
KAYNAKLAR....79
ÖZGEÇMİŞ....82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Yay katmanlarını içeren hat modeli (Kerr, 2000). 4

Şekil 2.2: Hat desteklerinin yaylarla ifade edilmesi (Aron ve Jonas, 2012). 8

Şekil 2.3: Çapraz bağlı hatlarda analitik model (Kerr, 2000)..... 9

Şekil 2.4: 115RE ray profilinde teker yükü altında oluşan w(x) ve p(x) grafikleri (Kerr, 2003). 10

Şekil 2.5: Elastik temelde üniform basınç altındaki zeminde Winkler modeli ve pratik uygulama karşılaştırması (https://www.mae.ust.hk/~meqpsun/Notes/Chapter4(202).PDF)..... 11

Şekil 2.6: Yük altında sehim, Winkler ve pratik uygulama karşılaştırması (Kerr, 2000). 11

Şekil 2.7: Farklı oturmalara sahip hatta tekerin h yüksekliğinden düşmesi. 12

Şekil 2.8: Düz teker nedeniyle tekerin d yüksekliğinden düşmesi. 13

Şekil 2.9: Farklı araçlar için hız ile birlikte artan dinamik yük artışları (Doyle, 1980). 18

Şekil 2.10: Talbot komitesi yükleme cihazı (Talbot Komitesi, 1918). 20

Şekil 2.11: Darbe çekici ile uyarma yöntemi (Kaewunruen ve Remennikov, 2005). .. 21

Şekil 2.12: FWD Deneyi (Burrow ve diğ., 2007)..... 22

Şekil 2.13: İsveç TLV'sindeki düşey ve yatay hidrolik kollar (Berggren, 2009). 23

Şekil 2.14: CARS esneklik ölçüm yöntemi (Burrow vd., 2009). 23

Şekil 2.15: AAR110 hat yükleme aracı (http://www.drgw.net/trips/report.php?tr=TTCI.3). 24

Şekil 2.16: Lazer yöntemiyle ölçüm (Wang ve diğ., 2016)..... 25

Şekil 2.17: Ray sehim miktarının tespiti (Wang ve diğ, 2016). 25

Şekil 2.18: RMSV ile ölçüm yöntemi (Berggren, 2009)..... 27

Şekil 2.19: Statik ve dinamik yükleme ile oluşan sehimler (Bezgin, 2017)..... 29

Şekil 2.20: Esnekliği sabit ve kusursuz geometrideki bir hat üzerindeki kusursuz bir tekerin hareketi. 30

Şekil 2.21: Düzensiz bir hat üzerindeki tekerin hareketi sonucu oluşan dinamik sehim (Bezgin, 2017). 30

Şekil 2.22: Sönümlemesiz ve sönümlemeli sistem üzerindeki teker yükü karşılaştırması (Bezgin, 2019). 32

Şekil 2.23: Düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş (Bezgin, 2018). 33

Şekil 2.24: Statik ve dinamik kuvvet altındaki sehimler (Bezgin, 2018). 34

Şekil 2.25: Artan esneklikli hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi (Bezgin, 2019). 35

Şekil 2.26: Artan esneklikli hattaki teker kuvvet-sehim ilişkisi (Bezgin, 2018). 35

Şekil 2.27: Yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş (Bezgin, 2018). 36

Şekil 2.28: Statik ve dinamik kuvvet altındaki sehimler (Bezgin, 2018). 37

Şekil 2.29: Azalan esneklikli hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi (Bezgin, 2019). 38

Şekil 2.30: Azalan esneklikli hattaki teker kuvvet-sehim ilişkisi (Bezgin, 2019). 38

Şekil 2.31: Alçalan hat profilinde meydana gelen sehimler (Bezgin, 2018). 39

Şekil 2.32: Yükselen hat profilinde meydana gelen sehimler (Bezgin, 2018). 40

Şekil 3.1: Farklı teker konumları için oluşan sehim eğrileri. 42

Şekil 3.2: Her iki dingil için farklı konumlarda oluşan sehim miktarları. 44

Şekil 3.3: x=-6 noktasına olan dingil merkezi uzaklıkları. 45

Şekil 3.4: Program girdi ve çıktıları. 46

Şekil 3.5: Hattaki deforme çukur üzerinde teker hareketiyle ortaya çıkan dinamik yükler. 49

Şekil 4.1: Sehim girişimlerinin dingiller arası mesafeyle değişimi. 52

Şekil 4.2: m=2 m için farklı k değerlerinde oluşan sehim girişimleri. 53

Şekil 4.3: Farklı ray profillerinde dingil mesafesi açıklığına göre değişen hat esnekliği. 54

Şekil 4.4: Farklı esneklikler için dingiller arası mesafenin artmasıyla değişen hat esnekliği. 55

Şekil 4.5: İki dingil ortasındaki toplam sehim ve maksimum toplam sehim. 57

Şekil 4.6: Dingil açıklığının artmasıyla değişen birim direnç ve IR değerleri. 57

Şekil 4.7: Dingil mesafesiyle değişen k^*/k oranları. 61

Şekil 4.8: Farklı geçiş uzunluklarında etkin hat esnekliğinin değişimi. 62

Şekil 4.9: Geçiş uzunluğu a) 4 m, b) 8 m, c)12 m için 1. tekerde oluşan dinamik yüklerin normalizasyonu. 64

Şekil 4.10: Geçiş uzunluğu a) 4 m, b) 8 m, c)12 m için 2. tekerde oluşan dinamik yüklerin normalizasyonu. 65

Şekil 4.11: Yükselen profil uyarı limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler. 66

Şekil 4.12: Yükselen profil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler. 67

Şekil 4.13: Yükselen profil acil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler. 68

Şekil 4.14: Alçalan profil uyarı limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler. 69

Şekil 4.15: Alçalan profil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler. 70

Şekil 4.16: Alçalan profil acil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler. 71

Şekil 4.17: Teker iniş hareketinde hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi. 72

Şekil 4.18: Teker tırmanma hareketinde hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi. 74

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Farklı bileşenlere ait düşey birim direnç katsayıları. 4

Tablo 2.2: Hat durumuna göre δ değerleri. 15

Tablo 2.3: Hıza göre değişen η değerleri. 15

Tablo 2.4: Gerilme türlerinin oluşma ihtimalleri (Esveld, 2001). 15

Tablo 2.5: Dinamik yük faktörü için geliştirilen diğer denklemler. 18

Tablo 3.1: Farklı ray profillerine ait kesit ağırlığı ve atalet momentleri 45

Tablo 3.2: Sonlu elemanlar modelinin özellikleri. 47

Tablo 3.3: Limit durumla rdaki maksimum düşey düzensizlik değerleri (EN 13848-5). 48

Tablo 4.1: Farklı esneklikler için kritik konumlardaki dingil açıklığı mesafeleri ve bu noktalardaki k^* değerleri. 58

Tablo 4.2: Dingil mesafesine (m) göre değişen k^* ve limit değerler. 59

Tablo 4.3 : Dingil mesafesine (m) göre değişen k^* ve limit değerler 60

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{k}$	: Düşey birim direnç (kN/mm)
$\mathbf{w}$	: Hat sehimi (mm)
$\mathbf{F}$	: Kuvvet (N veya kN)
$\mathbf{t}$	: Zaman (sn) ve üstyapı parçasının olasılıksal önemi
$\mathbf{E}$	: Elastisite modülü (N/mm^2) ve potansiyel enerji
$\boldsymbol{\partial}$	: Malzemenin elastik gerinim enerjisi
$\boldsymbol{\sigma}$	: Gerilim
$\boldsymbol{\varepsilon}$	: Malzeme şekil değiştirmesi
$\boldsymbol{\partial_S}$	: Sistemin toplam gerinim enerjisi
$\boldsymbol{\partial_R(k_{Gi})}$	: i. birim dirençteki ray gerinimi
$\boldsymbol{\partial_{TR}(k_{Gi})}$	: i. birim dirençteki travers gerinimi
$\boldsymbol{\partial_B(k_{Gi})}$	: i. birim dirençteki balast gerinimi
$\mathbf{u}$	: Hat esneklik modülü (kN/mm^2) veya (MPa)
$\mathbf{EI}$	: Ray esneklik modülü
$\mathbf{q(x)}$	: x noktasındaki düşey teker yükü
$\mathbf{p(x)}$	: x noktasındaki bağ-zemin teması basıncı
$\mathbf{M}$	: Eğilme momenti
$\mathbf{d}$	: Teker düzlük derinliği veya dever eksikliği (mm)
$\boldsymbol{\phi}$	: Dinamik yük faktörü
$\mathbf{P_d}$	: Dinamik teker yükü (kN)
$\mathbf{P_s}$	: Statik teker yükü (kN)
$\mathbf{D}$	: Teker çapı (mm)
$\mathbf{V}$	: Hız (km/h) veya (m/sn)
$\boldsymbol{\bar{x}}$	: Ortalama ray sehimi
$\boldsymbol{\bar{s}}$	: Ortalama sehim standart sapması
$\boldsymbol{\eta}$	: Hız faktörü
$\boldsymbol{\delta}$	: Hat kalitesi ve bakım durumu
$\mathbf{E}$	: Elastisite modülü (N/mm^2)
$\boldsymbol{\partial}$	: Malzemenin elastik gerinim enerjisi

h	: Araç ağırlık merkezinin yüksekliği (m)
c	: Dever (m)
R	: Kurba yarıçapı (m)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/sn^2) veya Hat genişliği (m)
$\mathbf{P_1}$	: Dinamik teker yükü (kN)
$\mathbf{P_0}$	: Statik teker yükü (kN)
$\mathbf{(\alpha_1+\alpha_2)}$	: Toplam ray eğim açısı (radyan)
$\mathbf{K_t}$	: Bağlantı noktasınaki hat birim direnci (kN/mm)
$\mathbf{m_u}$	: Bir tekerin süspansiyonsuz ağırlığı (kN)
$\mathbf{y_k}$	: Elastik sehim
$\mathbf{P_A}$	: Ağır araç yükü
$\mathbf{P_B}$	: Hafif araç yükü
$\mathbf{y_{KH}}$	: Ağır araç altındaki elastik sehim
$\mathbf{y_{KL}}$	: Hafif araç altındaki elastik sehim
$\mathbf{x_s}$	: Statik sehim
$\mathbf{x_i}$	: Dinamik darbe sehimi
$\mathbf{F_S}$	: Statik kuvvet
$\mathbf{F_i}$	: Dinamik darbe kuvveti
f	: Darbe azaltma faktörü
$\mathbf{t_{fall}}$	: Düşme süresi
$\mathbf{t_{pass}}$	: Geçiş süresi
L	: Kusurlu hat geçiş uzunluğu
$\mathbf{K_{B1}}$	: Düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş için Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K'_{B1}}$	: Düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş için Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K_{B2}}$	: Yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş için Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K'_{B2}}$	: Yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş için Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K_{B,d}}$	: Alçalan hat profili için Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K'_{B,d}}$	: Alçalan hat profili için Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K_{B,a}}$	: Yükselen hat profili için Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K'_{B,a}}$	: Yükselen hat profili için Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı
$\mathbf{K_J}$	: İvmelenme nedeniyle oluşan ekstra dinamik yük katsayısı
L	: Kusurlu hat geçiş uzunluğu

$\mathbf{k_{eq}}$: Sistem eşdeğer düşey birim direnci

$\mathbf{k_b}$: Tren-boji arası yay düşey birim direnci

$\mathbf{k_w}$: Boji-teker arası yay düşey birim direnci

$\mathbf{k_h}$: Hertz temas düşey birim direnci

s : Sistem sönümlemesi

$\mathbf{a_b}$: Boji yayı sehimi

$\mathbf{a_w}$: Teker yayı sehimi

$\mathbf{a_h}$: Hertz temas sehimi

a : Toplam sehim

Kısaltmalar	**Açıklama**
AL	: Alert limit (uyarı limiti)
IL	: Intervention Limit (müdahale limiti)
IAL	: Intervention Alert Limit (acil müdahale limiti)
AREA	: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (Amerika Demiryolu Mühendisliği ve Yol Bakım Birliği)
ORE	: European Rail Research Institute (Avrupa Demiryolu Araştırma Enstitüsü)
WMATA	: Washington Metropolitan Area Transit Authority (Washington Metropolitan Bölgesi Ulaştırma Komitesi)
FWD	: Falling Weight Deflectometer (düşen ağırlıklı deflektometre)
EN	: European Standards (Avrupa Birliği Standartları)
UIC	: International Union of Railways (Uluslararası Demiryolları Birliği)
DB	: Deutsche Bahn (Alman Demiryolları)
TLV	: Hat yükleme aracı
TTCI	: Transportation Technology Center, Inc. (Ulaştırma Teknoloji Merkezi)
CARS	: Chinese Academy of Railway Sciences (Çin Demiryolu Bilimleri Akademisi)
Banverket	: Swedish Rail Administration (İsveç Demiryolu İdaresi)
KTH	: Royal Instute of Technology (Kraliyet Teknoloji Enstitüsü)
RMSV	: Esneklik ölçüm aracı
KZV	: Ticari Demiryolu Araştırmaları Ltd.
SBB	: Schweizerische Bundesbahnen (İsviçre Federal Demiryolları)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEMİRYOLLARINDA ESNEKLİK DEĞİŞİMLERİNİN DÜŞEY TEKERLEK KUVVETLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Erdem BALCI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Niyazi Özgür BEZGİN

Bu çalışmada, dinamik yük tahminlerinde kullanılan hatta ait esneklik değerinin doğru bir şekilde tespit edilmesi hedeflenmiştir. Tek dingil altındaki esnekliğin, çift dingilli sistemlerdeki değişimi gözlemlenmiştir. Bu amaçla iki dingilin hatta oluşturduğu sehim eğrileri çizdirilmiş ve bu eğrilerin birbiriyle olan girişimi incelenmiştir. Ayrıca, EN 13848-5 yönetmeliğinde uyarı, müdahale ve acil müdahale limit durumları için belirtilen düşey düzensizlik değerlerinde ortaya çıkan dinamik yük katsayıları tespit edilmiştir.

Sonuç olarak çift dingilli sistem altındaki birim direncin, tek dingil altındaki düşey birim direncin 2 katından az, eşit veya daha fazla olduğu dingil aralık mesafeleri tespit edilmiştir. Ayrıca, yönetmelikte belirtilen değerlere göre artan ve azalan profil bozukluklarındaki geçiş durumları için farklı esnekliğe sahip hatlarda Bezgin Etki Katsayısı ve Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısının yüksek bir aralıkta değiştiği görülmüştür. Dolayısıyla yönetmelikte limit durumlar için belirtilen düşey düzensizliğin hesaplanmasında, deforme geçiş uzunluğu ve deforma çukur çapı gibi özelliklere ek olarak hat esnekliğinin de göz önünde bulundurulmasının gerekliliği ortaya konmuştur.

Eylül 2019, 98 sayfa.

Anahtar kelimeler: Demiryolu mühendisliği, hat esnekliği, etkin hat esnekliği, dinamik darbe kuvveti, dingil aralık mesafesi

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF RAILROAD STIFFNESS CHANGES ON THE VERTICAL WHEEL FORCES

Erdem BALCI

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Niyazi Özgür BEZGİN

In this work, determination of track stiffness value which is used to estimate dynamic loads is aimed. The chance of one axle stiffness in the two-axle systems is observed. To this end, deformation curves under the two-axle are drawn and interaction of these deformation bowls are examined. Besides, occurring dynamic loads for vertical irregularities in the alert limit, intervention limit and intervention alert limit specified in EN 13848-5 regulation are determined.

As a result, axle distances that stiffness under two-axle is less than, equal to or more than 2 times of stiffness value under one axle load are found. Besides, in ascending and descending track profiles according to the values in regulation, it is seen that Bezgin Impact Coefficient and Extended Bezgin Impact Coefficient vary in large range. So it is proved that track stiffness must be considered while calculating vertical irregularity limites in regulation extra to the irregular transition length and deformation bowl diameter.

September 2019, 98 pages.

Keywords: Railway engineering, track stiffness, effective track stiffness, dynamic impact loads, axle spacing

1. GİRİŞ

Günümüzde şehiriçi ve şehirlerarası hareketlilik oldukça önem kazanmıştır. En kısa zamanda en yüksek verimle en uzak mesafeye gitmek hedeflenmektedir. Bir ulaşım seçeneği olarak demiryolları da günün gerekliliklerine adapte olarak yüksek hızda ulaşım sağlamaktadır. Yolculuk esnasında güvenlik ve mümkün mertebede konfor sağlanmalıdır. Demiryolu hattı üzerindeki düzensizliklerin minimum seviyede tutulması bu açıdan bir gereklilik haline gelmektedir. Hattın düzensiz olduğu noktalarda araç durağan haldeki yükünden daha fazla bir yükü hatta ileterek düzensizliğin daha da artmasına neden olmaktadır. Özellikle yüksek hızlarda bu düzensizlik artış hızı daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu durum seyir konforunu etkilediği gibi güvenliği tehdit edici seviyelere ulaşabilir. Bu nedenle seyiri kolaylaştıran bir hat tasarımı için dinamik yüklerin tahmini önem kazanmaktadır.

Dinamik yüklere yol açan nedenlerden biri de hat üzerindeki esneklik değerlerinin değişimidir. Belirli bir hıza sahip aracın düzensizlik bulunduran bir hat üzerindeki geçişi esnasında hatta aktardığı yükü tespit edebilmek için hatta ait düşey birim direnç (k) değerini doğru bir şekilde hesaplamak gerekir. Bu çalışmada, çift dingilli sistemlerde dingil etkileşimleri sonucunda hattın maruz kaldığı etkin birim direnç değerinin nasıl etkilendiği ortaya konmuştur. İki dingil arasındaki mesafenin artmasıyla çift dingilli sistem altındaki hattın esnekliğinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda önce hat esnekliği tanımlanmış, daha sonra demiryolu hattını elastik zemin üzerindeki kiriş modeline dayandıran Winkler Teorisi açıklanmıştır.

Bu çalışmada, bu esneklik değişimlerinin trenin hatta ilettiği dinamik yük üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çift dingil altındaki esnekliğin, dingiller arasındaki mesafeye göre değişimi ortaya konmuştur. Ayrıca, EN 13848-5 yönetmeliğindeki limit düzensizlik durumlarında ortaya çıkan dinamik yükler tespit edilmiştir. Hatta oluşan dinamik darbe kuvvetinin tanımı verilmiş ve bu kuvvetin tespitine yönelik yaklaşımlar incelenmiştir. Çeşitli hat esneklik ölçüm yöntemleri tanıtılmış ve dinamik yük tahminine yönelik geliştirilen Bezgin Yöntemi ve Denklemleri'ne yer verilmiştir.

Malzeme ve yöntemler kısmında, çift dingilli sistemi ifade etmek amacıyla geliştirilen bir Excel programı, EN 13838-5 yönetmeliğinde belirtilen düşey düzensizlikler ve Bezgin Etki Katsayılarının hesaplanmasında kullanılan AllTrack programı tanıtılmıştır.

Bulgular kısmında, çift dingilli sistem altındaki hat düşey birim direncinin dingiller arası mesafenin değişimiyle nasıl değiştiği gözlemlenmiş, bu değişim tablo ve grafik halinde sunulmuştur. Çift dingil altındaki birim direncin, tek dingil altındaki birim dirence her dingil mesafesindeki oranını gösteren bir abak hazırlanmıştır. Ayrıca, EN 13848-5 yönetmeliğinde belirtilen uyarı, müdahale ve acil müdahale limit durumlarındaki düşey düzensizlik değerleri için ortaya çıkan dinamik yük katsayısı hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar grafikler halinde paylaşılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. HAT ESNEKLİĞİ

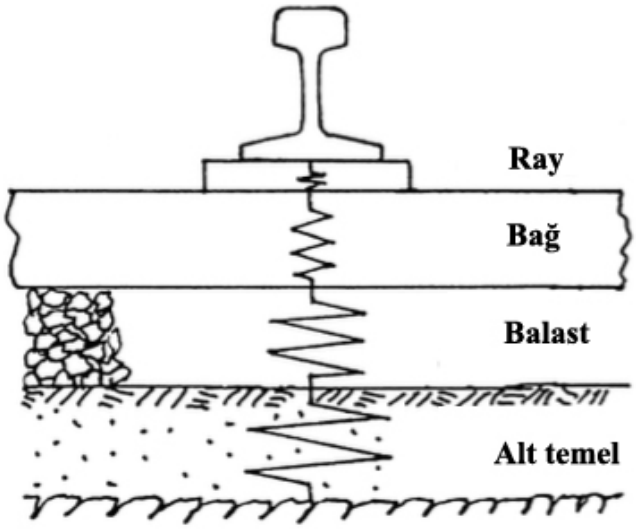
Bir demiryolu aracının hat üzerindeki hareketi, çok küçük bir alana sahip olan temas yüzeyinde gerçekleşir. Tekerden raya aktarılan yükler, altyapı katmanlarında kademeli olarak zeminin taşıyabileceği bir değere indirgenir. Bu düşey yükler altında hattın muhafaza edilmesi ve geometrik bozulma olmaması istenir. Hatta oluşabilecek sehimler, tren tarafından aktarılan dinamik yükün artmasına ve bunun sonucu olarak daha fazla sehimin meydana gelmesine neden olur. Hattın, üzerine uygulanan yüke verdiği tepki kuvveti, teker-ray arasındaki bu etkileşimde önemli rol oynar. Hat altyapısı tarafından oluşturulan tepki kuvveti, hattın esnekliğiyle ilgilidir. Hat esnekliği; sehim oluşumu, gerilim dağılımı ve titreşim seviyelerini etkileyen önemli bir parametredir (Şahin, 2011). Esneklik ve düşey birim direnç ters orantılıdır. Birim direnci düşük olan bir hat daha esnek olarak nitelendirilir.

Düşey birim direnç (k), hat üzerindeki herhangi bir noktada birim elastik sehim (w) oluşturmak için gerekli kuvvet (F) miktarıdır. Yapının elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği bu direnç, hem hattı oluşturan malzeme özelliklerine (bkz. Young Modülü), hem de bileşenlerin geometrik niteliğine bağlı olan yapısal bir fonksiyondur. Zamanın (t) bir fonksiyonu olarak Denklem 2.1 ile ifade edilebilir.

$$k(t) = F(t)/w(t) \tag{2.1}$$

$$k = \frac{EA}{L} \tag{2.2}$$

Bir demiryolu enkesitinde ray pedleri, traversler, balast, alt balast, alt temel gibi çeşitli katmanlar bulunur. Her bir katman; malzeme özelliği, kesit alanı, uzunluk ve kalınlığına göre farklı birim direnç değerine sahiptir (Denklem 2.2). Tablo 2.1'de farklı hat elemanlarının ortalama birim direnç katsayısı verilmiştir. Bir hat enkesitinde ray gibi yüksek sertliğe sahip elemanlar ile balast, doğal zemin gibi düşük sertlikteki malzemeler bir arada bulunur. Bu kompleks yapıyı ifade etmek için tüm bileşenlerin (ray eğilme momenti de dahil) esneklik değerlerinin bir kombinasyonu olarak genel düşey birim direnç kullanılır (Şekil 2.1). Her hat için teorik olarak optimum bir esneklik değeri vardır. Esneklik değeri ve esnekliğin belli bir mesafe boyunca değişimi, hat-tren etkileşiminde oldukça önemli bir rol oynar.



Şekil 2.1: Yay katmanlarını içeren hat modeli (Kerr, 2000).

$$\frac{1}{k_{sistem}} = \frac{1}{k_{ped}} + \frac{1}{k_{travers}} + \frac{1}{k_{balast}} + \frac{1}{k_{altbalast}} + \frac{1}{k_{zemin}} \tag{2.3}$$

Bazı kaynaklarda kontrol edilmesi daha mümkün olan ray pedi, diğer bileşenlerin kombinasyonundan (hat yatağı) ayrı tutulur.

$$\frac{1}{k_{sistem}} = \frac{1}{k_{hat}} + \frac{1}{k_{ped}} \tag{2.4}$$

Tablo 2.1: Farklı bileşenlere ait düşey birim direnç katsayıları.

Eleman	Düşey birim direnç katsayısı (10^6 N/m)
Ray	50.000-100.000
Ahşap travers	500-800
Beton travers	12.000-15.000
Balast	100-300
Kauçuk elastik tabaka	100-200
Çakıl/kaya zemin	20-80
Balçık zemin	5-15
Killi zemin	15-20

Sabit esnekliğe sahip bir hat her noktada eşit deforme olacağından, teker, aynı sehime sahip ray profili üzerinde oturur ve tren hattın esnekliğinden etkilenmez (Powrie ve Le Pen, 2016). Ancak hat boyunca esneklik sabit kaldığında dahi esnekliğin değeri önemli bir parametredir. Çünkü bu değer, hatta uygulanan yükün ne kadarlık bir mesafe boyunca etkiyeceğini gösterir. Esnekliğin hat boyunca değişmesi ise farklı seviyede oturmalara neden olur. Trenin lineer bir

hat yerine farklı yükseklikteki bölgeler üzerinde hareket etmesi, hatta uyguladığı dinamik kuvveti artırır. Esneklik değişimi ani veya kademeli olabilir. Tünel ve köprü giriş-çıkışları, balastlı hattan balastsız hatta geçiş noktaları, ani esneklik değişimlerinin görüldüğü yerlerdir. Ani değişimin gerçekleştiği yerler olan yumuşak noktaların (soft spots) yerinin hattın yapısal durumuna, yumuşak noktanın büyüklüğünün ise hattın fonksiyonelliğine etki eden önemli parametreler olduğu görülmüştür (Mohamed ve diğ., 2013).

Altyapı tabakalarının kalınlık ve malzeme özelliklerinin değişimiyle ise kademeli esneklik değişimi gerçekleşir. Taneli malzemelerin sıkışma ve porozitesinin zaman içerisinde değişimi, hat boyunca drenaj koşullarının değişimi (Bezgin, 2017), balast kirlenmesi, bağlantı noktaları esneklik değişimine neden olan faktörlerdir. Esneklik değerinin hat boyunca değişmesi sonucu oluşan farklı oturma değerleri, tren geçişinde geometrik sapmalara neden olur. Bu sapmalar sonucu hatta dinamik darbe kuvvetleri etkir; bu da oturmaların daha da artmasına yol açar. Sonuç olarak hat performansı giderek kötüleşir.

Düşük esnekliğe sahip, birim direnci yüksek olan hatta elastik sehimler ve raylardaki eğilme gerilmeleri daha az olur. Buna karşılık, hat üzerindeki yük daha az travers tarafından dağıtılır ve alt katmanlara iletilen gerilmeler artar. Bu durum balast yıpranmasına ve temas yorgunluğuna yol açar (Wehbi ve Musgrave, 2017). Teker ile yuvarlanma yüzeyi arasındaki sert etkileşim, rayda ve bağlantı elemanlarında hasara neden olabilir.

Birim direnci düşük olan, fazla esnek bir hatta ise zemin ve balast tabakasındaki eğilme momenti ve gerilmeler daha düşüktür. Ancak yüksek hat sehimleri gerçekleşir. Raylardaki eğilme gerilmeleri artar ve hat geometrisinde bozulmalar meydana gelir. Bu nedenle fazla esnek hatlar kötü performans gösterir.

2.1.1. Esneklik Optimizasyonu

Hat işletimi süresince meydana gelen geometrik bozulmalar, ray yorgunluğu ve çeşitli hat bileşenlerindeki bozulmalar, hattın esnekliğini önemli derecede etkileyen faktörlerdir (Leposava ve diğ., 2012). Hat tasarımında bu faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Esneklik, hatta ve taşıta etki eden dinamik gerilmeler açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle hat için en uygun esneklik değeri belirlenmelidir. Hattın optimum esneklikte tasarlanması ve inşa edilmesi, hat kullanımı boyunca gerekli bakım masraflarından önemli derecede tasarruf sağlar.

Her hat için teorik olarak belli bir optimum değer vardır. Hattın, ray eğilmesini azaltacak ve hatta stabilite kazandıracak kadar sert olması; yükleri zemine dengeli olarak dağıtabilecek kadar esnek olması istenir. Hat esnekliği, hattı oluşturan tüm bileşenlerin bir kombinasyonu olduğundan, artan veya azalan esnekliğin her bileşende farklı etkileri olur. Esneklik azaldıkça alt temel ve raydaki gerilmeler de azalır; ray pedindeki gerilmeler artar. Balast ve traverste ise gerilmeler belli bir esneklik değerine kadar azalır, daha sonra artmaya başlar (Wehbi ve Musgrave, 2017). Optimum hat esnekliği hesaplanırken genel bir değerlendirme yapmak için tüm bileşenler bir arada düşünülmeli ve maliyet de hesaba katılmalıdır.

Elastik gerinim enerjisi, malzemelerin sehim süresince serbest bıraktığı enerji miktarı olarak tanımlanır (Gavin, 2015) ve esneklik optimizasyon yöntemlerinden bir tanesidir. Çünkü hat bileşeninde meydana gelen yorulma, elastik olmayan gerinim enerjisinin dağıtımıyla ilgilidir (Kujawski ve Ellyn, 1995).

$$\partial = \frac{1}{2} V \varepsilon \sigma^2 \tag{2.5}$$

∂:Malzemenin elastik gerinim enerjisi
V: Hacim
σ: Gerilim
ε: Malzeme şekil değiştirmesi

En uygun esneklik değerini belirlemek için kullanılan yöntem toplam gerinim enerjisini minimize etmektir. Böylece yorulma ve malzeme tahribatları da minimum değere indirgenir. Daha uzun ömürlü, daha az bakım maliyetli ve yüksek performanslı hatlar için bu gereklidir.

$$min(\partial_S) = min\,[\partial_R(k_{Gi}) + \partial_{TR}(k_{Gi}) + \partial_B(k_{Gi}) + \partial_Z(k_{Gi}) + \partial_T(k_{Gi}) + \partial_P(k_{Gi})] \tag{2.6}$$

∂_S: Sistemin toplam gerinim enerjisi
$\partial_R(k_{Gi})$: i. birim dirençteki ray gerinimi
$\partial_{TR}(k_{Gi})$: i. birim dirençteki travers gerinimi
$\partial_B(k_{Gi})$: i. birim dirençteki balast gerinimi

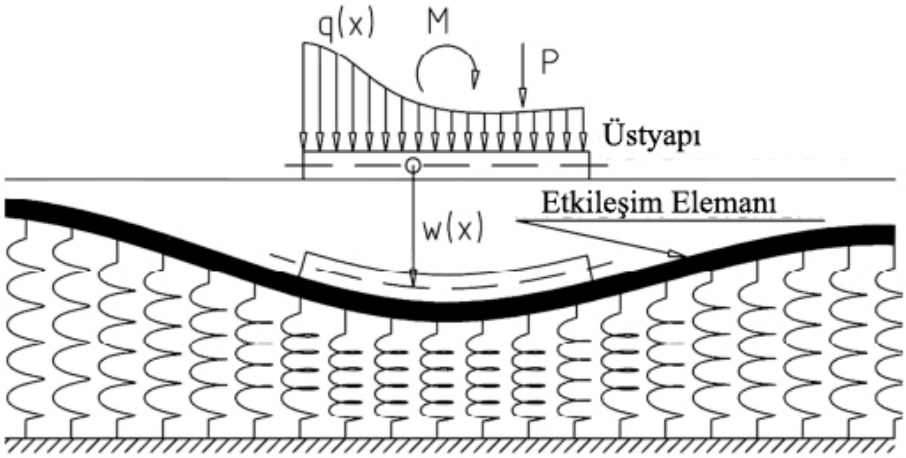
İngiliz Demiryolları için yapılan bir çalışmada (Wehbi ve Musgrave, 2017) toplam gerinim enerjisinin, düşey birim direnç 160 kN/mm'ye giderken minimum değerine ulaştığı görüldü. Ancak pratikte bu değeri sağlamak oldukça maliyetli ve bir bakıma gereksizdir. Aynı

çalışmada, düşey birim direnç değeri 45 kN/mm'yi aştıktan sonra toplam gerinim enerjisinin öneminin azaldığı görülmüştür. Farklı hızlar, dingil yükleri ve hat kalitesi için tekrarlanan deneyde, optimum birim direnç değeri sabit olarak 45 kN/mm olarak çıkmıştır. Gerçek bir hat üzerinde doğrudan bu değeri uygulamak ise oldukça zordur. Çünkü hattın üzerinde bulunduğu zemin de hat esnekliğini etkileyen parametrelerden biridir. Bileşenler, optimum değeri sağlayacak kalınlık ve malzeme özelliklerinde tasarlanıp yerleştirilse dahi, zemin esnekliğinin kontrolü mümkün değildir.

2.2. WINKLER TEORİSİ

Elastik zemin üzerindeki kiriş ve döşemelerin davranışlarını temsil etmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Zemin gibi kompleks bir yapının temsil ve analizi zorlu bir mühendislik problemidir. Ancak demiryolu mühendisliği açısından zemin davranışlarının bilinmesi veya tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle zemini ifade etmek için bazı varsayımlarda bulunarak farklı metotlar geliştirilmiştir. 1867'de Emil Winkler tarafından geliştirilen Winkler teorisi bunlardan bir tanesi olup zeminin, uygulanan yük altındaki sıkışma miktarını oldukça yalın bir biçimde gösteren bir yöntemdir.

Demiryollarında ray üzerindeki yükler balast tabakasına ray bağlantıları sayesinde iletilir. Bağlanma çeşitlerine göre iki tür hattan bahsedilebilir: boyuna bağlı (longitudinal-tie) hatlar ve çapraz bağlı (cross-tie) hatlar. Çapraz bağlı hatlarda her ray ayrı olarak desteklenirken, boyuna bağlı hatlarda ray desteğinde bir süreklilik hali mevcuttur. Her rayın, zemin tarafından sürekli olarak desteklenen bir kiriş olarak düşünülmesi ile bu hatların analizi mümkün olmuştur. 1867'de Winkler tarafından tanıtılan bu metot, demiryolu mühendisliğinde halen kullanılmaktadır. Winkler modelinde zemin sınırsız sayıda yanyana dizili yaylarla ifade edilir. Zeminin sıkışması, uygulanan yük altında yayların sıkışmasına benzetilir.



Şekil 2.2: Hat desteklerinin yaylarla ifade edilmesi (Aron ve Jonas, 2012).

2.2.1. Boyuna Bağlı Hatlar

X noktasındaki düşey ray sehimi w(x), ray esneklik modülü EI, düşey teker yükleri q(x), boyuna bağ ve zemin arasındaki temas basıncı p(x) olmak üzere birbirine yakın yaylar üzerindeki elastik kirişin eğilme tepkisi şu şekildedir:

$$EI\ \frac{d^4w}{dx^4} + p(x) = q(x) \tag{2.7}$$

Bir x noktasındaki basınç ile o noktada oluşan sehimin orantılı olduğu düşünülürse, hattın esneklik modülü u olmak üzere:

$$p(x) = uw(x) \tag{2.8}$$

olarak yazılabilir. Burada basınç ile sehim arasındaki orantıyı temsil eden u, zemine ait bir parametredir.

x=0'da yoğunlaşan P teker yüküne maruz kalan çok uzun bir ray-bağlantı kirişi için Schwedler (1882) Denklem 2.7'yi türeterek şu denkleme ulaştı:

$$w(x) = \frac{PB}{2u} e^{-Bx}[cos(Bx) + sin(Bx)],\ \text{x>0 için} \tag{2.9}$$

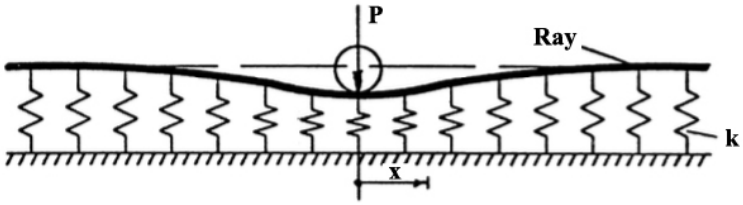
$$B = \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \tag{2.10}$$

olmak üzere Denklem 2.9'dan elde edilecek eğilme momenti şu şekildedir:

$$M(x) = -EIw^n(x) = \frac{P}{4B} e^{-Bx}[cos(Bx) - sin(Bx)] \quad , x>0 \tag{2.11}$$

2.2.2. Çapraz Bağlı Hatlar

Çapraz bağlı hatların analizi boyuna bağlı hatlara göre daha zordur. Her ray için ayrı bir destek olduğundan özellikle eski zamanlarda (1870 sonrası) karmaşık hesaplamaları yapmak külfetli olmuştur. Bu nedenle ray, önceleri ayrık rijit destekler üzerindeki bir kiriş olarak ele alınırken, daha sonra ayrık elastik destekler üzerindeki bir kiriş olarak düşünülmüştür. En nihayetinde ise sürekli destekli kiriş olarak ele alınmıştır.



Şekil 2.3: Çapraz bağlı hatlarda analitik model (Kerr, 2000).

Şekil 2.3'de gösterilen Winkler modeli boyuna bağlı hatlara ait model ile oldukça benzerdir. Tek bir ray için diferansiyel denklem, Denklem 2.7'ye benzer şekilde yazılabilir:

$$EIw^{IV} + uw = q \tag{2.12}$$

EIw^{IV} ray eğilme etkisini, uw sürekli olarak dağıtılan basıncı ve q düşey teker yüklerini ifade eder.

Boyuna bağlı hatlarda EI, ray ve boyuna bağın eğilme rijitliğinin bir kombinasyonudur. Ancak çapraz bağlı hatlarda E, ray çeliğinin Young modülünü ve I, ray atalet momentini ifade eder. Bu durumda k sabiti, çapraz bağın eğilme direnci, düşey sıkıştırılabilirliği ve bağ aralığı gibi özelliklerini barındırır. Buna ek olarak bağlantı elemanı, elastik ped, balast ve alt temel etkilerini de yansıtır. Ancak ray tepkisini içermez.

Denklem 2.7 ile Denklem 2.12 aynı formda olduğundan dolayı çok uzun bir ray üzerinde x=0 noktasında etkiyen teker yükü de Denklem 2.9'a benzer şekilde şöyle olur:

$$w(x) = \frac{PB}{2u} e^{-B|x|}[cos(B|x|) + sin(B|x|)] \quad , -\infty<x<\infty \tag{2.13}$$

$$B = \sqrt[4]{\frac{u}{4EI}} \tag{2.14}$$

olmak üzere elde edilen eğilme momenti:

$$M(x) = -EIw^n(x) = \frac{P}{4B} e^{-B|x|}[cos(B|x|) - sin(B|x|)] \quad , -\infty<x<\infty \tag{2.15}$$

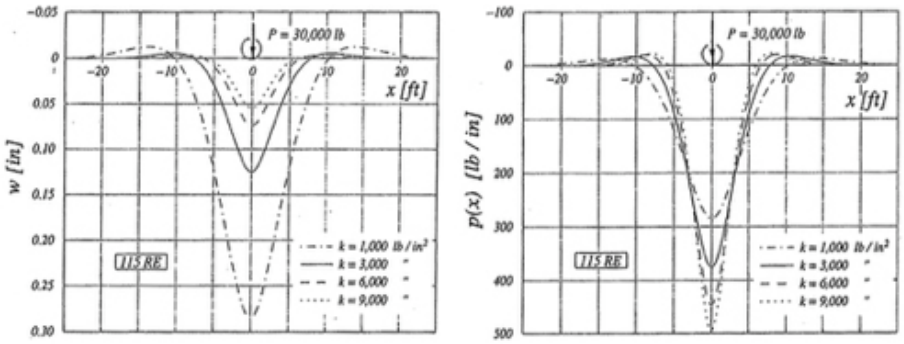
Yapılan analizlerde maksimum sehimin x=0 noktasında, yani teker merkezi altındaki noktada olduğu görülmüştür (Kerr, 2003). Bu durumda oluşan sehim:

$$w_{max} = w(0) = \frac{PB}{2u} \tag{2.16}$$

ve basınç dağılımı:

$$p_{max} = p(0) = uw(0) = \frac{PB}{2} \tag{2.17}$$

Oluşan basınç, sehim ile orantılı olduğundan teker altındaki basınç ve sehim grafikleri de benzer olur. Basınç, sehimin "k" ile genişletilmiş halidir. Ancak, Şekil 2.4'teki w(x) ve p(x) değerleri karşılaştırıldığında hattın düşey birim direnci (k) arttıkça, w_{max} azalırken p_{max}'ın arttığı görülmektedir.



Şekil 2.4: 115RE ray profilinde teker yükü altında oluşan w(x) ve p(x) grafikleri (Kerr, 2003).

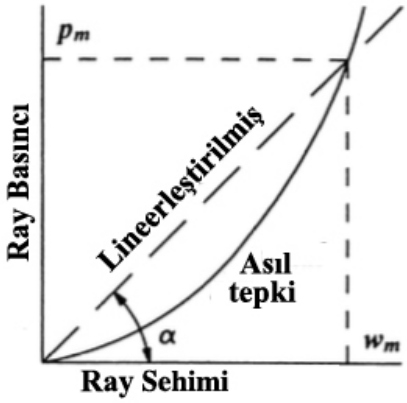
Winkler Teorisi oldukça basit bir şekilde zemini modelleyerek sıkıştırma miktarını hesaplasa da, pratikte durum daha farklı olmaktadır. Winkler Teorisine göre yapı elemanına uygulanan yük, elemanın temas ettiği zemin yüzeyinin her noktasında eşit derecede sehime neden olur. Gerçekte ise zemin üzerine uygulanan kuvvet, Winkler Teorisindeki gibi devamsızlık

göstermez. Sıkışma miktarı, yükün uygulandığı konumdan itibaren düzenli olarak azalarak devam eder.



Şekil 2.5: Elastik temelde üniform basınç altındaki zeminde Winkler modeli ve pratik uygulama karşılaştırması (https://www.mae.ust.hk/~meqpsun/Notes/Chapter4(202).PDF).

Winkler teorisi, ray-teker yüzeyinde sürekli temas olduğunu varsayar. Ancak pratikte temasın kesildiği zamanlar olabilir. Sonuç olarak uygulanan kuvvet-sehim ilişkisi gerçekte bir eğri şeklindeyken, Winkler teorisi yardımıyla bu eğriye yakın ve idealize edilmiş bir doğru elde edilir.



Şekil 2.6: Yük altında sehim, Winkler ve pratik uygulama karşılaştırması (Kerr, 2000).

2.3. DİNAMİK DARBE KUVVETLERİ

Hat tasarımında kullanılan dört çeşit yükleme tipi vardır. Bunlar; statik, yarı-statik, dinamik yükler ve dinamik darbe yükleridir. (Dyk ve diğ., 2013) Statik yükleme, demiryolu aracının durağan haldeyken hatta aktardığı yüktür. Yarı-statik yükleme, kurbalarda oluşan merkezcil kuvvet bileşeninin etkimesi gibi, hıza bağlı ve zamandan bağımsız olarak etkiyen yüklemedir. Demiryolu aracı hareket ederken ray-teker yüzeyinde meydana gelen yüksek frekanslı etkileşimler nedeniyle oluşan yük ise dinamik yük değeri olarak adlandırılır. Bu değer, dingillerin durağan halde hatta aktardığı statik yük değerinden fazladır. Statik yük değerinden

daha büyük bir dinamik yük değerinin ortaya çıkma nedeni iki kategoride incelenebilir.

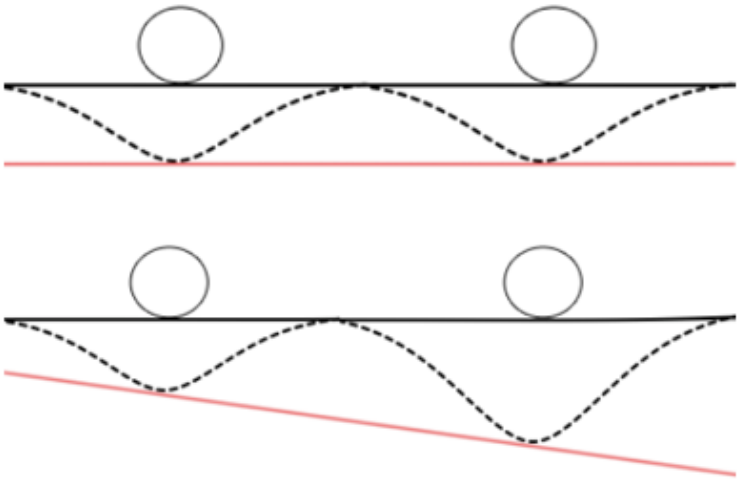
Dinamik yükü etkileyen trene ait özellikler:

- Dingil yüklerindeki değişim
- Dingil aralıkları
- Teker rijitliği ve teker düzlükleri
- Tekrarlı yük sayısı
- Tren hızı
- Süspansiyon özellikleri

Dinamik yükü etkileyen altyapı özellikleri:

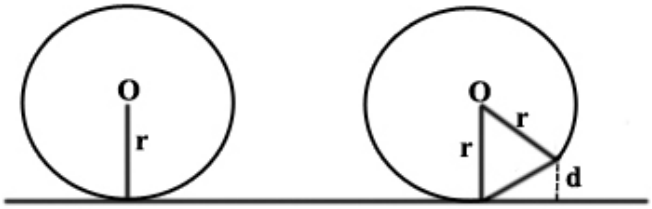
- Hat profil bozuklukları
- Hat sehimleri
- Desteklenmemiş traversler
- Kaynak noktalarındaki düzensilikler

Hattaki bozulmalar, tekerin bir doğru üzerinde hareket etmesini engeller. Özellikle hat boyunca esnekliğin değişimi nedeniyle meydana gelebilecek bu durumda, tekerin sahip olduğu statik yük, h yüksekliğinden düşerek hatta aktarılır.



Şekil 2.7: Farklı oturmalara sahip hatta tekerin h yüksekliğinden düşmesi.

Benzer şekilde tepesinde düzleşme taşıyan tekerin hatta teması, düzlük derinliği (d) kadar yükseklikten düşerek gerçekleşir.



Şekil 2.8: Düz teker nedeniyle tekerin d yüksekliğinden düşmesi.

Tren hızının artmasıyla bu faktörlerin neden olduğu dinamik etki de artar. Eğer bu etki sınırlı bir zaman içerisinde meydana geliyorsa hat üzerinde ani bir darbe etkisi yaratır. Bu ani yük artışlarına dinamik darbe kuvveti denir (Bezgin, 2017).

Demiryollarının mekanik tasarımı açısından hattın maruz kalacağı maksimum dinamik yük değerini bilmek gereklidir. Ray servis ömrünün uzun olabilmesi için hattın maruz kalacağı maksimum yüke uygun olarak ray çeliği dayanımı seçilmelidir (Doyle, 1980). Dinamik yük değerini belirlemek için demiryolu aracı özelliklerini kullanan, hatta bağlı özellikleri kullanan ve her ikisini birden kullanan yaklaşımlar mevcuttur. Ancak bu değeri en temel haliyle, statik yükün bir katsasıyla çarpımı olarak ifade edebiliriz.

$$P_d = \phi\, P_s \tag{2.18}$$

P_d : Dinamik teker yükü (Kn)
ϕ : Dinamik yük faktörü (daima >1)
P_s : Statik teker yükü (Kn)

Hıza bağlı olarak yük artış miktarını tespit etmek için tarih boyunca birçok denklem geliştirilmiştir. İlk geliştirilen kinematik denklemlerde, dinamik yük faktörü hıza bağlı olarak değişen bir parametre olarak tanımlanmıştır. Ancak hat esnekliğinin de dinamik yük üzerinde önemli bir etkisi vardır. Farklı yaklaşımlar ile geliştirilen bazı denklemler aşağıda sıralanmıştır.

2.3.1. Talbot (AREA)

A.N. Talbot, Amerikan Demiryolu Mühendisliği Derneği (AREA) için 1910'lu yıllarda ekibiyle birlikte, test sonuçlarına dayalı bir faktör denklemi ortaya koymuştur. Kuzey Amerika'da yapılan hat analizlerinde hala kullanılmaktadır.

$$\phi = 1 + 5{,}21\frac{V}{D} \tag{2.19}$$

V:Araç hızı (km/s)
D: Teker çapı (mm)

Denkleme göre, dinamik yük faktörü trenin hızıyla (V) orantılı olarak artar. Teker çapının (D) artmasıyla, teker-ray etkileşimi daha büyük bir alanda gerçekleşir. Dolayısıyla dinamik yük faktörü azalır.

2.3.2. Eisenmann

Eisenmann dinamik faktörü, Zimmermann kiriş modelini kullanarak ray eğilme gerilmelerinin ve sehimlerin normal dağılım gösterdiğini varsayar (Esveld, 2001). Maksimum ray gerilmesi veya ray sehimi (x) şu denklemle ifade edilebilir:

$$x = \bar{x} + \bar{s}\, t \tag{2.20}$$

$\bar{x}$: Ortalama ray sehimi
$\bar{s}$: Ortalama sehim standart sapması
t: Üstyapı parçasının olasılıksal önemi

Ortalama ray sehimine ($\bar{x}$) bağlı olarak ortalama sehim değerinin standart sapması ($\bar{s}$) ise şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{s} = \bar{x}\, \delta\, \eta \tag{2.21}$$

δ : Hat bakım durumu faktörü
η : Hız faktörü

Denklem 2.20, daha basit şekilde tek bir katsayıyla da ifade edilebilir.

$$x = \phi\, \bar{x} \tag{2.22}$$

$\bar{x}$: Ortalama ray gerilmesi (veya ray sehimi)
ϕ : Hat bakım durumu ve tren hızı ile ilgili etki faktörü

Denklem 2.21, Denklem 2.22 içerisinde yazılır ve tüm parametreler tek bir katsayıyla (ϕ) ifade edilirse, etki faktörü olarak anılan bu katsayı şu şekilde bulunur:

$$\phi = 1 + \delta\, \eta\, t \tag{2.23}$$

δ: hattın kalitesini ve bakım durumunu ifade eder.

Tablo 2.2: Hat durumuna göre **δ** değerleri**.**

δ	Hat Durumu
0.1	Oldukça iyi
0.2	İyi
0.3	Kötü

Bakımlı (hat durumu oldukça iyi) bir hattaki düzensizlikler daha az olacağı için, kötü bir hatta göre dinamik yük faktörü 3 kat daha az olur. η değeri aracın hızına (km/sa) bağlı olarak değişen bir faktördür.

Tablo 2.3: Hıza göre değişen **η** değerleri.

η	**V**
1	< 60 km/s
$1+\frac{(V-60)}{140}$	60 km/s – 200 km/s

t değeri, söz konusu üstyapı bileşeni için gerilmelerin oluşma olasılığına göre belirlenir.

Tablo 2.4: Gerilme türlerinin oluşma ihtimalleri (Esveld, 2001).

t	Gerilme türü	Oluşma İhtimali (%)
1	Ray-teker temas gerilmeleri ve alt temel gerilmeleri	68.3
2	Yanal yük ve balast yatağındaki gerilmeler	95.4
3	Ray eğilme gerilmeleri ve bağlantı elemanı gerilmeleri	99.7

2.3.3. ORE Formülü

Uluslararası Demiryolu Birliği Araştırma ve Deney Ofisi (ORE) tarafından geliştirilen formül, hat ölçüm değerlerine dayanmaktadır. Oldukça kapsamlı olup, diğer formüllerden farklı olarak kurp özelliklerini, lokomotif bakım durumunu ve araç ağırlık merkezini hesaba katar (Dyk ve diğ., 2014). ORE dinamik etki faktörü, hıza bağlı üç katsayının bir bileşimidir.

$$\phi = 1 + \alpha' + \beta' + \gamma' \tag{2.24}$$

α′ değeri hat seviyesine, aracın süspansiyon özelliklerine ve araç hızına bağlıdır. Mükemmel bir hat için $\alpha' = 0$ olmalıdır. Ancak ölçüm hataları nedeniyle hat seviyesinin etkisi ile α′ arasındaki ilişkiyi tahmin etmek güçtür. Tesviye kusurlarına sahip aliymanda α′ değeri %35'e

yaklaşırken, kurplarda %18'i aşmadığı görülmüştür (Doyle, 1980). En kötü durum için α´ değeri hıza bağlı olarak şu bağıntıyla hesaplanabilir:

$$\alpha' = 0{,}04 \left(\frac{V}{100}\right)^3 \tag{2.25}$$

V: Araç hızı (km/s)

Buradaki 0,04 değeri aracın süspansiyon esnekliğini yansıtmak için kullanılan bir azaltma katsayıdır. β′ katsayısı, araç teker yükünde kurp nedeniyle meydana gelen kaymadır. Fransız Demiryollarına (SNCF) göre;

$$\beta' = \frac{2d.h}{g^2} \tag{2.26}$$

Alman Demiryollarına (DB) göre;

$$\beta' = \frac{V^2(2h+c)}{127.R.g} - \frac{2c\ .h}{g^2} \tag{2.27}$$

V : Araç hızı (km/s)
d : Dever eksikliği (m)
h : Araç ağırlık merkezinin yüksekliği (m)
c : Dever (m)
R : Kurba yarıçapı (m)
g : Hat genişliği (m)

γ´ katsayısının bağlı olduğu parametreler ise şöyledir:

- Hattın yaşı
- Araç hızı
- Asılı travers olma olasılığı
- Araç tasarımı
- Lokomotif güç ünitelerinin bakım durumu

γ´ katsayısı eğer elde deneysel veri yok ise şu formül ile hesaplanabilir:

$$\gamma' = \gamma_0 = 0{,}10 + 0{,}017\left(\frac{V}{100}\right)^3 \quad (2.28)$$

γ' değeri hesaplanırken, Denklem 2.28 ile bulunan y_0 değerine ek olarak, lokomotifin bakım durumunu temsil eden bir faktör (a_0) ve hat bakım faktörün (b_0) etkileri de hesaplamaya dahil edilebilir.

$$\gamma' = \gamma_0 + a_0 + b_0 \quad (2.29)$$

Yapılan ölçüm ve hesaplamalarda aliymandaki α' değerinin kurptaki $\alpha' + \beta'$ değerinden çoğu zaman daha büyük olduğu görülmüştür (Doyle, 1980). β' katsayısı sonuç üzerinde çok etkili olmadığı için hesaplamada kullanılmayabilir. ORE (1965) tarafından çeşitli hat ve lokomotif durumlarında güvenli geçişi muhafaza eden y_0, a_0 ve b_0 değerleri elde edilmiştir. ORE tarafından önerilen değerler şu şekildedir:

- 140 km/s hıza kadar izin verilen normal hatlarda;

γ_0 = 0.11 (gözlem sonucu elde edilmiştir.), a_0 = 2 ve b_0 = 1.3

- 200 km/s hıza izin verilen özel hatlarda, yeni araçlar kullanılıyorsa;

γ_0= 0.24, a_0 = 1.5 ve b_0 = 1.2

2.3.4. İngiliz Demiryolları Formülü

Yüksek hıza sahip bir tren, eğim içeren ray bağlantılarından geçtiği sırada teker-ray arası temas kısa süreliğine kesilir. Birinci ray ile ikinci ray arasındaki eğimli bölgede kesilen temas sonucu, teker bir raydan diğerine sıçrayarak iniş yapar. Bu durum teker-ray yüzeyinde iki çeşit darbe kuvvetine yol açar. P1 kuvveti, yüksek frekanslı olup darbeden hemen sonra gerçekleşir ve kısa sürelidir. P2 kuvveti ise düşük frekanslı olup uzun süreli bir kuvvettir. P1 kuvveti darbenin gerçekleştiği temas yüzeyinde hasara neden olabilirken, P2 kuvveti etkileşim alanındaki diğer hat bileşenlerine ve vagona da zarar verebilir (Mandal ve diğ., 2016). İngiliz Demiryollarının geliştirdiği formül, eğimli ray bağlantıları gibi ayrık düzensizlik durumlarını ele alır. Araç hızı, süspansiyonsuz araç kütlesi, hat birim direnci ve hat düzensizlik etkilerini bir araya getirir.

İngiliz Demiryollarına göre eğimli ray bağlantı noktalarında meydana gelen darbe kuvveti P1, Denklem 2.30'daki şekilde ifade edilir. Daha sonra Jeong P2 formülünü geliştirilmiştir.

$$P_1 = P_0 + 2\,(a_1 + \alpha_2)\,V\sqrt{\frac{Kt\,m_u}{g}} \qquad (2.30)$$

P_1 : Dinamik teker yükü (kN)

P_0 : Statik teker yükü (kN)

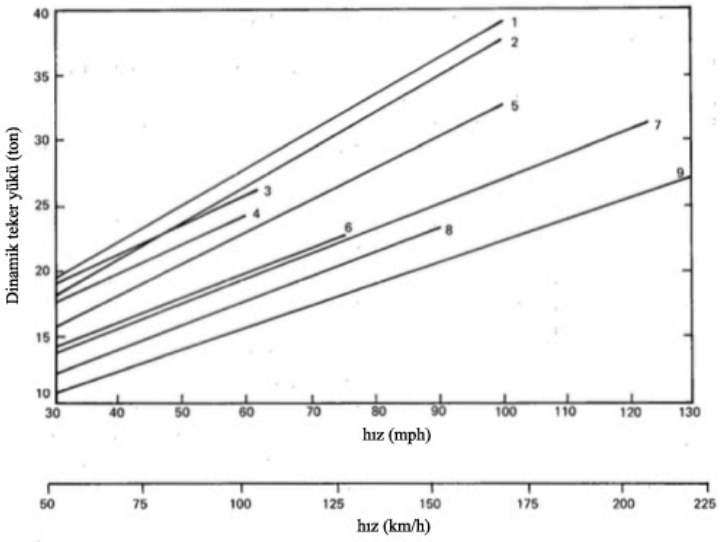
(α_1+α_2) : Toplam ray eğim açısı (radyan)

V : Araç hızı (km/s)

K_t : Bağlantı noktasınaki hat birim direnci (kN/mm)

m_u : Bir tekerin süspansiyonsuz ağırlığı (kN)

g : Yerçekimi ivmesi (m/sn²)



No	Araç	Statik dingil yükü (ton)	Yaylanmaz kütle (ton)
1	KESTREL (Diesel Elec) Loco, Co-Co	23	4.25
2	Class 86 Elec. Loco, Bo-Bo	20.45	4.22
3	100 Tonne Tank Wagon	25	2.8
4	45 Tonne Tank Wagon	22.5	2.7
5	Class 55 Deltic Diesel Elec. Loco, Co-Co	17.6	3.3
6	Freightliner Wagon	17.5	1.92
7	Special Elec. Multiple Unit	16.5	2.0
8	6 Axle Freightliner Wagon	13.5	1.9
9	Advanced Passenger Train	12	1.5

Şekil 2.9: Farklı araçlar için hız ile birlikte artan dinamik yük artışları (Doyle, 1980).

2.3.5. Diğer Denklemler

Tablo 2.5: Dinamik yük faktörü için geliştirilen diğer denklemler.

Geliştiren	Dinamik Yük Faktörü (ϕ)	Özellikleri
Hint Demiryolları	$1 + \frac{V}{58.14\sqrt{U}}$	Hattın durumunu, ölçülen hat modülü değerleri cinsinden ifade eder.

Tablo 2.5 (devam): Dinamik yük faktörü için geliştirilen diğer denklemler.

Alman Demiryolları	V≤100 km/h; $1+\frac{V^2}{3x10^4}$	Deutsche Bahn (Alman Demiryolları) tarafından 1943'de sunuldu. V < 200 km/s için geçerlidir.
	V>100 km/h; $1+\frac{4.5V^2}{10^5}$	
Güney Afrika Demiryolları	$1+4.92\frac{V}{D}$	Talbot denklemi, daha dar hat genişlikleri için modifiye edilmiştir.
Clarke	$1+\frac{19.65V}{D\sqrt{U}}$	AREA ve Hint formülünün bir kombinasyonudur. Deneysel sonuçlar ile üretilmemiştir.
WMATA	$(1+3.86x10^{-5}V^2)^{2/3}$	Washington Metropolitan Area Transit Authority tarafından 1968 yılında geliştirilmiştir.

V: Tren hızı (km/s)

U: Hat modülü (MPa)

D: Teker çapı (mm)

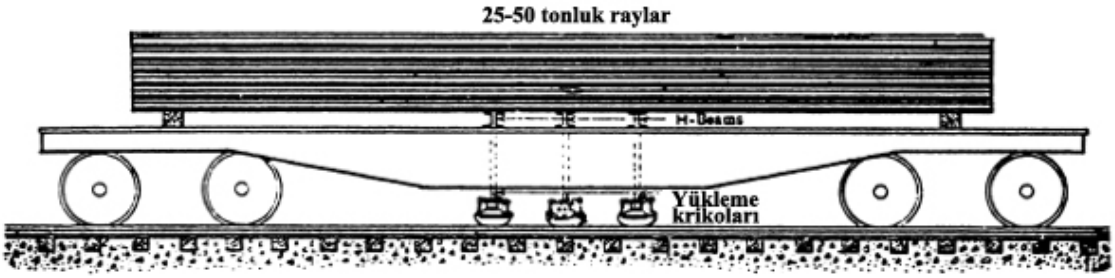
2.4. HAT ESNEKLİĞİ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Hat esnekliği; sehim oluşumu, gerilim dağılımı ve hattaki titreşim seviyelerini ilgilendiren önemli bir faktördür. Hatta gerekli stabiliteyi kazandırmak ve dolayısıyla güvenli tren geçişlerine olanak sağlamak için optimum esneklik değeri sağlanmalıdır. Yüksek ve düşük hat esnekliklerinde meydana gelen problemler Hat Esnekliği konusunda incelenmiştir. Hat esnekliğinin ölçümü, yeni tasarlanacak demiryollarında esneklik değerlendirmesi yapılmasına ve uygun çözümlerin sunulmasına olanak sağlar. Bu açıdan demiryolu mühendisliğinin gelişimi için bir temel oluşturur. Ölçüm yöntemleri 2 kategoride incelenebilir. Bunlar, farklı aralıklarda ölçüm yapan statik ölçüm yöntemleri ve hat esnekliğini hat boyunca sürekli olarak ölçen devamlı ölçüm yöntemleridir. Hat esnekliği, titreşim frekansının bir fonksiyonudur. Bu nedenle farklı frekans aralıkları için farklı ölçüm yöntemleri kullanılmalıdır. Düşük frekanslı hatlarda yapılan ölçümler, geoteknik problemlerin araştırılması için daha uygundur. Yüksek frekanslı hatlarda tren-hat etki kuvvetleri ve parazit durumları incelebilir.

2.4.1. Statik Ölçüm Yöntemleri

2.4.1.1. Hidrolik Kriko Yüklemesi ile k Tespiti

Düşey birim direnci (k) belirlemek için Timoshenko ve Langer'a (1932) ait araştırmalarla desteklenen ve uzun yıllar kullanılan bir yöntemdir. Bir noktada teker yükü nedeniyle meydana gelen ray sehimi ölçüm cihazıyla kaydedilir. Farklı noktalarda yapılan yüklemelerle yük-sehim eğrisi elde edilir. Bu eğrinin eğiminden düşey birim direnç (k) değeri hesaplanır.



Şekil 2.10: Talbot komitesi yükleme cihazı (Talbot Komitesi, 1918).

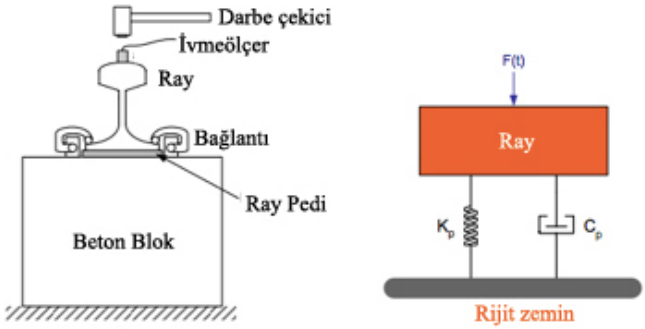
Bu yöntem için gerekli özel araç Talbot Komitesi tarafından (1918) kullanılmıştır. Düz bir araç üzerinde 25-50 ton ağırlığında raylar bulunur. Alt kısmında yükü gösteren üç adet kriko mevcuttur. Dıştaki krikolar, çift dingilli yük vagonlarını simüle etmek için; orta kriko ise tek dingilli yükleri temsil etmek için kullanılmıştır.

Hidrolik kriko yüklemesi ile basit bir şekilde ölçüm yapılabilir. Tek bir ölçüm cihazı kullanmak ve bu ölçümleri tek bir denklem üzerinde kullanmak yeterlidir. Ayrıca bu yöntemle, ölçüm yapılan alandaki ray eğilmeleri nedeniyle, eğimden etkilenen alandaki balast ve alt temel koşullarının ortalaması alınmış olur (Kerr, 2000).

Yöntemin en büyük dezavantajı özel bir araca ihtiyaç duymasıdır. Böyle bir araç daha önce tasarlanmış ve kullanılmış olsa da (Kuptsov, 1975; Zarembski ve Choros, 1980) çoğu demiryolu mühendisi için imkan dahilinde değildir. Kerr (1983, 1987) tarafından, 2 veya 3 dingilli her türlü aracın bu yöntemi kullanarak ölçüm yapmasını sağlayan bir metot geliştirilmiştir.

2.4.1.2. Darbe Çekici ile Uyarım

Deneysel model analizi, yapının titreşim tepkilerine dayanan bir tahribatsız muyene yöntemidir. Yapıların dinamik davranışını anlamak için kullanılır. Darbe çekici ile uyarım da bir deneysel model analizi türüdür.



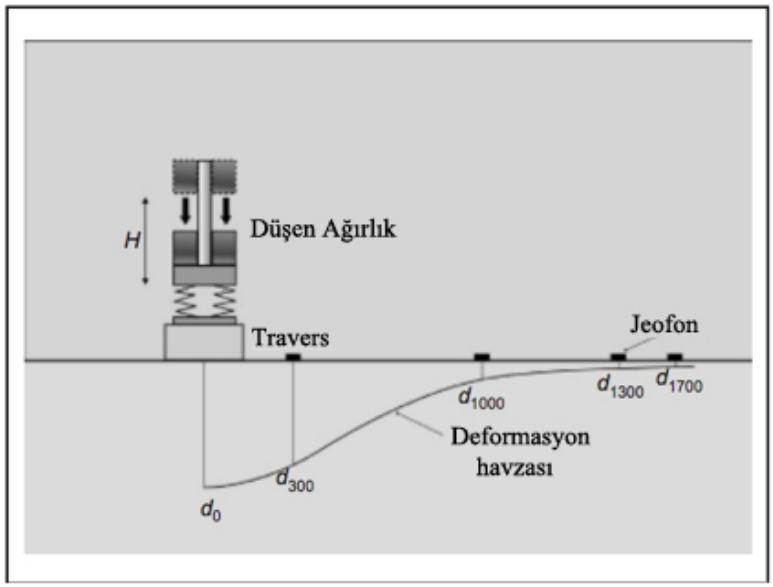
Şekil 2.11: Darbe çekici ile uyarma yöntemi (Kaewunruen ve Remennikov, 2005).

Darbe çekici ile bileşenler uyarılır. Çekicin üzerindeki güç sensöriyle etki kuvveti ölçülebilir. Ray mantarının üstüne konumlandırılan ivmeölçer yardımıyla da, bileşenlerde oluşan tepki titreşimi ölçülür. Böylece hattın gösterdiği frekans tepki fonksiyonu elde edilir. Son olarak, hat bileşenlerinin esneklik değeri ve hattın genel esneklik değeri hesaplanabilir.

2.4.1.3. Düşen Ağırlıklı Deflektometre (FWD)

Bir ağırlık, belirli bir yükseklikten dairesel plaka üzerine düşürülür. Plakanın ortasında yük hücreleri ve plakaya belirli mesafelerde konumlandırılmış jeofonlar (sismik sensör) bulunur. Yük hücresi yardımıyla uygulanan kuvvet, jeofonlar yardımıyla farklı mesafelerdeki yüzey hızları ölçülür. Titreşimi ölçmek için, toplanılan hız verileri d, sehim ve n, jeofon-plaka arası yatay mesafe olmak üzere d_n olarak bir araya getirilebilir. Düşen ağırlıklı deflektometre ile darbe etkileri ve hattın titreşim tepkileri aynı anda ölçülebilir. Hattın esneklik özellikleri transfer fonksiyonu yardımıyla veya diğer metotlarla elde edilebilir.

Demiryolu hatlarında kullanılan deflektometre, 125 kN yükü raydan ayrı traverse aktarmak için kullanılır. Yüksek hızda hareket eden bir trenin neden olduğu darbe etkisini sağlamak için 1 m uzunluğunda yükleme kirişi kullanılır. Böylece yük traversin iki ucuna da dağıtılır.

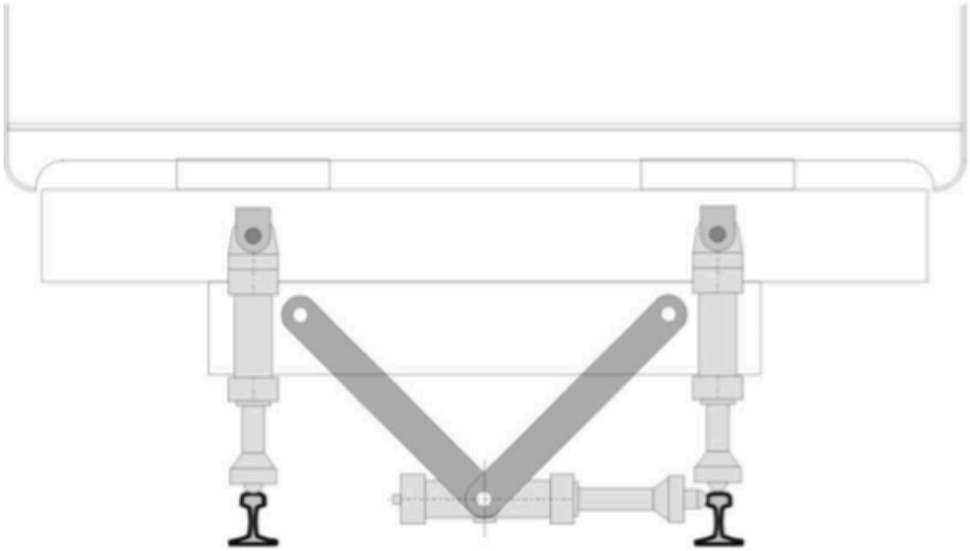


Şekil 2.12: FWD Deneyi (Burrow ve diğ., 2007).

2.4.1.4. Hat Yükleme Aracı (TLV)

Hidrolik kriko yüklemesine benzer şekilde krikolar yardımıyla hatta yükleme yapılır. Yükleme için TLV aracının kendi ağırlığı kullanılır. Hidrolik kriko yöntemine göre daha büyük düşey yük uygulamasına olanak sağlar. TLV bulunduran birçok kurum ve demiryolu inşaat şirketi vardır. ABD'de bulunan Ulaştırma Teknoloji Merkezi (TTCI) ve DECAROTOR, Güney Afrika'da bulunan BSSM, Hollanda'da Delft bunlardan bazılarıdır. İsveç'te bulunan TLV, 49 ton ağırlığında olup her rayı statik olarak 150 kN'a kadar yükleyebilir. Dinamik olarak 200 Hz'e kadar uyarabilir. Avustralya'da bulunan Queensland Teknoloji Üniversitesi'nde TLV'yi temel alan ve üç parçadan oluşan bir araç geliştirildi. Ön kısmı 90 ton ağırlığında, 6 dingilli bir lokomotif olup aracın ölçüm yapılacak noktaya gelmesini sağlar. Arka parça toplam 57 ton ağırlığındadır ve hidrolik kriko ve sehim ölçüm cihazlarıyla donatılmıştır. Toplam 22 sensör yardımıyla hat modülü tespit edilir. Orta araç ise ön aracı, arka aracın yarattığı etkilerden korumak için konulmuştur.

TLV'nin en büyük avantajı değişen ön yükleme, dinamik yükleme ve frekans aralıkları bakımından daha iyi sonuç vermesidir. Ancak zaman alan bir işlem olup, hattın diğer araçlara kapıtılması gerekmektedir (Burrow ve diğ., 2009).



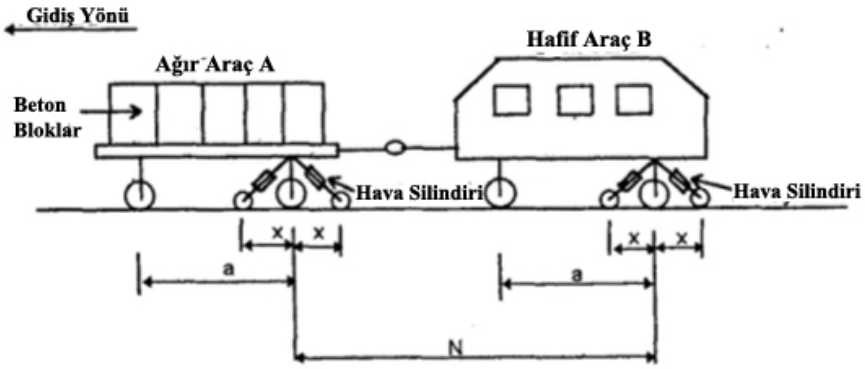
Şekil 2.13: İsveç TLV'sindeki düşey ve yatay hidrolik kollar (Berggren, 2009).

2.4.2. Devamlı Ölçüm Yöntemleri

Statik ölçüm, devamlı ölçüme göre daha çok zamana gerektiren bir yöntemdir. Ayrıca uzun hatlar için farklı noktalardan ölçüm almak, gerçekleştirilmesi zor bir eylemdir.

2.4.2.1. Çin Halk Cumhuriyeti

Çin'de 2015 itibariyle 19,000 KM uzunluğunda yüksek hızlı tren hattı bulunmaktadır. Açıklanan orta vadeli plana göre, 2025 itibariyle toplam 38,000 KM uzunluğa ulaşması hedeflenmiştir (Wang ve diğ., 2017). Bu hızlı gelişim sürecinde, yüksek hızlı tren hatları için devamlı esneklik ölçüm yöntemleri büyük önem taşır. 1997'de Çin Demiryolu Bilimleri Akademisi (CARS) tarafından ilk devamlı esneklik ölçüm yöntemlerinden biri ortaya konulmuştur.



Şekil 2.14: CARS esneklik ölçüm yöntemi (Burrow vd., 2009).

Araç, önde bulunan ağır araba ve arkada bulunan hafif arabadan oluşur. 60 km/s hız ulaşabilen araç ile, ağır arabadaki beton blok sayısını değiştirerek 150-250 kN arası yük uygulanabilir. Böylece farklı yükler altındaki sonuçlar elde edilebilir. Hafif araba, hattaki geometrik düzensizliklerin, ağır araba tarafından yapılan ölçüm üzerindeki etkisini azaltır. 40 kN ağırlığında olup ray-travers ve travers-balast arası boşlukları giderir.

Aracın ana amacı hat üzerindeki elastik sehimleri (y_k) ölçmektir. Ağır araba yükü (P_A) altındaki elastik oturma değeri (y_{KH}) ve hafif araba yükü (P_B) altındaki elastik oturma değeri (y_{KL}) kullanılarak hattın esnekliği şu şekilde ölçülebilir:

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta y_k} = \frac{P_A - P_B}{y_{KH} - y_{KL}} \tag{2.31}$$

2.4.2.2. TTCI, ABD

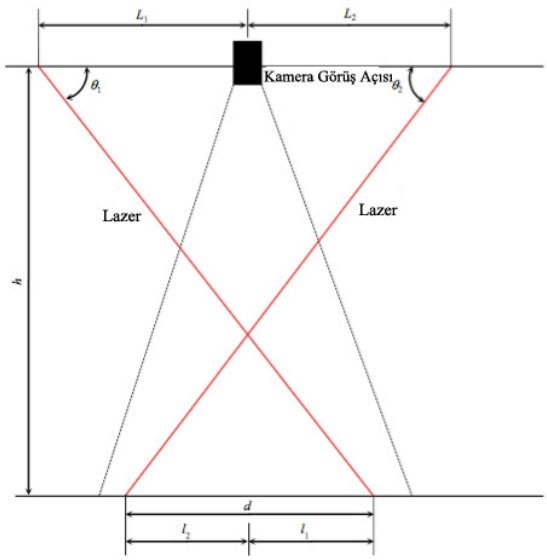
Ulaştırma Teknoloji Merkezi (TTCI) tarafından geliştirilen ölçüm aracı da CARS tarafından geliştirilen araca benzer. Statik ve devamlı ölçüm yapabilen cihazın hızı 16 km/s'e kadar ulaşmaktadır. Hattın düşey esnekliğinin yanı sıra yatay esneklik ölçümü de yapılabilir. Devamlı ölçüm için 2 vagon, statik ölçüm için TLV ve boş bir vagon kullanılır. TLV aracının merkezinde 4-267 kN yüklenebilen beşinci bir teker takımı bulunur. Hattın genel esnekliğini ölçmek için TLV'den hat üzerine 178 kN'luk yük aktarımı gerçekleştirilir. Üstyapı ile zemin esnekliği ayırılmak isteniyorsa, 44 kN'luk hafif dingil yüklemesi yapılır. Bu hafif yükleme ray, ray pedi, travers ve balastın gösterdiği tepkiyi içerir. 178 kN'luk yüklemede ise zeminin tepkisi dahildir. Hatta meydana gelen sehimler lazer sensörler yardımıyla ölçülür. Ağır yükleme ile hafif yükleme nedeniyle meydana gelen sehim değerleri arasındaki fark ile zemin esneklik değeri ölçülür.



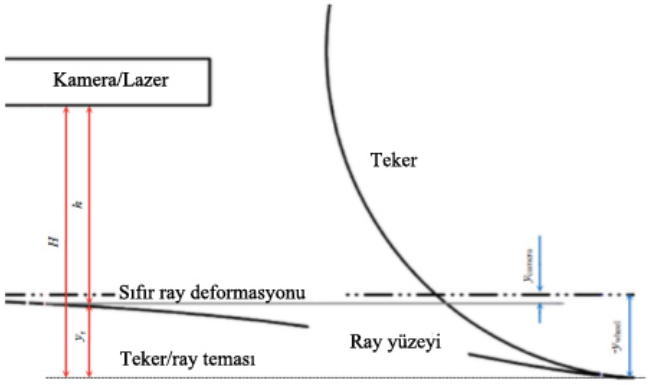
Şekil 2.15: AAR110 hat yükleme aracı (http://www.drgw.net/trips/report.php?tr=TTCI.3).

2.4.2.3. Nebraska Üniversitesi, ABD

M-Rail şirketi tarafından sonradan ticarileştirilmiş temassız ölçüm yöntemi, Nebraska Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir ve hat modülünü ölçer. İki adet lazer ve bir kamera içeren ölçüm aracı ile bu iki lazerin hat üzerine düştüğü noktalar arasındaki mesafe (d) ölçülür. Araç hat boyunca ilerlerken d mesafesinin değişmesi, demiryolu aracı ile hat arasındaki bağıl sehim değişimini, yani hat modülünün değiştiğini gösterir. Kamera ile ray arasındaki mesafenin artması ile d mesafesi de artar. Lazerlerin konumu ölçüm hassasiyeti açısından önem taşır. Teker-ray temas noktasına yakın bir mesafede ölçülen değer 0'a yakın olur. Temas noktasından çok uzak bir konumda ise yükleme etkisi daha az olur. Maksimum hassaslığı sağlamak için taker-ray temas noktasından 1.3 m uzaklıkta ölçüm yapılmalıdır (McVey ve diğ., 2005).



Şekil 2.16: Lazer yöntemiyle ölçüm (Wang ve diğ., 2016).



Şekil 2.17: Ray sehim miktarının tespiti (Wang ve diğ, 2016).

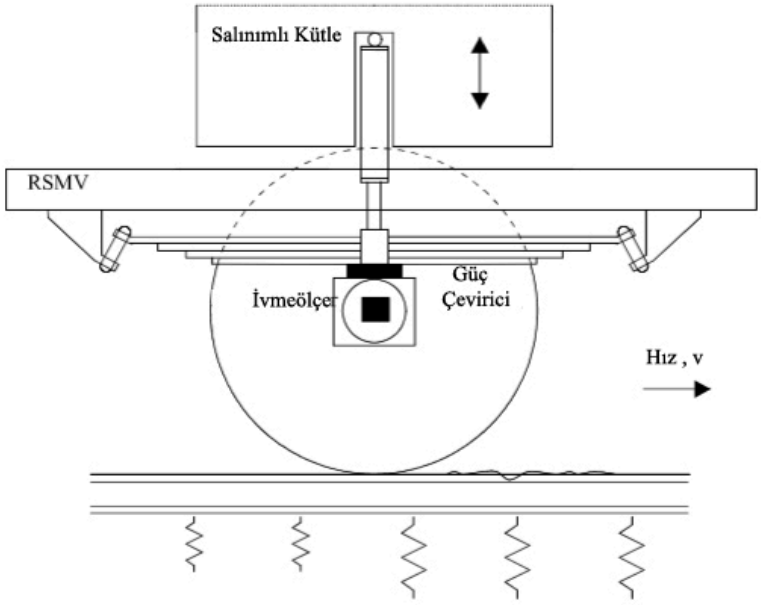
2.4.2.4. Delft Teknik Üniversitesi

Temassız ölçüm sağlayan bir başka yöntem de Delft Teknik Üniversitesi tarafından tanıtılmıştır. Ancak bu yöntemi kullanan bir prototip geliştirilmemiştir. Yönteme göre 130 km/s hıza kadar çıkabilen demiryolu aracına yerleştirilmiş lazer doppler sensörler ile ray eğilme hızı ölçülür. 3 eksenli jiroskop ve ivmeölçer içeren bir ünite yardımıyla lazer ışınlarının raya daima dik olması sağlanır. Ray eğilme hızının, tren hızına bağlı olarak artması nedeniyle yüksek hızdaki trenler daha doğru sonuç verir. Bu yöntemde hattaki geometrik düzensizliklerin etkisi, sehim ölçücü cihazlara göre daha azdır. Yine de asılı traverslerin etkisi ray eğilme hızı üzerinde etkilidir.

2.4.2.5. İsveç (Banverket ve KTH)

İsveç Demiryolu İdaresi (Banverket) tarafından devamlı ölçüm yapan bir tramvay geliştirilmiştir. 30 km/s hıza ulaşabilen bu tramvay ile 60 kN statik yükleme, 20 kN dinamik yükleme yapılabilmektedir.

Banverket tarafından tanıtılan tramvayla aynı prensipte çalışan fakat daha gelişmiş bir ölçüm cihazı (RMSV), Royal Instute of Technology (KTH) tarafından üretildi. Çift dingilli cihaz üzerinde her biri 4 ton ağırlığında 2 adet kütle salınım ünitesi bulunmaktadır. Bir dingil üzerinde kütle salınımı yaparak hattı dinamik olarak uyarır. 180 kN'luk dingil yüküne sahip olup kütle salınımlarıyla 60 kN'luk dinamik yük uygulanabilir. Esneklik değeri ölçülen kuvvet ve ivmelenme yardımıyla hesaplanır. RMSV frekansı 50 Hz'e kadar olan dinamik esnekliği ölçebilir. Ölçüm hızı 50 km/s'e kadar ulaşabilir.



Şekil 2.18: RMSV ile ölçüm yöntemi (Berggren, 2009).

RMSV ile Banverket tramvayı karşılaştırıldığında, düşey birim direnci 150 kN/mm'den az olan hatlar için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca her iki cihaz da yüksek tekrarlanabilirliğe sahiptir. Düşey birim direnci daha yüksek olan hatlarda ise sonuçların oldukça farklı olduğu görülmüştür (Wang ve diğ., 2016).

2.4.2.6. Çek Cumhuriyeti

SKMT adı verilen esneklik ölçüm cihazı Prag Teknik Üniversitesi ve Ticari Demiryolu Araştırmaları Ltd. (KZV) tarafından geliştirilmiştir. Ölçüm için özel olarak modifiye edilmiş hat sıkıştırma araçları kullanılır. Üzerinde kafes sistemler bulunan beş dingilli sıkıştırma aracıyla hat üzerinde hareket edilir. Bitişik kafesler üzerindeki dönme açıları lineer değişken sehim ölçücüler ile hesaplanıp daha sonra hat üzerindeki sehimlere çevrilir. Ölçümler için hatta iki farklı yük uygulanması gerekir. İlk çalışmada sıkıştırma makinesinin konumlandığı 2 ray üzerine 80 kN'luk statik yük uygulanır. Daha sonra ekstra yükleme yapılarak ölçümler alınır. Esneklik değeri, elastik zemin üzerindeki kiriş teorisine göre hesaplanabilir.

2.4.2.7. Fransa

CETE-Normandie Yol Yapıları Merkezi tarafından, titreşimli teker ile hatta düşey dinamik yük uygulayan esneklik ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Yol testlerinde 10 kN statik ağırlık ve 35 Hz'de 0,5 mm genlik kullanılır (Burrow ve diğ., 2009). Demiryolu testlerinde bu değerler artan yükler ve frekans değiştirme kapabilitesine göre değişim gösterir.

2.4.2.8. İsviçre

İsviçre Federal Demiryolları (SBB) tarafından geliştirilen cihaz Çin ve TTCI'ye ait cihazlarla benzerlik gösterir ve yatay esneklik ölçümü de yapabilir.

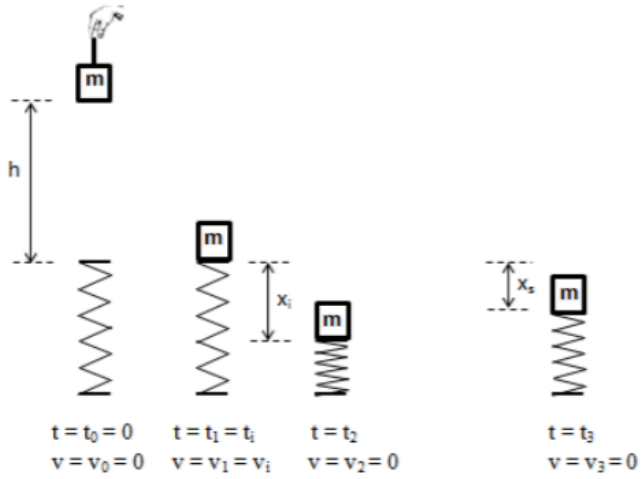
2.5. BEZGİN YÖNTEMİ VE DENKLEMLERİ

Dinamik yükler, başta dingil yükü ve tren hızı olmak üzere hat kondisyonu, hat esnekliği, boji ve tekerin sönümleme ve esneklik özellikleri ve şasi düzenine bağlı olarak değişir. Bölüm 2.3'te dinamik yük tahmini için geliştirilen önemli formüllere yer verilmiştir. Bu formüller deneysel olup, dinamik yüke etki eden faktörleri bir "dinamik yük katsayı" ile ifade etmeye çalışmıştır. 2017 yılında Doç. Dr. Niyazi Özgür Bezgin tarafından klasik mekaniğe dayanan yeni bir analitik denklem geliştirilmiştir. Bu denklem, taşıyıcı yapı üzerindeki rijit gövdenin kinetik enerjisinin, elastik sehime uğramış taşıyıcı yapıda depolanan potansiyel enerjiye dönüşümü yoluyla meydana gelen enerji konumu prensibine dayanmaktadır. Talbot, Eisenmann, Clarke, Deutsche Bahn ve Japon Demiryollarının sunduğu dinamik yük tahminleri ile karşılaştırıldığında Bezgin Denklemlerinin geçerli sonuç verdiği görülmüştür. Başta sadece hat esnekliğini içeren bu denklemlere, Genişletilmiş Bezgin Denklemleri ile boji ve tekerin sönümleme özellikleri ve Hertz temas esnekliği de dahil edilmiştir. Bu şekilde araç ve hat özelliklerinin kombinasyonundan oluşan bir sistem esneklik değeri kullanılmıştır. Şu anda devam etmekte olan ve tekerin bozuk profilli hat uzunluğundaki temas ve etkileşim sürelerini de dahil eden çalışma ile Sonlandırılmış Bezgin Denklemlerinin sunulması hedeflenmektedir. Bu bölümde, önce düşen bir kütlenin enerjisinin düştüğü zemine nasıl aktarıldığı ve sönümlenin etkisi anlatılmış, Darbe Azaltma Faktörü tanıtılmış ve daha sonra bu prensibin yanal hareket eden tekerler için uyarlaması verilmiştir.

2.5.1. Teker Hareketi ve Hareket Esnasında Etkiyen Faktörler

2.5.1.1 Düşen Bir Kütlenin Statik ve Dinamik Darbe Kuvvetleri

Yerçekimi etkisindeki bir kütle, üzerine bırakıldığı zemine ağırlık kuvvetiyle etki eder. Kütle bir yay üzerine bırakıldığında, taşıyıcı yay bu kuvvete tepki olarak, yay esneklik değerine bağlı "x_s" kadar sehim gösterir. Bu durumda etkiyen kütlenin statik kuvvetidir.



Şekil 2.19: Statik ve dinamik yükleme ile oluşan sehimler (Bezgin, 2017).

Kütle belirli bir yükseklikteyken, bir gözlemci tarafından el ile alınarak taşıyıcı yay üzerine yavaşça bırakıldığında etkiyen kuvvet de yine statiktir. Ancak h yüksekliğindeki kütle, olduğu yerden yay üzerine bırakılırsa sahip olduğu potansiyel enerjiyi üzerine bırakıldığı taşıyıcı yaya aktarır. Bu durumda etkiyen kuvvet dinamiktir ve potansiyel enerjinin yaya aktarımıyla, yayda statik sehim (x_s) değerinden daha büyük bir darbe sehimi (x_i) meydana gelir. (Popov, 1998) ile gelişim aşamaları gösterilen Denklem 2.32'de meydana gelen statik ve dinamik sehimler arasındaki ilişki verilmiştir.

$$x_i = x_s(1 + \sqrt{2h/_{xS} + 1}) \tag{2.32}$$

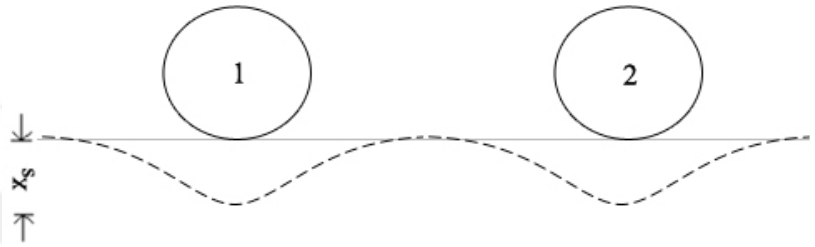
Parantez içerisinde verilen kısım dinamik sehimin statik sehime oranı olup artan yükseklik (h), artan düşey birim direnç (k) ve buna bağlı olarak azalan statik yer değiştirme (x_s) ile değeri artar. Bu durumda denklemin her iki tarafının k ile genişletilmesiyle dinamik darbe kuvveti ve statik kuvvet arasındaki ilişkili şöyle yazılabilir:

$$F_i = k.x_i = k.x_s(1 + \sqrt{2h/_{xS} + 1}) = F_s(1 + \sqrt{2h/_{xS} + 1}) \tag{2.33}$$

Bu denklemden h=0 için dahi, dinamik kuvvetin statik kuvvetin 2 katı kadar olduğu görülmektedir.

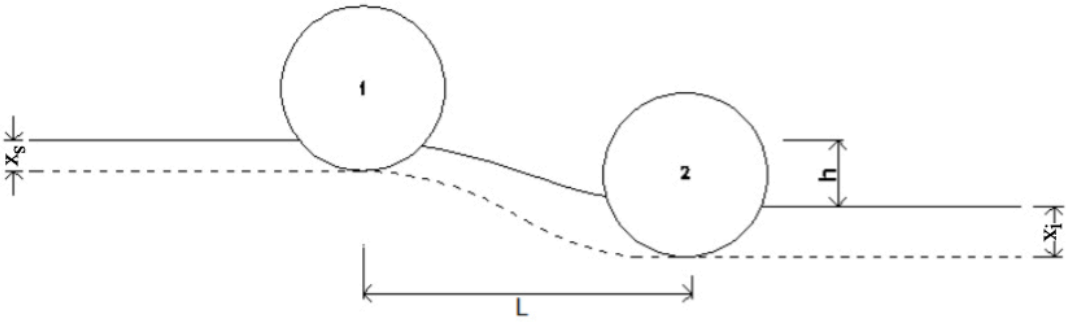
2.5.1.2. Hareket Halindeki Tekerin Düşey Darbe Kuvveti

Tekerin üzerinde yol aldığı demiryolu hattı, belirli bir esneklik değerine sahip ve yanyana dizili taşıyıcı yaylar olarak düşünülebilir (Selig ve Waters, 1994). Şekil 2.20'deki gibi Konum 1'den, Konum 2'ye v hızında giden düzgün şekilli bir teker, mükemmel geometriye sahip ve esnekliği değişmeyen bir hat üzerinde her iki konumda da eşit derecede sehim gösterir. Teker-hat etkileşiminde herhangi bir aksama meydana gelmediği için, meydana gelen sehim statik teker yükü altında x_s kadardır. Böyle bir durumda dinamik yüke neden olacak bir etken yoktur.



Şekil 2.20: Esnekliği sabit ve kusursuz geometrideki bir hat üzerindeki kusursuz bir tekerin hareketi.

Şekil 2.21'de esnekliği değişmeyen ancak hizası bozulmuş bir hat üzerinde soldan sağa doğru hareket eden bir tekerin gösterimi verilmiştir. Düşey hat düzensizliği (h), L kadarlık bir geçiş uzunluğu boyunca meydana gelmiştir. Konum 1 ve Konum 2 arasında bulunan ve tekerin hareketi esnasında sürekli değişen bu hiza farkı, hatta etkiyen teker yükünde artışa yol açarak dinamik yüke neden olur. Bu nedenle, başlangıçta x_s olan sehim miktarı, tekerin L uzunluğundaki düzensiz hat kısmından geçmesiyle oluşan dinamik etki sonucu daha büyük bir x_i değerine erişir. Kesikli çizgiyle gösterilen hat üzerindeki sehimler, Konum 2'de ilk konumuna göre daha büyük bir değere ulaşmıştır.



Şekil 2.21: Düzensiz bir hat üzerindeki tekerin hareketi sonucu oluşan dinamik sehim (Bezgin, 2017).

2.5.1.3. Darbe Azaltma Faktörü

Darbe azaltma faktörü olarak tanıtılan "f", tekerin düzensiz hat uzunluğunu (L) geçmesi için gereken zaman ile düzensizlik yüksekliği (h) kadar mesafeden serbest düşüş yapması için gereken zamanı oranlar. Bu zaman aralıkları sırasıyla geçiş süresi (t_{pass}) ve düşme süresi (t_{fall}) olarak gösterilmiştir.

$$f = 1 - \frac{t_{fall}}{t_{pass}} \tag{2.34}$$

Eğer tren düzensiz hat uzunluğundan çok yavaş bir şekilde geçiyorsa geçiş süresi, düşme süresinden çok daha büyük olur. Bu durumda t_{fall}/t_{pass} oranı 0'a yakınsar ve darbe azaltma katsayısı f=1 olur. Böylesine yavaş bir tren için hattaki düzensizlik ihmal edilebilir. Eğer tren, geçiş süresi ile düşme süresi eşit olacak derecede yüksek bir hıza sahipse t_{fall}/t_{pass}=1 ve f=0 olur. Bu durumda hattaki düzensizlik, tren bu düzensizlik bölgesini serbest düşüş yaparak geçiyormuşçasına bir etki gösterir. Eğer tren çok hızlı veya hat koşulları tren hızını kaldıramayacak seviyedeyse t_{fall}/t_{pass} 1'den büyük bir değere ulaşır ve f<0 olur. Böyle bir hıza sahip trenin h yüksekliğinden, g=9,81 m/s^2 yerçekim ivmesinden daha büyük ivmeyle düştüğü varsayılır. Düşme süresi:

$$t_{fall} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \tag{2.35}$$

ve geçiş süresi:

$$t_{pass} = \frac{L}{V} \tag{2.36}$$

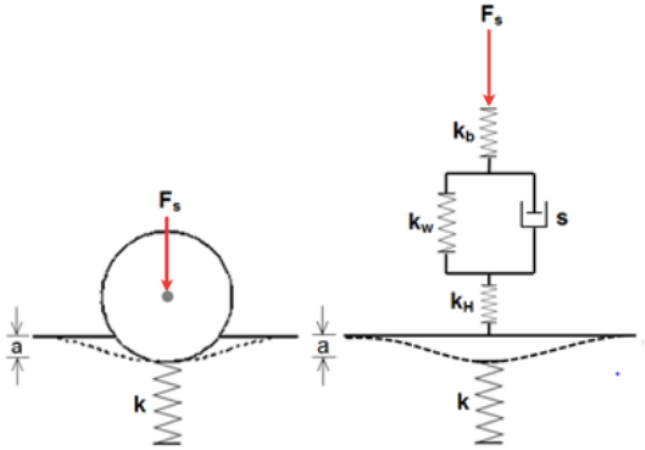
olmak üzere darbe azaltma faktörü:

$$f = 1 - \frac{t_{fall}}{t_{pass}} = 1 - \frac{\sqrt{2h/g}}{L/V} = 1 - \frac{V}{L}\sqrt{\frac{2h}{g}} \tag{2.37}$$

2.5.1.4. Sönümleme Etkisi

Bu bölümde, daha önceden tanıtılan yönteme ek olarak boji ile tekerin esneklik ve sönümleme bileşenleri ve hattın esnekliğine ek olarak Hertz temas esnekliği de hesaba katılmıştır. Şekil 2.22'deki gösterimde hattın düşey birim direnci k, boji ile tren gövdesi arasındaki yay düşey

birim direnci k_b, tekeri bojiye bağlayan yay düşey birim direnci k_w, teker ve ray arasındaki Hertz temas düşey birim direnci k_h ve sistemin sönümleme özelliğini yansıtan katsayı s ile gösterilmiştir.



Şekil 2.22: Sönümlemesiz ve sönümlemeli sistem üzerindeki teker yükü karşılaştırması (Bezgin, 2019).

Statik kuvvet altında meydana gelen sehimler; ray üstündeki sehim (a), boji yayı (a_b), teker yayı (a_w) ve Hertz yayı (a_h) sehimi olmak üzere sistemindeki toplam sehim:

$$a' = a_b + a_w + a_h + a \tag{2.38}$$

ve sistemin toplam esnekliği:

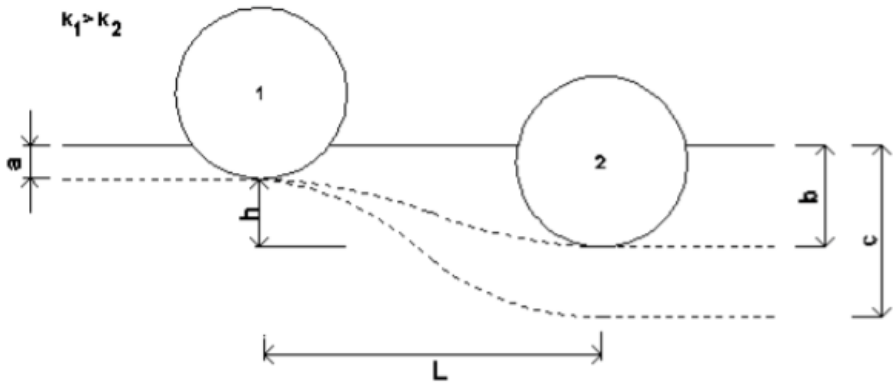
$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_w} + \frac{1}{k_h} + \frac{1}{k} \tag{2.39}$$

Şekil 2.22'de sağdaki gösterimdeki gibi bir sistem içerisinde enerjinin depolanabileceği yeni alanlar söz konusudur. Bu sayede hattaki veya tekerdeki düzensizlikler nedeniyle teker geçişi esnasında oluşan ve bir kısmı hatta aktarılan enerji farkları bir miktar daha indirgenebilir.

2.5.2. Hattaki Esneklik Değişimi Nedeniyle Oluşan Dinamik Yüklerin Tahmini

Hattın sahip olduğu esnekliğin ve bu esneklik değişiminin meydana getirdiği etkiler "Hat Esnekliği" konusunda incelenmiştir. Bu bölümde ise Bezgin yönteminin hat üzerindeki esneklik değişimi esnasında ortaya çıkan dinamik yüklere yönelik tahmini verilecektir.

2.5.2.1. Düşük Esneklikten Yüksek Esnekliğe Geçiş



Şekil 2.23: Düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş (Bezgin, 2018).

Şekilde tekerin soldan sağa doğru, az esnek bir hat kesiminden daha esnek bir hat kesimine kusurlu hat uzunluğu (L) boyunca geçişi gösterilmiştir. Konum 1'deki az esnek hatta düşey birim direnç (k) değeri daha büyük olduğundan, hat üzerindeki statik sehim (a) daha az olur. Konum 2'de, Konum 1'e nazaran daha az düşey birim direnç (k) ve daha fazla statik sehim (b) söz konusudur. Bu nedenle, esneklik değişiminin bir sonucu olarak teker geçişi esnasında yükseklik farkı (h) ve dingil kütlesine ait potansiyel enerji farkı meydana gelir. İki konum arasındaki potansiyel enerji farkı:

$$E_1 = mgh = mg(b - a) \tag{2.40}$$

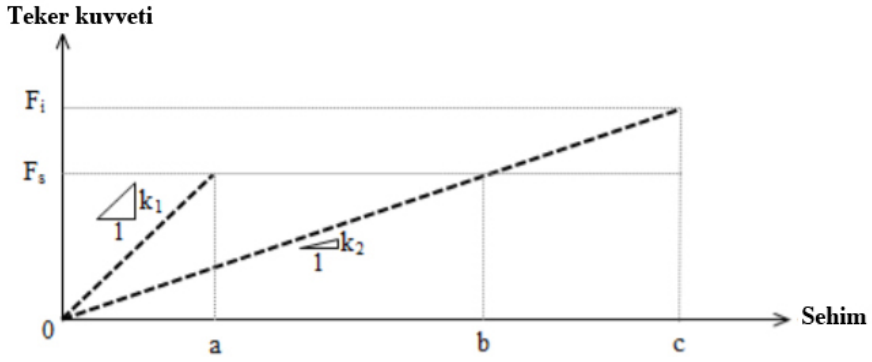
Hat geçişindeki bu potansiyel enerji değişimi dinamik yüke neden olur. Tren hızı, hattaki esneklik değeri ve esneklik değişim oranına bağlı olarak E1 enerjisinin bir kısmının Konum 2'de hatta aktarılmasıyla, hattaki mevcut sehim (b) daha büyük bir "c" değerine ulaşır (Bezgin, 2018).

$$E_2 = mg(c - a) \tag{2.41}$$

Daha önceden tanıtılan darbe azaltma katsayısı (f) ile Denklem 2.41deki potansiyel enerji farkının ne kadarının hatta yansıyacağı belirlenir. Eğer tren çok yavaş ise f=1'e yakınsar. Bu durumda hatta enerji aktarılmaz ve hat, Konum 2'de "b" statik sehiminde kalır. Tren hızı arttıkça f değeri 1'den azalmaya başlar ve hatta aktarılan enerji miktarı artar. Bu durumda Konum 2'deki sehim b'yi aşarak daha büyük bir c değerine ulaşır.

$$E_3 = E_2 - E_1\, f = mg(c - a) - mg(b - a)\, f \tag{2.42}$$

Şekil 2.24'te Konum 1 ve Konum 2 için hattın kuvvet-sehim davranışı gösterilmiştir.



Şekil 2.24: Statik ve dinamik kuvvet altındaki sehimler (Bezgin, 2018).

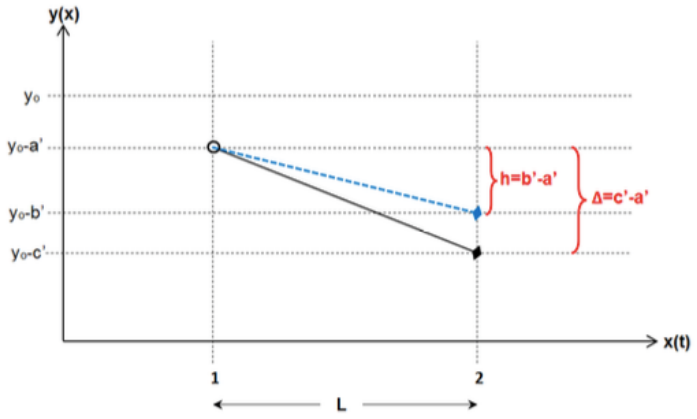
Hat Konum 2'de, üzerine aktarılan enerji E3'ü geçici olarak depolar. Statik sehim (b) ve dinamik sehim (c) arasında ve k_2 eğrisi altında kalan depolanmış enerji:

$$\frac{(k_2 b + k_2 c)}{2}(c - b) \tag{2.43}$$

Denklem 2.42 ve Denklem 2.43'ün eşitliğinden yararlanılarak (Bezgin, 2018)'de düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş için Bezgin Etki Katsayısı (K_{B1}) ortaya konmuştur.

$$K_{B1} = [1 + 1.414\sqrt{1 - f + \frac{a}{b}(f - 1)}] \ , \ a \leq b \text{ iken} \tag{2.44}$$

Daha sonra sunulan çalışmada, hattaki bu esneklik değişimine ek olarak tren teker ve bojisinin sönümleme özellikleri ve Hertz temas esnekliği de dahil edilmiştir. Daha önceden grafiksel gösterimi verilen (Şekil 2.23) bu geçiş alanı için, yüksüz halde ray üst noktası y_0, statik sehim ilk konumda a', geçiş sonrası konumda b' ve dinamik etkenlerle artan sehim c' olmak üzere sistem sehimlerinin kartezyen gösterimi Şekil 2.25'deki gibidir.



Şekil 2.25: Artan esneklikli hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi (Bezgin, 2019).

Daha önceden anlatılan Bezgin yöntemine benzer şekilde statik kuvvetler altında iki konum arası potansiyel enerji farkı

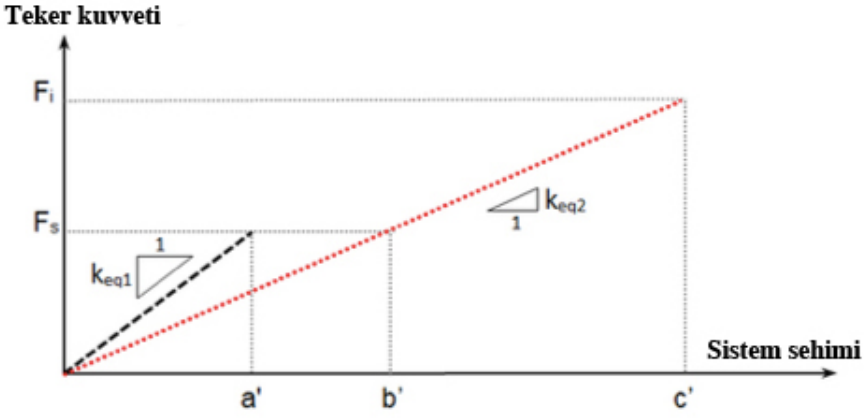
$$E_1 = mgh = mg(b' - a') \tag{2.45}$$

ve esneklik değişimi nedeniyle oluşan dinamik yüklerin de etkisiyle ortaya çıkan potansiyel enerji farkı:

$$E_2 = mg(c' - a') \tag{2.46}$$

olmak üzere, f darbe azaltma faktörü ve s sistem sönümlemesi ile hatta aktarılan enerji miktarı belirlenir. Sönümleme, potansiyel enerjinin %2'sini dağıtıyorsa s=0,02'dir. Hatta aktarılan enerji miktarı:

$$E_3 = E_2 - E_1\, f - E_1 s = mg(c' - a') - mg(b' - a')\, f - mg(b' - a')s \tag{2.47}$$



Şekil 2.26: Artan esneklikli hattaki teker kuvvet-sehim ilişkisi (Bezgin, 2018).

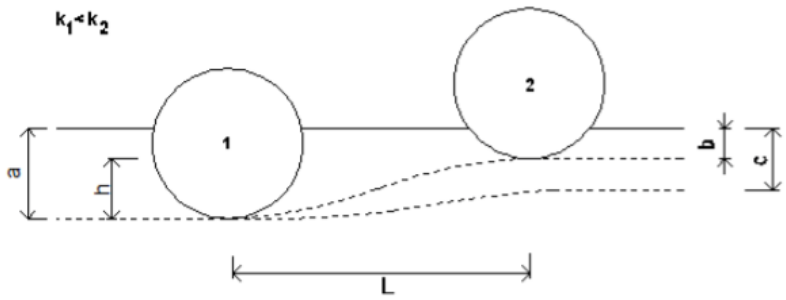
Statik sehim (b') ve dinamik sehim (c') arasında ve k_{eq2} eğrisi altında kalan depolanmış enerji:

$$\frac{(k_{eq2}b\prime+k_{eq2}c\prime)}{2}(c'-b') \tag{2.48}$$

Denklem 2.47 ve Denklem 2.48'in eşitliğinden ortaya çıkan, düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş için kullanılan Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı (K'_{B1}) şu şekildedir:

$$K'_{B1}=1+\sqrt{2[(1-f-s)\left(1-\frac{a'}{b'}\right)]}\ ,\ a'\leq b'\ iken \tag{2.49}$$

2.5.2.2. Yüksek Esneklikten Düşük Esnekliğe Geçiş



Şekil 2.27: Yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş (Bezgin, 2018).

Şekilde tekerin soldan sağa doğru yüksek esnekliğe sahip bir hat kesiminden daha az esnek bir kesime kusurlu hat uzunluğu (L) boyunca geçişi gösterilmiştir. İlk konumdaki daha esnek hatta meydana gelen statik sehim (a), tekerin ikinci konumundaki statik sehima (b) göre daha fazladır. Ancak, Konum 2'de, esneklik değişimi nedeniyle oluşan ve tren hızına ve darbe azaltma faktörüne bağlı olan dinamik sehim "c" değerine ulaşır. İki konum arasındaki statik sehimlerin potansiyel enerji farkı:

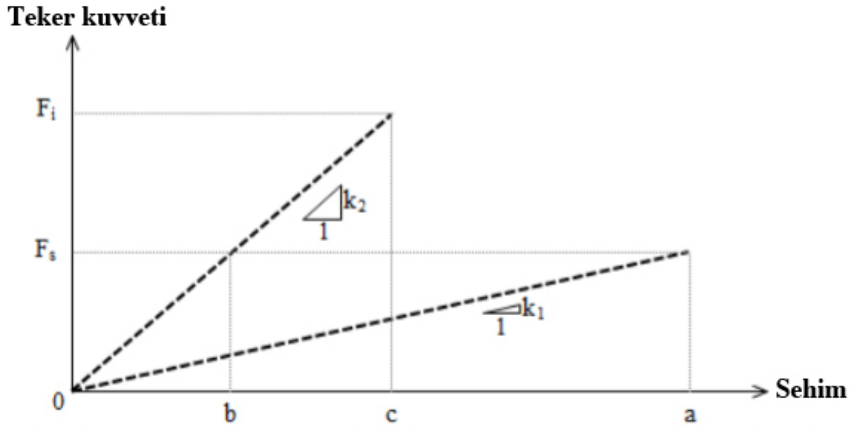
$$E_1 = mgh = mg(a-b) \tag{2.50}$$

Eğer teker bölgeyi belli bir hız ile geçerse dinamik yük altında oluşan sehim için potansiyel enerji farkı şu şekildedir:

$$E_2 = mg(a-c) \tag{2.51}$$

E_2'nin ne kadarının hatta aktarılacağı darbe azaltma faktörünün bir fonksiyonu olarak tren hızı, her iki konumdaki esneklik değeri ve kusurlu hat uzunluğuna bağlı olarak değişir.

$$E_3 = E_2 - E_1\, f = mg(a-c) - mg(a-b)\, f \tag{2.52}$$



Şekil 2.28: Statik ve dinamik kuvvet altındaki sehimler (Bezgin, 2018).

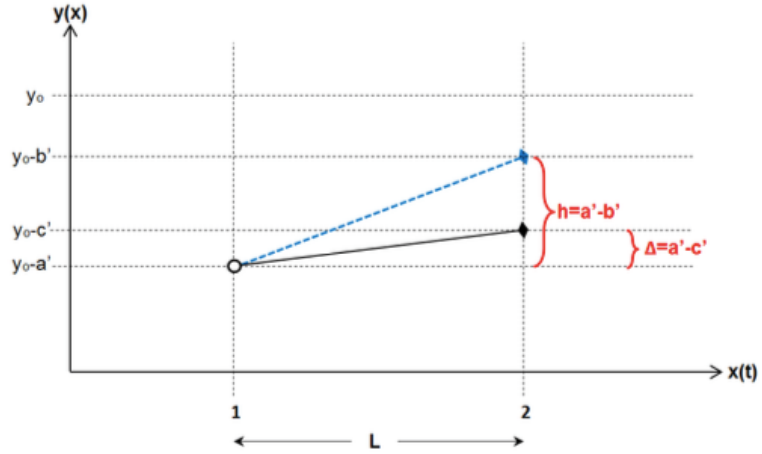
Statik sehim (b) ve dinamik sehim (c) arasında ve k_2 eğrisi altında kalan depolanmış enerji:

$$\frac{(k_2 b + k_2 c)}{2}(c-b) \tag{2.53}$$

Denklem 2.52 ve Denklem 2.53 eşit olduğundan (Bezgin, 2018)'de gelişimi gösterilen yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş için Bezgin Etki Katsayısı (K_{B2}) şu şekildedir:

$$K_{B2}=[1+1.414\sqrt{1+f+\frac{a}{b}(1-f)}-1]\ ,\ \text{a}\geq\text{b iken} \tag{2.54}$$

Genişletilmiş Bezgin denklemleriyle bu denkleme araca ait esneklik özellikleri de dahil edilmiştir. Grafiksel gösterimi Şekil 2.27 ile verilen hat geçişi esnasında oluşan sehimlerin kartezyen gösterimi şöyledir:



Şekil 2.29: Azalan esneklikli hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi (Bezgin, 2019).

Statik yük altındaki potansiyel enerji değişimi:

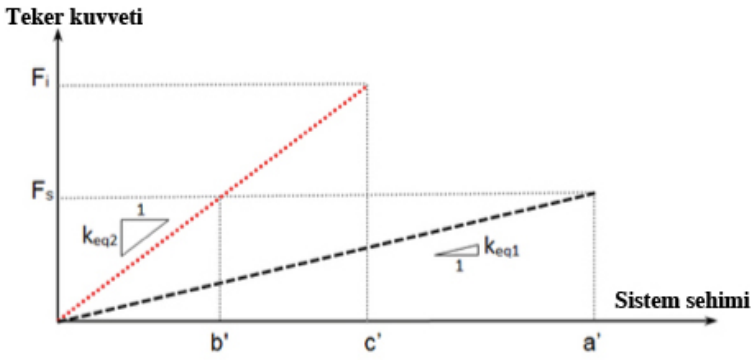
$$E_1 = mgh = mg(a' - b') \tag{2.55}$$

Dinamik yükün etkisiyle oluşan sehim ile ilk konum arasındaki enerji değişimi:

$$E_2 = mg(a' - c') \tag{2.56}$$

Hatta aktarılan enerji:

$$E_3 = E_2 - E_1\, f - E_1 s = mg(a' - c') - mg(a' - b')\, f - mg(a' - b')s \tag{2.57}$$



Şekil 2.30: Azalan esneklikli hattaki teker kuvvet-sehim ilişkisi (Bezgin, 2019).

Statik sehim (b') ve dinamik sehim (c') arasında ve k_{eq2} eğrisi altında kalan depolanmış enerji:

$$\frac{(k_{eq2}b\prime + k_{eq2}c\prime)}{2}(c' - b') \tag{2.58}$$

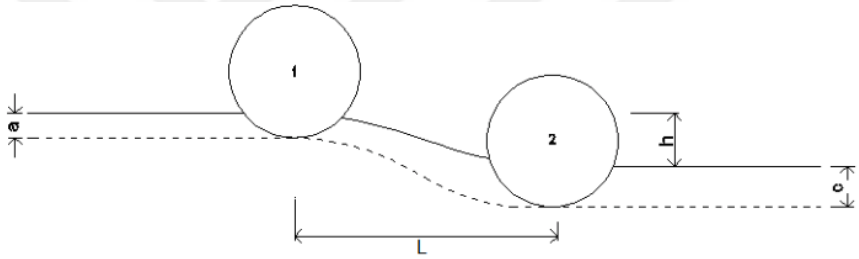
Denklem 2.57 ve Denklem 2.58'in eşitliğinden elde edilen yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş için Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı (K'_{B2}) şöyledir:

$$K'_{B2}=1+\sqrt{2[1+f+s+\frac{a'}{b'}(1-f-s)]}-1 \quad \text{,a'≥b' iken} \tag{2.59}$$

2.5.3. Hat Profil Bozuklukları Nedeniyle Oluşan Dinamik Yüklerin Tahmini

2.5.3.1. Alçalan Hat Profili

Kesikli çizgilerle hatta oluşabilecek maksimum sehim gösterilmek üzere Şekil 2.31'de sabit esneklikte fakat düşey seviye farklılığına sahip bir hatta teker hareketi gösterilmiştir. Konum 1'deki sehim miktarı, profil bozukluğuna sahip L uzunluğundaki hat kesiminden geçtikten sonraki konumda, hiza farkı (h) ve geçiş uzunluğuna (L) bağlı olarak daha da artar.



Şekil 2.31: Alçalan hat profilinde meydana gelen sehimler (Bezgin, 2018).

İki konum arasında hiza farkı nedeniyle oluşan potansiyel enerji değişimi şu şekildedir:

$$E1 = mg(h+c-a) \tag{2.60}$$

Hız, geçiş uzunluğu ve düşey hiza farkına bağlı olarak E1'in hatta aktarılan miktarı:

$$E2 = mg(h+c-a)-mghf \tag{2.61}$$

Statik sehim ve dinamik sehim arasında geçici olarak depolanan potansiyel enerji:

$$E3 = \frac{1}{2}k(a+c)(c-a) \tag{2.62}$$

olmak üzere enerji korunumu nedeniyle E2 ve E3'ün eşitlenmesiyle ortaya çıkan alçalan hat profil bozukluğu için Bezgin Etki Katsayısı ($K_{B,d}$):

$$K_{B,d} = 1 + \sqrt{\frac{2h}{a}(1-f)} \tag{2.63}$$

Bu aşamadan sonra araç sönümlemesi ve sistem (araç ve hat) esnekliği hesaba katılarak oluşturulan denklem şu şekildedir:

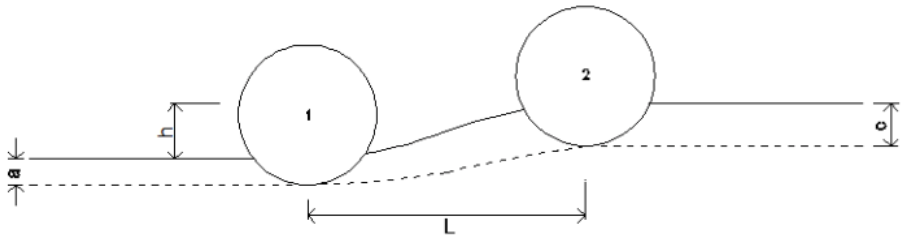
$$mg(h + c' - a') - mghf - mghs = \frac{1}{2}k_{eq}(a' + c')(c' - a') \tag{2.64}$$

Buradan elde edilen alçalan hat profil bozukluğu için Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı ($K'_{B,d}$):

$$K'_{B,d} = 1 + \sqrt{\frac{2h}{a'}(1-f-s)} \tag{2.65}$$

2.5.3.2. Yükselen Hat Profili

Şekilde sabit esneklikli bir hat üzerinde düşey hiza farkı (h) bulunduran bir hattaki sehimler gösterilmiştir. Kusurlu geçiş uzunluğu (L) boyunca Konum 1 ve Konum 2 arasında hat profili h kadar yükselmiştir. Bu profil bozukluğu nedeniyle Konum 2'de hat a'dan daha büyük bir c değeri kadar sehim gösterir.



Şekil 2.32: Yükselen hat profilinde meydana gelen sehimler (Bezgin, 2018).

İki konum arasındaki potansiyel enerji farkı

$$E1 = mg(h - c + a) \tag{2.66}$$

ve bu enerjiden hatta aktarılan miktar:

$$E2 = mg(h - c + a) - mghf \tag{2.67}$$

Her iki konumda oluşan sehimler arasında geçici olarak depolanan enerji:

$$E3 = \frac{1}{2}k(a+c)(c-a) \tag{2.68}$$

Enerji korunumu nedeniyle E2=E3 eşitliğinden ortaya çıkan yükselen hat profil bozukluğu için Bezgin Etki Katsayısı ($K_{B,a}$):

$$K_{B,a} = 2\sqrt{[\frac{h}{2a}(1-f)+1]} - 1 \tag{2.69}$$

Sistemin genel esneklik değerini alarak aracın sönümleme özelliklerini de denkleme dahil etmek için kullanılan eşitlik şu şekildedir:

$$mg(h-c'+a') - mghf - mghs = \frac{1}{2}k_{eq}(a'+c')(c'-a') \tag{2.70}$$

Bu eşitlik sonucu elde edilen yükselen hat profil bozukluğu için Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı ($K'_{B,a}$):

$$K'_{B,a} = 2\sqrt{[\frac{h}{2a'}(1-f-s)+1]} - 1 \tag{2.71}$$

Bu potansiyel değişime ek olarak, değişen esneklik veya yükselen profil nedeniyle, teker düşey olarak ivmelenir (a_v) ve bu ivmelenmenin bittiği yerde kritik hıza (v_v) ulaşır. Hattın yükselişinin bittiği yerde kesilen ivmelenme nedeniyle teker hatta ekstra bir dinamik yük oluşturacak şekilde düşer. Bu ekstra dinamik yük K_J ile gösterilir. Dolayısıyla böyle bir durumda oluşacak dinamik yük katsayısı, $K_{B,a}+K_J$ ve $K'_{B,a}+K_J$ olarak iki katsayının toplamı şeklinde hesaplanmalıdır. Yükselen kısım (h_a), yükselen profilli hatlarda h kadar, esneklik değişimi durumunda a-b=a'-b' kadar veya her ikisinin de söz konusu olduğu durumlarda h+b-a kadar olabilir. K_J hesabı için kullanılan denklemler şu şekildedir:

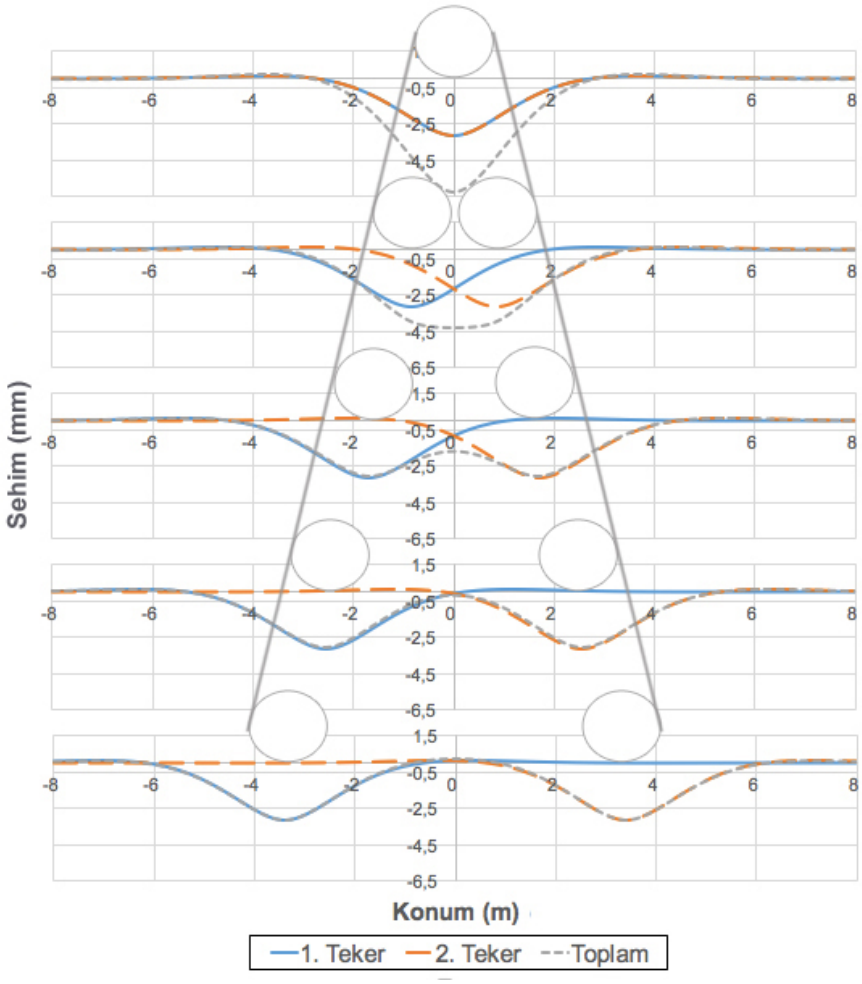
$$a_v = 2h_a({}^{V}/_{L})^2 \tag{2.72}$$

$$K_J = \frac{a_v}{g} \tag{2.73}$$

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. HATTIN ÇİFT DİNGİL ALTINDA GÖSTERDİĞİ ETKİN ESNEKLİĞİN HESAP YÖNTEMİ

Hattın ray pedi, travers, balast, altbalast bileşenleri ve zeminin bir kombinasyonu olarak bir esneklik değeri vardır. Bu değer dinamik yük tahminlerinde kullanılan k düşey birim direnci ile ters orantılıdır. Düşey birim direnç, bir tekerin hatta aktardığı yük altında meydana gelen sehim oranıdır. Ancak demiryolu aracı çift dingile sahip ve dingiller arası mesafe azsa, bir dingilin hatta oluşturduğu sehim miktarı diğer dingilin oluşturduğu sehimden etkilenir. Bu durumda iki teker olduğundan hem hatta uygulanan yük miktarı, hem de bu yük altında oluşan sehim miktarı değişmektedir. Bu yeni yük ve sehim oranına göre yeni bir esneklik değerinden bahsedilebilir. Bu çalışmada, çift dingilli sistem bir bütün olarak ele alınmış ve hattın bu bütüne karşı gösterdiği esneklik değerini hesaplamak amaçlanmıştır.



Şekil 3.1: Farklı teker konumları için oluşan sehim eğrileri.

Şekil 3.1'de tek teker altındaki hat birim direnci k=50 kN/mm için yukarıdan aşağıya doğru dingil aralığı 0 m, 1.7 m (5.6 ft), 3.4 m (11.2 ft), 5.1 m (16.7 ft) ve 6.8 m (22.3 ft) için hat sehim değişimleri gösterilmiştir. Tek dingil altında oluşan maksimum sehim (w_{max}) Winkler Teorisi bölümünde incelenmiştir. Çift dingil altında oluşan maksimum sehim ise dingillerin etkileşimine bağlı olup w_{max} değerinden farklıdır ve w^*_{max} ile gösterilmiştir.

Eğer iki tekerin üst üste yer aldığı ve hatta birlikte kuvvet uyguladığı düşünülürse, iki tekere ait toplam yük 2P ve dingiller arası mesafe m=0'dır. Bu durumda iki tekerin oluşturduğu toplam sehim, tek tekerin oluşturduğu sehimin 2 katına eşittir.

$$w^*_{max} = 2\, w_{max} \tag{3.1}$$

Bu başlangıç durumunda (m=0) çift dingil altındaki birim direnç;

$$k^* = \frac{2P}{2\, w_{max}} = k \tag{3.2}$$

olup hattın tek teker altındaki birim direncine eşittir. İki dingil altında, dingillerin etkileşimi sonucu normalden daha küçük veya daha büyük sehimler görülebilir. Winkler modeline göre hat üzerindeki bir noktadaki yük, hat birim direnci ve o noktada gerçekleşen sehimin çarpımına eşittir. Bu nedenle, çift dingilli bir trenin hatta oluşturduğu sehim miktarının değişmesinden dolayı, çift dingil altındaki hat birim direnci (k^*), hattın normal birim direncinden (k) daha büyük, daha küçük veya ona eşit olabilir. Dingiller arası mesafenin çok fazla olduğu ve dingil sehimlerinin birbirinden etkilenmediği durumu ele alalım. Örneğin Şekil 3.1'deki m=8 m durumu için, çift dingilli sistemin toplam yükü 2P, bu yük altında oluşan maksimum sehim ise tek dingil altında oluşan maksimum sehim miktarı kadardır. Bu durumda;

$$w^*_{max} = w_{max} \tag{3.3}$$

$$k^* = \frac{2P}{w_{max}} = 2k \tag{3.4}$$

Yani tek teker altında hattın gösterdiği birim direncin 2 katı kadar bir birim direnç değerine ulaşılır. Dolayısıyla dingiller arası mesafe, tekerlerin üst üste düşünüldüğü durum ile tekerlerin birbirinden etkilenmeyecekleri kadar uzakta olduğu durum arasında bir değerde ise, hattın çift dingil için gösterdiği birim direnç k-2k arasında bir değer olmalıdır. Bu dingil mesafesinde tekerlerin oluşturduğu sehim eğrileri birbiriyle girişim yaparak hat üzerinde normalden daha

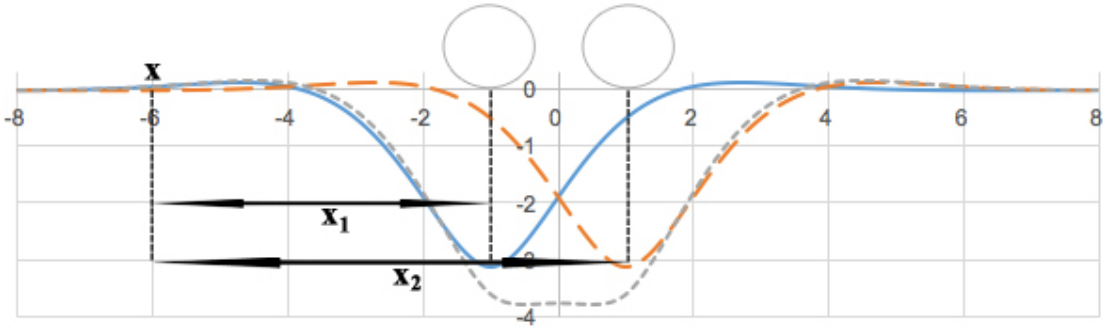
farklı bir maksimum sehim oluşturur. Buna bağlı olarak da hattın 2 dingil altında gösterdiği esneklik değişir.

Bu çalışmada k^* değerinin , hat birim direncine (k) ve dingiller arası mesafeye (m) bağlı değişimi incelenmiştir. Bu amaçla iki ayrı dingilin hat üzerinde oluşturduğu sehim eğrileri Microsoft Excel 2016 programıyla hesaplanmış ve çizdirilmiştir. Hattın birim direncini (k) ve iki dingil merkezi arasındaki açıklığı (m) girdi olarak alan program, 0 noktası dingillerin orta noktası olacak şekilde dingilleri konumlandırır. Dingillerin orta noktasından (0 noktası) 8 m ilerisi ve 8 m gerisine kadar Winkler formülüyle tek bir dingilin neden olduğu sehim miktarları ölçülmüştür. Aynı şekilde ikinci dingilin neden olduğu sehim miktarı da -8 m ve 8 m arasındaki hat kısmı için hesaplanır. Her 0,005 metrede iki dingilin oluşturduğu sehim miktarı toplanarak toplam sehim eğrisi elde edilir.

x	x_1	w_1	x_2	w_2	Toplam
-8	7	-0,0049076	9	-0,001843	-0,0067506
-7,995	6,995	-0,0048828	8,995	-0,0018556	-0,0067385
-7,99	6,99	-0,0048577	8,99	-0,0018683	-0,006726
-7,985	6,985	-0,0048322	8,985	-0,001881	-0,0067132
-7,98	6,98	-0,0048063	8,98	-0,0018938	-0,0067001
-7,975	6,975	-0,00478	8,975	-0,0019066	-0,0066866
-7,97	6,97	-0,0047533	8,97	-0,0019194	-0,0066727
-7,965	6,965	-0,0047262	8,965	-0,0019323	-0,0066585

Şekil 3.2: Her iki dingil için farklı konumlarda oluşan sehim miktarları.

-8 m'den başlayarak 8 m'ye kadar giden x değerleri hat konumunu ifade etmektedir. x_1 değeri, 1. dingil merkezinin hattın x noktasına olan uzaklığını, w_1 ise dingilin bu noktada neden olduğu sehim miktarını göstermektedir. Aynı şekilde 2. dingil merkezinin x noktasına uzaklığı x_2 ve burada oluşturduğu sehim w_2'dir. Toplam sütununda, iki dingile ait sehim miktarları toplanmıştır. Şekil 3.3'de x=-6 noktası için x_1 ve x_2 gösterilmiştir.



Şekil 3.3: x=-6 noktasına olan dingil merkezi uzaklıkları.

Tüm bu x değerleri için toplamda en fazla sehiminin meydana geldiği yer w^*_{max} bulunduğunda, her biri P yükünde olan tekerlerin oluşturduğu çift dingilli sistemin toplam yükü her zaman 2P olacağından;

$$k^* = \frac{2P}{w^*_{max}} \tag{3.5}$$

olarak hesaplanır. Çift dingil altındaki hat modülü u^* ve birim direnç (k^*) arasındaki bağıntı ise şu şekildedir:

$$u^* = \sqrt[3]{\frac{(k^*)^4}{64EI}} \tag{3.6}$$

Farklı ray profillerine ait esneklik değerlerini bulmak için formülizasyonda farklı I değerleri kullanılmıştır. EN-13674-1 2011'de yer alan 4 farklı ray profiline ait atalet momentleri şu şekildedir:

Tablo 3.1: Farklı ray profillerine ait kesit ağırlığı ve atalet momentleri.

Ray Profili	**Kesit ağırlığı (kg/m)**	**Atalet Momenti (cm^4)**
UIC 54	54,77	2337,90
115RE	56,82	2726,30
UIC 60	60,21	3038,30
136RE	67,49	3921,10

Girdiler		Çıktılar	
k (kN/mm)	40	w^*_{max}	-3,804
m (m)	2	u^*	32,832
P (N)	125000	B^*	0,001
u (N/mm2)	16,94	k^*	65,72
B (1/mm)	0,001	IR	0,994

Şekil 3.4: Program girdi ve çıktıları.

3.2. SONLU ELEMANLAR MODELİYLE DİNGİL ETKİLEŞİMİNİN DİNAMİK YÜK ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DOĞRULANMASI

Bir önceki bölümde komşu dingillerin birbirleri üzerindeki etkisi gösterilmiş ve bu etki nedeniyle tekerin deneyimlediği etkin esneklik değerinin değişimini inceleyecek olan çalışma tanıtılmıştır. Bu çalışmada, etkin hat esnekliğinin değişimi dingil açıklığıyla ilişkilendirilmiştir. Bezgin Yöntemi kullanılarak yapılan dinamik darbe kuvveti tahminlerinde, statik sehim (a) ve statik sistem sehimi (a') içeren bir dizi denklem kullanılır. Bu statik sehimler doğrudan hattın esnekliğiyle bağıntılıdır. Bu nedenle dinamik darbe kuvvetleri de hattın esnekliğine bağlıdır. Hattın esnekliği dingil açıklığından etkilendiğinden, dinamik darbe kuvvetlerinin de dingil açıklığıyla değiştiği söylenebilir. Bu hipotezi test etmek amacıyla Network Rail ile iletişime geçilmiş ve şirketin sonlu elemanlar programından yararlanılmıştır. Network Rail'de inşaat mühendisi olan Dr. Mohamed Wehbi tarafından ABAQUS® Explicit kullanılarak bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Toprak destekli balastlı hattan beton yapı üzerindeki balastlı hatta geçiş içeren, 4 m, 8 m ve 12 m geçiş uzunluğuna sahip üç farklı model kullanıldı. 20. ve 30. metreler arasında beton üzerinde yer alan hat modelinin toplam uzunluğu 50 metredir. Modelde kullanılan tren 120 km/sa geçiş hızı ve F_s=123 kN statik teker kuvvetine sahiptir. 1.5 m, 2.3m ve 3.1 m dingil açıklığına sahip üç adet çift dingilli boji kullanıldı. Toprak destekli hattaki düşey birim direnç k_1=23 kN/mm ve beton destekli hattaki düşey birim direnç k_2=185 kN/mm'dir. Diğer bir deyişle, toprak desteğinden beton desteğe geçişte esneklik 1/8 katına düşmekte ve beton destekten toprak desteğe geçişte 8 katına çıkmaktadır. Bu modelin amacı tekerin deneyimlediği etkin hat esnekliğinin, teker bir geçiş bölgesindeyken oluşacak dinamik darbe kuvveti üzerindeki etkisini göstermektir. Bunu gerçekleştirmek için sadece hat esnekliğini göz önünde bulundurmak gerekse de, modeli işletebilmek için birincil teker esnekliği ve bir miktar sönümleme eklemek gereklidir. Birincil teker düşey birim direnci k_w=1.85 kN/mm kullanılmıştır. Modele ait ayrıntılı veriler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Sonlu elemanlar modelinin özellikleri.

Toplam uzunluk (m)	50	Balast kalınlığı (mm)	300
Tren hızı (km/sa)	120	Balast yoğunluğu (kg/m^3)	1800
Toplam dingil yükü (kN)	246 kN	Balast Poisson oranı	0.28
Teker çapı (m)	0.9	Balast kayıp faktörü	0.1
Teker seti kütlesi (kg)	981	Ray pedi düşey birim direnci (kN/mm)	150
Ray tipi	CEN60	Ray pedi kayıp faktörü	0.2
Ray Young Modülü (MPa)	210,000	Alt temel Young Modülü (MPa)	10
Ray yoğunluğu (kg/m^3)	7750	Doğal zemin kalınlığı (mm)	3000
Ray kaybı faktörü	0.01	Alt temel yoğunluğu (kg/m^3)	2000
Travers boyutları (m) (enxboyxyükseklik)	2.5x0.25 x0.14	Alt temel Poisson oranı	0.3
Travers aralığı (m)	0.6	Alt temel kayıp faktörü	0.5
Hertz temas yayı (N/m)	10x10^9	Beton Young modülü (MPa)	35000
Balast Young Modülü (MPa)	180	Beton yoğunluğu (kg/m^3)	2400

3.3. EN 13848-5 (2008) YÖNETMELİĞİNDE İZİN VERİLEN SINIR DÜŞEY DÜZENSİZLİK DEĞERLERİ

Hatta trenin geçişi sırasında dinamik darbe kuvvetlerini azaltmak amacıyla tren hızına ve sehim çukurunun dalga boyuna bağlı olarak hatta izin verilen maksimum düşey düzensizlik (h) değerleri belirlenmelidir. Hızlı bir trenin oluşturacağı dinamik yük daha fazla olacağından, ray profilindeki düzensizlik daha az olmalıdır. Aynı şekilde hat üzerinde bulunan deforme çukurun dar olması, geniş bir deforme çukura göre daha büyük dinamik yüke neden olur. Bu nedenle her iki çukur için izin verilen düşey düzensizlik miktarı farklı olmalıdır. Avrupadaki çeşitli demiryollarının geometrik kalitelerini karşılaştırmak zordur. Ancak yine de, hattın taşıması gereken minimum geometrik özelliklerin teknik şartnamelerle belirlenmesi, tren seferlerinin güvenle gerçekleşmesi açısından önemlidir.

EN 13848-5 (Demiryolu uygulamaları, Hat ve Hat Geometrik Kalitesi) yönetmeliği, geometrik kalite standartlarını sağlamak için Avrupa demiryolları tasarımında kullanılan bir kaynaktır. Bu kaynakta 3 farklı dalga boyu için çalışma yapılmıştır. Düşey düzensizlik hesaplamalarında ele alınan dalga boyları şu şekildedir:

D1: 3 m < λ ≤ 25 m

D2: 25 m < λ ≤ 70 m

D3: 70 m < λ ≤ 200 m

Tablo 3.3: Limit durumlardaki maksimum düşey düzensizlik değerleri (EN 13848-5).

Hız (km/h)	AL (mm)		IL (mm)		IAL (mm)	
	Dalga Boyu		Dalga Boyu		Dalga Boyu	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
v ≤ 80	18	-	21	-	28	-
80 < v ≤ 120	16	-	19	-	26	-
120 < v ≤ 160	15	-	17	-	23	-
160 < v ≤ 230	12	20	14	23	20	33
230 < v ≤ 300	10	18	12	20	16	28

D3 dalga boyundaki geniş deforme çukurlar, güvenlikten ziyade konforla ilgilidir. Bu nedenle D1 ve D2 dalga boyları ve v ≤ 300 km/sa için limit durumların meydana geldiği h düşey düzensizlik değerleri Tablo 3 ile verilmiştir. Tabloda 3 farklı limit değer için hesaplama yapılmıştır.

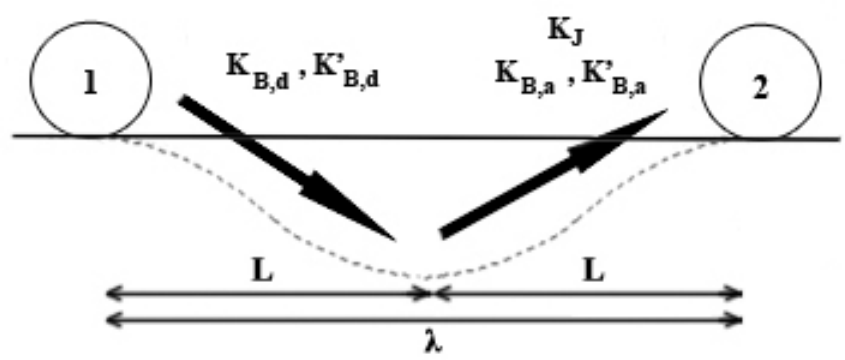
Uyarı limiti (AL): Aşılması halinde geometrik analiz yapılması ve buna göre planlı bakım operasyonları gerçekleştirilmesi gereken değerdir (EN 13848-5).

Müdahale limiti (IL): Bir sonraki ölçümden önce ve düzensizlik, güvenlik eşiğine ulaşmadan önce bakım gerektiren limittir (EN 13848-5).

Acil müdahale limiti (IAL): Aşılması halinde, raydan çıkma riskini kabul edilebilir bir seviyeye düşürmek için hatta acil müdahale gerektiren limittir. Hattı kapamak, hızı düşürmek veya geometrik düzeltmeler yapmak bu müdahalelere örnek verilebilir (EN 13848-5).

Bu çalışmada, belirli hız ve dalga boyları için limit durumlardaki maksimum düşey düzensizlik değerleri Bezgin Denklemlerine uyarlanmıştır. Hat profil bozuklukları nedeniyle meydana gelen dinamik yüklerin tahmininde kullanılan denklemlerde bu hız değerlerine bağlı olarak f darbe azaltma faktörleri hesaplanmıştır. Denklemde kullanılan düzensiz bölgedeki geçiş uzunluğu (L), deforme çukurun (λ) yarısı kadardır.

Alçalan hat profil bozukluğu için Bezgin Etki Katsayısı ($K_{B,d}$) ve Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı ($K'_{B,d}$); yükselen hat profil bozukluğu için Bezgin Etki Katsayısı ($K_{B,a}$) ve Genişletilmiş Bezgin Etki Katsayısı ($K'_{B,a}$) hesaplanmıştır. Şekil 3.5'teki gibi bir deforme çukurun ilk yarısında, azalan profil için, ikinci yarısında ise yükselen profil için hesap yapılır. Yükselen profilde, tekerin yükselen kesimde ivmelenmesi sonucu, yükselme sonunda düşey bir hızla hatta düşmesiyle oluşan ekstra dinamik yük (K_J) de göz önünde bulundurulmuştur. Hesaplamada AllTrack v1 programından yararlanılmıştır.



Şekil 3.5: Hattaki deforme çukur üzerinde teker hareketiyle ortaya çıkan dinamik yükler.

3.4. ALLTRACK V1 İLE HESAPLANAN DİNAMİK YÜKLER

AllTrack (Bezgin, 2019) programı, Bezgin ve Genişletilmiş Bezgin denklemlerini kullanarak hat esneklik değişimi ve hat profil bozukluklarından kaynaklı dinamik yük tahmini yapan bir programdır. Doç. Dr. Niyazi Özgür Bezgin tarafından 2 Ocak 2019'da kullanıma sunulmuştur. Programın esneklik değişimi kısmında, farklı esnekliğe sahip bölgelerde (tünel ve köprü giriş çıkışları v.b.) oluşan dinamik yükler ele alınmıştır. Farklı esnekliğe sahip iki bölgenin düşey birim dirençleri programa girdi olarak verilir. Aynı zamanda, teker yayı birim direnci, boji yayı birim direnci ve Hertz temas birim direnci de kullanıcı tarafından girilebilen parametrelerdir. Bu birim direnç değerlerine ek olarak istenilen teker yükü, tren hızı ve sönümleme oranı için istenilen hat uzunluğundaki dinamik yük tahmini ele edilebilir.

Programa ait düz tekerler kısmında yine hatta ve araca ait birim direnç değerleri girdi olarak alınır. Esneklik değişiminden farklı olarak teker çapı (mm), teker-ray arayüzündeki Hertz teması (mm) ve düz teker uzunluğu (mm) kullanıcıdan istenir. Çıktı olarak teker düzlüğünden

kaynaklı dinamik etki faktörü K_{B3}, araç sönümlemesinin de hesaba katıldığı dinamik etki faktörü K'_{B3} ve Hertz temas sehiminin etkisini de dahil eden $K'_{B3,H}$ katsayıları üretilir.

Bu çalışmada, yönetmelikte yer alan farklı L (λ/2) ve v değerleri için limit durumları gösteren h mesafeleri için AllTrack v1 programının profil değişimi kısmında hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalarda hatta ait düşey birim direnç (k) 20, 40, 60, 80, 100 kN/mm değerleri kullanılmıştır. Teker yayı birim direnci 10 kN/mm, boji yayı birim direnci 5 kN/mm ve Hertz temas birim direnci 20,000 kN/mm, sönümleme oranı %1, teker kuvveti 125 kN olarak alınmıştır. En fazla izin verilen dinamik yükü görebilmek amacıyla, L uzunlukları iki dalga boyu için minimuma yakın değerde seçilmiştir. D1 dalga boyu için L=2,5 m ve D2 dalga boyu için L=15 m olarak alınmıştır.

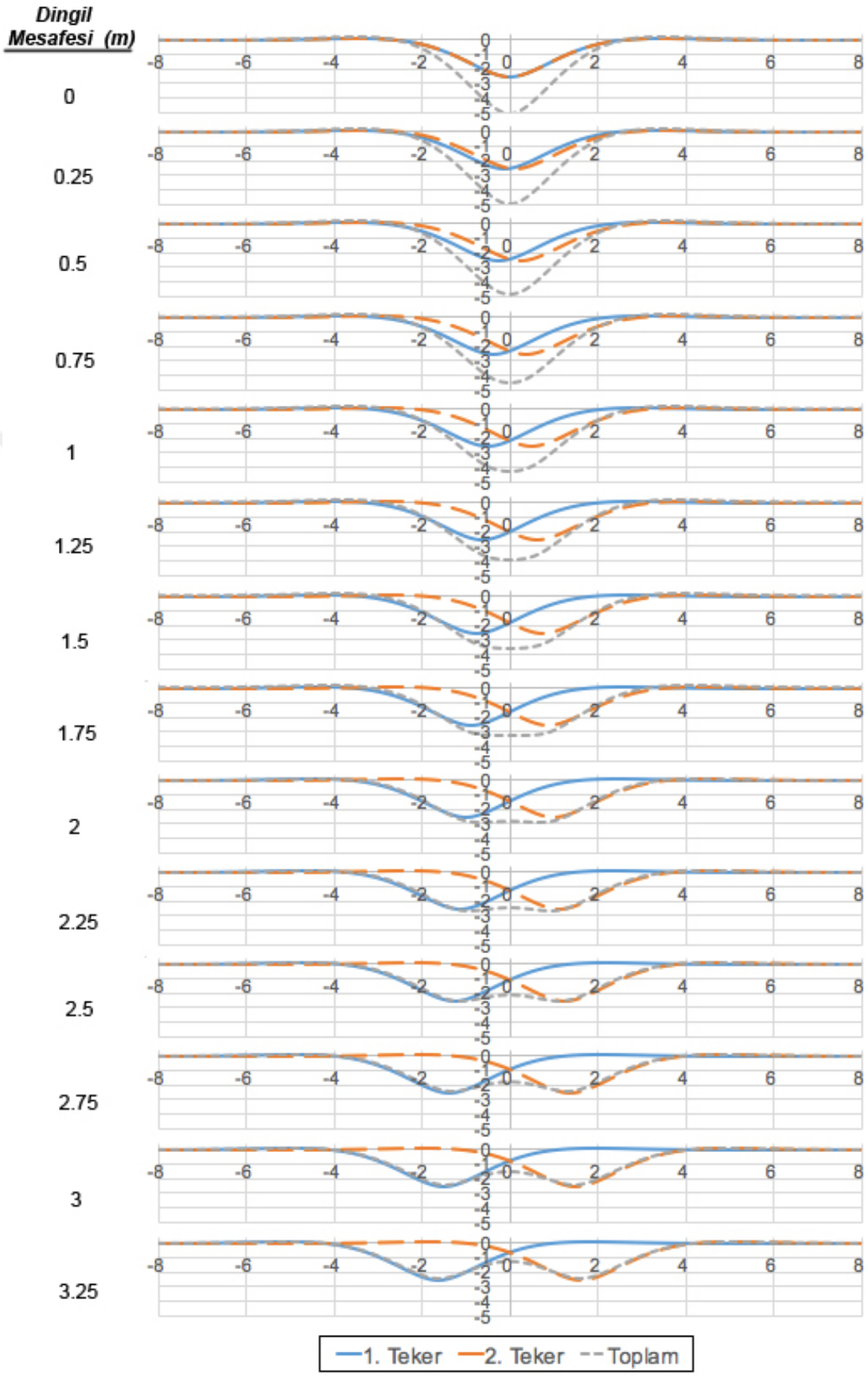
4. BULGULAR

4.1. HATTIN ÇİFT DİNGİL ALTINDA GÖSTERDİĞİ ESNEKLİK VE ESNEKLİĞİN DİNGİLLER ARASI MESAFEYLE DEĞİŞİMİ

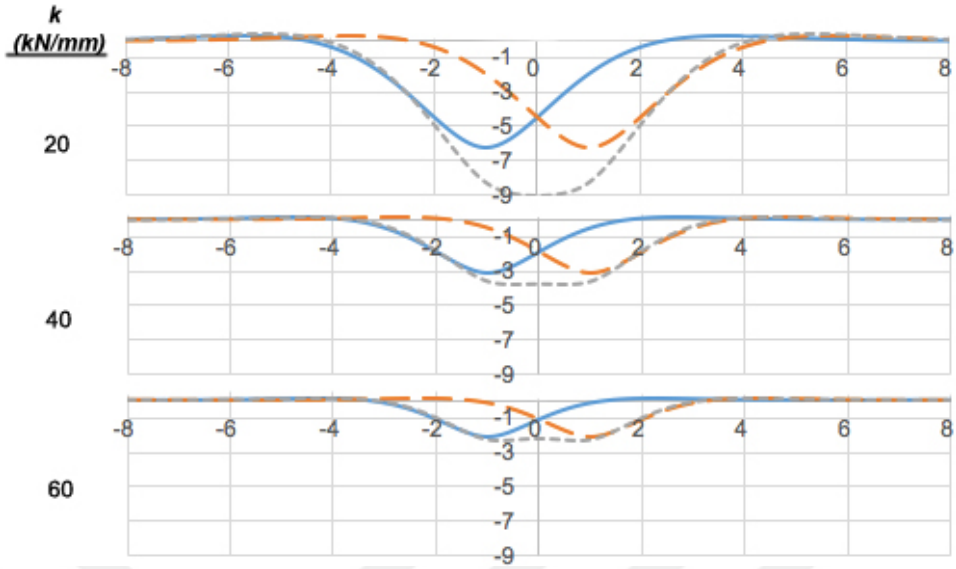
4.1.1. Dingil Sehim Dalgalarının Girişimi

Hat esnekliğinin çift dingil altında dingil merkezleri arasındaki mesafeyle orantılı değişimi incelenmiştir. Dingil açıklığı 3,25 metreden azken çift dingil etkileşiminin esneklik üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Çoğu hat esnekliğinde bu dingil açıklığı içerisinde hat birim direnci, gerçek birim direncin 2 katına ulaşmış ($k^* \geq 2k$) olur. 3,25 m'den büyük dingil açıklıklarında daha küçük çaplı değişimler gerçekleşir. Bu nedenle Şekil 4.1'de k=50 kN/mm için tekerlerin üst üste olarak konumlandığı m=0'dan başlayarak iki dingil merkezi arası mesafenin 3,25 m olduğu duruma kadar olan sehim girişimleri gösterilmiştir.

Eğer hatta tek bir dingil olsaydı maksimum sehimin dingil altında olması beklenirdi. Çift dingil için dingillerin üst üste olduğu durumda maksimum sehim yine bu şekildedir. Ancak dingiller arası mesafenin biraz daha artmasıyla, örneğin m=1,25 metreyken maksimum sehim dingil altlarında değil, iki sehim eğrisinin girişim yaptığı yerde, yani dingillerin orta noktasında olduğu görülmektedir. Dingiller arası mesafe m=2 m'den itibaren sehim eğrilerinin ayrışmaya başladığı ve maksimum sehimin tekrar dingil altına doğru kaydığı görülmektedir. Açıklık değerinin biraz daha fazla olması durumunda, örneğin m=3 metreyken maksimum sehimin yeniden dingil altında meydana geldiği ancak diğer dingilin etkisi nedeniyle normal değerinden daha az olduğu görülmektedir. Bu mesafede, bir dingilin hat üzerindeki kaldırma etkisi diğer dingilin sehimini azaltarak hattın normalden daha az sehim yapmasını sağlar. Açıklığın daha da artmasıyla, dingillerin birbiri üzerindeki etkisi önemsenmeyecek kadar azalır ve hattın birim direnci tek dingil altındaki birim direncin 2 katına eşit olur.



Şekil 4.1: Sehim girişimlerinin dingiller arası mesafeyle değişimi.

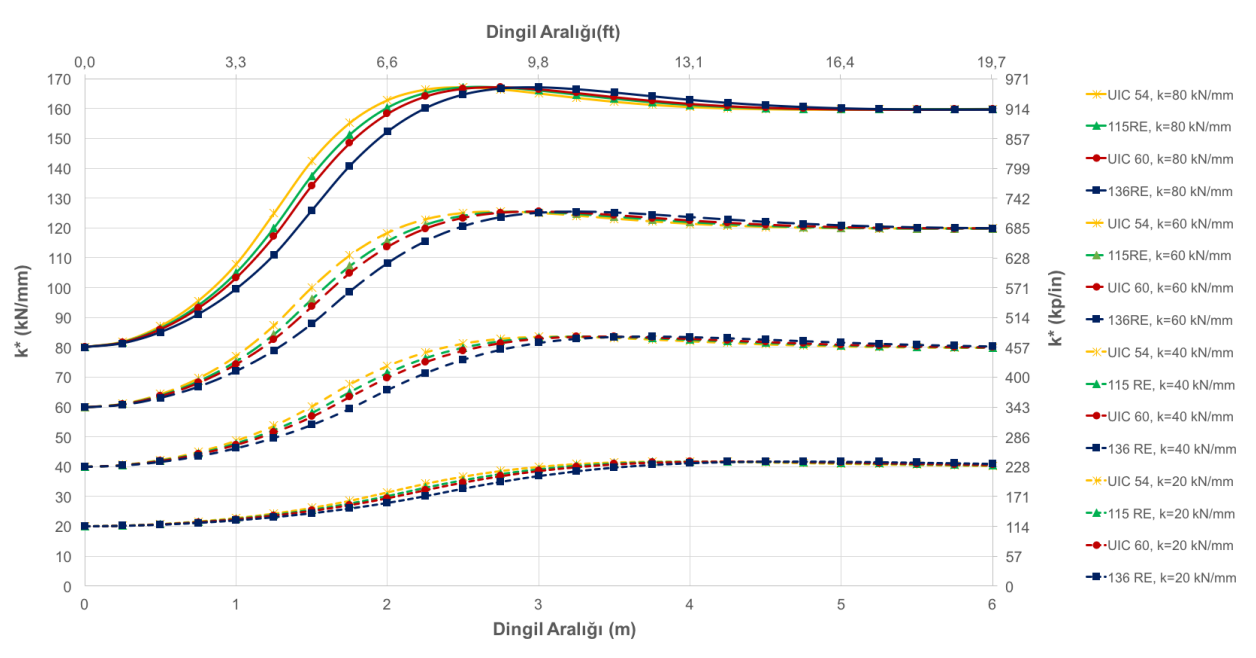


Şekil 4.2: m=2 m için farklı k değerlerinde oluşan sehim girişimleri.

Şekil 4.2'de dingil açıklığı sabit tutularak (m=2 m) farklı k değerleri için sehim girişimleri gösterilmiştir. Belirli bir dingil açıklık mesafesinde her hat esnekliğinde farklı sonuçlar ortaya çıkar. Yüksek esneklikte teker daha geniş bir sehim çukuru oluşturur. Bu nedenle yüksek esneklikli bir hattaki teker, çevresini daha geniş bir alanda etkiler. Özellikle dingiller arası mesafe küçükse oluşan sehim çukurları birbiriyle daha fazla girişim yapar. Esnekliğin azalmasıyla maksimum sehim, dingil altında oluşmaya daha eğilimli hale gelir. Bir tekerin oluşturduğu sehimin diğer teker üzerindeki etkisi azalır. Sonuç olarak, belirli bir dingil açıklık mesafesinde, esnek bir hat, esnek olmayan hatta göre daha çok dingil etkileşimi gerçekleştirir. Bu nedenle de m'ye bağlı olarak değişen k^* değeri, esnek hatta daha az bir ivmeyle artar. Sert bir hatta m'nin az bir miktarda artırılması k^* değerini önemli ölçüde etkileyebilir.

4.1.2. Farklı Ray Profilleri İçin Esneklik Değişimleri

Hesaplamaların hangi ray profiline göre yapıldığı da k^* değerini etkiler. Çift dingil altındaki esneklik, ray çeliğinin Young modülü (E) ve ray atalet momentine (I) de bağlıdır. E, her ray için sabit olarak 210 000 N/mm^2 olarak alınmıştır. Ray profiline göre I değeri değişmiştir. Çalışmada 4 farklı ray profili için hesap yapılmıştır. Şekil 4.3'de bu ray profilleri için m'ye bağlı olarak değişen k^* değerleri gösterilmiştir.

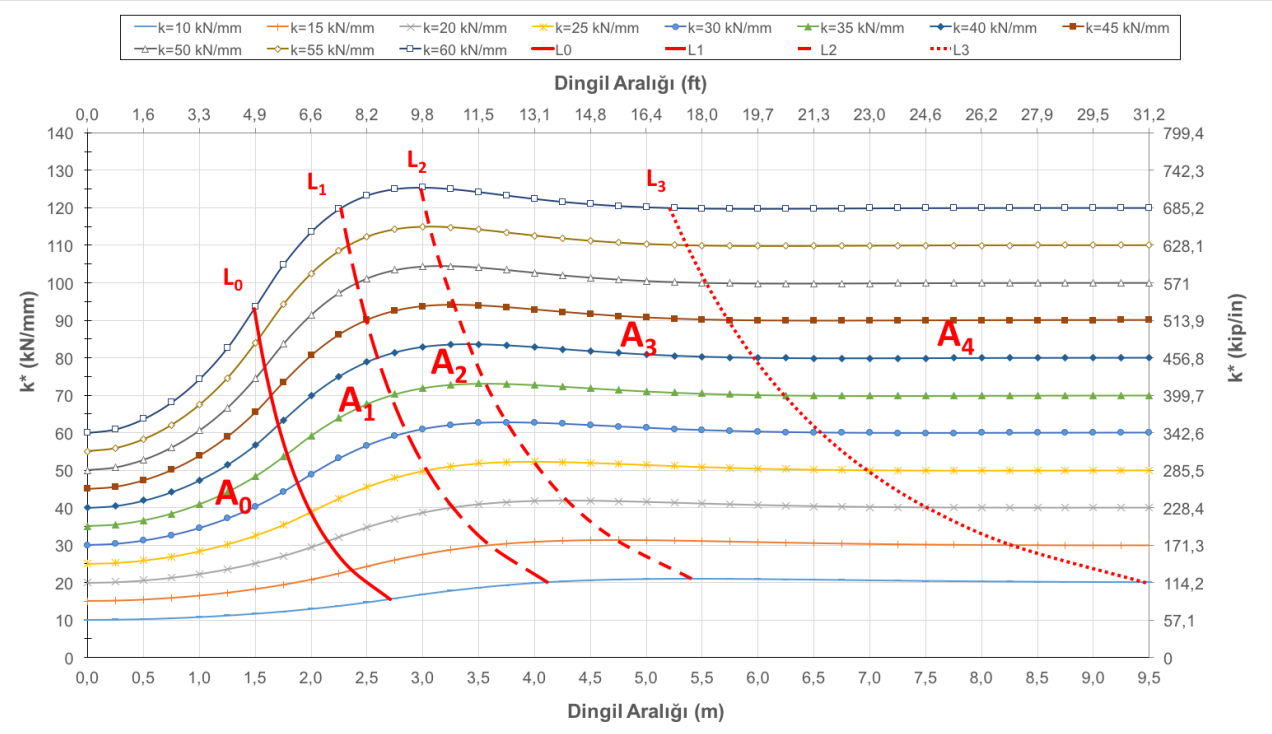


Şekil 4.3: Farklı ray profillerinde dingil mesafesi açıklığına göre değişen hat esnekliği.

Raylar hafiften ağıra doğru UIC 54, 115RE, UIC 60 ve 136RE sırasıyla gitmektedir. Şekilde, m mesafesi belirli bir eşik değerin altındayken hafif rayların daha az esneklik gösterdiği, yani daha yüksek k^* değerine sahip olduğu görülmektedir. Ancak hattın esnekliğine bağlı olarak, değişen eşik değerden belirli bir mesafe sonra bu düzen değişmektedir. Daha yüksek birim direncin hafif rayda yüksek, ağır rayda daha düşük olduğu bu düzenin değiştiği eşik değerleri k=80 kN/mm için 2,75 m; k=60 kN/mm için 3 m; k=40 kN/mm için 3,25 m; k=20 kN/mm için 4,25 m'dir. Eşik değerden önce çift dingil altındaki birim dirençte hafif raydan, ağır raya doğru bir azalma görülmektedir. Eşik değerde bu sıralama düzensiz bir şekilde bozulmuş olsa da, mesafe daha da arttıkça k^* ağır raydan hafif raya doğru bir azalma gösterir. Ancak bu mesafelerden itibaren ray profilleri arasındaki esneklik farkı oldukça azdır. Yüksek k değerine sahip sert zeminlerde, ray profilleri arasındaki farkın daha fazla olduğu görülmektedir.

4.1.3. Esnekliğin Dingiller Arası Mesafeyle Değişimi

Bu bölümden itibaren yapılan hesaplamalarda UIC 60 ray profili esas alınmıştır. Excel dosyasında farklı dingil açıklık mesafeleri (m) için çizdirilen ve hattın çift dingil altındaki esnekliğini gösteren grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.4: Farklı esneklikler için dingiller arası mesafenin artmasıyla değişen hat esnekliği.

İki dingil üst üsteykenki hat birim direnci, tek dingil altındaki hat birim direncine eşittir. Çünkü bu durumdaki yük, tek dingil altındaki yükün 2 katı ve sehim, tek dingil altındaki sehimin 2 katı kadar olur. Bu ilk durum için $k^* = k$'dır. Dingiller arası mesafenin artmasıyla, her hat esnekliğinde k^* değeri artar. Bir noktada maksimuma ulaşan k^*, daha sonra giderek azalır ve en son çift dingil etkisinin önemsenmeyecek seviyede olduğu bir mesafede $k^* = 2k$ olarak sabit kabul kabul edilebilir. Dingil açıklığının az olduğu mesafelerde maksimum sehim iki dingilin orta noktasında oluşur ve esneklik değeri bu sehim miktarına göre hesaplanır. Ancak açıklık arttıkça maksimum sehim dingillerin orta noktasından, dingil altına doğru kaymaya başlar. Şekildeki L_0 eğrisi, maksimum sehimin dingillerin orta noktasından kaymaya başladığı anı temsil etmektedir. Bu noktaya kadar hızla artan k^* eğrisi, L_0 noktasından dan itibaren artışını daha az bir ivmeyle sürdürür. L_1 eğrisi, çift dingil altındaki birim direncin artarak tek dingil altındaki birim direncin 2 katına eşitlendiği mesafedir. Bu noktadan itibaren k^* artmaya devam ederek tek dingil altındaki birim direncin 2 katının da üzerine çıkar ve L_2 üzerindeki noktada maksimum değerine ulaşır. Buradan sonra k^* azalmaya başlar. L_3 eğrisi, k^* değerinin tekrar gerçek k değerinin 2 katına eşitlendiği noktadır.

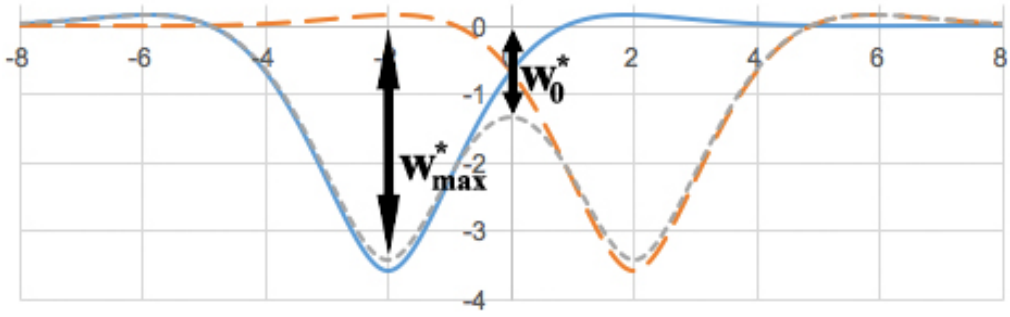
A_0 ile gösterilen bölgede, dingillerin orta noktasında her iki dingilin neden olduğu sehim toplamı hattaki maksimum sehime eşittir. İki dingil sehim çukurunun birbiriyle tam girişim yaptığı (üst üste dingiller) durumdan başlayarak, girişimin %64 olduğu noktaya kadar devam eder ve bu alan sonunda $k^* \approx 1{,}55k$ kadar olur. Bu alan içerisinde iki dingil tam bir bütün olarak düşünülebilir. Çünkü dingillerin birbiri üzerindeki etkisi oldukça fazladır.

A_1 bölgesi, çift dingil etkisi nedeniyle hattın gösterdiği birim direncin, tek dingil altındaki hat birim direncin 2 katından daha az olduğu bölgedir. Bu bölgede dingil açıklığının artmasıyla k^* artar ve A1 sınırında 2k değerine ulaşır.

A_2 ve A_3 bölgelerinde bir dingilin merkezinden itibaren belirli bir mesafe sonra oluşturduğu kaldırma kuvveti etkisinin, diğer dingil merkezi üzerine etkimesi sonucu daha düşük maksimum sehim ve dolayısıyla daha büyük bir düşey birim direnç değeri görülür. $A_2 - A_3$ sınırını belirleyen eğri üzerinde en düşük maksimum sehim ve en yüksek düşey birim direnç meydana gelir. A_2 bölgesi birim direncin artış gösterdiği, A_3 bölgesi ise tekrar azaldığı alanlardır.

A_3 sınırına kadar devam eden azalış, A_4 bölgesinde önemsenmeyecek kadar küçük miktarlara düşer. Bu bölgede bir dingilin kendi merkezinden çok uzak bir mesafeye olan küçük etkisi nedeniyle, esneklik değerinde küçük artış ve azalışlar yaşanır. Ancak bu dalgalanmaların miktarı oldukça küçüktür. A_4 bölgesindeki dingil aralık mesafesi arttıkça dalgalanmaların boyutu daha da küçülmektedir.

Şekil 4.4'te L_0 ile gösterilen konum, maksimum sehimin dingil ortasından yanlara doğru kaymaya başladığı ilk andır. Bu ayrışmanın hangi mesafede başladığını tespit edebilmek için dingillerin orta noktasındaki sehim toplamının $(w^*{}_0)$, hat üzerindeki maksimum sehime $(w^*{}_{max})$ oranı hesaplanmıştır. İki dingil hat üzerinde tek bir sehim eğrisi oluşturuyormuşçasına yakınken bu oran 1'e eşittir. Tablo 4.1'de bu oranın 1'den düşmeye başladığı ilk dingil mesafesi farklı esneklikler için kaydedilmiştir. Bu noktalarda iki dingilin hat üzerinde oluşturduğu sehim eğrisileri ayrışmaya başlamış ve tek bir eğri olmaktan çıkmıştır. Bu nedenle L_0 noktasında Şekil 4.4'deki k^* artış eğrisinin eğimi değişmektedir.

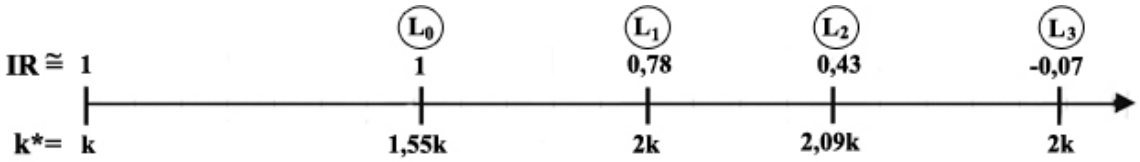


Şekil 4.5: İki dingil ortasındaki toplam sehim ve maksimum toplam sehim.

$$Girişim\ Oranı(IR) = \frac{w^*{}_0}{w^*{}_{max}} \tag{4.1}$$

Esnekliğin kritik değerlere ulaştığı mesafelerde (L_0, L_1, L_2 ve L_3) sehim eğrilerinin birbiriyle yaptığı girişim oranının her esneklikte sabit olduğu görülmüştür. Tamamen üst üste olan iki dingil için IR=1 iken dingiller arası mesafenin artmasıyla IR giderek azalır. Bu değerin negatif olması, dingil sehim çukurlarının girişiminin sona erdiğini ve dingillerin hatta oluşturduğu kaldırma eğrilerinin girişim yaptığını gösterir.

Üzerinde belirli aralıkta iki dingil olan bir hattaki sehim eğrilerinin hangi noktada birbirinden ayrışmaya başladığı, hangi noktada $k^* = 2k$ değerine ulaştığı ve hangi noktada esneklik değerinin sabitlendiği gibi kritik noktalar Girişim Oranı (IR) cinsinden iyi bir şekilde ifade edilebilir.Aşağıdaki grafikte 1'den başlayarak 0'a giden ve daha sonra önemsenmeyecek kadar küçük değerlerde sürekli artıp azalarak devam eden IR için kritik noktalardaki değerler gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Dingil açıklığının artmasıyla değişen birim direnç ve IR değerleri.

Kritik noktaların her hat esnekliği için hangi dingil açıklık mesafesinde meydana geldiği ve bu kritik noktalarda hattın eriştiği k^* değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.1: Farklı esneklikler için kritik konumlardaki dingil açıklığı mesafeleri ve bu noktalardaki k^* değerleri.

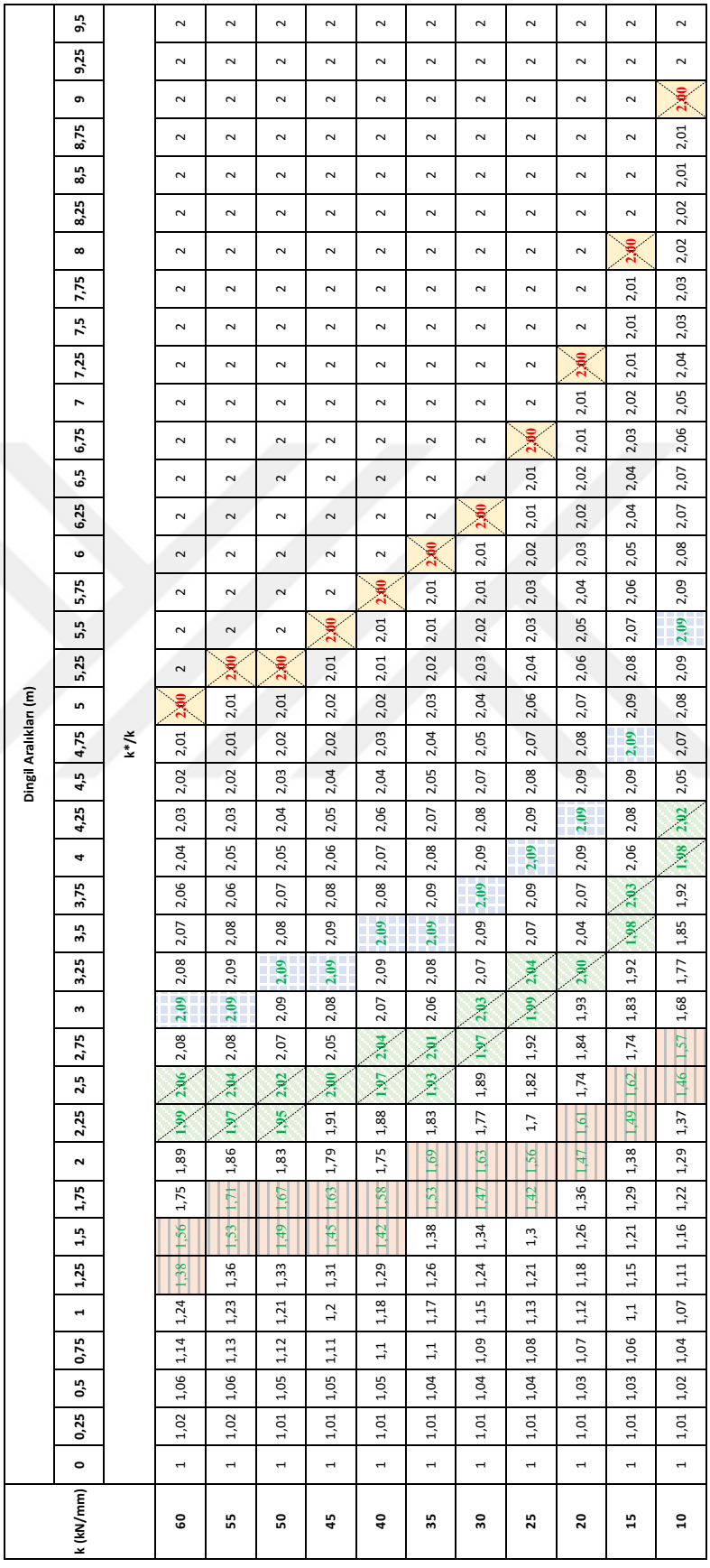
k (kN	L_0		L_1		L_2		L_3	
	m (m)	k* (kN/mm)	m (m)	k* (kN/mm)	m (m)	k* (kN/mm)	m (m)	k* (kN/mm)
60	1,49	93,08	2,27	120	2,98	125,42	5,21	120
55	1,53	85,33	2,33	110	3,06	114,97	5,36	110
50	1,58	77,56	2,41	100	3,16	104,52	5,54	100
45	1,64	69,82	2,50	90	3,28	94,06	5,73	90
40	1,70	62,04	2,60	80	3,41	83,61	5,96	80
35	1,78	54,30	2,71	70	3,56	73,16	6,23	70
30	1,88	46,54	2,86	60	3,75	62,71	6,56	60
25	1,99	38,78	3,04	50	3,99	52,26	6,98	50
20	2,15	31,02	3,27	40	4,29	41,81	7,51	40
15	2,36	23,27	3,60	30	4,73	31,36	8,27	30
10	2,71	15,51	4,12	20	5,41	20,90	9,47	20

0-8 m dingil mesafeleri arasında 0,005 m hassasiyetle hesaplanan m-k^* tablosuna göre elde edilen kritik konumlar taranarak gösterilmiştir. L_0, L_1, ve L_3 için kritik konumdaki k^* değerinin üst ve altındaki mesafeler taranmıştır. L_2'de ise tablodaki en yüksek k^* değerine sahip m taranmıştır.

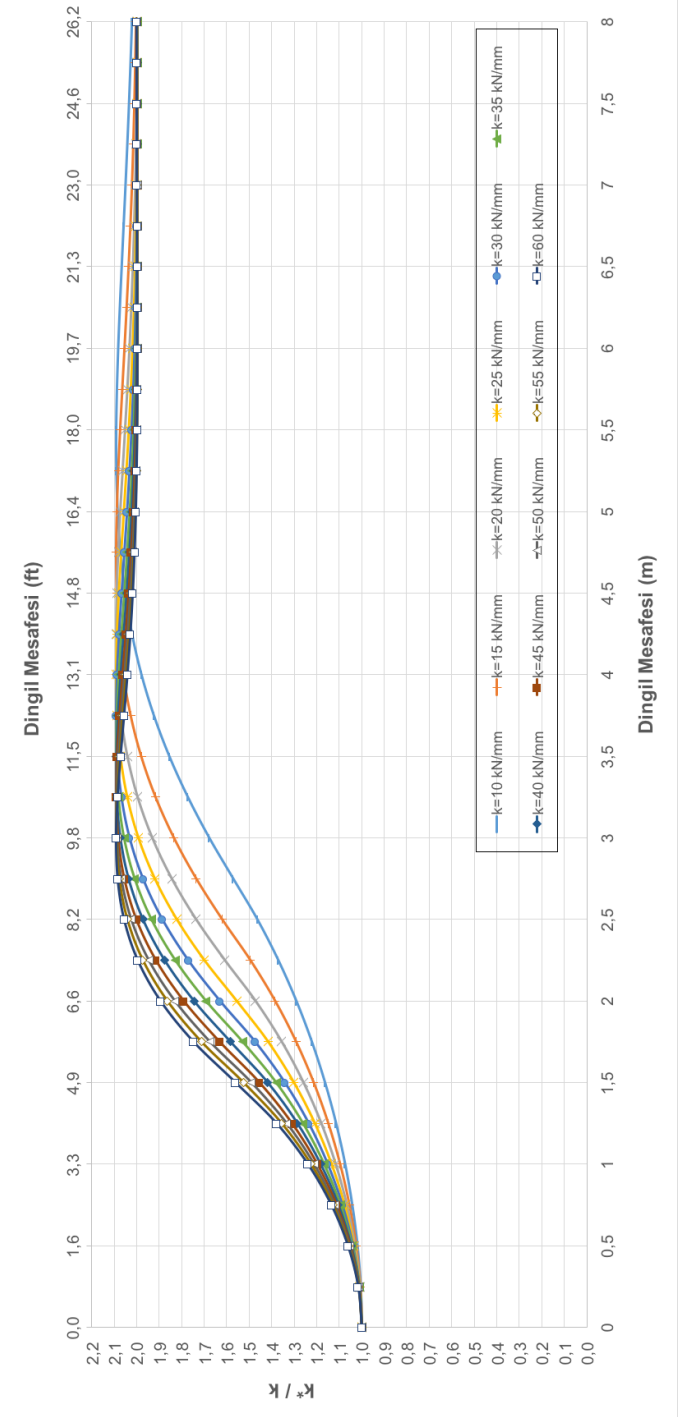
Tablo 4.2: Dingil mesafesine (m) göre değişen k^* ve limit değerler.

| k (kN/mm) | Dingil Aralıkları (m) | | |

Tablo 4.3 : Dingil mesafesine (m) göre değişen k^* ve limit değerler



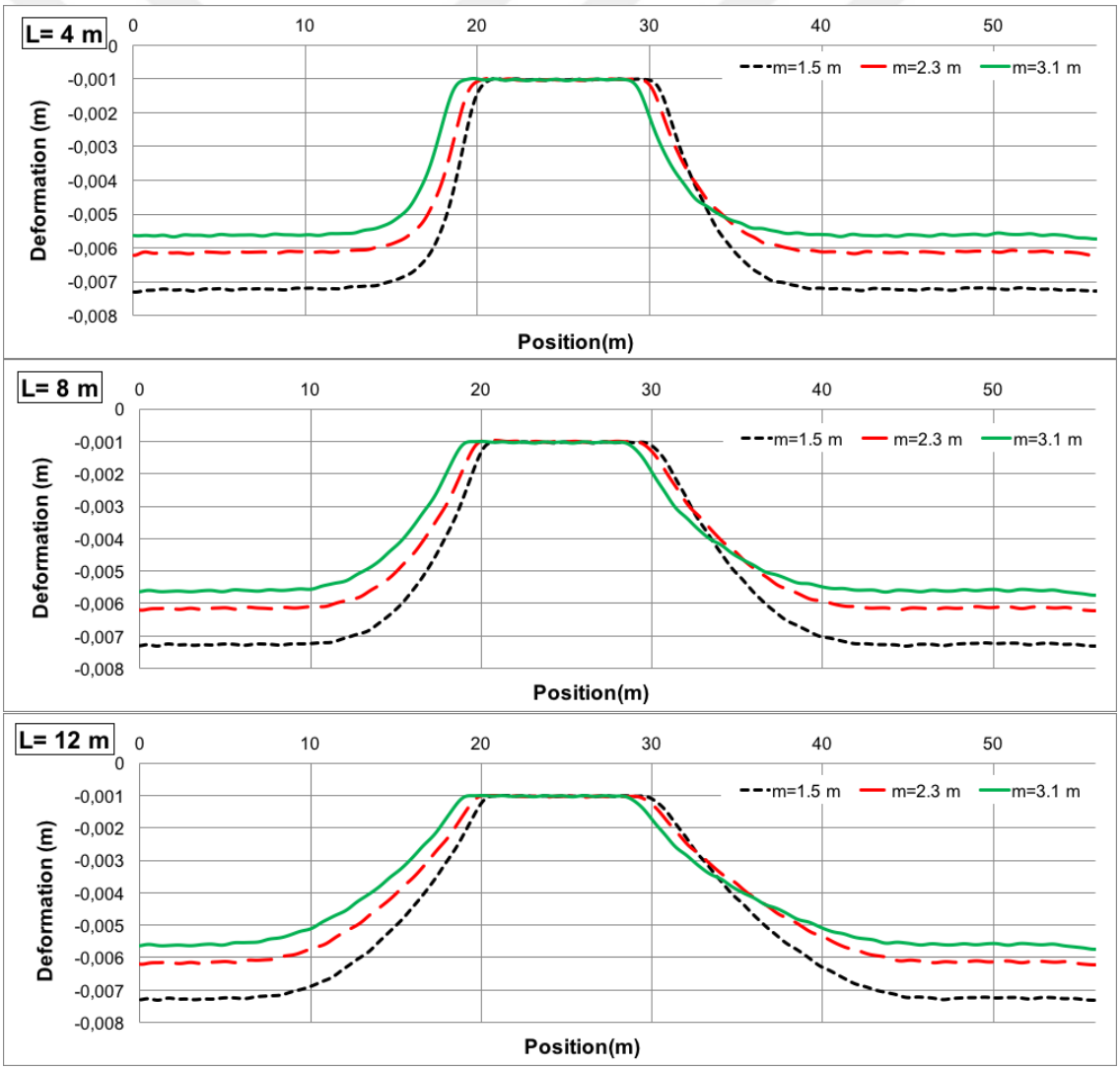
Dingil mesafesine göre değişen esneklik tablosu normalize edilerek, dingil mesafesine bağlı olarak değişen k^*/k oranları elde edilmiştir. Hattın tek dingil altındaki düşey birim direnci k ve dingiller arası mesafe m biliniyorsa, tablodan bu değerlere tekabül eden k^*/k oranı bulunabilir. Tek teker altındaki direncin bu katsayıyla çarpılmasıyla çift dingil altındaki düşey birim direnç elde edilir.



Şekil 4.7: Dingil mesafesiyle değişen k*/k oranları.

4.1.3. Etkin Esneklikle Değişen Dinamik Darbe Kuvvetlerinin Sonlu Elemanlar Analizi

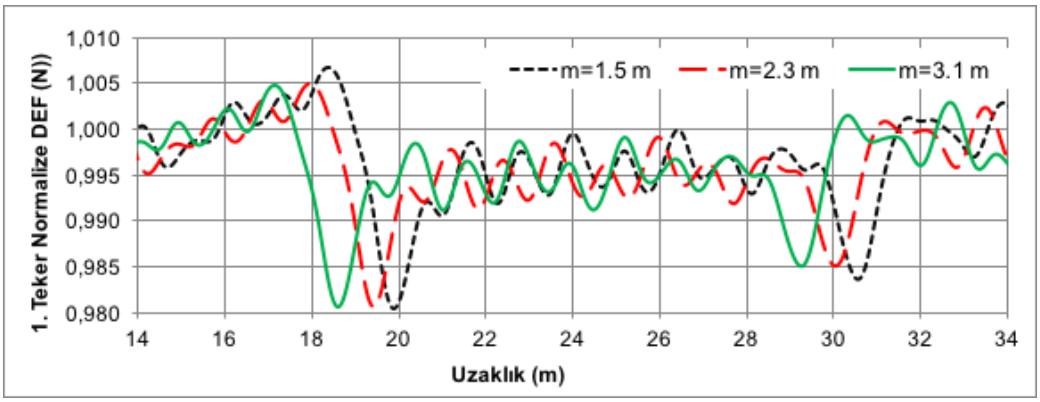
Bir önceki bölümde dingil komşuluğunun bir etkisi olarak boji içerisindeki bir tekerin tecrübe ettiği hat esnekliğinin değiştiği gösterilmiştir. Etkin hat esnekliğinin dingil açıklığına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Dinamik darbe kuvvetleri tahminleri hattın esneklikliğiyle bağıntılı olduğundan, tekerin deneyimlediği etkin esneklik dinamik darbe kuvvetini de etkiler. Dolayısıyla, dinamik darbe kuvvetinin dingil açıklığından da etkilendiği söylenebilir. Bu hipotezi desteklemek için Dr. Mohamed Wehbi'nin oluşturduğu sonlu elemanlar modelinin detayları Bölüm 3.2'de verilmiştir. L=4 m, 8 m ve 12m geçiş uzunlukları için m=1.5 m, 2.3 m ve 3.1 m dingil aralıklarında oluşan sehimler Şekil 4.8'te gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Farklı geçiş uzunluklarında etkin hat esnekliğinin değişimi (Balcı, Bezgin & Wehbi, 2019)

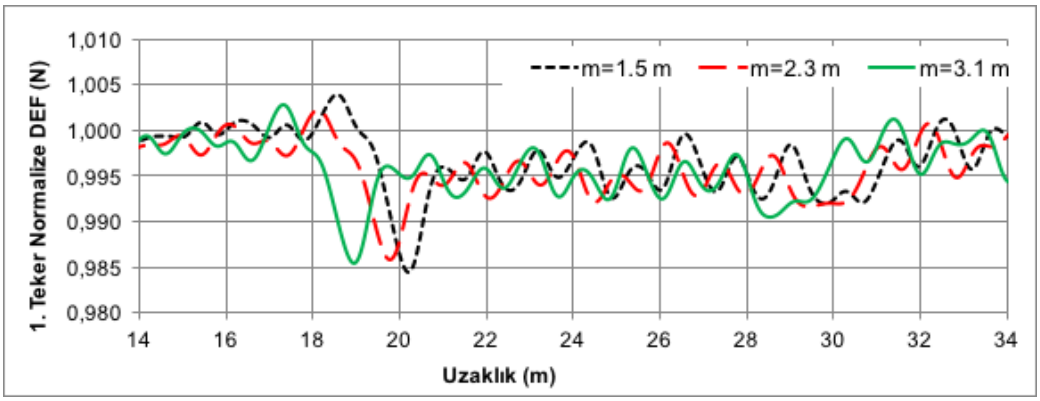
Toprak destekli hat ve beton destekli hatın düşey birim dirençleri k_1=23 kN/mm ve k_2=185 kN/mm arasında 8 katlık bir esneklik farkı vardır. Birincil teker esnekliği (k_w=1.85 kN/mm) ve hat esnekliğinin bileşimi olarak eşdeğer sistem düşey birim direnci k_{eq1}=1.71 kN/mm ve k_{eq2}=1.83 kN/mm ve topraktan destekten beton desteğe girişteki yeni esneklik oranı 1.07 ve tekrar toprak destekli hatta çıkıştaki yeni esneklik oranı 0.924'tür. Sisteme ait yayların dahil edilmesiyle esneklik farkının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.

Şekil 4.7'den herhangi bir esneklik ve dingil mesafesi için etkin esneklik katsayı bulunabilir. k_1=23 kN/mm ve dingil mesafesi 1.5 m, 2.3 m ve 3.1 m için enterpolasyonla $c_{1.5}$=0.64, $c_{2.3}$=0.83 ve $c_{3.1}$=1.00 katsayılarına erişilir. k_2=185 kN/mm için extrapolasyonla $c_{1.5}$=1.00, $c_{2.3}$=1.04 ve $c_{3.1}$=1.00 katsayılarına ulaşılır. Esneklik değerinin bu katsayılarla çarpılmasıyla etkin esneklik değerleri bulunabilir. Bu durumda dingil açıklık sırasına göre k^*_1=14.7 kN/mm, 19.1 kN/mm, 23 kN/mm ve k^*_2=185 kN/mm, 192.4 kN/mm'dir. Bu yeni esneklik değerlerine göre toprak destekli hat ile beton destekli hat arasındaki esneklik oranı sırasıyla k^*_2/ k^*_1= 1.117, 1.084 ve 1.0711 olmaktadır. Tüm parametreler aynı olmasına rağmen dingil aralığının değişmesiyle geçiş bölgesindeki esneklik oranının değiştiği görülmüştür. İki bölge arasındaki esneklik oranı arttıkça dinamik etki faktörü de artar. 1.5 m, 2.3 m ve 3.1 m dingil açıklıklarında, açıklık arttıkça esneklik oranının azaldığı görülmüştür. Bu nedenle dinamik etki faktörü en düşük m=3.1 m için ve en yüksek m=1.5 m için olmalıdır. Teker geçiş bölgesinden geçerken oluşan dinamik yüklerin, F_s=123 kN'a göre normalizasyonu 1. teker için Şekil 4.9'da, 2. teker için Şekil 4.10'da verilmiştir.

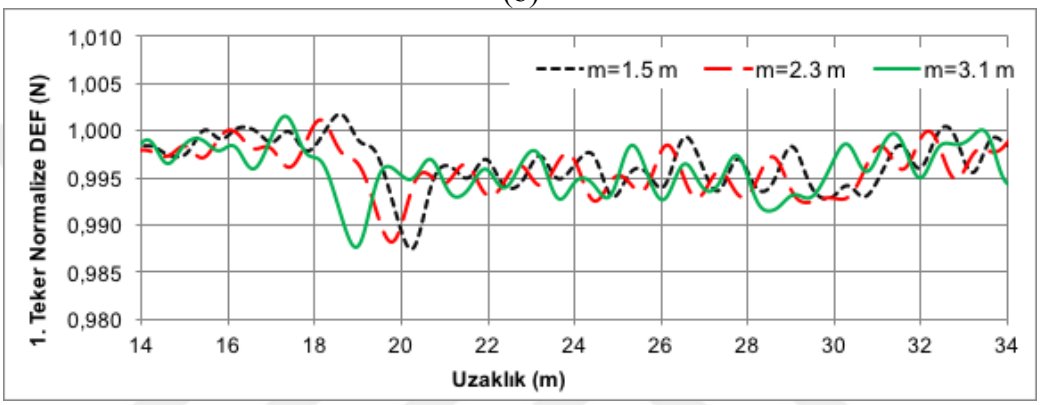


(a)

Şekil 4.9: Geçiş uzunluğu a) 4 m, b) 8 m, c)12 m için 1. tekerde oluşan dinamik yüklerin normalizasyonu (Balcı, Bezgin & Wehbi, 2019).

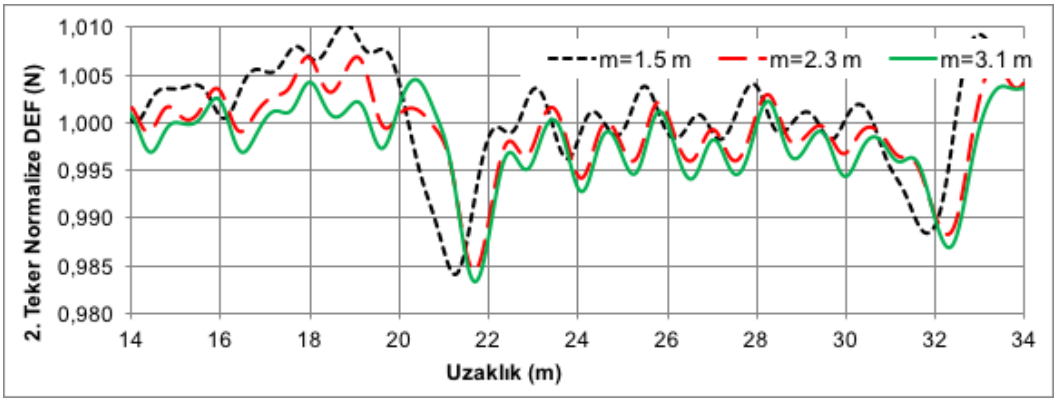


(b)



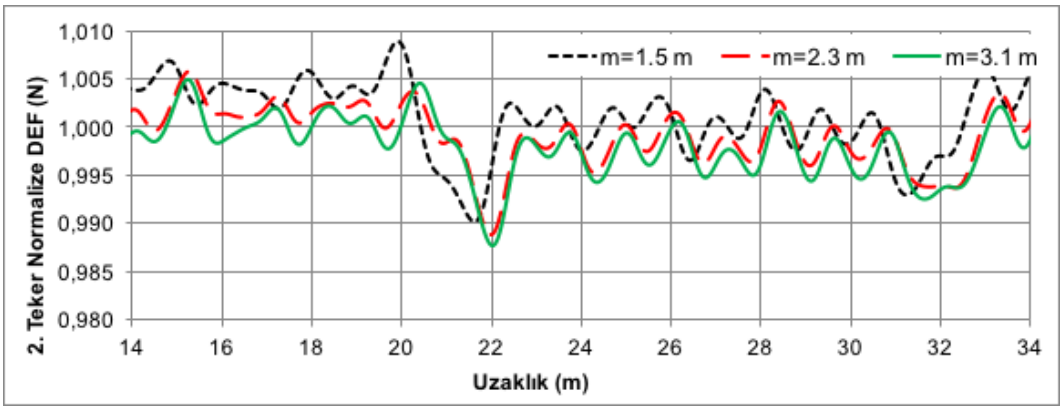
(c)

Şekil 4.10 (devam): Geçiş uzunluğu a) 4 m, b) 8 m, c)12 m için 1. tekerde oluşan dinamik yüklerin normalizasyonu (Balcı, Bezgin & Wehbi, 2019).

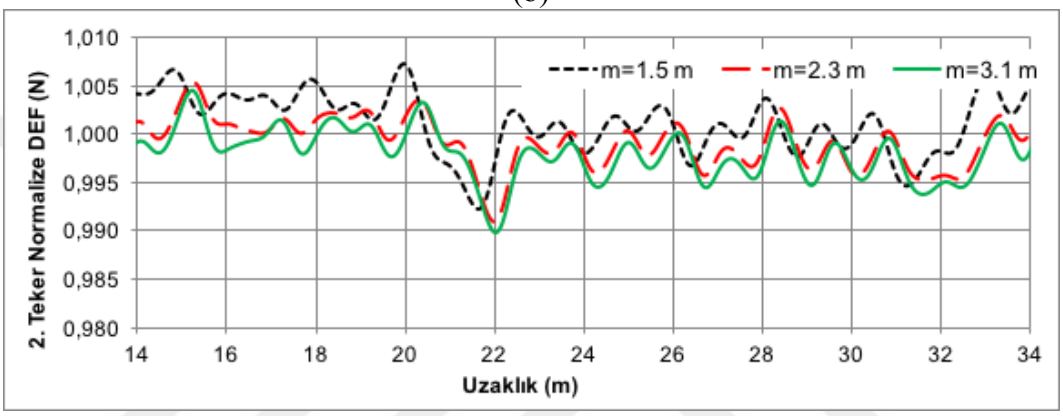


(a)

Şekil 4.10: Geçiş uzunluğu a) 4 m, b) 8 m, c)12 m için 2. tekerde oluşan dinamik yüklerin normalizasyonu (Balcı, Bezgin & Wehbi, 2019).



(b)



(c)

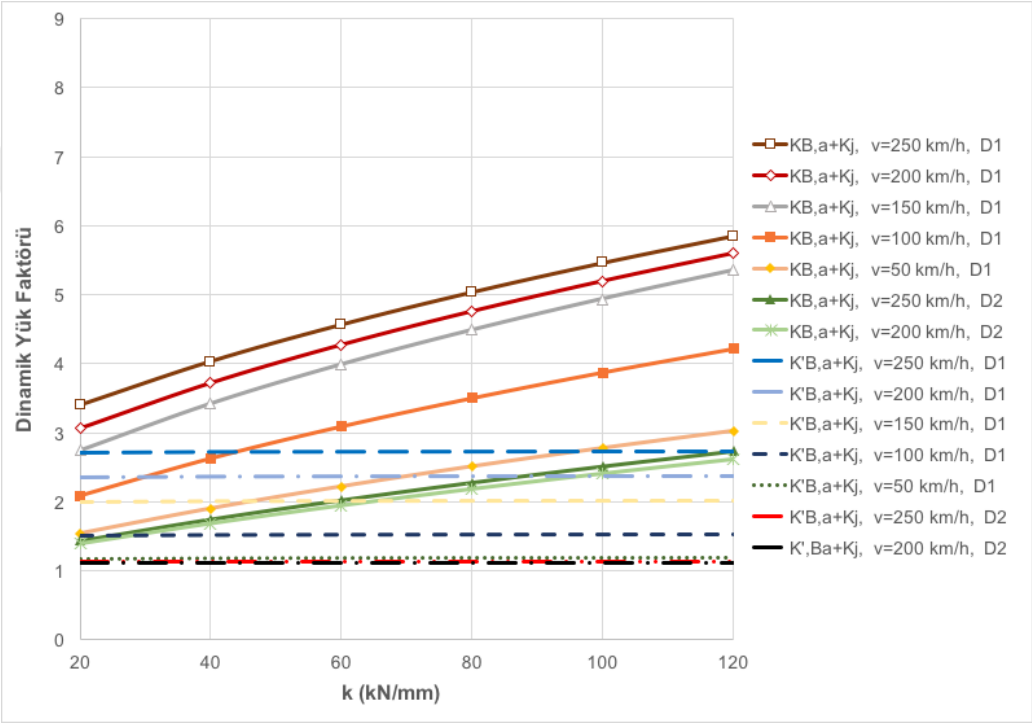
Şekil 4.11 (devam): Geçiş uzunluğu a) 4 m, b) 8 m, c)12 m için 2. tekerde oluşan dinamik yüklerin normalizasyonu (Balcı, Bezgin & Wehbi, 2019).

4.2. DÜŞEY DÜZENSIZLIK SINIR DEĞERLERINDE MEYDANA GELEN DINAMIK DARBE KUVVETLERI

Bu başlık altında, aşılması halinde analiz ve buna uygun bakım gerektiren uyarı limiti (AL), bir önceki ölçümden önce müdahale gerektiren müdahale limiti (IL) ve tren geçişleri için risk ifade eden ve hatta derhal müdahale gerektiren acil müdahale limiti (IAL) için EN 13848-5 (2008) yönetmeliğinde verilen sınır düzensizlik değerleri (h) ve geçiş uzunlukları (L) Bezgin Yöntemleri'ne uyarlanmış ve bu sınır durumlarda tren geçişi esnasında ortaya çıkacak olan dinamik yükler hesaplanmıştır. Farklı esnekliklerde bu yükler değişim grafikleri çizdirilmiştir. Bu hesaplamalar yükselen hat profil bozukluğu için sırasıyla Bezgin Etki Faktörü ($K_{B,a}$), Genişletilmiş Bezgin Etki Faktörüne ($K'_{B,a}$), yükselen profildeki ivmelenme etkisinin katılmasıyla elde edilen $K_{B,a} + K_J$ ve $K'_{B,a} + K_J$ için yapılmıştır. Alçalan hat profil bozukluğu için de sırasıyla Bezgin Etki Faktörü ($K_{B,d}$) ve Genişletilmiş Bezgin Etki Faktörü ($K'_{B,d}$) için hesaplamalar yapılmıştır.

4.2.1. Yükselen Hat Profilinde Meydana Gelen Dinamik Yükler

Yönetmelikteki D1 ve D2 dalga boyundaki iki deforme çukur için sınır durumda verilen bozuk profildeki hat geçiş uzunluğu L ve uyarı limitine ulaştığı maksimum düşey düzensizlik h için farklı esnekliklerde elde edilen dinamik yükler Şekil 4.12'deki gibidir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de sırasıyla müdahale limiti ve acil müdahale limiti değerleri için aynı şekilde elde edilen dinamik yükler gösterilmiştir.



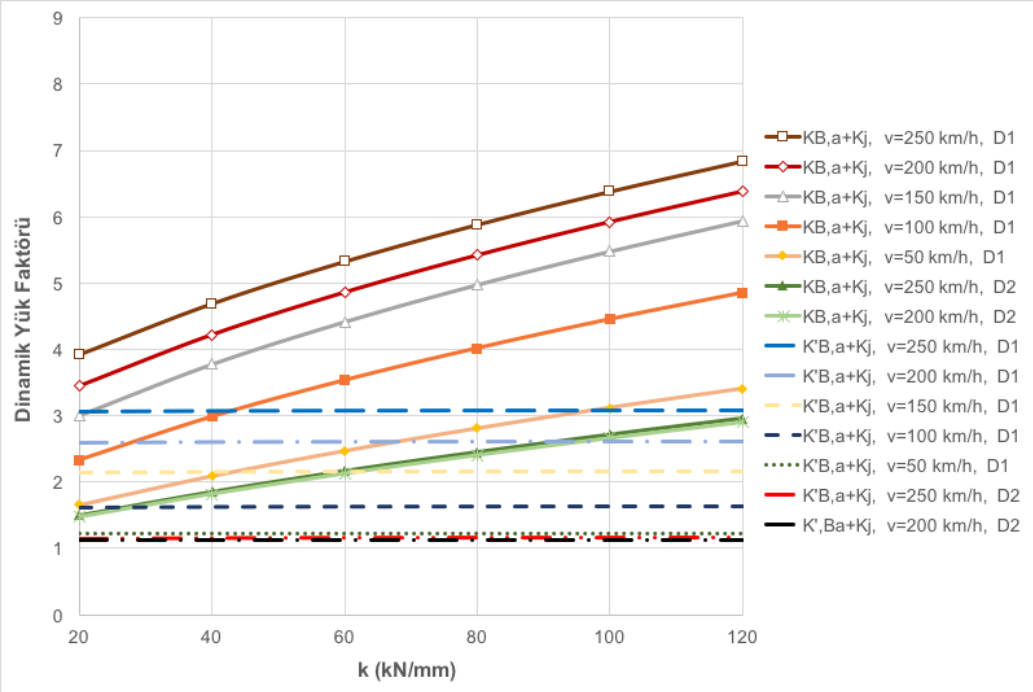
Şekil 4.12: Yükselen profil uyarı limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler.

Düşey birim direnç değerinin artmasıyla, yönetmelik tarafından uyarı limiti olarak verilen düşey düzensizlikte daha fazla dinamik yükün ortaya çıktığı görülmektedir. Bunda etkili olan $K_{B,a}$ değeri hattın düzensizliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu katsayı, hattın esnekliğiyle bağlantılı olduğundan hatta ait düşey birim direncin yüksek olması durumunda hatta aktarılacak dinamik yük oldukça fazla olacaktır. Yüksek hızlarda uyarı limitinde yönetmelikte belirtilen düzensizlik değerinde k=120 kN/mm'deki dinamik yük katsayısı, k=20 kN/mm'deki dinamik yük katsayısının yaklaşık 2 katı kadardır.

Dinamik yük değerlerinde oldukça etkili olan diğer bileşen K_J'de ise aracın hızı devreye girmektedir. Normal şartlarda v=200 km/h ve v=250 km/h hızlarındaki araçlar için $K_{B,a}$ aynı olmasına rağmen, aracın deforme çukurdan çıkarken ivmelenmesi sonucunda ortaya çıkan ek

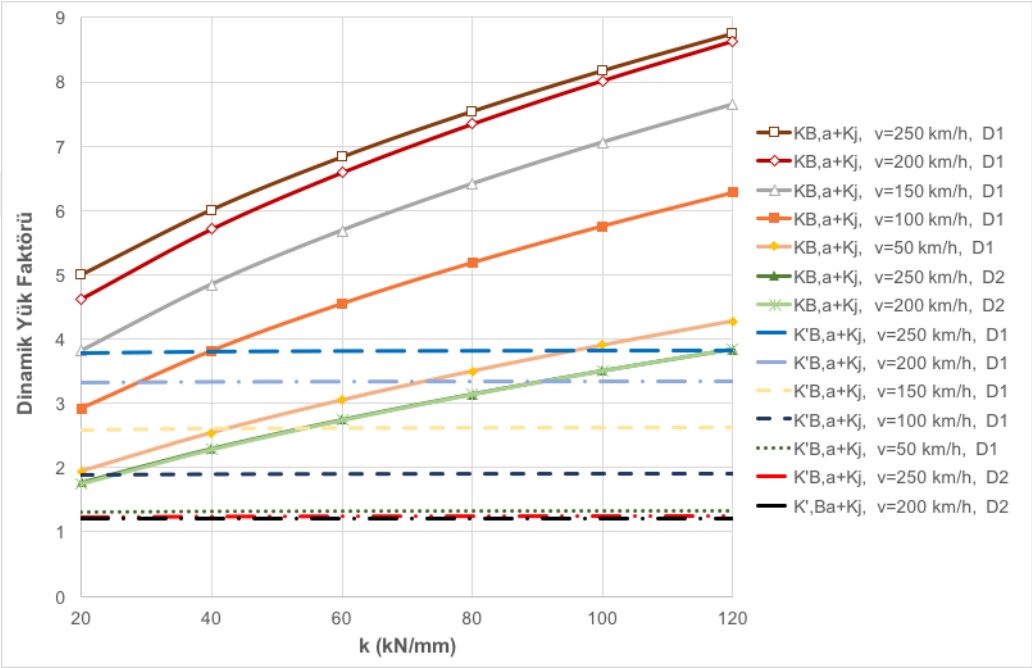
K_J değeri bu iki araç arasında dinamik yük farkı olmasına neden olmaktadır. Bu durum özellikle yüksek hızlarda, beklenenden daha falza bir yükün uygulanmasına neden olabilir. Örneğin, yönetmelikte v=230 km/h'den v=300 km/h'e kadar olan hız değerlerinde uyarı limit düşey düzensizlik değerleri aynıdır. Sadece bu düzensizliğe bağlı olan dinamik yük katsayısı $K_{B,a}$ hesaplandığında, tüm hızlar için eşit değer çıkmaktadır. Ancak v=230 km/h ile v=300 km/h hızlarında oluşacak K_J değerleri arasında fark vardır. Dolayısıyla bu aradaki hızlar için hatta aktarılan yük değerleri farklıdır. Daha yüksek hızlarda daha yüksek dinamik yükün ortaya çıktığı görülmektedir. Hat düşey birim direnci k=120 kN/mm ve araç hızı=250 km/h olan bir aracın uyarı limitinde hatta aktardığı yük, aracın normal yükünün yaklaşık 6 katı kadar olmaktadır.

Araç sönümlemesinin hesaba katılmasıyla bulunan $K'_{B,a} + K_J$ değerlerinin hattın düşey birim direncinden oldukça az etkilendiği görülmektedir. Hat birim direnci k=20 kN/mm ve k=120 kN/mm iken oluşan $K'_{B,a}$ neredeyse eşittir. Sistemin eşdeğer birim direnci; hat birim direnci, teker yayı birim direnci, buji yayı birim direnci ve Hertz temas birim direncinin bir kombinasyonu olmasından dolayı hattın birim direncinin etkisi bu denli az olmaktadır. Araca ait birim direnç değerlerinin değişmesiyle oluşan dinamik yük de değişir. Bu nedenle trenin süspansiyon özellikleri oldukça önemlidir.



Şekil 4.13: Yükselen profil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler.

Müdahale limiti düşey düzensizlik değerleri için ortaya çıkan dinamik yük değişim grafiği de uyarı limitine benzer şekildedir. Ancak müdahale limitinde hattın durumu daha kötüdür ve daha yüksek yüklere ulaşılır. Araç hızı v=250 km/h ve D1 çukuru için k=20 kN/mm iken oluşan dinamik yük katsayısı 4'ken, k=120 kN/mm için oluşan dinamik yük katsayısı yaklaşık 7'dir. Bu da özellikle yüksek hızlarda hatta ait birim direncin dinamik yük üzerindeki etkisini göstermektedir.



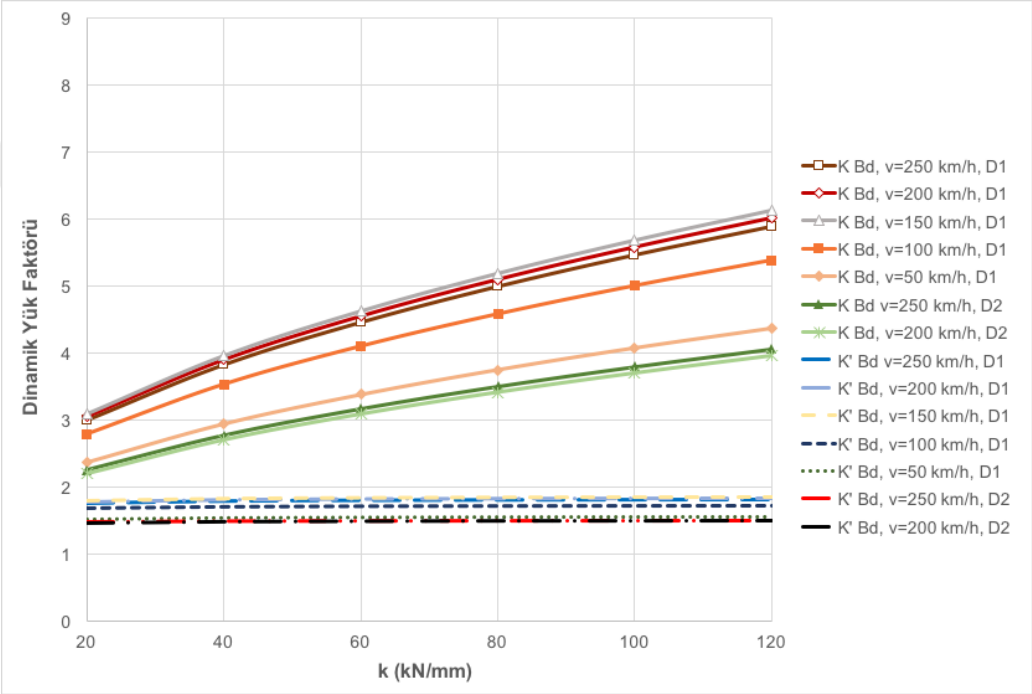
Şekil 4.14: Yükselen profil acil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler.

Acil müdahale limit durumunda yük faktörü-k grafiği yine benzer bir karakteristiğe sahip olsa da, farklı hızlara ait eğriler arasındaki mesafenin arttığı görülmektedir. Araç hızı, oluşan dinamik yükü önemli ölçüde değiştirmektedir. D1 çukurunda, birim direnç k=120 kN/mm ve v=250 km/h için acil müdahale gerektiren durumda ortaya çıkan dinamik yük, aracın normalde uyguladığı yükün yaklaşık 9 katı kadardır.

Tüm bu grafiklerden çıkan bir diğer sonuç ise D1 ve D2 çukurları arasındaki farktır. D1, D2'ye göre çok daha kısa bir uzunlukta meydana gelen düzensizliklerdir. D2 çukuru için sadece v=200 km/h ve v=250 km/h hızları için hesap yapılmıştır. Yine de, D1 çukurunda v=50 km/h hızında ortaya çıkan dinamik yükün, D2 çukurunda v=250 km/h hızında ortaya çıkan dinamik yükten hem $K_{B,a}$ hem de $K'_{B,a}$ için daha yüksek olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, düzensizliğin ne kadarlık bir uzunlukta meydana geldiği oldukça önemlidir.

4.2.2. Alçalan Hat Profilinde Meydana Gelen Dinamik Yükler

Alçalan hat profilinde, belirli bir h yüksekliğinden meydana gelen düşüş söz konusu olup, yükselen hat profilindeki benzer bir şekilde bir tırmanış hareketi olmadığından $K_{B,d}$ değerleri tek başına yeterlidir. Aşağıda D1 ve D2 çukurları için uyarı limiti, müdahale limiti ve acil müdahale limiti sınır durumlarında meydana gelen dinamik yükler hesaplanmış ve çizdirilmiştir.



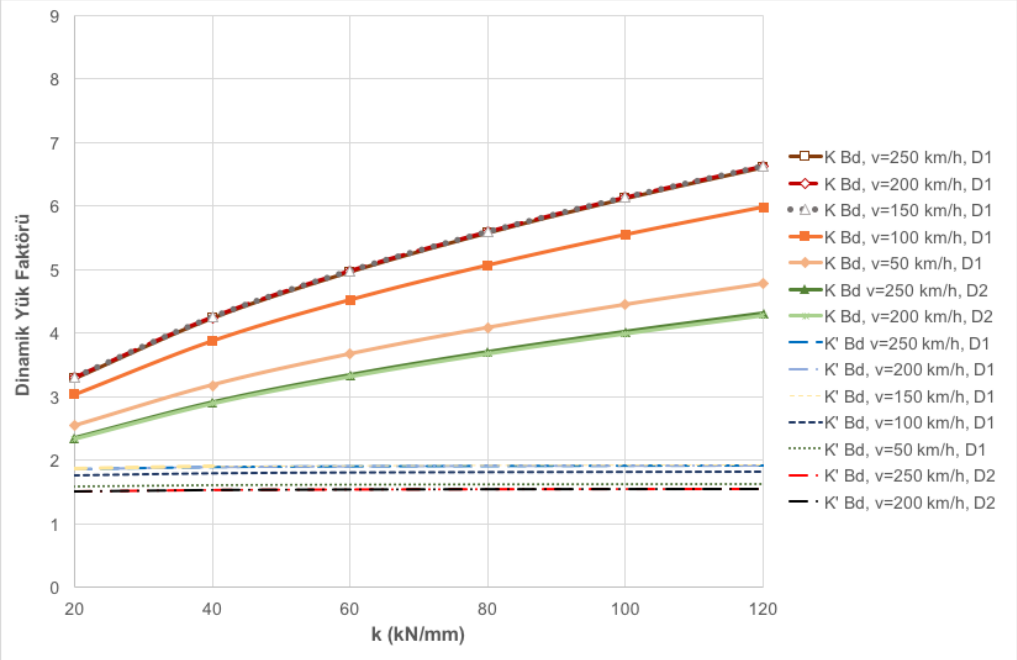
Şekil 4.15: Alçalan profil uyarı limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler.

$K_{B,d}$ için ortaya çıkan dinamik yüklerin, yükselen profilde ortaya çıkan $K_{B,a} + K_J$ katsayılarına benzer bir eğilim gösterdiği ancak bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir. Uyarı limit durumundaki bir hatta deforme çukurdan geçen bir trenin, çukurdan çıkarken uyguladığı dinamik kuvvet, çukura girerken uyguladığı dinamik kuvvetten bir miktar daha fazla olmaktadır.

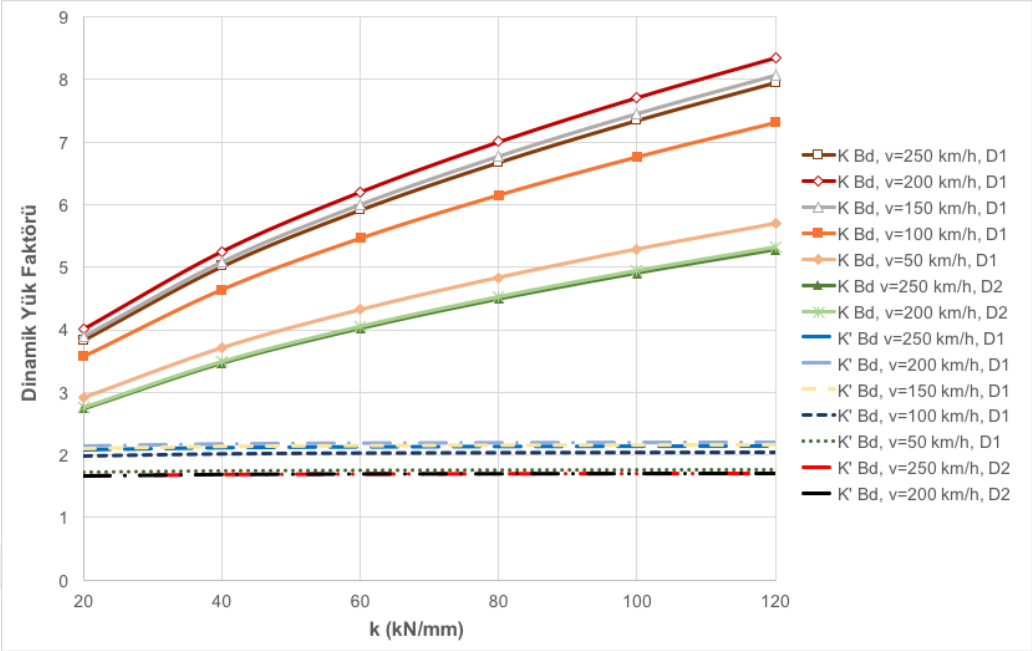
Yükselen profilin aksine, alçalan profilli hatta oluşan $K'_{B,d}$ değerlerinin her hızda birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bunun başlıca sebebi, yükselen profilli hatta etki eden K_J değeridir. Bu değer hıza bağlı olduğu için $K'_{B,a} + K_J$ değerleri arasında farklılıklar meydana gelmişti. $K'_{B,d}$'de böyle bir durum söz konusu olmadığı için, hem tren hızı hem de hattın birim

direnç değeri değişiminin bu katsayı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Ancak, araca ait süspansiyon özelliklerinin değişimiyle bu katsayının değişimi mümkündür.

Aşağıda müdahale limiti ve acil müdahale limiti için belirlenen düzensizlik değerlerinde ortaya çıkan dinamik yük gösterimleri verilmiştir. Maksimum dinamik yük katsayısı uyarı limitinde v=250 km/h, müdahale limitinde v=150, 200 ve 250 km/h, acil müdahale limitinde v=200 km/h hızında ortaya çıkmıştır. Müdahale limitinde her üç hız için eşit dinamik yük katsayısı çıktığından, katsayı miktarını belirleyen etken trenin hızından ziyade hatta ait birim dirençtir. Sert bir hatta (k=120 kN/mm) oluşan dinamik yük katsayısı, esnek bir hatta (k=20 kN/mm) oluşan miktarın 2 katından daha fazladır. Dolayısıyla, EN 13848-5 (2008) yönetmeliğinde çukur tipleri (D1, D2) için verilen limit düşey düzensizlik değerleriyle uyarı ve müdahale durumlarını belirlemek yetersiz kalabilmektedir. Çünkü bu düzensizlik durumları içerisinde hatta çok farklı miktarlarda dinamik yük aktarılmaktadır. Bunu önlemek için, bu yük artışına neden olan hattın düşey birim direnci konusuna da değinilmelidir. Belirli bir düzensizlik uzunluğu için limit durumlardaki maksimum düşey düzensizlik değeri belirlenirken hattın düşey birim direnç değeri de hesaba katılmalıdır.



Şekil 4.16: Alçalan profil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler.

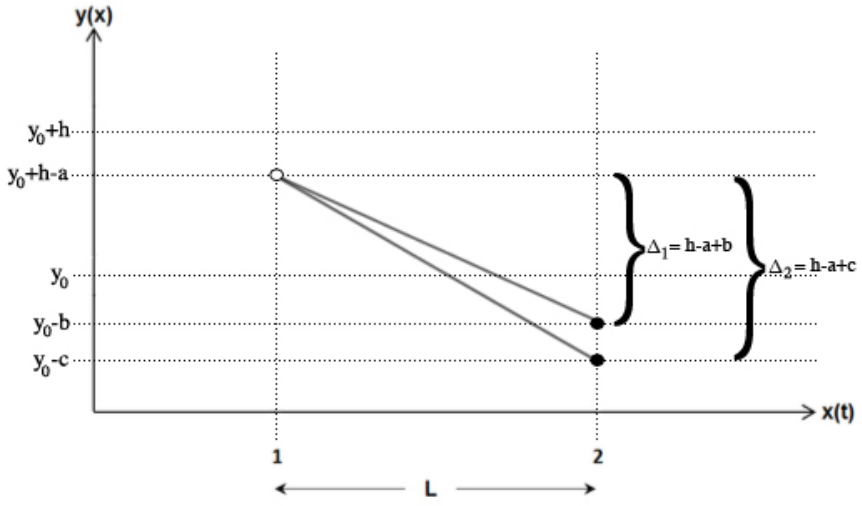


Şekil 4.17: Alçalan profil acil müdahale limiti düzensizlik değerlerinde oluşan dinamik yükler.

4.3. GENİŞLETİLMİŞ BEZGİN DENKLEMLERİNİN SONUÇLANDIRILMASI

Bölüm 2.5'te açıklandığı üzere Genişletilmiş Bezgin Denklemleri 4 farklı durum için sonuç üretmekte ve 4 adet dinamik etki katsayısı ortaya koymaktadır. Bunlardan 2 tanesi hattaki esneklik değişimiyle, diğer 2'si ise hat profilindeki değişimle ilgilidir. Teker, yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş ile yükselen hat profili durumlarında tırmanma hareketi yapar. Bu iki durumun denklemleri birleştirilerek iki durum tek bir denklemde ele alınabilir. Düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş ve alçalan hat profili durumlarında ise bir iniş söz konusudur. Bu iki durum da yine tek bir denklemde toplanabilir. Bu nedenle, tekerin yaptığı hareket göz önünde bulundurarak Genişletilmiş Bezgin Denklemleri daha genel bir ifadeyle, 2 farklı durum için ele almak mümkündür. Böylece tekerin yaptığı inme ve tırmanma hareketleri için oluşturulacak 2 denklem ile dinamik darbe kuvvetlerini hesaplamak mümkün hale gelir.

4.3.1. Tekerin İniş Hareketi (Düşük Esneklikten Yüksek Esnekliğe Geçiş ve Alçalan Hat Profili)



Şekil 4.18: Teker iniş hareketinde hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi**.**

Şekil 4.18'de tekerin hat bozukluk başlangıcı (Konum 1) ve bitişi (Konum 2) arasındaki sehim değişimi gösterilmiştir. Düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş ve hat profilinde alçalma olduğu durumlarda teker geçiş uzunluğu boyunca, ilk baştaki yüksek konumundan daha alçak bir konuma doğru iniş yapar. Bu iki hat bozukluğu aynı anda olabileceği gibi hattaki bozukluk bunlardan sadece bir tanesi de olabilir. Öncelikle iki durum aynı anda gerçekleşiyormuş gibi ele alınarak genel bir denklem oluşturulacak, daha sonra sadece esneklik değişimi ve sadece profil bozukluğu durumları için bu genel denklemden K'_{Bl} ve $K'_{B,d}$ denklemlerinin elde edilebilirliği gösterilecektir.

Teker ilk konumunda "a" statik sehimi yapar. Teker ikinci konuma geldiğinde esneklik artacağından, bu konumdaki statik sehimi "b" a'dan daha küçük bir değerdir. İki konum arasındaki potansiyel enerji farkı:

$$E_1 = m.g.\Delta_1 = m.g.(h - a + b) \tag{4.2}$$

Ancak, hem esneklik değişimi hem de profil kot farkı (h) nedeniyle 2. konumda b'den daha yüksek bir "c" dinamik sehimi gerçekleşir. Dinamik sehim yaptığı durum ile ilk konumdaki arasındaki potansiyel enerji farkı:

$$E_2 = m.g.\Delta_2 = m.g.(h - a + c) \tag{4.3}$$

Darbe azaltma faktörü ve tren sönümlemesine bağlı olarak bu enerjinin bir kısmı hatta aktarılır

(E3). Bu enerji, tekerin 2. Konumdaki statik ve dinamik durumları arasında yaylarda geçici olarak depolanan enerjiye eşittir.

$$E_3 = E_2 - E_1.f - E_1.s = m.g.(h-a+c) - m.g.(h-a+b).f - m.g.(h-a+b).s \quad (4.4)$$

$$m.g.(h-a+c) - m.g.(h-a+b).f - m.g.(h-a+b).s = \frac{k_{eq2}.b + k_{eq2}.c}{2}(c-b) \quad (4.5)$$

$$2.m.g.(h-a+c) - 2.m.g.(h-a+b).f - 2.m.g.(h-a+b).s = k_{eq2}.(c^2-b^2) = \frac{mg}{b}.(c^2-b^2) \quad (4.6)$$

$$2.b.(h-a+c) - 2.b.(h-a+b).f - 2.b.(h-a+b).s = c^2 - b^2 \quad (4.7)$$

$$2.b.h - 2.b.a + 2.b.c - 2.b.h.f + 2.b.a.f - 2.b^2.f - 2.b.h.s + 2.b.a.s. - 2.b^2.s = c^2 - b^2 \quad (4.8)$$

$$b^2 + 2.b.h. - 2.b.a - 2.b.h.f. + 2.b.a.f. - 2.b^2.f - 2.b.h.s + 2.b.a.s. - 2.b^2.s = c^2 - 2.b.c \quad (4.9)$$

$$b^2 - 2.b^2.f - 2.b^2.s + 2.b.h.(1-f-s) - 2.a.b.(1-f-s) = (c-b)^2 - b^2 \quad (4.10)$$

$$\sqrt{2.b^2(1-f-s) + 2.b.h.(1-f-s) - 2.a.b.(1-f-s)} = c - b \quad (4.11)$$

$$b\left[1 + \sqrt{2.(1-f-s) + \frac{2.h}{b}.(1-f-s) - \frac{2.a}{b}.(1-f-s)}\right] = c \quad (4.12)$$

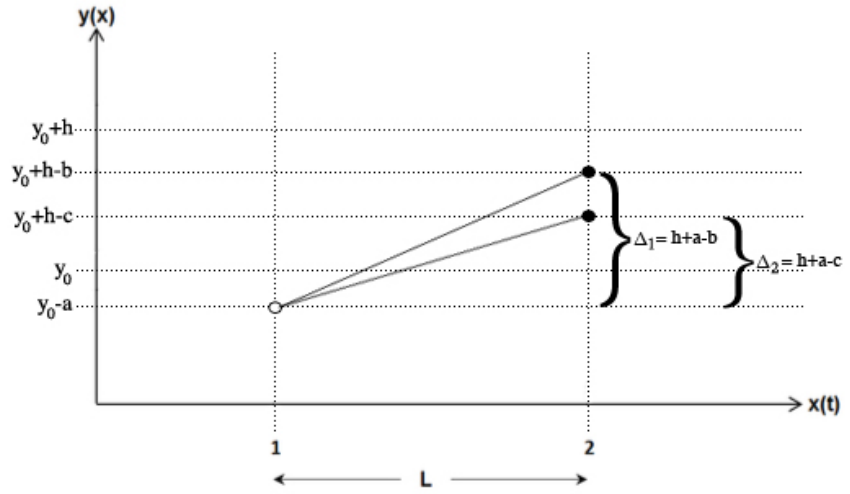
$$F_i = k_{eq2}.c = F_S.\left[1 + \sqrt{2.(1-f-s)\left(1 + \frac{h}{b} - \frac{a}{b}\right)}\right] \quad (4.13)$$

$$K_{B,do} = 1 + \sqrt{2.(1-f-s)\left(1 + \frac{h}{b} - \frac{a}{b}\right)}\ , a \le b \text{ için} \quad (4.14)$$

$K_{B,do}$, tekerin iniş hareketi sırasında (düşük esneklikten yüksek esnekliğe geçiş ve/veya alçalan hat profili) meydana gelen dinamik yük katsayısıdır. Bu denklem, hat üzerinde hem esneklik değişimi hem de profil bozukluğu olduğunda uygulanabileceği gibi bu bozukluklardan sadece birinin mevcut olması durumunda da geçerlidir. Örneğin, geçiş uzunluğu boyunca esneklik değişimi var ve profilde bir bozulma yoksa h=0 olacağından $K_{B,do}$=K'_{B1} olmaktadır. Aynı

şekilde, geçiş uzunluğu boyunca profil seviyesinde değişiklik var ve herhangi bir esneklik değişimi yoksa, tekerin profil bozukluğu öncesi ve sonrası konumlarındaki oluşturduğu statik sehimler eşit olacaktır (a=b). Bu durum $K_{B,do}$ denklemi üzerinde uygulandığında $K_{B,do}=K'_{B,d}$ olduğu görülmektedir.

4.3.2. Tekerin Tırmanma Hareketi (Yüksek Esneklikten Düşük Esnekliğe Geçiş ve Yükselen Hat Profili)



Şekil 4.19: Teker tırmanma hareketinde hattaki sehim değişiminin kartezyen gösterimi.

Şekil 4.18, hat bozukluğu başlangıcı (Konum 1) ve bitişi (Konum 2) arasındaki sehimlerin değişimini temsil etmektedir. Yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş ve hat profilinde yükselme durumlarında teker ilk baştaki alçak konumundan daha yüksek bir konuma doğru tırmanma hareketi yapar. Bu iki hat bozukluğu aynı anda olabileceği gibi hattaki bozukluk bunlardan sadece bir tanesi de olabilir. Öncelikle esneklik değişimi ve profil bozukluğunun aynı anda meydana geldiğini varsayalım. Bu durumda teker ilk konumunda "a" statik sehimi yaparken, ikinci konumdaki statik sehimi, esnekliğin daha az olması nedeniyle a'dan daha yüksek bir "b" değeridir. Bu durumda tekerin statik konumları arasındaki potansiyel enerji farkı:

$$E_1 = m.g.\Delta_1 = m.g.(h + a - b) \tag{4.15}$$

Hem esneklik değişimi, hem de profildeki "h" düşey yükseklik farkı nedeniyle ikinci konumda b'den daha yüksek bir "c" dinamik sehimine erişilir. Bu dinamik durum ile tekerin ilk konumu arasındaki potansiyel enerji farkı:

$$E_2 = m.g.\Delta_2 = m.g.(h + a - c) \quad (4.16)$$

Bu durumda tren hızına ve aracın sönümleme özelliklerine bağlı olarak hatta aktarılan enerji

$$E_3 = E_2 - E_1.f - E_1.s = m.g.(h + a - c) - m.g.(h + a - b).f - m.g.(h + a - b).s) \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilir. Bu potansiyel enerji farkı, tekerin ikinci konumdaki statik ve dinamik durumları arasında yaylarda geçici olarak depolanan enerjiye eşittir.

$$m.g.(h + a - c) - m.g.(h + a - b).f - m.g.(h + a - b).s$$

$$= \frac{k_{eq2}.b + k_{eq2}.c}{2}(c - b) \quad (4.18)$$

$$2.m.g.(h + a - c) - 2.m.g.(h + a - b).f - 2.m.g.(h + a - b).s$$

$$= k_{eq2}.(c^2 - b^2) = \frac{mg}{b}.(c^2 - b^2) \quad (4.19)$$

$$2.b.(h + a - c) - 2.b.(h + a - b).f - 2.b.(h + a - b).s = c^2 - b^2 \quad (4.20)$$

$$2.b.h + 2.b.a - 2.b.c - 2.b.h.f - 2.b.a.f + 2.b^2.f - 2.b.h.s - 2.b.a.s. + 2.b^2.s$$

$$= c^2 - b^2 \quad (4.21)$$

$$b^2 + 2.b.h. + 2.b.a - 2.b.h.f. - 2.b.a.f. + 2.b^2.f - 2.b.h.s - 2.b.a.s. + 2.b^2.s$$

$$= c^2 + 2.b.c \quad (4.22)$$

$$b^2 + 2.b^2.f + 2.b^2.s + 2.b.h.(1 - f - s) + 2.a.b.(1 - f - s) = (c + b)^2 - b^2 \quad (4.23)$$

$$\sqrt{2.b^2(1 + f + s) + 2.b.h.(1 - f - s) + 2.a.b.(1 - f - s)} = c + b \quad (4.24)$$

$$b\left[\sqrt{2.(1 + f + s) + \frac{2.h}{b}.(1 - f - s) + \frac{2.a}{b}.(1 - f - s)} - 1\right] = c \quad (4.25)$$

$$F_i = k_{eq2}.c = F_s.\left[\sqrt{2[(1 + f + s) + (1 - f - s).\frac{h+a}{b}]} - 1\right] \quad (4.26)$$

$K_{B,up} = \sqrt{2[(1 + f + s) + (1 - f - s).(\frac{h+a}{b})]} - 1$, a ≥ b için (4.27)

$K_{B,up}$ tekerin tırmanma hareketi esnasında (yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçiş ve/veya yükselen hat profili) ortaya çıkan dinamik etki faktörüdür.

Eğer hatta sadece esneklik değişimi var ve profil bozukluğu yoksa h=0 alınır. Bu durumda $K_{B,up}$ denklemi, yüksek esneklikten düşük esnekliğe geçişte kullanılan K'_{B2} ile eşit olur. Eğer hatta sadece profil bozukluğu var ve esneklik değişimi yoksa, tekerin hat bozukluğu öncesi ve sonrasındaki konumlarındaki esneklik eşit olacağından iki konumdaki statik sehimleri da eşit olur (a=b). Bu eşitlik $K_{B,up}$'de yerinde yazıldığında $K_{B,up}$, sadece yükselen hat profili nedeniyle ortaya çıkan dinamik faktörü gösteren $K'_{B,a}$ ile eşit olur.

Genişletilmiş Bezgin Denklemleri'nin sonuçlandırılması için yapılan hesaplamalarda kullanılan "h" sadece profil kot farkını temsilen kullanılmıştır. Daha önceden esneklik farkı nedeniyle statik ve dinamik sehimler arasındaki yükseklik farkını göstermek için kullanılan "h" ile karıştırılmamaldır. Ayrıca, darbe azaltma faktörü hesaplamasında kullanılan tekerin toplam çıkış yüksekliği h yerine h+a-b olmaktadır. Buradaki h profil seviyesi farkından, a-b ise esneklik değişimi nedeniyle oluşan yükseklik farkından kaynaklanmaktadır. Bu durumda, sonuçlandırılmış denklemler kullanılırken baz alınacak darbe azaltma faktörü şu şekildedir:

$$f = 1 - \frac{t_{fall}}{t_{pass}} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{2(h+|a-b|)}{g}}}{\frac{L}{V}} = 1 - \frac{V}{L}.\sqrt{\frac{2.(h+|a-b|)}{g}} \quad (4.28)$$

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada çift dingilli tren geçişi sırasında hattın gösterdiği esneklik değerinin, tek dingilli tren altındaki hat esnekliğiyle kıyaslaması yapılmıştır. Hattın düşey birim direnci ne olursa olsun, 3,25 m dingil aralık mesafesine kadar hattın esnekliğinin değiştiği ve 3,25 m'den büyük dingil aralık mesafelerinde esnekliğin oldukça az değiştiği görülmüştür.

Farklı ray tipleri üzerinde yapılan çalışmada, 4 farklı ağırlıktaki ray tipi ele alınmıştır. Dingil aralığı belirli bir eşik değerin altındayken hafif ray kullanılan hatların, ağır ray kullanılan hatlara göre daha yüksek düşey birim direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Bu eşik değeri hattın birim direncine bağlı olarak değişmektedir. Dingiller arasındaki mesafenin artmasıyla ray tipleri arasındaki düşey birim direnç farkları oldukça azalır.

Tek dingil altındaki düşey birim direnç k olmak üzere, çift dingilli sistemde iki dingilin üst üste düşünüldüğü durumda hattın düşey birim direnci $k^* = k$ olmaktadır. İki dingilin, hatta oluşturduğu sehimlerin birbirini hiç etkilemeyecek kadar uzakta olduğu dingil aralık mesafesinde ise $k^* = 2k$ kadar olmaktadır.

Bu nedenle, dingil aralık mesafesine bağlı olarak çift dingil altındaki birim direncin k'dan başlayarak 2k'ya kadar ulaştığı eğri grafiği verilmiştir. Hattın düşey birim direncine bağlı olarak, dingil mesafesinin artmasıyla belirli bir yere kadar k^* hızla artmakta ve 2k değerine ulaşmaktadır. Bu noktadaki dingil mesafesinin daha da artmasıyla, iki dingilin hatta oluşturduğu sehim eğrilerinin girişiminin bir sonucu olarak k^*, 2k değerinin de üstüne çıkar. Dingil mesafesinin daha da artmaya devam etmesiyle k^* değeri azalır ve bir noktadan sonra 2k olarak sabitlenmiş kabul edilir. Sabit kabul edilen dingil mesafesinde hat esnekliği çok küçük miktarlarda artmakta veya azalmaktadır, ancak birim direnç değeri 2k'ya oldukça yakındır. Her hat esnekliği için dingil aralık mesafesinin k'dan başlayarak artış gösterdiği, 2k limitine ulaştığı, 2k'yı aşarak maksimum olduğu ve azalış göstererek tekrar 2k'ya düştüğü mesafeler tespit edilmiştir. Bu limit durum dingil mesafeleri düşük birim dirence sahip esnek hatlarda daha büyüktür. Sert hatlarda, dingil mesafesinin artışı çift dingil altındaki hat esnekliğini önemli ölçüde etkilemektedir.

EN 13848-5 yönetmeliğinin incelendiği çalışmada, limit durumlar için belirlenen düşey düzensizlik değerlerinde ortaya çıkan dinamik yükler bulunmuştur. K_B değeri hattın

esnekliğiyle doğrudan ilgilidir. Yönetmelikte verilen limit durumlar için belirtilen düzensizlik değerlerinde ortaya çıkan dinamik yük, hattın esnekliğine bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. Yüksek hızlarda, aynı limit durum için düşük esneklikli bir hattın dinamik yük katsayısı, esnek hattın dinamik yük katsayısının yaklaşık 2 katı kadar olmaktadır. Bu nedenle yönetmelikteki düzensizlik değerlerinin belirlenmesinde hat esnekliği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Yükselen profilde $K_{B,a}$ ve $K'_{B,a}$ katsayılarına ek olarak ivmelenme sonucu oluşan ekstra dinamik yük olarak K_J de etki eder. Yönetmelikte iki hız değeri arasında verilen düzensizlik değerleri için $K_{B,a}$ ve $K'_{B,a}$ aynıyken K_J hıza bağlı olarak değişir. Bu nedenle yüksek hızda daha fazla bir dinamik yük katsayısı ortaya çıkar. Alçalan profilde ise sadece $K_{B,d}$ ve $K'_{B,d}$ değerleri hesaplandığı için yüksek hızlarda oluşan dinamik yük katsayıları birbirine daha yakındır.

$K'_{B,a}$ ve $K'_{B,d}$ değerlerinin esneklik değişiminden çok az etkilendiği görülmüştür. Bu katsayıların hesaplanmasında hattın esnekliğiyle birlikte aracın sönümleme özellikleri de hesaba katıldığından hat esnekliğinin önemi daha azdır. Bu dinamik yük katsayısının değişiminde aracın süspansiyon özellikleri önemli rol oynar.

Yapılan hesaplamalardan çıkan bir diğer sonuçta deforme çukur çapının dinamik yük katsayısı üzerindeki etkidir. Verilen düzensizlik değerlerinde daha küçük çaplı olan D1 çukurunda v=50 km/h için oluşan dinamik yük, D2 çukurunda v=250 km/h'da oluşan dinamik yükten daha fazladır. Hattaki düzensizliğin ne kadarlık bir geçiş uzunluğu boyunca devam ettiği oluşan dinamik yükler açısından oldukça önemlidir.

Son olarak, hattaki esneklik değişimi ve profil bozukluklarında ortaya çıkan dinamik yük katsayısının, tekerin deforme uzunluğu geçiş sırasındaki hareketi (tırmanma veya iniş) göz önünde bulundurularak Genişletilmiş Bezgin Denklemleri'nin birleştirilmesi sonucu elde edilen daha genel bir ifadeyle hesaplanabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Aron, C. & Jonas, E., 2012, *Structural element approaches for soil-structure interaction,* Yüksek Lisans Tezi, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology.

Balcı, E., Bezgin, N.Ö., & Wehbi, M., 2020, Analysis of the Effects of Bogie Axle Spacing On Effective Track Stiffness and Dynamic Impact Forces due to Track Roughness, *Transportation Research Board 99th Annual Meeting,* Haziran 2020, Washington, ABD, 12-16 (Değerlendirme Sürecinde).

Berggren, E., 2009, *Railway Track Stiffness-Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance,* Doktora Tezi, Royal Institute of Technology (KTH).

Bezgin N.Ö., 2017, Development of a new and an explicit analytical equation that estimates the vertical dynamic impact loads of a moving train, *Procedia Engineering*, vol.189C, 2-10.

Bezgin N.O., 2018, Application of a new concept and a method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to track stiffness variations, *97th Transportation Research Board Meeting*, Washington DC, Paper: 18-00407.

Bezgin N.O., 2018, Application of a new concept and a method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to track profile irregularities, *97th Transportation Research Board Meeting*, Washington DC, Paper No.: 18-00407.

Bezgin N.O., 2018, Proposal of a new analytical method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to changes in track profile and track stiffness, *5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA 2018*, 17-19 May 2018, Zadar, Croatia, 837-845.

Bezgin, N.Ö., 2019, ALLTRACK V1 January 2, 2019. 10.13140/RG.2.2.32548.94083.

Burrow, M., Teixeira, P. & Dahlberg, T., 2009, *Track Stiffness Considerations for High Speed Railway Lines,* Railway Transportation: Policies, Technology and Perspecrives*,* In: Sacott N.P. (ed.), 10, Nova Science, UK, 303-354 .

Burrow, M.P.N., Chan, A.H.C., & Shein, A., 2007, Falling weight deflectometer based inverse analysis of ballasted railway tracks, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 160 (GE3), 169-177.

CEN. European Standard EN 13848-5:2008+A1:2010 railway applications – track – track geometry quality, 2008, – Part 5: geometric quality levels – plain line. 93100 – construction of railways. Brussels: CEN/TC 256 – railway applications, Comité Européen de Normalisation.

Doyle, N, 1980, Railway track design, a review of current practice, *Austrlian Government Publishing Service*, 5-35.

Esveld, C., 2001, *Modern Railway Track,* MRT Productions, Zaltbommel, the Netherlands.

Gavin, H.P., 2015, *Strain Energy in Linear Elastic Solids ,* North Carolina: Department of Civil and Environmental Engineering in Duke University.

Kaewunruen, S. & Remennikov, A.M., Applications of experimental modal testing for estimating dynamic properties of structural components, *In Proceedings of Australian Structural Engineering Conference,* 2005, New Castle, Australia, 2005 (CD-ROM), 8 pages

Kerr, A.D., 1983, A method for determining the track modulus using a locomotive or car on multi-axle trucks, *In: Proceedings AREA*, vol. 84., 269-286.

Kerr, A.D., 1987, On the Vertical Modulus in the Standard Railway Track Analysis, *Rail International*, November Issue, 37-45.

Kerr, A.D., 2000, On the Determination of the Rail Support Modulus, k, *International Journal of Solids and Structures,* vol. 37, 4335-351.

Kerr, A.D., 2003, *Fundamentals of railway track engineering*, NE: Simmons-Boardman Books, Omaha, Nebraska.

Kujawski, D., & Ellyin, F., 1995, A unified approach to mean stress effect on fatigue threshold conditions, *Int J Fatigue*,17 (2), 101-106.

Kuptsov, V.V., 1975, The elasticity of rail strings and their dependence on the fastener parameters, in Russian, Vestnik, Tsentralnii NauchnoÐIssled. Inst. Zh/D Transporta (CNII MPS), Nr. 3.

Mandal, N.K., Dhanasekar, M., & Sun, Y.Q., 2016, Impact forces at dipped rail joints, *J Rail Rapid Transit,* 230 (1), 271-82.

McVey, B., Norman, C., Wood, N., Farritor, S., Arnold, R., Fateh, M., & El-Sibaie, M., 2005, Track Modulus Measurement From A Moving Railcar, *Proceedings of the AREMA 2005 Annual Conference*, Chicago, IL.

Popov, E., 1998, *Engineering Mechanics of Solid,* 2nd Edition, Pearson, New Jersey.

Powrie, W. & Le Pen, L., 2016, *A Guide to Track Stiffness,* Milton Keyns: The Permanent Way Institution.

Puzavac, L., Popović, Z., & Lazarević, L., 2012, Influence of Track Stiffness on Track Behaviour Under Vertical Load, *PROMET - Traffic&Transportation*, 24.

Schwedler, J.W., 1882, Discussion on iron permanent way, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol.76, 95-118.

Selig, E.T., Waters, J.M, 1994, *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford Ltd., London, UK.

Sun, Q., *Elastic Foundations* [PDF Belgesi]. 12 Nisan 2019 tarihinde https://www.mae.ust.hk/~meqpsun/Notes/Chapter4(202).PDF adresinden erişildi.

Şahin, O., 2011, *Demiryolunda Hat Rijitliğinin ve Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Talbot Committee, 1918, ASCE - AREA committee on stresses in railroad track, first progress report, *Proceedings AREA*, vol. 19.

Timoshenko, S., Langer, B.F., 1932, Stresses in railroad track, *Transactions, ASME*, vol. 54, 277-302.

Van Dyk, B., Dersch, M., Edwards, R., Ruppert, J., & Barkan, C., 2014, Evaluation of Dynamic and Impact Wheel Load Factors and Their Application for Design, *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Ocak 2014, Washington, ABD, 12-16.

Wang, L., Liu, Y., Sun, C., & Liu, Y., 2016, Accessibility impact of the present and future high-speed rail network: a case study of Jiangsu Province, *China. J. Transp. Geogr.*, 54, 161-172.

Wang, P., Wang, L., Chen, R., Xu, J., Xu, J. & Gao, M., 2016, Overview and outlook on railway track stiffness measurement, *J Modern Transp*, 24 (2), 89-102.

Wang, K., Xia, W. & Zhang, A., 2017, Should China further expand its high-speed network? Consider the low-cost carrier factor, *Transp. Res. A Policy Pract.*, 100, 105–120.

Wehbi, M., Burrow, M., Jin, S. & Ghataora, G., 2013, Investigating the Effects of Soft Spots on the Functional and Structural Condition of a Railway Track, *4th BEAR Post Graduate Conference in High Performance Computing*, University of Birmingham

Wehbi, M. & Musgrave, P., 2017, Optimisation of track stiffness on the UK Railways, *Permanent Way Institute Journal*, 135.

Zarembski, A.M. & Choros, J., 1980, On the measurement and calculation of vertical track modulus, *In: Proceedings AREA*, vol. 81, 156-173.

http://www.drgw.net/trips/report.php?tr=TTCI.3 (Erişim tarihi: Nisan, 2019).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Erdem BALCI
Doğum Yeri	Wuppertal
Doğum Tarihi	04.09.1994
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	05312027692
E-Posta Adresi	erdembalci@outlook.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2016

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği