

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAMVAY HATLARINDA FARKLI DURUMLARIN PLAK YORULMASINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Efe ERDEM

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

HAZİRAN, 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAMVAY HATLARINDA FARKLI DURUMLARIN PLAK YORULMASINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Efe ERDEM
526181007**

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

HAZİRAN, 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 526181007 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Efe ERDEM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TRAMVAY HATLARINDA FARKLI DURUMLARIN PLAK YORULMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat ERGÜN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Sercan KESTEN
Işık Üniversitesi

Teslim Tarihi : **08 Haziran 2020**
Savunma Tarihi : **24 Haziran 2020**





Bilime ve insanlığa,



ÖNSÖZ

Demiryollarında yorulmanın önemi ve farkındalığın artması adına yaptığım çalışmanın mühendisliğe bir katkısının olmasını ve daha ilerilere taşınmasını ümit ediyorum.

Bu çalışmanın yazımında ve yüksek lisans öğrenimim boyunca destekleri ile yeni bir inceleme alanı yaratan ve fikirleri ile öncü olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e, meslek hayatımda bana ve bu çalışmaya kattığı değerle desteklerini esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Burhan ERDİL'e ve ALSTOM'daki tüm çalışma arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunuyorum. Tezde editörlük katkılarından ötürü Em. Kd. Alb. Ufuk ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

İTÜ Raylı Sistemler Mühendisliği bölümünün demiryolunda Türkiye için yetişmiş iş gücüne katkısını göz önünde bulundurarak anabilim dalı başkanı Sayın Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ nezdinde tüm öğretim görevlilerine teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Demiryolu literatürüne katkı sunma gurunu her zaman taşıyacağım.

Haziran 2020

Efe Erdem
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.2 Literatür Taraması	3
1.3 Hipotez	7
2. BALASTSIZ DEMİRYOLU ÜST YAPILARI	9
2.1 Balastsız Üstyapı Elemanları	9
2.1.1 Raylar	9
2.1.2 Ray bağlantı elemanları	11
2.1.3 Ray altı yastığı (Ray Pedi)	12
2.2 Standart Plaklı Hatlar	12
2.3 Betona Gömülü Traversli ve Bloklı Hatlar	14
2.4 Gömülü Hatlar	15
3. RAYLI SİSTEMLERDE YORULMA VE YORULMANIN DEMİRYOLU ELEMANLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	17
3.1 Eschede Tren Kazası	18
3.2 Demiryolu Üstyapı Elemanlarında Yorulma	20
3.2.1 Raylarda yorulma etkileri	20
3.2.1.1 Temas yüzeyi çatlakları	20
3.2.1.2 Ondülasyon	22
3.2.1.3 Yanal Aşınma	22
3.2.1.4 Kabuklanma	24
3.2.1.5 Cebirelerde oluşan hasarlar	25
3.2.1.6 Ray kaynağı hasarları	26
3.2.2 Raylarda oluşan yorulma deformasyonlarının tespiti için yöntemler	26
3.2.2.1 Gözle kontrol yöntemi	26
3.2.2.2 Hat geometrik ölçüm cihazları ile ray profili ölçümü	27
3.2.2.3 Ultrasonik Testler	28
3.2.2.4 Boyayla çatlak kontrolü	30
3.2.3 Raylarda yorulma testleri	30
3.2.4 Ray bağlantı elemanlarında yorulma etkisi	31
3.2.5 Beton plakta yapıda oluşan yorulma deformasyonları	32

3.2.5.1 CRTS-III tipi hat plaklarının yorulma davranışının incelenmesi.....	34
4. TRAMVAY HAT PLAKLARININ YORULMA AÇISINDAN İNCELENMESİ	37
4.1 Analizde Kullanılacak Olan Yapısal Elemanlar	38
4.1.1 Raylar	38
4.1.2 Hat plağı	38
4.1.3 Zemin	38
4.2 Analiz Yöntemi	39
4.2.1 Bilimsel yöntem	39
4.2.2 Model	39
4.2.3 Analizde kullanılan bilgisayar programı	40
4.2.4 Bağlantı özellikleri	40
4.3 Standart Hat Tasarımı.....	40
4.4 Analiz ve Hesaplamalar.....	41
4.4.1 Yükler.....	41
4.4.2 Plak yorulma dayanımı hesabı	42
4.5 Farklı Hat Koşulları	45
4.5.1 Standart durum (Durum 1)	45
4.5.1.1 Ray deplasmanı	46
4.5.1.2 Zemin deplasmanı	46
4.5.1.3 Boyuna gerilme dağılımı	47
4.5.1.4 Enine gerilme dağılımı	47
4.5.2 Oluklu ray etkisi-Durum 2	48
4.5.2.1 Ray deplasmanı	48
4.5.2.2 Zemin deplasmanı	49
4.5.2.3 Boyuna gerilme dağılımı	49
4.5.2.4 Enine gerilme dağılımı	50
4.5.3 Selet aralığı etkisi-Durum 3	50
4.5.3.1 Ray deplasmanı	51
4.5.3.2 Zemin deplasmanı	51
4.5.3.3 Boyuna gerilme dağılımı	52
4.5.3.4 Enine gerilme dağılımı	52
4.5.4 Ray yastığı rijitliğinin etkisi-Durum 4	53
4.5.4.1 Ray deplasmanı	53
4.5.4.2 Zemin deplasmanı	54
4.5.4.3 Boyuna gerilme dağılımı	54
4.5.4.4 Enine gerilme dağılımı	55
4.5.5 Selet boyutlarının etkisi-Durum 5	55
4.5.5.1 Ray deplasmanı	56
4.5.5.2 Zemin deplasmanı	56
4.5.5.3 Boyuna gerilme dağılımı	57
4.5.5.4 Enine gerilme dağılımı	57
4.5.6 Dingiller arası mesafe etkisi-Durum 6	58
4.5.6.1 Ray deplasmanı	58
4.5.6.2 Zemin deplasmanı	59
4.5.6.3 Boyuna gerilme dağılımı	59
4.5.6.4 Enine gerilme dağılımı	60
4.5.7 Analiz sonuçlarının yorumlanması.....	60
4.5.7.1 Ray tipinin etkisi	60
4.5.7.2 Selet aralığının etkisi	61

4.5.7.3 Ray yastığı rijitliği	62
4.5.7.4 Selet genişliği	62
4.5.7.5 Dingiller arası mesafenin etkisi.....	63
4.6 Analiz Sonuçları	64
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ.....	74





KISALTMALAR

AREMA	: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association/ Amerikan Demiryolu Mühendisliği ve Hat Bakımı Birliği
ASTM	: American Society for Testing of Materials/ Amerikan Gereç Deneme Derneği
CAD	: Computer Aided Design/ Bilgisayar Destekli Çizim
CEN	: Comité Européen de Normalisation/ European Committee for Standardization/ Avrupa Standardizasyon Komitesi
EN	: European Norms/ Avrupa Normları
ICE	: Inter City Express/ Şehirlerarası Transit Tren
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
KFTP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
UIC	: Union Internationale des Chemins de Fer (International Union of Railways) / Uluslararası Demiryolları Birliği



SEMBOLLER

A	: Dingil yükü
B	: Plak genişliği
B_{crit}	: Kritik plak genişliği
E₁	: Betonun elastisite modülü
E_s	: Ray çeliğinin elastisite modülü
E_{cm}	: Betonun elastisite modülü
h₁	: Beton plağın kalınlığı
K	: Kelvin
k_q	: Statik teker yük arttırma sabiti
k_d	: Dinamik kuvvetlendirme katsayısı
α_t	: Termal uzama katsayısı
β_{fs}	: Betonun eğilmede çekme dayanımı
Δt	: Sıcaklık eğimi
μ	: Poisson oranı
σ_q	: Çekme gerilmesi
σ_w	: Sıcaklık nedeni ile oluşan çekme gerilmesi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Raylı sistemlerde yorulmanın önemli olduğu alanlar.....	18
Çizelge 4.1 : Plak kalınlığına göre sıcaklık eğimi (Δt) değerleri	42
Çizelge 4.2 : Ray tipine göre analiz verileri	61
Çizelge 4.3 : Selet aralığına göre analiz verileri.....	61
Çizelge 4.4 : Ray yastığı rijitliğine göre analiz verileri.....	62
Çizelge 4.5 : Selet genişliğine göre analiz verileri	63
Çizelge 4.6 : Dingil mesafesine göre analiz verileri.....	64
Çizelge 4.7 : Gerilme-Deplasman Özet Tablosu	65



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Balastlı hat üstyapısı.....	1
Şekil 1.2 : Balastsız hat üstyapısı.	1
Şekil 1.3 : Wöhler'in Krupp aks çeliği için oluşturduğu S-N eğrisi.....	4
Şekil 1.4 : Goodman, Soderberg, Gerber çizgileri.	5
Şekil 2.1 : Vinyol tipi ray.	10
Şekil 2.2 : Oluklu ray.....	11
Şekil 2.3 : Ray bağlantı elemanı. (Pandrol).....	12
Şekil 2.4 : Ankrajsız hat plağı ve temel plağı birleşimi.....	13
Şekil 2.5 : Ankraj donatılı hat plağı ve temel plağı birleşimi.....	13
Şekil 2.6 : Bögl tipi hat	14
Şekil 2.7 : Rheda tipi hat-Rheda istasyonu	15
Şekil 2.8 : Edilon gömülü sistem.....	15
Şekil 3.1 : Eschede tren kazası şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.2 : BO 84 tipi araç tekeri.	19
Şekil 3.3 : Ray-teker temas yüzeyinde oluşan çatlaklar.	21
Şekil 3.4 : Ondülasyon örneği.	22
Şekil 3.5 : Kritik seviyede bir yanıl aşınma örneği.....	23
Şekil 3.6 : Kritik seviyede bir ray yüzeyi yanığı.	24
Şekil 3.7 : Başlangıç aşamasında olan bir kabuklanma örneği (siyah lekeli).....	24
Şekil 3.8 : Orta seviyede kabuklanma örneği.	25
Şekil 3.9 : İleri seviyede kabuklanma örneği.....	25
Şekil 3.10 : Ray deliklerinin kenarında oluşan çatlaklar.	26
Şekil 3.11 : Ray profil kılavuzu (Geismar marka).....	27
Şekil 3.12 : Hat geometri ölçüm cihazı çalışma şeması.	28
Şekil 3.13 : Ölçüm ekranı üzerinde profil karşılaştırılması.....	28
Şekil 3.14 : El ile kullanılan ultrasonik test ünitesi	29
Şekil 3.15 : Araç üzerine yüklenen ultrasonik test ünitesi	29
Şekil 3.16 : Ultrasonik test dalgalarının ray üzerindeki yayılımı.	30
Şekil 3.17 : Boyayla çatlak kontrolü örneği.	30
Şekil 3.18 : Ray bağlantı ankraj civatasının fabrika yorulma testi düzeneği.....	32
Şekil 3.19 : Tekrarlı yükler altında deforme olmuş bir ray yastığı.....	32
Şekil 3.20 : Geniş (üstteki) ve standart (alttaki) selet plan krokisi.....	34
Şekil 3.21 : Beton plak yorulma analizi test düzeneği.....	35
Şekil 4.1 : Boyuna hat kesiti.	39
Şekil 4.2 : Grafik örneği.	40
Şekil 4.3 : Hat en kesiti.....	41
Şekil 4.4 : Teker yüklerinin uygulanması.....	42
Şekil 4.5 : Maksimum gerilme-yük tekrar sayısı eğrisi.....	45
Şekil 4.6 : Durum 1 ray deplasmanı grafiği.....	46
Şekil 4.7 : Durum 1 zemin deplasmanı grafiği.....	46
Şekil 4.8 : Durum 1 plak boyuna gerilme grafiği.....	47

Şekil 4.9 : Durum 1 plak enine gerilme grafiği.	47
Şekil 4.10 : Durum 2 ray deplasmanı grafiği.	48
Şekil 4.11 : Durum 2 zemin deplasmanı grafiği.	49
Şekil 4.12 : Durum 2 plak boyuna gerilme grafiği.	49
Şekil 4.13 : Durum 2 plak enine gerilme grafiği.	50
Şekil 4.14 : Durum 3 ray deplasmanı grafiği.	51
Şekil 4.15 : Durum 3 zemin deplasmanı grafiği.	51
Şekil 4.16 : Durum 3 plak boyuna gerilme grafiği.	52
Şekil 4.17 : Durum 3 plak enine gerilme grafiği.	52
Şekil 4.18 : Durum 4 ray deplasmanı grafiği.	53
Şekil 4.19 : Durum 4 zemin deplasmanı grafiği.	54
Şekil 4.20 : Durum 4 plak boyuna gerilme grafiği.	54
Şekil 4.21 : Durum 4 plak enine gerilme grafiği.	55
Şekil 4.22 : Durum 5 ray deplasmanı grafiği.	56
Şekil 4.23 : Durum 5 zemin deplasmanı grafiği.	56
Şekil 4.24 : Durum 5 plak boyuna gerilme grafiği.	57
Şekil 4.25 : Durum 5 plak enine gerilme grafiği.	57
Şekil 4.26 : Durum 6 ray deplasmanı grafiği.	58
Şekil 4.27 : Durum 6 zemin deplasmanı grafiği.	59
Şekil 4.28 : Durum 6 plak boyuna gerilme grafiği.	59
Şekil 4.29 : Durum 6 plak enine gerilme grafiği.	60
Şekil 4.30 : Geniş (üstteki) ve standart (alttaki) selet plan krokisi.	63

TRAMVAY HATLARINDA FARKLI DURUMLARIN PLAK YORULMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

İki yüz yılı aşkın tarihiyle demiryolu taşımacılığı genel çalışma prensibini korusa da ilk günden bugüne son teknoloji araçlarla ulaşılan hızlar, yeni sinyal sistemleri ile ulaşılan sefer sıklık seviyeleri ve balastsız hatlarla ulaşılan kullanım ömürleri düşünüldüğünde çok büyük gelişmeler göstermektedir.

Son dönemlerde hat tasarımlarında oluşan gelişim yüksek hızlarda dahi hat geometrisinin bozulmadan uzun yıllar korunmasını sağlamıştır. Hat yapısındaki en önemli gelişme balastsız hat yapılarının kullanımının yaygınlaşmasıdır.

Maddelerin yorulma özelliği demiryolu ve havayolu kazaları ile fark edilip literatüre geçmiş ve bu alanda birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. İlk çalışmalarda yorulmanın metallerin kristalleşmesinden kaynaklı olduğu düşünülmüş olsa da daha sonra aslında yorulmanın zamanla maddenin zayıflayıp ekstrem yüklere ulaşmasa bile kırılmasına neden olduğu anlaşılmıştır.

Demiryollarında yorulma etkisi öncelikle ray ve tekerlerde görülmüş daha sonra araç gövdelerinde, boji elemanlarında, traverslerde, ray bağlantı elemanlarında ve plaklarda yorulma detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Araç ve hat üst yapı elemanlarının tasarımlarında kullanılan teorik değerler testlerle doğrulanmalı ve düzenli bir bakım onarım planı yapılmalıdır. Demiryolları tarihinin en büyük kazalarından biri olan Eschede tren kazası yorulma kaynaklı ve tamamen kullanılan teker tipinin yorulma testlerinin yapılmaması ve bakımının doğru yapılmaması kaynaklı olmuştur.

Demiryolu üst yapısında rayların teker-ray etkileşimindeki tekrarlı kuvvetler nedeniyle deformasyonları oldukça sık rastlanan durumlardır. Farklı doğrultudaki kuvvetlerin etkisi nedeniyle raylarda temas yüzeyi çatlakları, kabuklanma, izole cebire çatlakları, ray kaynağı çatlakları ve makas bölgelerinde mangan bloklarda oluşan tehlikeli sonuçlar doğacak hasarlar oluşabilir. Bu hasarları azaltmak için iyi bir ray teker analizi yapılmalı ve yüzeyi sertleştirilmiş raylar kullanılmalıdır. Hataların tehlikeli sonuçlarını sıfıra indirmek doğru bakım ve kullanımla mümkündür. Ray taşlama, kurplarda yağlama, yüzey kaynakları gibi yöntemlerle ray hasarları büyük çatlak ve kırıklara dönmeden müdahale edilebilir.

Demiryolu hatlarında balastsız hat döşemelerinin yorulma analizleri, balastsız hatların yorulma açısından balastsız hatlarla kıyaslanması gibi alanlarda geçmişte bazı çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte beton elemanların fiber donatılı olup olmamasının yorulmaya etkisi ile ilgili testler literatür araştırmasında incelenmiştir. Bu çalışmalarda yapılan testlerle balastsız hat plaklarının kırılma oluşturacak kritik deplasman değeri üzerinde yorulma yükleme sayısı kapasitesi tahmini yapılmıştır. Bir diğer çalışmada ise hat kesitinde asfalt tabakanın özelliklerini, plak beton sınıfını ve ray bağlantı elemanı rijitliğini değiştirerek en ideal tasarım durumları için tasarım önerilerinde bulunulmuştur.

Bu çalışmada yorulmanın tarihi, önermeler, hipotezler, yapılan bilimsel çalışmalar incelendikten sonra, bir tramvay hattı dingil yükleri ve kesitine benzer bir koşul için hesaplamalar yapılmıştır. Bir referans ve beş karşılaştırma durumu için hesaplamalar

yapılmış ve ray tipi, selet aralığı, selet genişliği, ray yastığı rijitliği ve dingiller arası mesafe gibi parametrelerin değiştirilmesinin yorulma üzerinde etkileri araştırılmıştır.

İlk aşamada yapısal analiz programı üzerinde yorulma analizleri yapılacak olan hattın katı modeli yapılmış ve elemanların Elastisite modülü, Poisson oranı gibi parametreleri eklenmiştir. Daha sonra ilgili standarda göre hesaplanan arttırılmış dingil yükü raylar üzerinde uygulanmıştır. Elemanlar arası bağlantı özellikleri de program üzerinde tanımlanarak gerçeğe yakın sonuçlar hesaplanmaya çalışılmıştır.

Altı farklı model için analizler yapıp gerilme dağılımı, ray ve zemin deplasman grafiklerinin çıktıları alınmış ve incelenmiştir. Oluşan plak gerilmeleri üzerinden ilgili standartta verilen ampirik formüllerle yükleme sayısı tahmini yapılmıştır.

Analiz sonuçları açık ve net bir şekilde göstermektedir ki gerilme dağılımının homojen olduğu plaklarda yorulmaya karşı dayanım ömrü daha uzun oluşan gerilmeler daha düşüktür. Gerilme konsantrasyonları yorulma için faydalı bir durum değildir ancak beton plakta bir gerilme konsantrasyonu azaltma durumunda raydaki deplasmanlar artmakta ve ray gerilmeleri artmaktadır. Bu nedenle bu hesaplamaları yaparken sadece plak gerilmeleri değil aynı zaman ray, ray bağlantı elemanı ve varsa traverslerin üzerinde oluşacak iç kuvvetler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak bu çalışma raylı sistemlerde özellikle de demiryolu üst yapısında yorulmanın ne denli önemli bir kriter olduğunu, gerekli testlerin ve bakım-onarımın zamanında yapılması gerektiğini ve bazı parametrelerin değiştirildiğinde nasıl katkılar-zararlar getireceğini göstermiş ve birçok yorulma analizi-testi için fikir vermeyi amaçlamıştır.

FATIGUE PERFORMANCE OF TRACK SLAB FOR TRAMWAY UNDER DIFFERENT CONDITIONS

SUMMARY

After two centuries experience on railways simple working methods of railway has not been slightly changed. Whereas technology of rollings stocks have been developing to very high speeds, headways less than two minutes were acheived by advance level of signallings system and ballastless track usage have brought an excellent level of track structure and geometry. This improvement in ballastless track technology brings us to create track slabs with 100 years of life cycle and millions of load cycles.

The recent developments in ballastless tracks during last decades make the durability and stability of track structure and geometry excellent for long time. The most important milestone to make condition at that level was starting usage of slab track instead of ballasted tracks.

Slab track brings strong guideway stability as well as much longer service life of railway tracks and substructures.

With growing railway technology the fatigue performance of railway components increased slightly. Fatigue firstly was noticed by the serious railway and aircraft accidents due to fatigue failure. Severity of the risks and failures made scientist to research about the root causes of those failure. Even though the stresses occurred on the components were not as much as strength of the material, but somehow the elements were failing.

At the beginning scientists thought metal crystalizing is the reason for those failures, but afterthat fatigue became an issue of various material, not only metals, then fatigue was defined as deformation of the components under cyclic load effect.

The most important development was a test of rolling stock axles in order to propose a stress-load cycle diagram. Palgrem-Miner rules and Goodman diagram developed fatigue analysis one step more by defining relation between stresses and load cycles.

Rail-wheel contact is one of the must important subjects of track-rolling stock interface. In addition, it is the root and main cause of rail and wheel fatigue failure. Rail-wheel contact creates severe damages on running rail, insulated rail joint and rail welding such as rail vertical-horizontal wear, corrugation rail surface splitting, rail contact surface cracks, welding cracks and splits, rail hole cracks and fish plate cracks at mechanical rail joint by the effect of different loads in different direction. In addition to those main effects, fatigue is observed on rail clips, bolts of fastening base plate, concrete, sleepers and track slab.

As rail-wheel interaction is very important for the running rails, the effects on rolling stock wheels and bogie are very critical and they should be evaluated, this is obviously vital. In 1998 the train accident in Eschede was due to a fatigue failure of

wheel that has been holded by switch and broken. Ultrasonic tests and rail re-profiling are vital test and repair methods to prevent dramatic results of fatigue failure.

In order to prevent those kind of fatigue failures on railway tracks an appropriate maintenance and repair plan must be adopted as well as rail-wheel interaction study should be done very well that the study should state the best fitting rail type for the rolling stock wheel. Precautions and repair method such as rail grinding, rail lubrications at tight curves, rail surface build-up welding are vital to prevent and mitigate risk due to the fatigue failure of materials.

During the evaluation of fatigue literature scientists have performed analysis about fatigue performance of ballastless track and compare ballastless track and ballasted track in terms of fatigue behaviours of the track components. In addition to railway slab tracks a study has examined the relavancy of fibres in concrete to improve the fatigue performance of the concrete.

In a study performed a full scale fatigue test in order to see the fatigue strength of slab track as load cycle by the mean of critical vertical displacement of the concrete slab. An other research showed the effects of asphalt layer properties, fastening system stiffness, concrete class of slab track. After having of the test results the study proposed the best track conditions in order to catch 100 years of durability under traffic loads.

This study examined the evolution of fatigue literature, formulas, hypothesis, scientific studies regarding to railway components especially focused on track components. Those components include railway infrastructure components such as running rails, rail fastening systems, sleepers, rail pads, slab track as well as other railway subsystem components such rolling stock bogie and body components. Many of the fatigue failures on track and rolling stock bogie are caused by rail-wheel interaction. Lateral and vertical forces at the point of wheel-rail interaction create fatigue damages on running rails and fastening system as well as on the wheels. Worn rails and wheels must be observed in certain frequency and must be repaired with the proven treatment such as rail grinding and rail re-profiling. Moreover those certain observations and inspections are critical to see a need of replacement on the components of railway subsystems.

After studying development and effects of fatigue, the study covers a wide analysis about slab track fatigue performance. The amalysis starts with the design of the track model. Track model consists of compacted soil, concrete slab track, rail base plate, rail pad, rail clips and continuous welded rail. Slabs are divided into three sections in order to prevent load distrubition by the mean of construction joint.

After creating the general design conditions, material properties were assigned to the each component and the connection properties are defined to be ideally same with reality. Fatigue load combination was applied on the rail as wheel points load within wheel base. The components were divided finite elements and analysis had been performed by the mean of structural analysis tools.

The analysis has been done for one reference and five comparison conditions (six in total). The main purpose of this study was not changing of slab or soil mechanical and geometric properties. Instead of those change the track design parameters such as rail pad stiffness, rail profile type (grooved or vignol), fastening system spacing, baseplate dimensions and finally wheel base. Analysis results were plotted for

internal longitudinal and transversal stresses in concrete slab, rail and soil displacement. According to stress distribution and principle stress values showed the estimated fatigue performance of slab as per relevant standard. It is clearly observed that whenever the stress is distributed homogeneously the fatigue performance was increased and stress concentration at certain points reduced fatigue performance. In the analysis everytime one parameter has been changed and compared with the reference situation and it is observed that wheel base, rail pad stiffness and fastening spacing affected fatigue load cycle capacity the most. As a result the study will be an opinion for the fatigue in railway slab tracks and give some influence and encourage for new studies. In addition, the study can be adopted for the full-scale test in order to verify the finite element solution on the structural analysis tool as many research has been performed structural analysis as well as full-scale tests.

To summarize the whole study demonstrates that the importance of fatigue evaluation of railway components are very important to prevent dangerous results of the fatigue failures. In addition to analysis, theories and formulae, an appropriate and relevant full scale tests should be adopted in order to see the estimated mean time to failure for each component.

Test results on changing parameter inspire on the design of the railway tracks. It demonstrates there are ways such alternative ways to decrease the fatigue stress concentrations on the slabs.

The test results at certain load cycle values will give the operator an insight to plan its maintenance scheduled. Of course scheduled maintenance is very important, however a predictive maintenance is a strong maintenance method with using laser scanner for infrastructure and rolling stock equipment to see the fatigue effects on the components as well as see the general conditions of them.

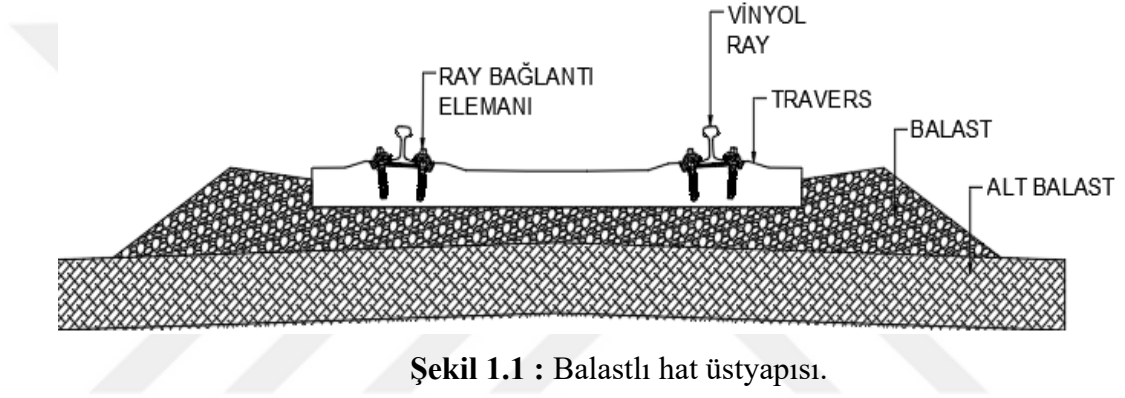
Lastly, the author has tried to contribute the railway fatigue literature with a unique study by combining his resources and knowledge. If the resources that need investments would be increased, the tests of the given conditions in the study might be performed.

The author hopes that the study will give courage for new researches and developments for the railway fatigue issue that has been caused unfortunate accidents in the history.



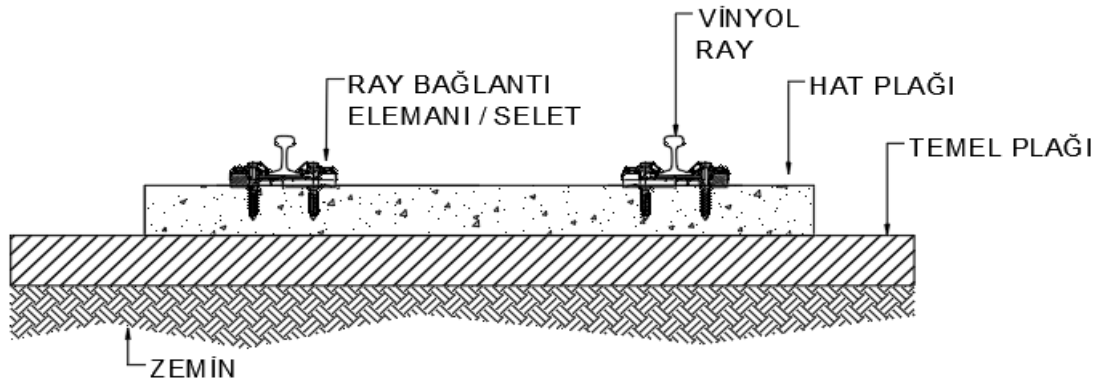
1. GİRİŞ

Demiryolları en basit tanımı ile madeni bir yol üzerinde, madeni tekerlekli bir aracın elektrik veya fosil yakıtlardan üretilen güçle hareket etmesi suretiyle bir yerden bir yere yolcu ve yük taşınması için yapılan yollardır. Geleneksel demiryollarında raylar bağlantı elemanları ile traverse bağlanır ve traversler de herhangi bir bağlantı elemanı kullanmaksızın balastlı altyapı üzerine yerleştirilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Balastlı hat üstyapısı.

Geleneksel balastlı sistem dışında özellikle kent içi raylı sistemlerde sıkça kullanılan rayların balasttan çok daha rijit bir yapısal elemana (beton, betonarme veya asfalt) bağlanması suretiyle demiryolu işletmesi yapılan balastsız hat üstyapısı sistemleri mevcuttur (Şekil 1.2). Bu sistemler tekrarlı yüklerin altında çok uzun süre dayanabildiklerinden yani yorulma dayanımları yüksek olduğundan kentiçi raylı sistemlerin büyük bir bölümünde ana hat yapılarının da az bir bölümünde balastlı yapıların yerini almıştır.



Şekil 1.2 : Balastsız hat üstyapısı.

Balastsız hatlar daha rijit olmaları nedeni ile hat geometrisinde yıllar boyunca oluşan değişimler çok azdır. Başta bu neden olmak üzere diğer çeşitli nedenlerle bakım aralıkları düşük ve kullanım ömürleri yüksektir. Getirdiği bu avantaj sayesinde trafiğin fazla olduğu yerler olan kentiçi raylı sistemlerde demiryolu otoriteleri tarafından yapım maliyeti ve süresi balastlı hata göre fazla da olsa daha çok tercih edilen sistemlerdir. Balastsız hatların bakım maliyetleri balastlı hatların %20-30 daha azdır (Esveld, 2001). “Yapılan araştırmalara göre İngiltere’de sürekli döşemeli balastsız hattın maliyeti balastlı hattın üst yapı döşenme (poz) maliyetinden %30 fazladır” (Öztürk ve Öztürk, 2005).

Balastsız demiryolu hatları yerinde döküm olabileceği gibi tam donatılmış şekilde prefabrik uygulanabilmektedir. Prefabrik sistemlerde ray montajı ve kaynağı gibi işlemler haricinde bağlantı elemanlarının montajı, drenaj elemanlarının yerleştirilmesi gibi işlemler fabrikada veya depo sahasında yapıp sahada doğrudan yerleşim yapılabilmektedir.

Günümüzde balastsız hat üstyapısı teknolojisi sürekli gelişmekte ve uygulanan sistemlerin çeşitliliği artmaktadır. Kentlerin gürültü ve titreşim azalım gereklilikleri, zemin koşulları, demiryolu araçlarının tiplerine göre uyum sağlayabilmektedir. Örneğin hastane yakınından geçecek bir hafif raylı sistem için bölgesel olarak rijitliği daha düşük titreşim savar yastıklar kullanarak kolay bir gürültü ve titreşim azaltma yöntemi sağlamaktadır.

Balastsız hat üstyapı sistemleri kullanım amaçlarına ve gerekliliklerine göre değişebildiği gibi kullanılan altyapı malzemelerine göre de sınıflandırılabilir. Demiryolu altyapısına göre hatlar beton, fiber beton, fiber donatılı beton, betonarme veya asfalt olarak seçilebilir. Taşıma kapasitesinin yüksekliği ve yorulma dayanımının uzun olması nedeni ile betonarme sistemler en çok tercih edilen sistemler olmuştur. Bu sistemler yerinde döküm olabileceği gibi prefabrik veya ön görmeli döşemeler şeklinde fabrika veya depo sahasında imal edilip sahada uygulanabilmektedir.

Balastsız demiryolu sistemlerinin tasarımı için uluslararası geçerliliği olan standartlara (EN, UIC, AREMA gibi) başvurulmuş ve tasarımlar buna uygun yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir.

Balastsız üstyapılarda nihai limit tasarımına göre yapılırken malzeme yorulması da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tezde yorulmanın tarihi gelişimi, bu alanda yapılan çalışmalar, üretilen literatür ve demiryollarında yorulmanın etkileri incelenmiştir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez genellikle kentiçi raylı sistemlerde ancak son yıllarda konvansiyonel hatlarda da kullanımı artmış olan balastsız hat üstyapısında kullanılan yapısal elemanları ve özelliklerini, balastsız üstyapı sistemlerini anlatmayı ve yorulmanın balastsız üstyapı elemanlarındaki etkisini irdelemeyi amaçlamıştır.

Tezin son bölümünde balastsız bir hat üstyapısının tekrarlı yükler altında hat döşemesinde oluşan iç kuvvetlerin yorulma dayanımlarının hesaplanıp, hattın geometrik yapısını (döşeme kalınlığı veya genişliğini) değiştirmeden elemanların özellik, tip veya boyutlarını değiştirerek yorulma ömürlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

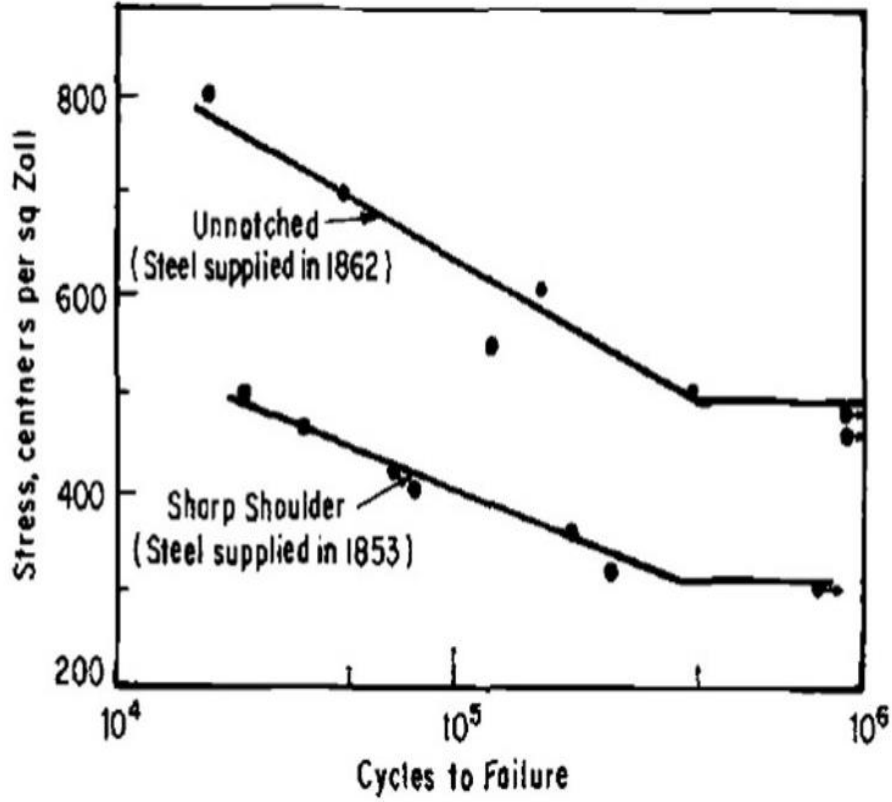
Tezin son bölümündeki analizler tramvay örneği için yapılmıştır ancak araç yükleri arttırılarak daha büyük aks yükleri için de uygulanabilecektir. Burada uygulanan aks yükü ve hat tipi tramvaya uygun olarak seçilmiştir.

1.2 Literatür Taraması

Yorulma aslında maddelerin akma dayanımına ulaşmayan gerilmelerle kırılması sonucunda bir sorun olarak ortaya çıktı. Tasarım yüklerine ulaşmamasına rağmen belirli bir zaman sonra deformasyona uğrayıp kırılan maddeler yorulmanın araştırılmasının başlangıcı oldu. Bu araştırmalar günümüze kadar gelinen noktada önemli katkılar sundu. 1838 yılında yorulma hakkında ilk makale Wilhelm Albert tarafından yayımlandı (González-Velázquez, 2020). Wilhelm Albert Harz bölgesinde maden ve orman ofisinde çalışırken demir madeninde kırılan vinç zincirlerinin tekrarlı ama küçük gerilmeler altında kırıldığı üzerinde çalışarak ilk kez yorulma üzerine bir çalışma olarak “Über Treibseile am Harz” (Harz’daki Sürüş Halatları) adlı makaleyi yayımladı. (Albert, 1838).

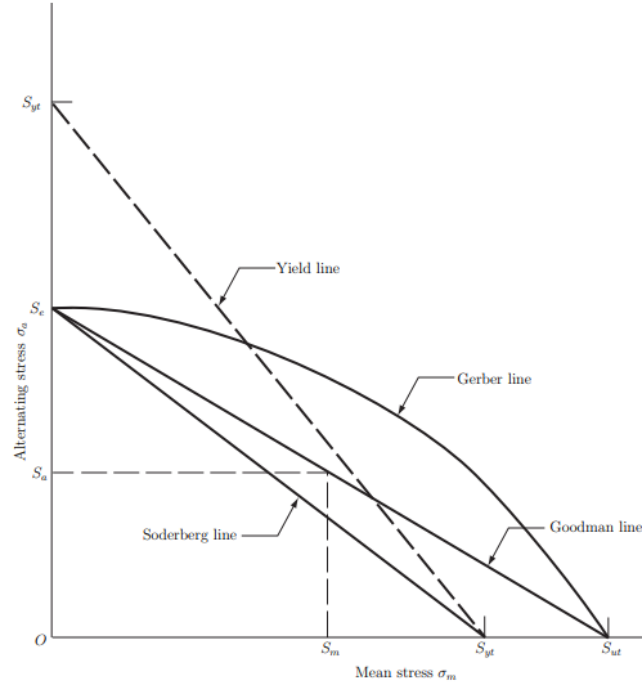
Wilhelm Albert ile aynı dönemlerde İngiltere’de ise bu kez demiryollarında dingil ve rayların tekrarlı gerilmeler altında kırıldığı gözlemlendi. Ancak yanlış bir tanımla metallerin tekrarlı gerilmeler altında kristalleştiği gerekçe gösterilerek gevrek

malzemelerin kullanımının lehine fikirler ortaya çıktı. 19.yy. ortalarında yorulma metallerin tekrar eden gerilmeler altında kırılması olarak tanımlandı. 1860 yılında August Wöhler tarafından ilk yorulma testi yapılmış ve yorulma dayanımını S-N (gerilme-yaşam döngüsü) eğrileri ile yorulmanın konsepti belirlenmiştir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 : Wöhler'in Krupp aks çeliği için oluşturduğu S-N eğrisi.

1890'dan sonra Goodman, Soderberg ve Gerber çizgileri (Şekil 1.4) ile malzemelerin güvenli gerilme sınırları belirlenmeye çalışıldı. Bu çalışmalar dökme demir üzerinde yapıldı ve malzeme için yorulma kaynaklı kırılma yaratmayacak limit gerilme değerleri için bir değişen gerilme-ortalama gerilme ilişkisi ortaya konulmuştur.



Şekil 1.4 : Goodman, Soderberg, Gerber çizgileri.

1920'lerin başında otomotiv elemanlarının yorulma ömrü bilyeli dövme yöntemi ile oldukça geliştirildi. 1924 yılında Palgren tarafından doğrusal hasar hipotezi önerildi. Daha sonra bu hipotez Miner kuralı olarak uçak malzemeleri için bir kümülatif yorulma hasar kriteri oldu. 1950 başlarında İngiltere'nin Da Havilland şirketi tarafından üretilen Comet tipi uçak ticari amaçlı yolcu taşımada kullanılan ilk jet motorlu uçaklar olmuştur. İki adet Comet tipi uçağın yaklaşık üç bin uçuştan sonra yaptığı kazaların nedenin uçak gövdesinde oluşan yorulma olduğu tespit edilmiştir ve uçağın gövde tasarımında gövdede oluşacak gerilme konsantrasyonu azaltılarak yorulmaya karşı dayanım ömrünün uzatılması hedeflenmiştir (González-Velázquez, 2020). Bu sayede artık uçakların belirli bir ömür ile tasarlanacağı gerçeği ortaya çıkmıştır. Paris, Gomez ve Anderson (1963), yapının ömrü belirlemek için rasyonel analitik yorulma teorisi ortaya atıldı. Yorulma nedeniyle oluşan bir kırılmanın büyüme oranını hesaplayan bir teori olarak literatüre geçmiştir.

1967 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Batı Virjinya eyaletinde bir otoyol köprüsü bir yorulma çatlağının beklenen çok daha kısa bir sürede büyümesi sonucu yıkılmıştır. Bu olayla birlikte yorulma ivmesinin korozyonu arttırdığına yönelik bir ilişki tespit edilmiştir (González-Velázquez, 2020).

1970 ve sonrasında yorulma ile ilgili farklı sektörlerde çok gelişmiş yöntemler ve malzemelerin yorulma ömürleri oldukça uzatılmıştır. Otomotiv sektöründen demiryoluna, demiryolundan endüstriyel makinelere, inşaat sektörü gibi birçok sektörde yorulmanın standartlarda yer alması ile tasarımların yorulma kriterlerini sağlaması önemli bir durum olmuştur.

Demiryollarında özellikle rayların yorulma testlerinin yapımında ISO 1099 standardı kullanılmaktadır. EN 13674-1’de bu standarda referans verilmiştir. Betonarme ve ön gerilmeli betonlar için EN 1992-1-1 standardı dizayn için kullanılabilirler. Demiryolu hat plakları için ise 2017 yılında yayımlanan EN 16432 standartları uygulanabilmektedir. Hat plakları için yorulma üzerine aşağıda gösterilen çalışmalar yapılmıştır.

Demiryollarında yorulmanın detaylı bir şekilde anlatımı tezin üçüncü bölümünde yapılmıştır. Bu bölümde demiryolu elemanlarında yorulma analizleri nasıl yapılmaya başlandığı ve yorulmanın nasıl hasarlar oluşturduğu anlatılmıştır.

Poveda, Yu, Lancha, Ruiz (2015), demiryolu hat plaklarının yorulma dayanım ömrünün hesaplanması adına bir sayısal analiz çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada yorulma açısından analizler yapılmış ve farklı bağlantı elemanları rijitlik değerleri, farklı beton sınıfları, farklı asfalt karışım tabakaları basınç dayanımları ve beton plak kalınlıkları için analiz ve testler yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- Bir beton plağın ömrünün 100 yıl olabilmesi için betonun karakteristik basınç dayanımının 50 megapaskal’dan az olmaması gerekir.
- Plakta oluşacak olan yorulma nedenli hasarların düşük seviyede tutulabilmesi için plak kalınlığının en az 170 milimetre olması gerekmektedir.
- Ray bağlantı elemanının rijitliğinin artması yani ray altı yastığının elastisite modülünün artması ile birlikte plakta oluşan yorulma nedenli hasarlar artmaktadır.
- Yorulma nedenli hasarları minimize etmek için hat plağı altındaki asfalt karışımlı tabakanın elastisite modülünün en az 60-80 megapaskal olması gerekmektedir.

Xavier, Abraham, Varkey (2016) yaptıkları çalışmalarda hat plaklarının standart çelik donatılı olması ile karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) donatıların kullanılmış olmasının yorulma yükleme sayısına etkisi karşılaştırılmıştır. İki durum içinde araç yükü altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ile yorulma yükleme sayılarına ulaşılmıştır. Yorulma yükleme sayısı kapasitesinin KFTP donatı kullanılan hat plaklarında standart çelik donatı kullanılan plağa göre yaklaşık olarak 4 kat daha fazla olduğu saptanmıştır. KFTP kullanımının yorulma kapasitesine oldukça olumlu katkı sunduğu kanısı ile çalışma sonuçlandırılmıştır.

Poveda, Ruiz, Cifuentes, Yu, Zhang (2017) kendiliğinden yerleşen çelik fiber donatılı betonlarda fiber yoğunluğunun yorulma basınç dayanımı kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmada 5 farklı fiber yoğunluğu için analiz yapılmıştır. Ancak en yüksek dayanım fiber yoğunluğunun fazla olduğu durumda değil alınan değerlerin ortalamasına yakın bir miktarda olduğunda gözlemlenmiştir.

Tarifa, Zhang, Ruiz, Poveda (2015) Japonya’da kullanılan prefabrik hat plağı sistemlerinin yorulma davranışını incelemek için araştırma yapmışlardır. Yaptıkları testlerde plak yükleme testleri ile kırılma oluşturacak kritik deplasmanı bularak yorulma ömrünü (maksimum yükleme sayısını) tahmin edecek sonuçlar bulmuşlardır.

1.3 Hipotez

Balastsız hatların temelini oluşturan betonarme tabaklarda ölü yükler, hareketli yükler ve tekrarlı hareketli yükler altında iç kuvvetler oluşmaktadır. Kent içi demiryollarında sefer aralığı az yani hattın bir kesitinden geçen araç sayısı çok fazla olduğundan üstyapı elemanları üzerinde tekrarlı yüklerin etkisi oldukça fazladır. Bu tekrarlı yükler altında demiryolu trafik akışını değiştirmeden hat üzerinde bazı parametreleri değiştirerek betonarme hat plakalarının yorulmaya karşı dayanımları değiştirilebilir.

Tezin karşılaştırma kısmında, yorulma yüklemeleri koşulları (tekrarlı yükler) altında araç aks yükü ve demiryolunun güzergâh özellikleri (geometrik standartları) değiştirilmeden ray yastığı rijitliği, aks açıklığı, ray tipleri, selet boyutları, seletler arası mesafe değiştirilerek yapılan analizlerde betonarme hat plakasında oluşan iç

kuvvetlerde değişimler beklenmektedir. Bu değişimlerin karşılaştırması ile optimum tasarım önerilebilir.



2. BALASTSIZ DEMİRYOLU ÜST YAPILARI

Balastsız demiryolu üstyapısında raylar betonarme, ön gerilmeli beton traverslere veya doğrudan hat döşemesine bağlanırlar. Betonarme veya fiber donatılı betona doğrudan veya dolaylı olarak bağlanan rayların oturmadan dolayı oluşan düşey deplasmanları çok küçük olduğu ve balastlı hatlardaki gibi balastın stabilizasyon probleminden kaynaklı deplasmanlar olmadığı için daha düzgün ve hassas bir hat geometrisi oluşur. Yine aynı nedenle hat geometrisi uzun yıllar boyunca stabil kalacağından balastlı hatlarda olduğu gibi buraj makinesi ile hat geometrisinin düzeltilmesine gerek yoktur.

Balastlı hatlardaki üstyapıda kullanılan yapısal elemanlar en genel tipleri ile ray, ray altı yastığı, ray bağlantı elemanı, travers ve balasttan oluşmaktadır. Buna karşın balastsız hat üstyapısında aynı şekilde benzer üstyapı elemanları kullanılsa da ray bağlantı elemanlarının tipleri oldukça değişmiştir. Ray kısaçları benzer olsa bile seletler ve seletlerin altında kullanılan elastik yastıklar balastlı hatlarda görülmeyen üstyapı elemanlarıdır. Raylı sistemlerde sıkça kullanılan balastsız üstyapı sistemleri bu bölümde incelenmektedir.

2.1 Balastsız Üstyapı Elemanları

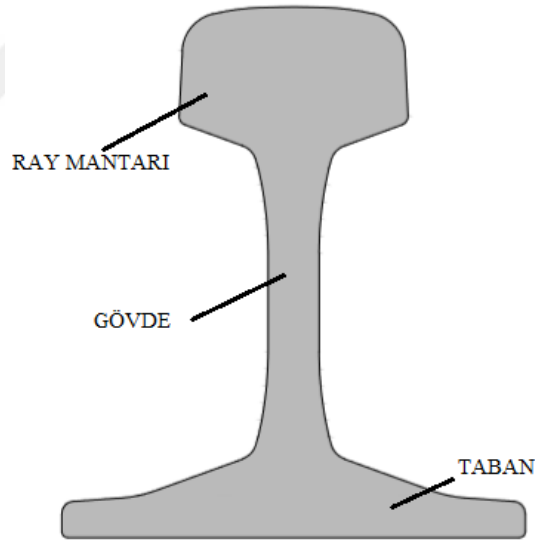
Hat üstyapısı tasarım gerekliliklerine göre değişmekle birlikte genel olarak ray, ray altı yastığı, ray bağlantı elemanları, travers, beton döşeme ve temel döşemesinden oluşur.

2.1.1 Raylar

Raylar balastsız hat üstyapısının da en önemli elemanıdır. Demiryollarında araç yükleri altında tekerlek ve ray etkileşiminden ötürü oluşacak aşınmaya karşı dayanıklı, eğilmede çekme mukavemeti yüksek çelik raylar kullanılmaktadır. İlk başlarda dökme demir ile yapılan raylar yüksek dayanım gerektirdiğinden sıcak haddelenmiş çelik alaşımlardan yapılmaktadır. Raylar bir hat boyunca belirli noktalar (uzama contaları) hariç sürekli bağlantılı olarak devam ederler. Ray bağlantıları

cebireli veya kaynaklı olabilmektedir. Ancak son dönemlerde ray bağlantıları ray kaynaklarıyla yapılmakta sürekli kaynaklı raylar kullanılmaktadır. Sürekli kaynaklı raylar daha düşük bakım maliyeti ve daha yüksek iletkenlik sağlamaktadır. Bu durum ray üzerinden iletilen cer dönüş akımı için oldukça avantajlıdır. Raylar standart olarak 18 metre uzunluğunda üretilir ve sahada bağlantıları yapılır. Ancak bazı spesifik lokasyonlarda (makas, dar kurplar, uzama contaları gibi) özel boylu raylar üretilmektedir. Balastsız hatlarda genel olarak patenli (vinyol) ray ve oluklu ray olmak üzere iki tip ray kullanılır.

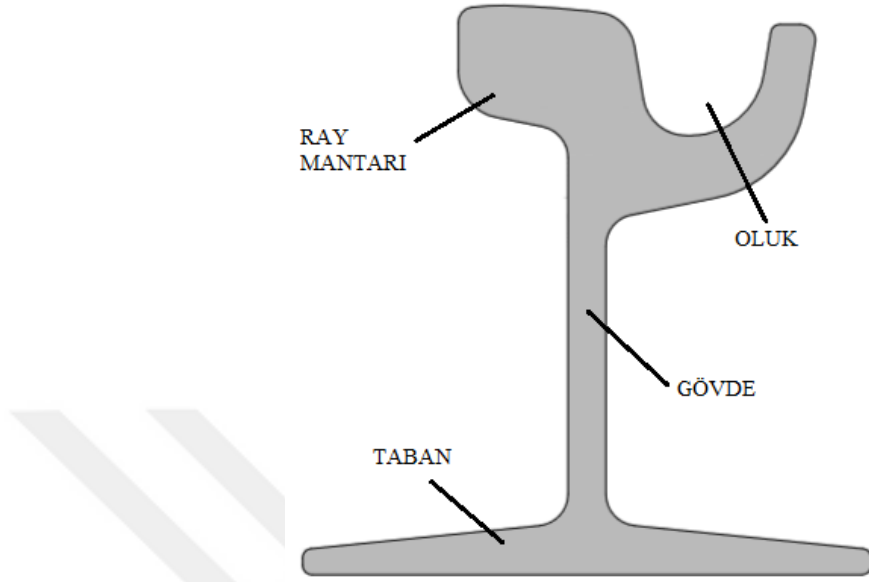
Vinyol tipi raylar mantar, gövde ve taban (ayak) bölümlerinden oluşur (Şekil 2.1). Ray çelikleri istenilen sertliğe ve aşınma ihtimaline karşı belirlenir. Yarıçapı küçük olan kurplarda tekerleğin yapısı nedeniyle dış rayda daha fazla aşınma görüldüğü için dış ray mantarları daha yüksek çelik sınıfından yapılabilir. Vinyol raylar oluklu raylara oranla çok daha sık kullanılmaktadır. Bu durum vinyol tip rayların kaynaklama, taşlama ve bakım açısından daha kolay olmasından kaynaklıdır.



Şekil 2.1 : Vinyol tipi ray.

Bazı kentiçi raylı sistem demiryolları (özellikle tramvaylar) karayolu ile ortak kullanılır ve yol kaplaması ile çevrelenir. Bu durumlarda bodenin hareket edebileceği bir boşluk (boden yatağı) kalmaktadır (Şekil 2.2). Bu nedenle ray üzerinde oluşturulan olukla boden için hareket edebilecek boşluk ve hareket için kılavuz sağlanmış olur. Oluklu raylar ray başlığı (mantar), kılavuz ray, gövde ve taban bölümlerinden oluşur (Şekil 2.2). Oluklu raylarda bakım ve temizlik düzenli

olmadığı takdirde oluk içerisinde oluşan kalıntılar araçların bodenin oluğu terk etmesi suretiyle raydan çıkmasına neden olabilir.



Şekil 2.2 : Oluklu ray.

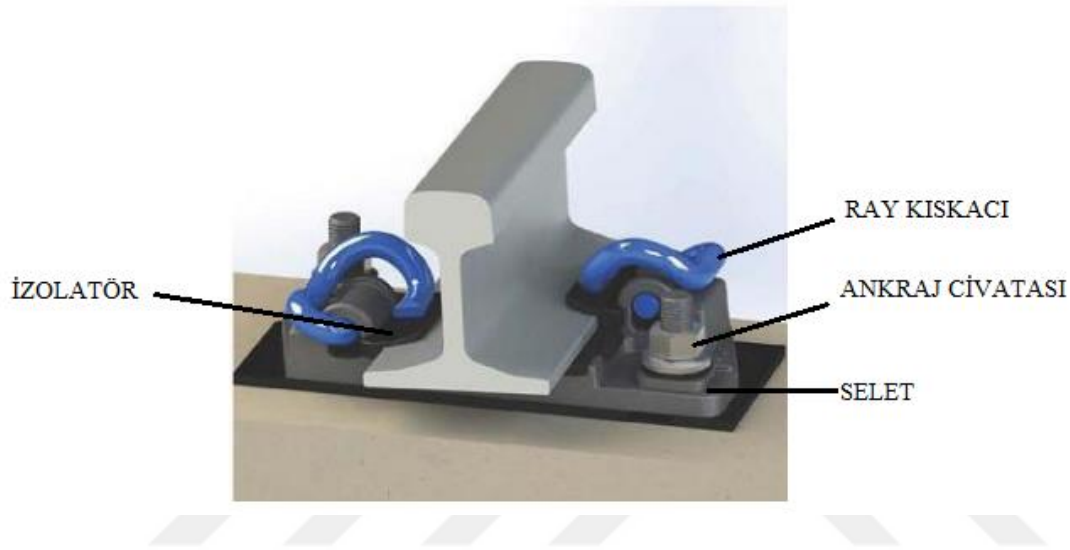
Yapısal taşıyıcı (çalışan raylar) dışında yarıçapı küçük olan kurplarda boden kılavuz olması için kılavuz ray (emniyet rayı) da kullanılabilir. Kurplarda araç bojisine ve akslara gelen yanal yükler tekerin tırmanarak raydan çıkmasına neden olabilir ancak bunu engellemek için raya paralel olarak emniyet rayları yerleştirilir. Bu tip emniyet rayları makaslardaki geçişin tehlikesiz olması için de kullanılmaktadır. Emniyet rayları genellikle raydan ayrı bir şekilde bağlanıp farklı ve daha küçük kesit alanı olan profillerden oluşurlar. Oluklu rayların kendinden bir kılavuzu olduğundan emniyet rayları ile kullanılmazlar, bu nedenle emniyet rayı uygulamaları vinyol tip raylarla birlikte görülür.

2.1.2 Ray bağlantı elemanları

Ray bağlantı elemanları rayı traverslere veya hat döşemesine elastik şekilde bağlanmasını sağlamaktadır. Bağlantı elemanları ray kısıkaçı, izolatör, selet, ray altı yastığı, ray bağlantı cıvataları ve yaylardan oluşur (Şekil 2.3). Ray bağlantı elemanın temel görevleri şunlardır:

- Raydan gelen yükleri döşemeye veya taşıyıcı elemana (travers) aktarmak,

- Rayların düşey ve yanal hareketini sınırlayarak hat geometrisini belirlenen toleranslar altında korumak,
- Ray yastığı ve izolatör sayesinde elektrik izolasyonunu sağlamak,
- Tekrarlı yükler nedeniyle yüksek yorulma dayanımına sahip olmak,
- Dinamik yükler altında titreşim azaltımını sağlamak,
- Termal gerilmeler etkisi altında rayların şekil değiştirmesini önlemektir.



Şekil 2.3 : Ray bağlantı elemanı. (Pandrol)

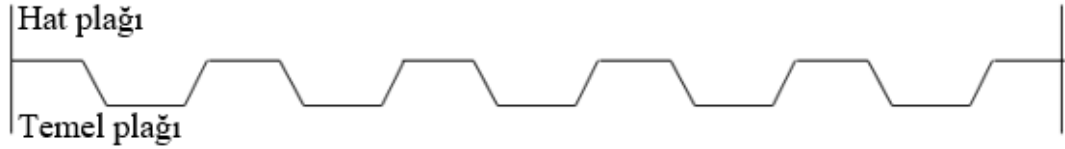
2.1.3 Ray altı yastığı (Ray Pedi)

Ray altı yastıklarının fonksiyonu raydan gelen yükleri travers veya taban plakasına frekanslarını filtreleyerek iletmektir (Esveld, 2001). Yapısal görevinin yanında ray dönen cer akımını izole edip kaçak akımı minimize etmeye yararlar. Ray altı yastıkları gerekli rijitlik özelliklerine göre düz kauçuk, düz köpüklü yapılı, oluklu kauçuk veya çivili kompozit malzemeli olabilir. Kalınlıkları titreşim azaltma gerekliliklerine göre değişmektedir. Bu gereklilikler çevresel etkiler ve demiryolu hattı yakınındaki yapılara göre ses ve titreşim raporları üzerinden belirlenir.

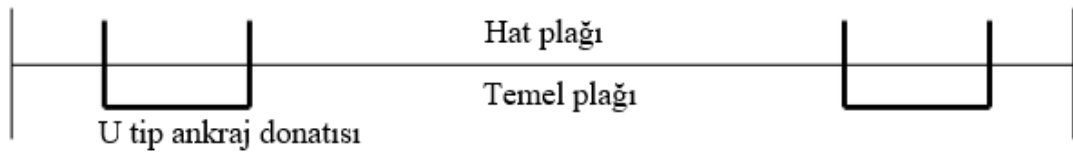
2.2 Standart Plaklı Hatlar

Balastsız üstyapı tiplerinde rayların selet yardımı ile doğrudan betonarme veya beton plaklara bağlanması ile oluşan plaklı hatlar sıkça karşımıza çıkmaktadır. Demiryolu yüklerinin etkisinde yapısı uzun yıllar bozulmayan düşey yer değiştirmelerin oldukça az olduğu bu tip hatlarda bakım maliyeti oldukça düşüktür.

Plaklı hatların temel betonuna bağlantısı pürüzlendirilmiş (sürtünme katsayısı artırılmış) yüzeyle doğrudan ankrajsız (Şekil 2.4) veya temel plağı ile hat plağı arasında oluşacak kesme kuvvetine karşı ankraj donatısı (Şekil 2.5) yerleştirilir.



Şekil 2.4 : Ankrajsız hat plağı ve temel plağı birleşimi.



Şekil 2.5 : Ankraj donatılı hat plağı ve temel plağı birleşimi

Tezin yorulma analizi yapılan bölümünde bu tip hat yapısı örnek olarak kullanılacaktır. Kullanılan modelde sıkıştırılmış zemin üzerine belirli bir kalınlıkta hat plağı betonu, betona ankrajlı selet ve seletin üzerinde belirli bir rijitliğe sahip ray altı yastığı ve raydan oluşmaktadır.

Standart plaklı doğrudan yerinde döküm olabileceği gibi prefabrik olarak fabrikada veya imalat sahasında imal edilip sahada uygulaması yapılabilir. Şehir içi demiryolu projelerinde daha hızlı inşaat avantajı getirmesine rağmen daha pahalı olduğu için genellikle prefabrik hat plakları daha az tercih edilirler. Prefabrik plaklar da her türlü bağlantı elemanına göre tasarlanabilirler.

Alman Demiryolları tarafından tercih edilen BÖGL sistemi prefabrik plak imalatına örnektir (Şekil 2.6). Bu tip hatlar yüksek dayanıklılık gerektiren bölgelerde zemin, köprü ve tünel gibi yapıların üzerinde kullanılabilir.

Japon Demiryolları da prefabrik döşeme sistemlerini Shinkansen hızlı tren yolları için de kullanmıştır.



Şekil 2.6 : Bögl tipi hat (Laurinavičius ve Gailiene, 2017)

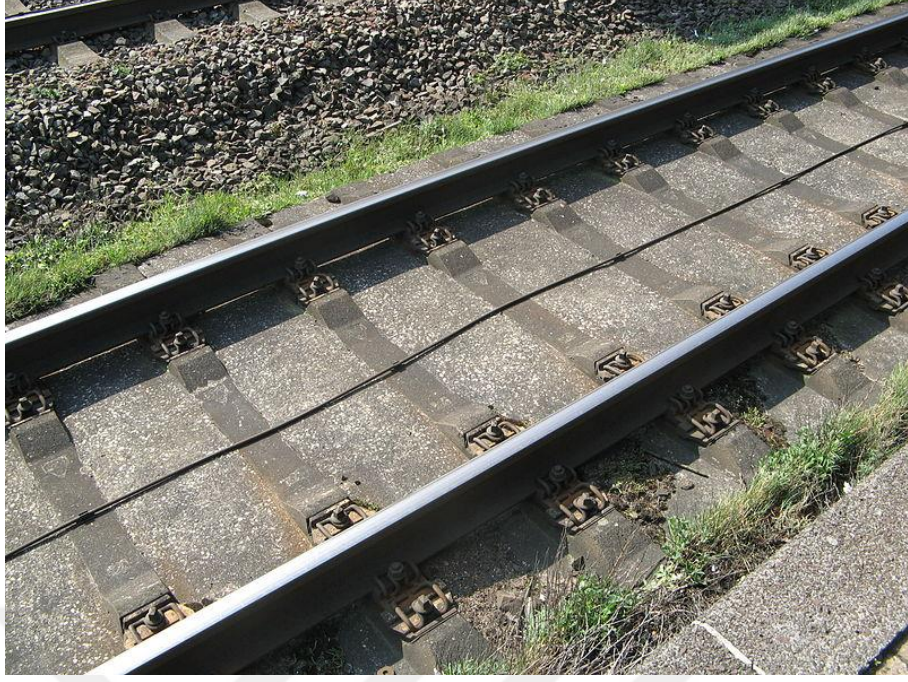
2.3 Betona Gömülü Traversli ve Bloklu Hatlar

Bu tip sistemlerde raylar bağlantı elemanları vasıtasıyla traverslere veya iki bloklu traverslere bağlanır ve bu traversler beton veya betonarme plağa gömülüdür. Bu hatlar travers tipine göre değişiklik gösterir. Travers tiplerinde tasarımlar değişse de tasarım ve çalışma mantığı açısından aşağıdaki traversler sayılabilir.

- Tek parça betonarme traversler,
- Tek parça ön gerilmeli beton traversler,
- İki bloklu betonarme traversler.

Bu traversler tiplerinden bağımsız olarak gürültü ve titreşim azaltmak adına elastik pedlerle desteklenebilir. Bu elastik pedler travers ile beton plak arasına yerleştirilir.

Kısmen betona gömülü travers sistemler için Rheda, Züblin ve Stedef sistemleri örnek gösterilebilir. Rheda sistemler ilk olarak Almanya’da Rheda istasyonunda 850 metrelik bir test alanında kullanılmıştır (Şekil 2.7). Bakım maliyeti ve sıklığı çok düşük olduğu kanıtlanan bu hatlar Almanya demiryollarının birçok tüneline kullanılmıştır. (Öztürk ve Öztürk, 2005)



Şekil 2.7 : Rheda tipi hat-Rheda istasyonu (Kohring 2007)

2.4 Gömülü Hatlar

Bu tip balastsız hatların asıl ve en temel kullanım amacı demiryolu hattının karayolu ile kesiştiği yerlerde seviye eşitlemesi gerekliliğidir. Bu nedenle kentiçi cadde tramvaylarında ve hemzemin geçitlerde sıklıkla tercih edilir. Hat plağının üst kotunun ray ve bağlantı elemanlarını çevrelemek sureti ile asfalt, kaldırım taşı, beton gibi malzemelerle ray üst kotuna eşitlenmesidir.

Bu hatlarda raylar bir oluk içinde sürekli olarak destekli olabileceği gibi bağlantı elemanlarının kullanıldığı sistemler de olabilir. Gömülü sistemler için Hollanda’da kullanılan Edilon tipi en yaygın örnektir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Edilon gömülü sistem.



3. RAYLI SİSTEMLERDE YORULMA VE YORULMANIN DEMİRYOLU ELEMANLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Demiryolu altyapısı ve araçları, endüstriyel makineler, hava-karayolu araçları gibi birçok sektörde materyallerin tekrar eden yüklemeler nedeniyle hasar görmesine yorulma hasarları denilmektedir. Hatta öyle ki yorulmanın demiryolu ve havayolu ile fark edilip ortaya çıktığı bilinmektedir. Yorulma bir elemanın uzun süreler (tekrarlı) yüklemelere maruz kalmasının bir sonucudur ve kontrol altında tutulması gerekir.

Yorulma demiryollarının 200 yıllık tarihinden beri onunla süregelen bir durum veya kontrol edilmezse çok tehlikeli sonuçlar doğurabilecek bir durumdur. Demiryolu elemanlarının tasarımı yapılırken elbette maksimum yükleme durumlarına göre tasarım yapılmaktadır. Ancak bazı yükler maksimum yük değerlerinin altında kalsa da demiryolu için uzun vadede yıkıcı etkiye sahip olabilirler. Raylı sistemlerin her alt disiplininde kullanılan elemanlarda yorulma gözlemlenmektedir (Çizelge 3.1).

Raylı sistemlerde araçlar 50 yıla varan, raylı sistem altyapıları ise 100 yıllık kullanım ömürleri için tasarlanırlar. Bu sürelerle ulaşabilmek adına tasarımlar yorulma yüklemelerinden oluşacak gerilmelerin yorulma limitlerinde kalması gerekmektedir. Aksi takdirde tahmin edilenden daha erken olacak bir hata çok tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Örneğin rayda oluşabilecek bir yorulma kırılması raydan çıkmaya neden olabilir. Tarihte ilk büyük kayıplara neden olan demiryolu kazası olarak bilinen ve 1842 yılında gerçekleşen Versailles kazası bir aksın yorulma nedeni ile kırılması sonucu olmuştur. 3 Haziran 1998’de Almanya’nın Eschede köyü yakınlarında Alman Demiryollarına ait bir hızlı tren tekerinin yorulma nedeniyle kırılması sonucu deray olmuş, daha sonra köprünün taşıyıcılarına çarpmış ve 101 kişinin ölümüne neden olmuştur. Hızlı tren tarihinin en büyük kazalarından bir tanesi yorulma nedeniyle olmuştur. 17 Ekim 2000 tarihinde ise İngiltere’de rayın yorulma nedeniyle kırılması sonucunda bir trenin Hatfield yakınlarında devrilmesi sonucu dört kişinin ölümüne neden olmuştur. (Smith, 2009)

Yaşanan kazalardan da görüldüğü üzere yorulmanın demiryolunun araçtan, hat yapısına kadar her alanda tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması

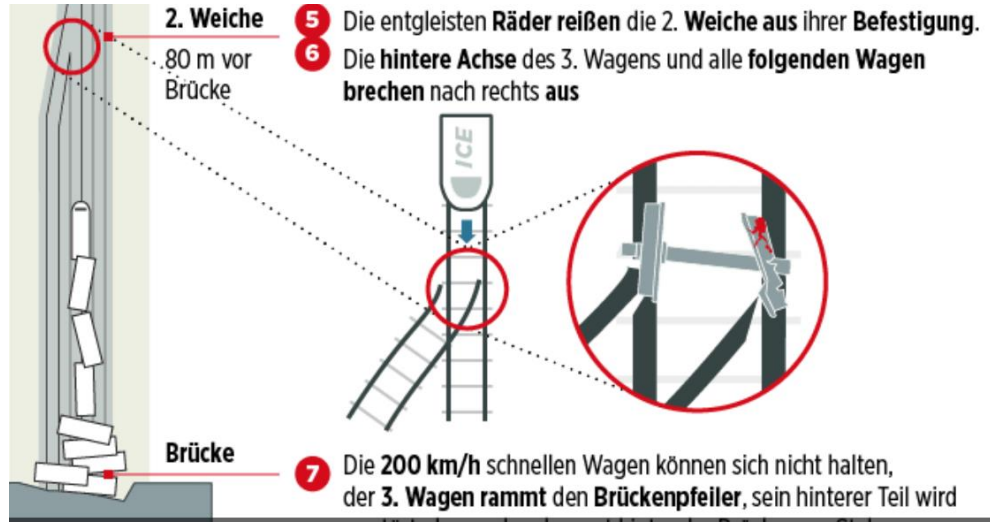
gerekmektedir. Bununla birlikte ileri seviye önleyici ve öngörücü bakım yöntemleri ile yorulmadan dolayı oluşacak hasarların ölümcül sonuçlar doğurmadan önlenmesi sağlanabilir.

Çizelge 3.1 : Raylı sistemlerde yorulmanın önemli olduğu alanlar. (Smith, 2009)

Yorulma Etkisi	Etkilenen Eleman
Ray-teker ara yüzü	Tekerler Raylar Ray Kaynakları
Ray-teker temasından üretilen kuvvetlerden etkilenenler	Taşıyıcı (boji) Dingiller Vites kutuları Merkez mili (boji) Boji iskeleti Yaylar ve süspansiyonlar Fren sistemi Ray bağlantı elemanları Hat plağı
Araçlar	Motor ve motor elemanları Araç gövdesi Bağlantı manşonu Araç içi ekipmanlar ve bağlantılar
Altyapı	Köprüler Sinyalizasyon ekipmanları Güç kaynağı elemanları

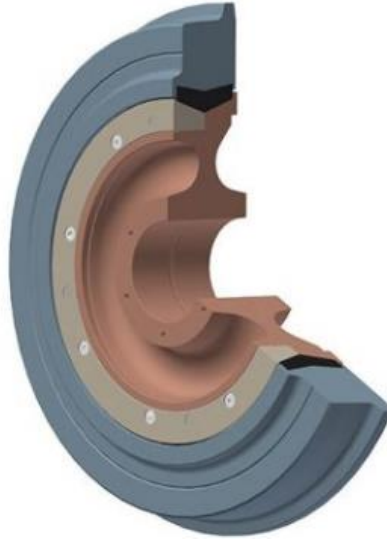
3.1 Eschede Tren Kazası

Demiryolu tarihinin en büyük kazalarından bir tanesi olan Eschede kasabası yakınlarında Alman demiryollarına ait ICE tipi hızlı trenin bir tekerinin yorulma nedeni hasarından kaynaklanan kazada 101 kişi ölmüş ve 100'den fazla kişinin de yaralanmasına neden olmuştur. Köprüden 80 metre önce bir makasta çatlayan tekerin sıkışması sonucu köprüye çarpmıştır ve köprünün yıkılması ile vagonların bir kısmı köprünün enkazı altında kalmıştır (Şekil 3.1) (Sievering, 2018).



Şekil 3.1 : Eschede tren kazası şematik gösterimi.

ICE trenlerin ilk başlarda tek bloklu dingiller kullanılıyordu ve sönümlleme için tekerin metal gövdesi ile yüzeyi arasında bir kauçuk halkadan oluşuyordu (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : BO 84 tipi araç tekeri.

Ancak daha sonra yapılan araştırmalardan öğrenilmiştir ki aslında bu tip teker yapısı vibrasyonu azaltırken tekeri zayıflatmaktadır. Bu durumla birlikte bu tip tekerler ancak kabul ve teorilerle tasarlanıyordu. O dönemlerde yapılan testlerde aşınma, yüksek hız ve ekstrem yüklerden oluşan tekrarlı etkileri ölçmüyordu. (NASA, 2007)

Bu kazada bir diğer önemli nokta ise bakım toleransları idi. Bilim insanları 1992 yılının başlarında, ispitlerin metal yorgunluğu nedeniyle arızalanabileceği yönünde endişelerini ortaya koymuşlardır. Uzmanlar aşınma dolayısıyla çapı 88 cm'den az olan tekerlerin kullanılmaması gerektiğini belirtmişlerdir. Ancak otoriteler o

dönemde bunun limit değerini 85.4 cm olarak belirlemişlerdi. Kazayla aynı dönemlerde Hannover ulaşım otoritesi bu tekerlerin ispitlerinin tahmin edilen çok daha kısa sürede deformasyona uğradığını tespit etmişlerdi ve tekerlerin değişimine başlamışlardı. Ancak kazaya neden olan tekerin değişimi yapılmamış ve teker arızalanıp kırıldığında çapı 86.2 cm idi. (NASA, 2007)

NASA'nın bu konu ile ilgili raporu da göstermektedir ki Eschede tren kazası doğru bir önleyici veya ön görücü bakımın gerekliliğini kanıtlayan bir kazadır. Demiryolu ve demiryolu araçları belirli aralıklarla (fabrika test ve malzeme dayanımlarına göre) kontrol edilmeli ve deformasyonların durumları ve toleransların içinde olup olmadığı saptanarak gerekirse değişimleri yapılmalıdır.

3.2 Demiryolu Üstyapı Elemanlarında Yorulma

3.2.1 Raylarda yorulma etkileri

Demiryolları ray teker kontağının dönüş kolaylığı sağlaması nedeniyle daha az enerji ile daha fazla yük taşımaya elverişli olduğu için yük ve yolcu taşıma konusunda çekim gücü olan ulaşım yollarıdır. Ancak bu teker ray kontakları çok küçük yüzeylerle olduğundan hem raylar hem de teker kontak noktalarında tekrarlı etkiler altında ciddi aşınmalara neden olmaktadır. Çöl, Koç, Yamanoglu 2013 yılındaki çalışmalarında ray temas noktalarının ray profilinin diğer kısımlarına göre sert olması gerektiğini “Ray üzerinde en çok yükü taşıyan kısımlar rayın sağ ve sol köşe bölgeleridir. Dolayısıyla bu kısımlar daha fazla sürtünmeye maruz kalan bölgeler olduğu için orta bölgeye göre daha fazla yüzey sertliğine sahiptirler” şeklinde açıklamışlardır. Bu noktada teker ray etkileşimi analizinin çok iyi yapılması gerekmektedir. Ray profili ve ray çeliği sınıfı ile teker profilinin uyumu analiz edilmeli ve bu etkileşimin yorulmaya olan etkisi doğru tespit edilmelidir. Yorulma nedenli hasarlar ray mantarı ve tüm ray yapısında olabilir. Raylara ait bazı yorulma nedenli hasar durumları bu bölümde anlatılmıştır.

3.2.1.1 Temas yüzeyi çatlakları

Bu çatlak tipleri özellikle dar kurplarda işletme hızının da yüksek olduğu yerlerde ray başlığına gelen yanal kesme kuvveti ile oluşur. Normal koşullarda kurplarda oluşan teker ray sürtünmesi düşük hızlarda zarar verici bir kuvvet oluşturmaz ancak bu yüksek hızlarda olduğunda titreşimler daha sık olduğundan hasar oluşturabilir.

doğru ilerleyip ray kırılmasına neden olmaması için ultrasonik testlerle tespit edilip rayların değiştirilmesi gerekmektedir.

3.2.1.2 Ondülasyon

Raylar üzerinde dalgalı bir şekilde art arda oluşan tepe oluklar bütünüdür (Şekil 3.4). Ray eğilmesi ile karıştırılmamalıdır. Raylar daha uzun açıklıklarda eğilirken ondülasyonda dalga boyları 2cm ila 200cm arasında olabilir. Ondülasyonun birçok nedeni olmasına karşın asıl nedeni araç tasarımının araç hat etkileşimine karşı optimum dizayn edilmemesi ve teker ray uyumunun doğru şekilde analiz edilememesi nedeni ile olur.



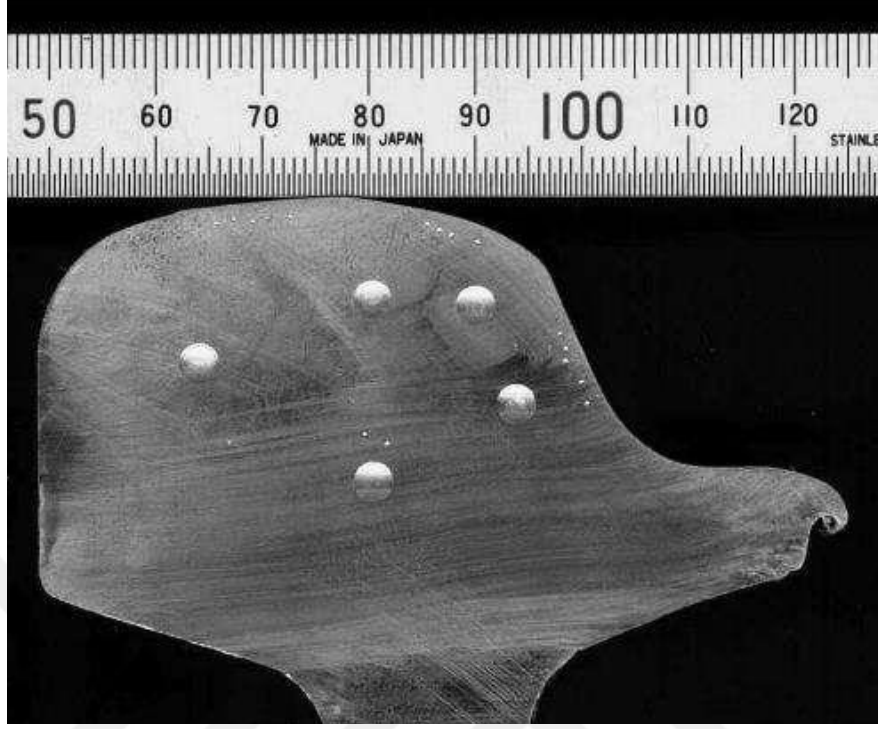
Şekil 3.4 : Ondülasyon örneği.

Ondülasyon hem demiryolu güvenliği açısından tehlike oluşturur, hem de seyahat ve çevre konforunu olumsuz etkiler. Ondülasyon oluşan bölgelerde gürültü ve titreşimler artacağı çevreyi rahatsız edebilir ve çevredeki yapılara zarar verebilir. Buna ek olarak ray-teker arasındaki direnimsizlikten dolayı cer gücünün artmasına da neden olmaktadır.

3.2.1.3 Yanal Aşınma

Doğrusal veya kurp yarıçapının büyük olduğu (600 m ve üzeri) ve araç bakımının kalibrasyonunun iyi yapıldığı hatlarda ray mantarında oluşan yanal aşınma etkisi minimize edilir. Yanal aşınma ray profilinde ciddi bozulmalar yaratacağından erken

dönemde ise taşlama belirlenen limitleri (6-8mm) aştıysa ray değişimine neden olur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Kritik seviyede bir yanal aşınma örneği.

Yanal aşınmanın yok edilmesi için bir yöntem olan yanal taşlama beraberinde ekartmanın istenilen güvenli limitlerin üstüne çıkmasına neden olmaktadır. Bunun dışında ikinci bir yöntem olarak rayların iç kısmı aşındığından doğrusal hatlarda karşılıklı rayların değişimi sağlanarak ray kullanım ömrü uzatılabilir. Bu yöntem rayın kullanım ömrünü uzatsa da aşınma sorunu için bir çözüm değildir (Lesley, 2009).

Yanal aşınma ile mücadele edebilmek için kritik bölgelerde (dar kurplarda) yağlama yöntemine başvurulur. Yağlama hat üstüne yerleştirilmiş olacağı gibi araç üstünde de olabilir. Bu yöntem yanal aşınma açısından olumlu olsa da hızlanma ve frenleme sırasında araçta kızaklamaya neden olup ray üzerinde yanığa bağlı aşınmalar oluşturacaktır (Lesley, 2009). Şekil 3.6'da görüldüğü gibi bu yanıklar frenleme sırasında kızaklama denen olay sonucu ray üzerinde giden teker dönüş hareketi yapsa da bazen kayma hareketi yaparak sürtünme kuvveti oluşturur ve bu sürtünme etkisi ile raylarda yanık nedenli hasarlar oluşur.



Şekil 3.6 : Kritik seviyede bir ray yüzeyi yanığı.

Bir diğer önleyici yöntem ise dar kurplarda aşınmanın boden hareketinin dışarı doğru olması nedeniyle dış rayların teker-ray temas yüzeyine giydirme uygulanabilir. Aynı şekilde dış ray mantarının sertliğini arttırmak da yorulma nedeni ile oluşacak hasarları azaltır.

3.2.1.4 Kabuklanma

Ray-teker kontak yüzeyinin iç kısmında oluşan 2-10 mm arasında olan hasarlardır. Genellikle kurplarda dış (yüksek) raylarda görünürler. Kabuklanmadan önce ray teker kontak noktasında siyah noktalar oluşmaya başlar. Temas yüzeyi çatlakları gibi art arda ve birbirine paralel olmazlar (NSW Transport, 2019). Aşağıda tehlikeli olma durumuna göre sırası ile kabuklanma örnekleri verilmiştir (Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).



Şekil 3.7 : Başlangıç aşamasında olan bir kabuklanma örneği (siyah lekeli).



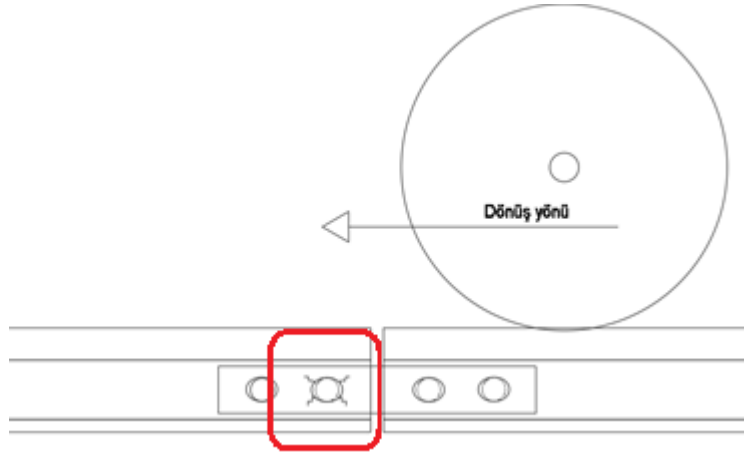
Şekil 3.8 : Orta seviyede kabuklanma örneği.



Şekil 3.9 : İleri seviyede kabuklanma örneği.

3.2.1.5 Cebirelerde oluşan hasarlar

Dünya üzerinde yeni demiryollarında ray bağlantıları kaynak yöntemiyle yapılsa da hala cebirelerle bağlı olan hatlar oldukça fazladır. İki ardışık rayın birbirine bağlandığı bu noktalarda rayların contalarla temasından oluşan kesme kuvveti yıldız şeklinde ray deliklerinin kenarlarında çatlaklar oluşturur (Şekil 3.10). Bu boşlukların oluşmasındaki temel neden cebire uygulaması yapılan noktanın altında bir mesnet (bağlantı elemanı) olmamasıdır. Teker sağ taraftaki rayda deplasman yaratırken sol taraftaki cıvatalar raya baskı yaparak rayın delindiği bölgenin etrafında çatlaklar oluştururlar. Bu çatlaklar cebirenin altında kalabileceğinden ray gövdesinde de ultrasonik test yapılmalıdır.



Şekil 3.10 : Ray deliklerinin kenarında oluşan çatlaklar.

Bu tip çatlakların oluşumunu engellemek için cıvatalar çok iyi sıkılmalı ve belirli aralıklarla yağlanmalıdır.

3.2.1.6 Ray kaynağı hasarları

Ray kaynaklarının yapısı birleştirdikleri raylardan oldukça farklıdır. Kaynaklar yapıldıktan sonra ultrasonik testler yapılsa da raylar tekrarlı yükler altında sürekli eğilir ve ray kaynak bölgesinin altında yukarıya doğru açılma eğiliminde olurlar. Bu sürekli çatlaklar ray üst seviyesine ulaştığında tamamen kırılma gerçekleşir (Lesley, 2009).

Bu tip hataların nedeni ray gerilimi alma işlemi göz önünde bulundurulmadan ray sabitleme işlemlerinden veya ray kaynağının doğru bir uygulama metodu ile uygulanmamasından kaynaklanabilir.

3.2.2 Raylarda oluşan yorulma deformasyonlarının tespiti için yöntemler

3.2.2.1 Gözle kontrol yöntemi

Gözle kontrol yöntemi en ilkel ve basit yöntem olsa en az iki haftalık sıklıkla yapılan devriye gezilerinde birçok ray deformasyonu başlangıç seviyelerindeyken tespit edilip ileri düzeyde testler yapılabilir.

Gözle kontrol yöntemleri ancak yüzeyde olan aşınma ve çatlakları tespit için kullanılacağı için ray altında ve rayın iç kısmında oluşan (kabuklanma gibi) çatlakları tespit etmek için yeterli olmayacaktır. Sadece bazı deformasyonlar ray yüzeyi üzerinde beliren ipuçları verebilirler ancak bunların da tespiti için gelişmiş test yöntemleri gereklidir.

Rayda yanal ve düşey aşınmaları ölçmek için ray profil kılavuzu kullanılabilir (Şekil 3.11). Profil kılavuzları ayarlanabilir olduğundan farklı ray profilleri için uygundur. Bazı durumlarda hatlarda farklı profiller uygulanabilmektedir.



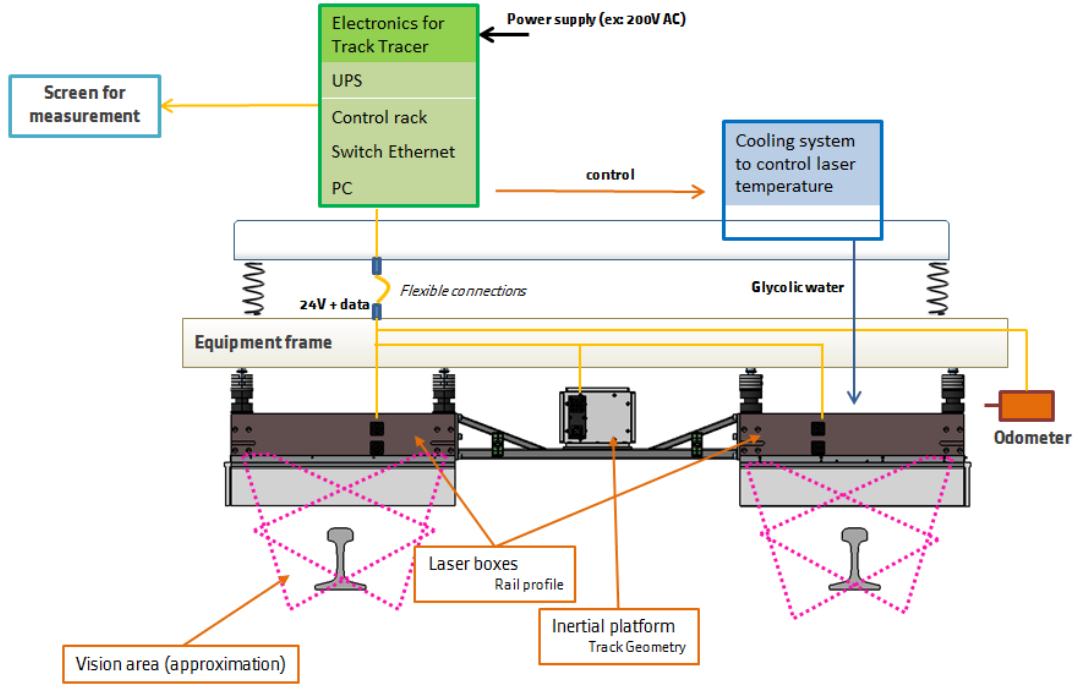
Şekil 3.11 : Ray profil kılavuzu (Geismar marka).

3.2.2.2 Hat geometrik ölçüm cihazları ile ray profili ölçümü

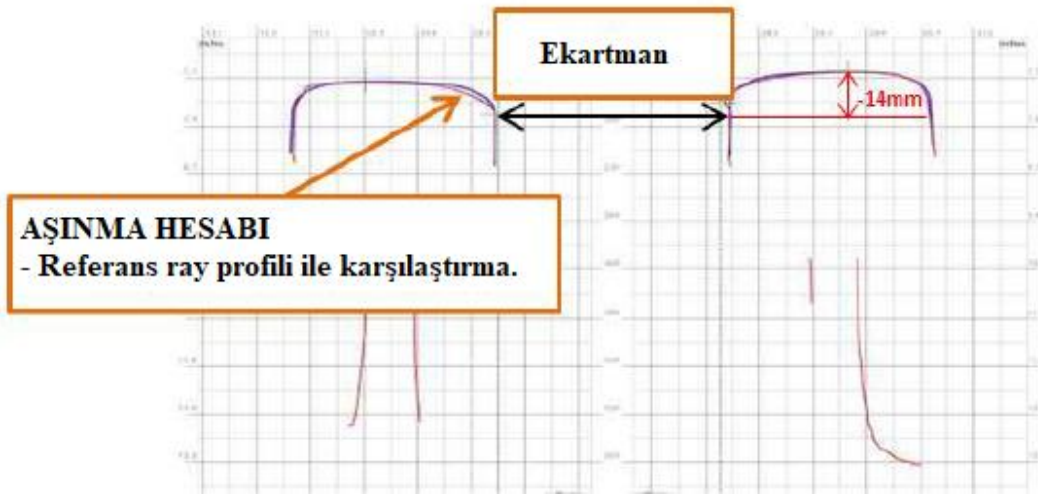
Ray profili ölçümü bir önceki bölümde anlatıldığı gibi el ile yapılabileceği gibi dijital olarak hat geometri ölçüm cihazı ile de yapılabilir. Bu yöntem oldukça hızlı ve 0.5-1 mm hata payı ile ölçüm yaptığından oldukça güvenilirdir. Doğru ölçüm için cihaz bakımı ve temizliğinin uygun aralıklarla yapılması ve her testten önce kalibrasyonun yapıldığından emin olunması gerekir.

Hat geometri ölçüm cihazları hattın geometrik uygunluğu (dever, eğim, ekartman gibi) kontrol ederken ray mantarının yanal ve düşey aşınmalarını da tespit etmek için kullanılır. Bunun için ray yüzeyine lazer ışınları göndermek suretiyle çalışan lazer kutuları rayın profilini çıkarır ve bilgi ekranına göndererek referans ray profili ile kıyaslar (Şekil 3.12 ve Şekil 3.13).

Bu cihazlar genellikle bakım vagonlarının üstünde yüklüdür ve hat üzerinde bakım için sürüş yapılırken tüm hattın geometrik özelliklerini kaydederler.



Şekil 3.12 : Hat geometri ölçüm cihazı çalışma şeması.



Şekil 3.13 : Ölçüm ekranı üzerinde profil karşılaştırılması.

3.2.2.3 Ultrasonik Testler

Rayların içinde oluşan çatlaklar gözle kontrol ve profil ölçme yöntemleri ile tespit edilemezler. Bu durumlarda ultrasonik ray testleri yapılmalıdır. Ultrasonik testler yorulma kaynaklı iç çatlaklar, malzeme yapısındaki değişim gibi deformasyonları gösterirler. Ultrasonik testler raydaki kaynakları tespit etmek için yüksek frekanslı ses dalgalarını kullanırlar. Bir frekans yayıcı enerjiiyi ray yüzeyine uygular ve bu da ultrasonik dalgaların ray boyunca yayılmasını sağlar. Bu dalgalar herhangi bir

süreksizlik veya çatlak durumunda yansıtılır. Yansıyan bu dalgaların frekansına göre de ray deformasyonunun nerede olduğu tespit edilebilir (RAIB, 2014). Ultrasonik test üniteleri el ile kullanılabilen sistemler (Şekil 3.14) veya araç üzerinde yüklü sistemler (Şekil 3.15) olabilirler.

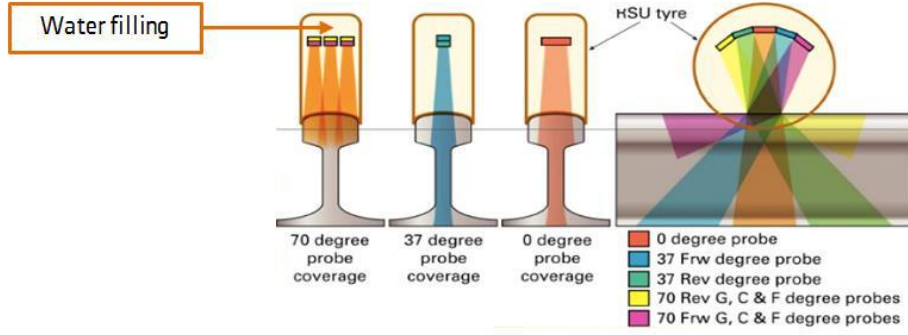


Şekil 3.14 : El ile kullanılan ultrasonik test ünitesi (RAIB, 2014)



Şekil 3.15 : Araç üzerine yüklenen ultrasonik test ünitesi (RAIB, 2014)

Hat uzunluklarının fazla olduğu işletmelerde araç üstü üniteler tercih edilir ancak testin doğruluğunun sağlanabilmesi için belli hız limitleri konulmuştur. Şekil 3.16’da ultrasonik testlerle ölçülebilecek ray kesiti verilmiştir. Görüldüğü üzere ray taban kenarları ölçülemediğinden bu bölgelerde özellikle hassas bir gözle kontrol yapılmalıdır.



Şekil 3.16 : Ultrasonik test dalgalarının ray üzerindeki yayılımı.

3.2.2.4 Boyayla çatlak kontrolü

Ultrasonik testlerin yapılamadığı bölgelerde (örneğin mangan makas blokları) bu testler uygulanmaktadır. En basit anlatım şekli ile boyanın renk değiştirmesi ile çatlak tespiti yapılır. Bu test yöntemi çok basit ve lokal olarak kısa sürede yapılabilir. Boyalar uygulandıktan sonra eğer rayda çatlak varsa kırmızı net bir çizgi oluşur (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Boyayla çatlak kontrolü örneği.

Ray yüzeyinde olan aşınmalardan dolayı yapılan yüzey kaynakları sonrası kaynağın doğru bir şekilde uygulanıp uygulanmadığı da boyayla çatlak kontrolü yöntemi ile yapılabilir.

3.2.3 Raylarda yorulma testleri

Raylar belirli uluslararası standartlara göre üretilir ve bu standartlarda rayların yorulma testlerinin nasıl ve hangi koşullarda yapılması gerektiği anlatılır. EN 13674-1'de ray için yorulma test yöntemi ve koşulları verilmiştir.

3 noktalı eğilme testi ile rayın çatlak genişliğinin büyüme oranı hesaplanır. Testin genel özellikleri BS (British Standards) 6835-1'e göre yapılmalıdır. EN 13674-1'e göre test koşulları aşağıdaki durumlara bağlıdır.

- Ortam sıcaklığı,
- Minimum tekrarlı yük /maksimum tekrarlı yük oranı,
- 3 noktalı test açıklığı,
- Ray mantarı düşey uzunluğu,
- Ortam koşulları,
- Yük tekrar frekansı.

Rayların yorulma testleri için ayrıca EN 13674-1'de yorulma test koşulları ve kabul koşullarıyla birlikte verilmiştir.

3.2.4 Ray bağlantı elemanlarında yorulma etkisi

Ray bağlantı elemanları da rayda olduğu gibi her araç geçişinde eksenel ve enine gerilmelere maruz kalırlar. Özellikle dar kurplarda ve geçiş eğimi yüksek olan makaslarda torklu cıvatalar oldukça zorlanır. Bu bölgelerde özel bir kontrol ve daha dayanıklı çelik sınıfı kullanılabilir. Ray sürekli bir kiriş yapısında olduğundan her yük geçişinde rayın bazı bölümleri ray üst seviyesinin üstüne doğru deplase olmaya çalışırken bu hareket ray kısıkaçları ile önlenecektir. Bu durumda kısıkaçlar belirli bir yorulma kapasitesine göre tasarlanmalı ve sabit aralıklarla kontrolleri yapılmalıdır.

Ray kısıkaçlarının ve cıvatalarının belirli bir noktada kırılması doğal bir sonuçtur ancak uygulama önce yorulmaları test ile kanıtlanmalı ve yorulma ömrü belirlenmelidir. Bununla ilgili bir fabrika kabul testinin görseli Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 : Ray bağlantı ankraj civatasının fabrika yorulma testi düzeneği.

Şüphesiz ki raya uygulanan her düşey dingil yükü ray yastığında gerilme olması ve deplasmanına neden olacaktır.



Şekil 3.19 : Tekrarlı yükler altında deforme olmuş bir ray yastığı (RAIB, 2014).

Şekil 3.19’da görülen bir ray yastığı yapısal açıdan tehlikeler doğuracağı gibi raydan dönen akımların izolasyonun kaybolması nedeni ile toprağa karışıp tehlike oluşturmaya veya sinyal sisteminin doğru çalışmamasına neden olabilir.

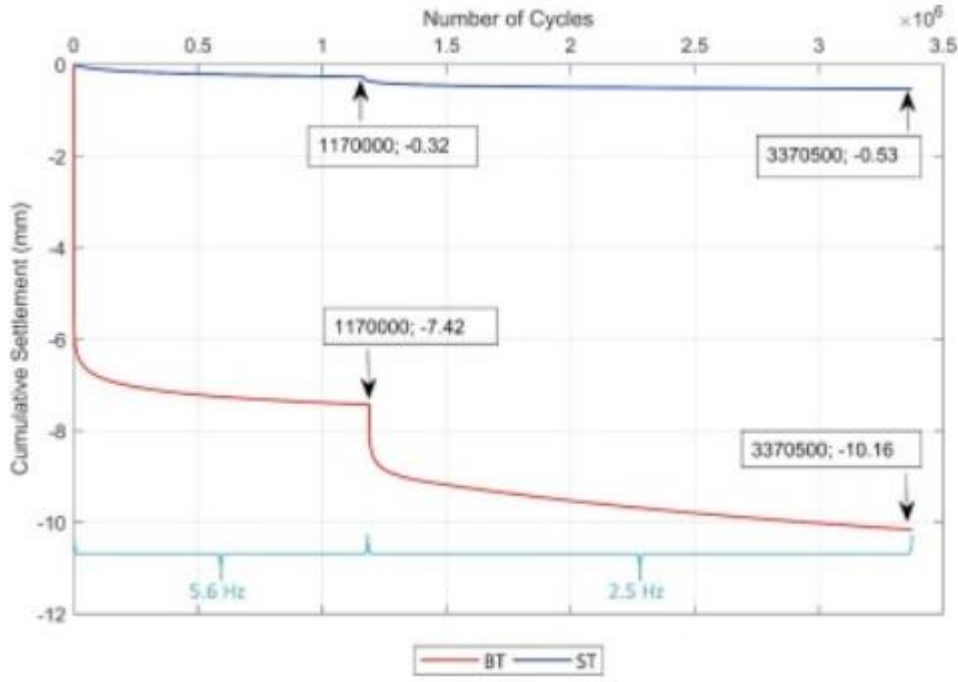
3.2.5 Beton plakta yapıda oluşan yorulma deformasyonları

Balastsız demiryollarında balastın yerine beton, betonarme veya ön gerilmeli beton plaklar almıştır. Beton plaklar uzun yıllar yapısal olarak bozulmadan düzgün bir hat geometrisi için ray ve bağlantı elemanlarını destekler. Demiryollarında beton plaklar günümüzde 100 yıl gibi çok uzun bir süre için tasarlanır. Ancak beton plakların

tahmin edilenden fazla ve derin çatlaklara sahip olması, fonksiyonunu tam anlamı ile gerçekleştirmesine engel olacak ve birçok tehlikeyi de beraberinde getirecektir.

Beton basınç etkisi altında oldukça dayanıklı iken çekme veya kesme kuvvetine karşı oldukça zayıftır. Bu nedenle betona gelecek çekme kuvveti sınırlandırılmalıdır. Nihai limit durumuna göre tasarım yapılırken bu göz önünde bulundurulurken yorulmaya göre yapılan analizde de bu durum dikkate alınmalıdır. Yorulma ve bunun sonucu oluşacak deformasyonlar betonun yapısal özelliklerinin değişmesine, donatı veya ön germe tendonlarının zarar görmesine neden olacaktır. Bazı durumlarda plak donatısı kaçak akım toplayıcı olacağından yapısal zararların dışında akım kaçağının bölgedeki altyapıya zarar vermesi de söz konusu olabilir.

Demiryolu üst yapısı elemanlarının yorulma açısından önemli bir kıyas noktası ise balastlı ve balastsız hatlardır. Yapılan bir deney göstermektedir ki aynı yükler altında balastlı hatta oluşan oturma balastsız hatta oluşan oturma 20 katı çıkmıştır ve aynı testte aslında balastsız hat testleri daha önce yapıldığından balastlı hattın yapıldığı test zemin oldukça sıkışmış durumdadır (Cebasek ve diğerleri, 2018). Bu denli bir oturma farkı ray ve bağlantı elemanlarına gelecek gerilmeleri arttırarak yorulma dayanımlarını olumsuz yönde etkileyecektir. Aşağıda Şekil 3.20’de verilen çalışma sonuçları belirli bir yük tekrarından sonra balastlı ve balastsız hattaki oturma farklılıklarını göstermektedir. Test sonuçlarından da çıkarılacağı üzere beton plakların üst yapı elemanlarının yorulma kapasitesi açısından balastlı hatlara üstünlüğü vardır. Balastlı hatlarda oturmalarından dolayı oluşacak deformasyonları balast eleme yöntemi ile düzeltmenin de ayrıca titreşim ve gerilme oluşturacağından yorulmaya olumsuz etkileri olabilir.

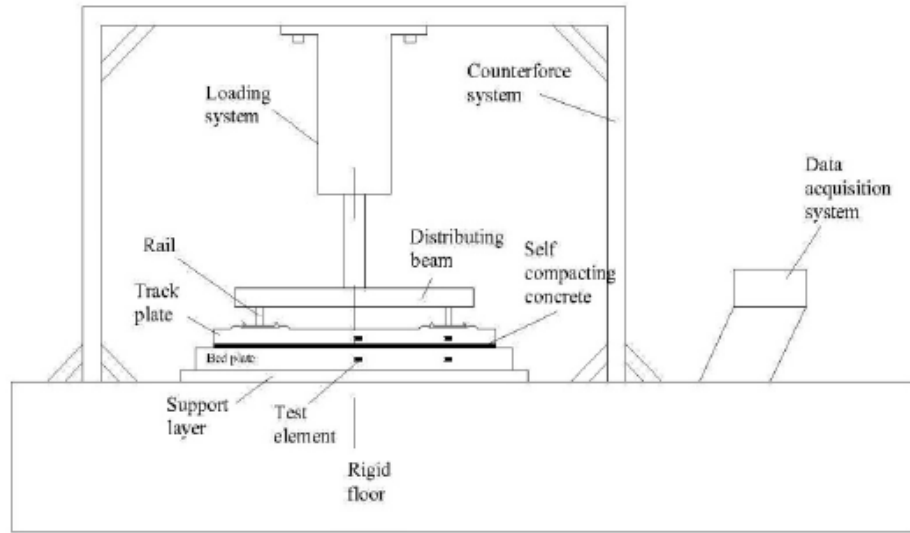


Şekil 3.20 : Geniş (üstteki) ve standart (alttaki) selet plan krokisi (Marot Cebasek ve diğerleri 2018).

Balastsız hat plaklarının yorulma davranışını incelemek adına literatüre geçen çalışmalar alt bölümde anlatılmıştır.

3.2.5.1 CRTS-III tipi hat plaklarının yorulma davranışının incelenmesi

Yu ve diğerleri 2018 yılında yaptıkları çalışmada CRTS (Çin Demiryolları Hat Plâğı) III tipi plâğın yorulma davranışlarını incelemeyi amaçlamışlardır. Öncelikle tasarımlarını Ansys yazılımı üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamalar yaparak yorulma davranışlarını bulmuşlar daha sonra da bu analizleri gerçek boyutlardaki Şekil 3.21’de görülen test düzeneği ile laboratuvar ortamında gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 3.21 : Beton plak yorulma analizi test düzeneği. (Yu ve diğerleri 2018)

Yapılan çalışmada sonlu elemanlar yöntemine göre yük koşulları simülasyon yapılarak hesaplanan yorulma hasarları doğrulanarak aşağıdaki sonuçlara varılmış ve bu tip hat plaklarının yorulma davranışları incelenmiştir.

Test için hazırlanan hat yapısı ray, selet, 200 mm kalınlığında C60 sınıfı beton hat plağı, 90mm kalınlığında kendiliğinden sıkışabilen C40 sınıfı beton tabaka ve 200 mm kalınlığında C30 sınıfı beton temelden oluşmuştur. Temel tabakası ve kendiliğinden yerleşen beton tabakası arasında izolasyon için 4 mm kalınlığında geotekstil yerleştirilmiştir. Test yorulma ve statik yükleme için ayrı ayrı yapılmıştır. Yorulma için belir yük tekrar sayılarında gerilme değerleri üç tabaka içinde farklı noktalarda ölçülmüştür. Bu noktalara gerinim ölçer yerleştirilerek aşağıdaki yük tekrar sayılarına göre oluşan çekme ve basınç gerilmeleri saptanmıştır. Gerilme değerlerinin okunduğu yük tekrar sayıları aşağıda belirtildiği gibidir.

- İlk yükleme (1 tekrar sayısı),
- 0.1 milyon yükleme,
- 0.5 milyon yükleme,
- 1.5 milyon yükleme,
- 3 milyon yükleme ve
- 4 milyon yükleme.

Yukarıdaki yüklemelerin tamamında ilk tabaka basınç durumunda iken kendiliğinden yerleşen beton tabaka ve temel tabakası çekme durumundadır. Yükleme sayısı arttıkça beklendiği üzere temel tabakası ve ara tabakada çekme gerilmeleri artmıştır. Gerilme artışlarına bakıldığında yükleme sayısı 0.1 milyondan 4 milyona çıkarıldığında yani 40 katına çıkarıldığında, maksimum çekme gerilmesindeki artış ise 4 katı olmuştur.

Yukarıdaki gerilme-yükleme sayısı arasındaki logaritmik artış EN 16432-2'deki maksimum izin verilebilen gerilme hesabında yükleme sayısının logaritmik olarak gerilmeye etkisi de göz önünde bulundurulduğunda doğrulanmaktadır.

Bu çalışmadan ve EN 16432'deki referanslardan tezin son dördüncü bölümünde yapılan plak analizinin gerçeğe yakınlığı da doğrulanmış olmaktadır.

4. TRAMVAY HAT PLAKLARININ YORULMA AÇISINDAN İNCELENMESİ

Tramvay hatlarında yorulma önemli etkilerden bir tanesidir. Araç trafiği fazla yani araçlar çok sık aralıklarla geçtiğinden beton plakta yükleme tekrar sayısı fazla olacaktır. Oluşan tekrarlı yüklemeler beton plağın yorulma dayanımı açısından kritik olacaktır ve beton plağın tasarım ömrünün belirlenmesi veya istenilen tasarım ömrünü sağlayıp sağlamadığının kontrolü için yorulma analizi önem kazanmaktadır. Çalışmanın bu aşamasında hat plağı kalınlığı, genişliği ve beton sınıfı değiştirilmeden hattın tasarımına etki eden bazı parametreler değiştirilerek analizler yapılmaktadır. Yorulma analizleri sonlu elemanlar yöntemine göre yapısal analiz programında katı kübik elemanlar olarak tasarlanan hat üzerinde, tekrarlı yüklerin etkisi göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu analiz sırasında aşağıda sıralanan parametrelerin yorulma yükleme koşulunda hat plağında oluşan çekme gerilmesine etkileri incelenmiştir. Etkisi araştırılan tasarım parametreleri şunlardır:

- Ray tipi (vinyol ve oluklu tip)
- Selet aralığı
- Selet boyutları
- Ray altı yastığı rijitliği
- Dingiller arası mesafe (çift dingilli boji için)

Standart bir tasarım modeli oluşturularak bu model yukarıda belirtilen tasarım parametreleri teker teker değiştirilerek analizler yapılmıştır. Bir standart durum ve beş adet kıyaslama durumu olmak üzere altı farklı durum için yapısal analiz yapılmıştır. Her birim durum için enine ve boyuna oluşan gerilme grafikleri, ray ve zemin deplasmanı grafikleri olmak üzere toplamda dört grafik elde edilmiş ve çalışmada gösterilmiştir. Farklı durumlarda oluşan maksimum gerilme ve deplasman değerleri üzerinden bu parametrelerin etkileri incelenmiştir ve yorumlanmıştır.

4.1 Analizde Kullanılacak Olan Yapısal Elemanlar

4.1.1 Raylar

Yapısal analiz sırasında standart model karşılaştırmaları yapılırken tek tip vinyol 50E4 profile ve R260 çelik sınıfına (EN 13674-1’de verildiği şekilde) sahip ray kullanılmıştır. Yorulmaya ray tipinin etkisi araştırıldığında yükseklik açısından benzerliğe sahip ve aynı çelik sınıfında 55G2 profile ve R260 çelik sınıfına (EN 14811’de verildiği şekilde) sahip oluklu ray kullanılmıştır.

Rayların malzeme özellikleri:

- Elastisite modülü (E_s): 210000 MPa
- Termal uzama katsayısı (α_t): 10×10^{-6} 1/K
- Poisson oranı (μ): 0.30

4.1.2 Hat plağı

Plak malzemesi beton olarak tanımlanmıştır ve beton sınıfı C30/37 olarak seçilmiştir. Genişliği 2500 milimetre ve kalınlığı 300 milimetre olan betonun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibi hesaba katılmıştır.

- Elastisite modülü (E_{cm}): 34000 MPa
- Poisson oranı (μ): 0.15
- Eğilmede çekme tasarım dayanımı (β_{fs}): 5.5 N/mm^2

4.1.3 Zemin

Zemin sıkıştırılmış ve elastisite modülü 50 MPa olarak alınıp katı kübik elamanlar şeklinde modellenmiştir. Kullanılan program üzerinde zemin analizi ve parametreleri kullanılmadığından zeminin belli bir yükleme etkisi altında bir deplasmana uğraması için elastisite modülü tanımlanmıştır. Demiryolu altyapısı tasarlanırken zemin üzerine yapılacak balastsız hatlarda zemin için aranan belirli bir oturma ve sıkışma limiti konulması gerekir. Bu nedenle zeminin beklenen deplasmanları sağlayabilmesi için elastisite modülü bu değer seçilmiştir.

4.2 Analiz Yöntemi

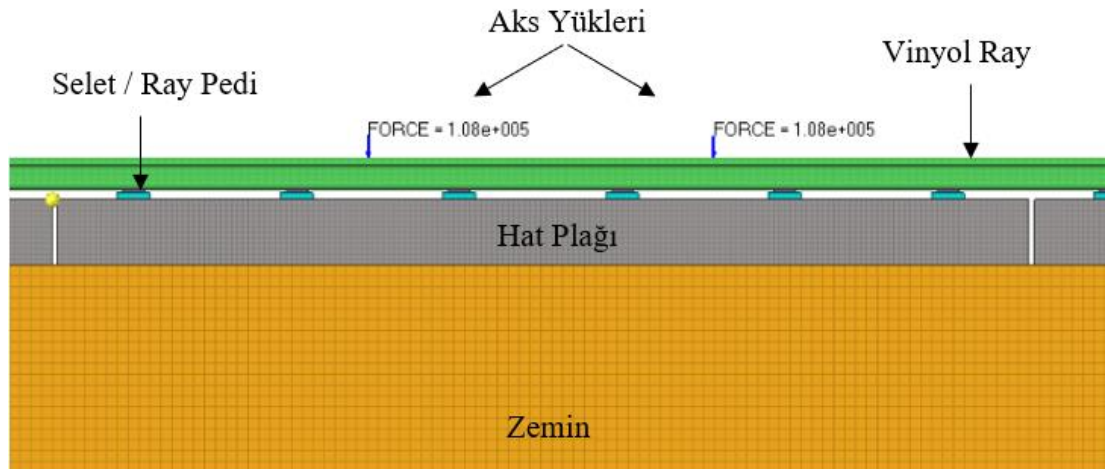
4.2.1 Bilimsel yöntem

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan yapısal analiz için tüm durumların katı modeli oluşturulmuş, elemanlara özellikler atanmış ve elemanlar arası bağlantı tanımlanmıştır. Model oluşturulurken ray, ray yastığı, selet, beton plaklar ve zemin sonlu eleman olarak tanımlanmış ve lineer statik analiz yapılmıştır. Yükleme sonucunda oluşan gerilme grafiklerinden farklı durumlar için maksimum yorulma gerilmeleri bulunarak yorulma dayanımları, yapılacak maksimum yükleme sayısı olarak bulunmuştur.

4.2.2 Model

Modelde bütün parçalar kübik eleman olarak tanımlanmış ve sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapılmıştır. Eleman boyutları elemanın yapısına uygun olarak değişiklik göstermektedir. Bunun gerilme dağılımına etkisi olacaktır ancak farklı boyutlarda analiz yapıldığında da gerilmeler yakın çıkmaktadır. Bir tramvay hattının bütün olarak analizini yapmak mümkün olmayacağından hattın art arda gelen üç hat plağı üzerinde analiz yapılmıştır. Hat plakları arasında bir bağlantı tanımlanmadığı için doğrudan yük aktarımı olmamaktadır. Daha sonra hesaplanan tekrarlı yükler teker yüküne çevrilip iki dingilli boji tipine göre ray üstünde noktasal olarak uygulanmıştır (Şekil 4.1). Tekrarlı yük durumu simetrik olduğundan yarım model üzerinde analiz yapılmıştır.

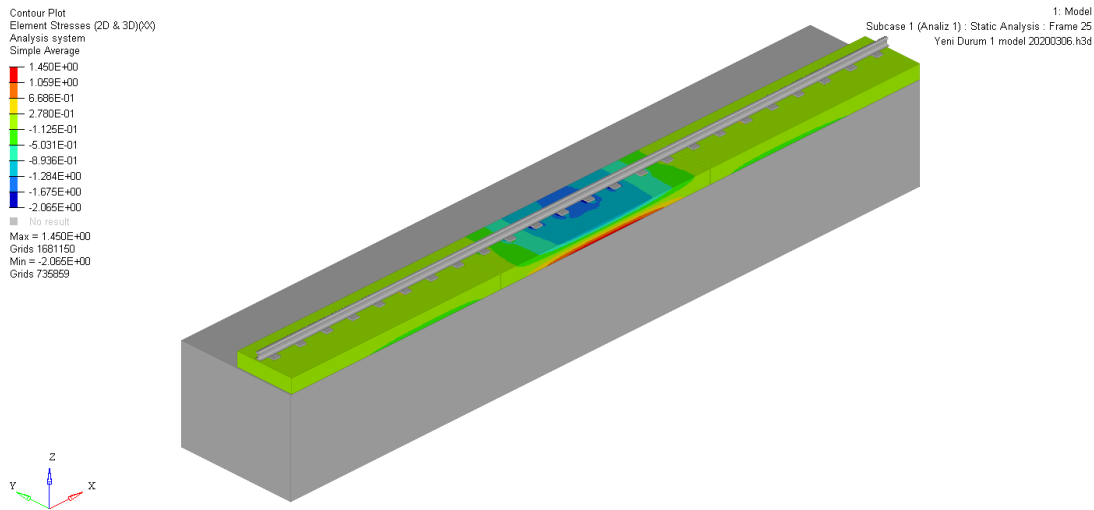
Bu modelde ekartman 1435 mm olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.1 : Boyuna hat kesiti.

4.2.3 Analizde kullanılan bilgisayar programı

Modelleme AutoCAD® üzerinde oluşturulan ray kesitlerinin de desteği ile Altair HyperMesh® adlı programda yapılmıştır. İlk olarak iki boyutlu kesitler çizilip sonlu eleman özellikleri tanımlanmış daha sonra da üçüncü boyuta genişletilmiş ve katı elemanlar elde edilmiştir. Daha sonra yine HyperMesh® üzerinde eleman özellikleri, malzeme özellikleri, bağlantı türleri ve yükler tanımlanmış, daha sonra Altair HyperWorks® üzerinde yapısal analiz yapılmıştır. Gerilme dağılımını gösteren bir analiz sonucu aşağıda verilmiştir (Şekil 4.2).



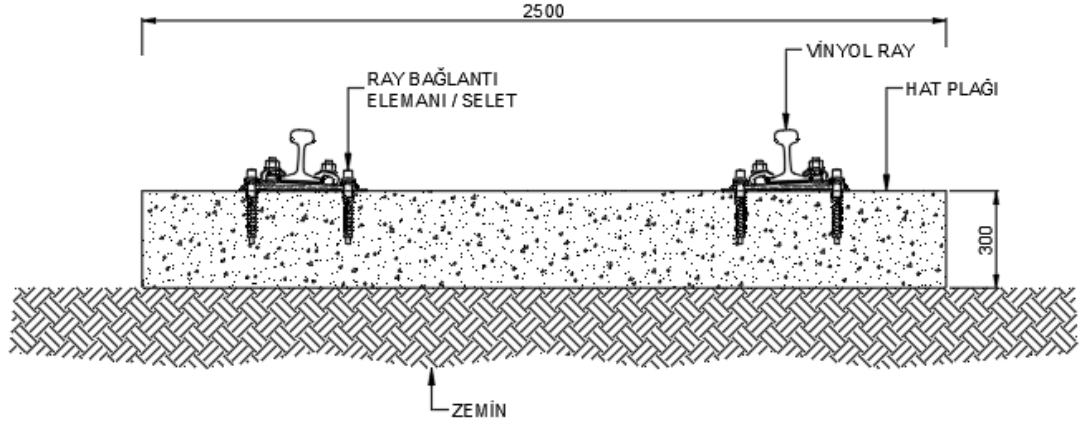
Şekil 4.2 : Grafik örneği.

4.2.4 Bağlantı özellikleri

Elemanların bağlantı durumları yapısal analiz programına tanımlanarak yük aktarım ve bağlantı koşulları göz önünde bulundurularak gerçeğe en yakın şekilde belirlenmiştir. Ray-selet ve selet-hat plağı bağlantısı ankastre olarak tanımlanmış, hat plağı-zemin bağlantısı sürtünme olarak tanımlanmıştır.

4.3 Standart Hat Tasarımı

Hat sıkıştırılmış dolgu zemin üzerine yerleşen 300 mm kalınlığında 2500 mm genişliğinde ve 4800 mm uzunluğunda döşemeler olarak tasarlanmıştır. Döşemeler arasında 50 milimetrelilik inşaat derzleri bırakılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan modelde art arda 3 döşeme modellenmiş ve tasarım bu şekilde analiz edilmiştir. Hattın en kesiti Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Hat en kesiti.

4.4 Analiz ve Hesaplamalar

4.4.1 Yükler

Demiryolu üzerinde çeşitli trafik yükleri etki etmektedir ancak yorulma yükleme koşulu tekrarlı yüklerin etkisinde olacağından beton plağa uygulanan yükler olarak dingil yükü EN 16432-2'deki A.3 formülüne (formül 4.1'de görüleceği üzere) göre dinamik etkiler göz önünde bulundurularak artırılmıştır. Aks yükü teker yüküne çevrilip ray üstünde uygulanan noktasal yükler olarak tanımlanmıştır. Teker yükü hesap yöntemi aşağıdaki formülde verilmiş ve analizde kullanılacak teker yükü hesaplanmıştır.

$$Q_a = k_q \times k_d \times \frac{A}{2} \quad (4.1)$$

Q_a : Teker yükü (N)

k_q : Statik teker yük arttırma sabiti (EN 16432-1 Bölüm 5.2.1.5'te 1.2 olarak verilmiştir.)

k_d : Dinamik kuvvetlendirme katsayısı (EN 16432-1 Bölüm 5.2.1.6'da 1.5 olarak verilmiştir.)

A : Dingil yükü (N)

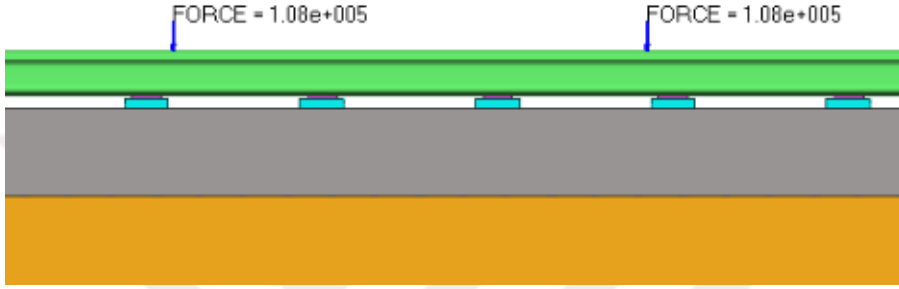
Dingil yükü 120.000 N olarak alınmıştır. Bu dingil yükü tramvay için uygulanabilir bir yükür. Bu yük tramvayın tam dolu yani metrekaareye altı insan düşecek durumdaki dingil ağırlığıdır.

Arttırılmış teker yükü;

$$Q_a = 1.2 \times 1.5 \times \frac{120\ 000}{2}$$

$$Q_a = 108\ 000\ \text{N}$$

olarak hesaplanmıştır. Bahsedilen 6 farklı durumda da bu teker yükü değeri kullanılacaktır. Teker yükü noktasal olarak uygulanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Teker yüklerinin uygulanması.

4.4.2 Plak yorulma dayanımı hesabı

Plakta izin verilen maksimum yorulma gerilmesi hesabı EN16432-2'nin B.2.3 ve B.3 bölümüne göre yapılmıştır. İlgili standarda göre yaz döneminde plak yüzeyinin ısınması eğilmede çekme gerilmesi oluşturmaktadır. Bu gerilmenin hesabı EN 16432'de B.65'teki formüle (Formül 5.2) göre hesap edilir.

$$\sigma_w = \frac{1}{1-\mu} \times \frac{h_1 \times \Delta t}{2} \times \alpha_t \times E_1 [\text{N/mm}^2] \quad (4.2)$$

h_1 : Beton plağın kalınlığı (mm).

Δt : Sıcaklık eğimi (K/mm) Plak kalınlığına bağlı olarak aşağıdaki çizelgeden seçilmiştir.

Çizelge 4.1 : Plak kalınlığına göre sıcaklık eğimi (Δt) değerleri

Kalınlık (mm)	<220	220-240	240-270	270-310	310-440	>440
Δt (K/mm)	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04

α_t : Betonun termal uzama katsayısı. (1/K)

E_1 : Betonun elastisite modülü (N/mm²)

μ_1 : Betonun poisson oranı

Standarda göre eğer beton plaklarda plak genişliği (B) kritik plak genişliğinin %90'undan küçükse sıcaklık değişiminden oluşacak eğilme durumunda çekme gerilmesi hesabı aşağıdaki gibi (Formül 4.3) yapılır.

$$\sigma'_w = \sigma_w \left[\frac{B-400}{0.9 \times B_{crit}} \right]^2 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.3)$$

B : Plak genişliği (mm)

B_{crit} :Kritik plak genişliği (Formül 4.4)

$$B_{crit} = 228 \times h_1 \times \sqrt{\alpha_t \times \Delta t \times E_1} \text{ [mm]} \quad (4.4)$$

α_t : Betonun termal uzama katsayısı. (1/K)

E_1 : Betonun elastisite modülü (N/mm²)

h_1 : Beton plağın kalınlığı (mm).

Δt : Sıcaklık eğimi (K/mm) Çizelge 4.1'den alınacaktır.

Eğer $B > B_{crit}$ ise σ_w %20 arttırılır.

Bu kontrol yapıldıktan sonra beton plağın eğilmede çekme mukavemeti aşağıdaki formülle (Formül 4.5) hesaplanmıştır.

$$\max \sigma_Q = \beta_{fs} \times \left[(\log n - 2) \times \left(\frac{0.0875 \times \sigma_w'}{\beta_{fs}} - 0.07 \right) + 0.8 \right] - \sigma_w' \quad (4.5)$$

β_{fs} : Betonun eğilmede çekme gerilmesi

n : Yük tekrar sayısı

25 milyon yükleme sayısı için hesap aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Sıcaklık değişiminden dolayı oluşacak çekme gerilmesi σ_w hesabı için girdiler;

- Plak kalınlığı, $h_1 = 300\text{mm}$,
- Termal eğim, $\Delta t = 0.06$,
- Betonun termal uzama katsayısı, $\alpha_t = 0.00001$,
- Betonun elastisite modülü, $E_1 = 33\,000\text{ MPa}$,
- Betonun Poisson oranı, $\mu_1 = 0.15$,

$$\sigma_w = \frac{1}{1-0.15} \times \frac{300 \times 0.06}{2} \times 0.00001 \times 33000$$

$$\sigma_w = 3.49 \text{ N / mm}^2$$

Genişlik ve kritik genişlik kontrolü aşağıda gösterilmiştir.

$$B_{crit} = 228 \times 300 \times \sqrt{0.00001 \times 0.06 \times 33000} = 9624.73 \text{ mm}$$

$$B = 2500 \text{ mm}$$

$$B = 2500 \text{ mm} < 0.9 \times B_{crit} = 8662.26 \text{ mm}$$

Yukarıdaki eşitsizlik sağlandığı için termal etkiden dolayı oluşan çekme gerilmesi aşağıdaki gibi hesaplanacaktır.

$$\sigma'_w = 3.49 \times \left[\frac{2500 - 400}{0.9 \times 9624.73} \right]^2 = 0.205 \text{ N/mm}^2$$

25 milyon yük tekrarı maksimum izin verilen yorulma çekme gerilmesi hesabı aşağıda yapılmıştır.

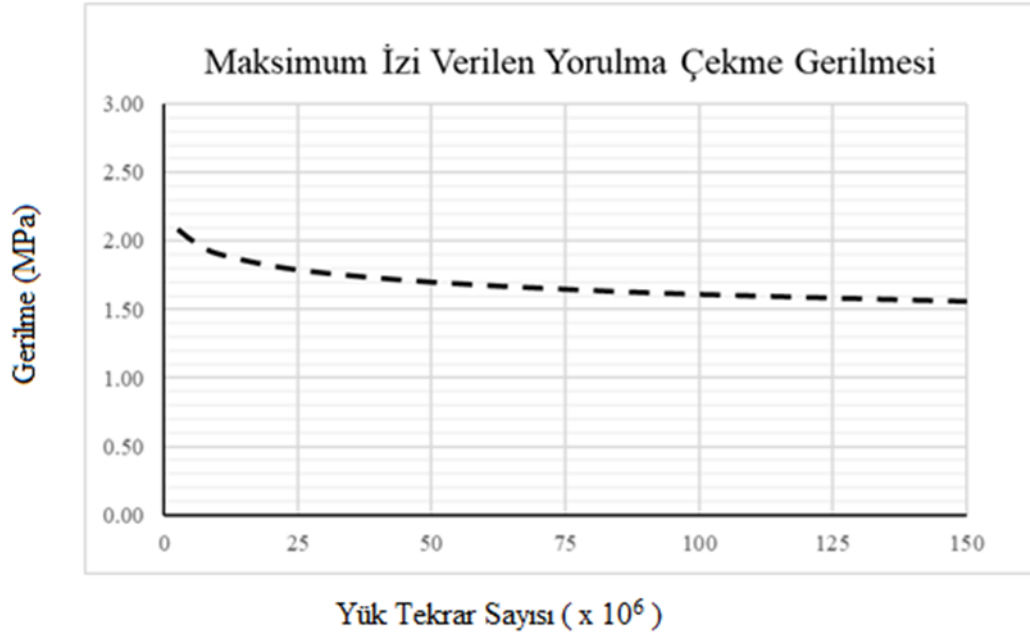
Bu hesaplama için girdiler;

- Yük tekrar sayısı, $n = 25\ 000\ 000$
- Betonun eğilmede çekme gerilmesi $\beta_{fs} = 4.5 \text{ N/mm}^2$

$$\max \sigma_Q = 4.5 \times \left[(\log 25\ 000\ 000 - 2) \times \left(\frac{0.0875 \times 0.205}{4.5} - 0.07 \right) + 0.8 \right] - 0.205$$

$$\max \sigma_Q = 1.909 \text{ N/mm}^2$$

Bu sonuçla tekrarlı yüklerin etkisi altında 300 mm kalınlığında 2500 mm genişliğinde ve C30/37 betonla imal edilen dizayn ömrü boyunca 25 milyon yük tekrarına maruz kalacak olan bir plakta oluşabilecek maksimum gerilme EN 16432'de verilen ampirik formüllere göre 1.909 N/mm^2 olabilmektedir. Yukarıda gösterilen analiz 25 milyon yük tekrarı için olsa da gerekli analizler farklı yük tekrar sayıları için yapılmış ve yorulma yük koşulu altında izin verilebilecek maksimum gerilme kapasitesi-yük tekrarı eğrisini veren grafik oluşturulmuştur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : Maksimum gerilme-yük tekrar sayısı eğrisi.

Tezin devam eden kısmında hattın plak geometrik ve yapısal özellikleri korunarak bazı hat üst yapısı özellikleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Bu analizler bir standart olmak üzere altı ana durumda incelenmiştir.

4.5 Farklı Hat Koşulları

4.5.1 Standart durum (Durum 1)

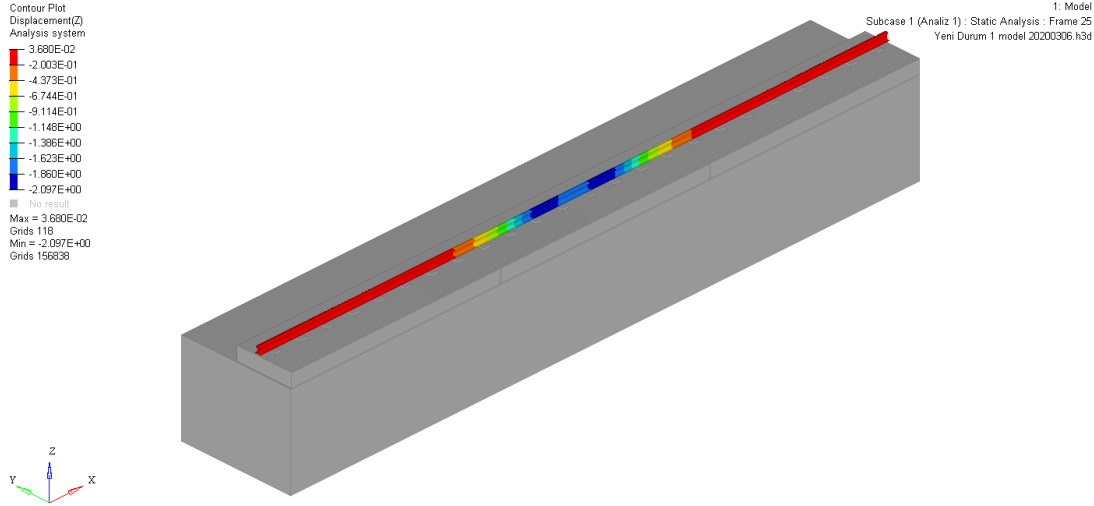
Standart durum referans olacak durumdur. Bu durum üzerinden parametreler teker teker değiştirilip kıyaslamalar bu durum üzerinde yapılacaktır. Standart tasarım parametreleri aşağıdaki gibi alınmıştır.

- Ray tipi : 50 E4
- Selet aralığı : 600 mm
- Ray altı yastığı rijitliği: 50 kN/mm
- Selet boyutları : 300 mm x 150 mm
- İki dingil arası mesafe : 1600 mm

Aşağıdaki grafikler legösterildiği gibi analiz sonuçları kaydedilmiştir.

4.5.1.1 Ray deplasmanı

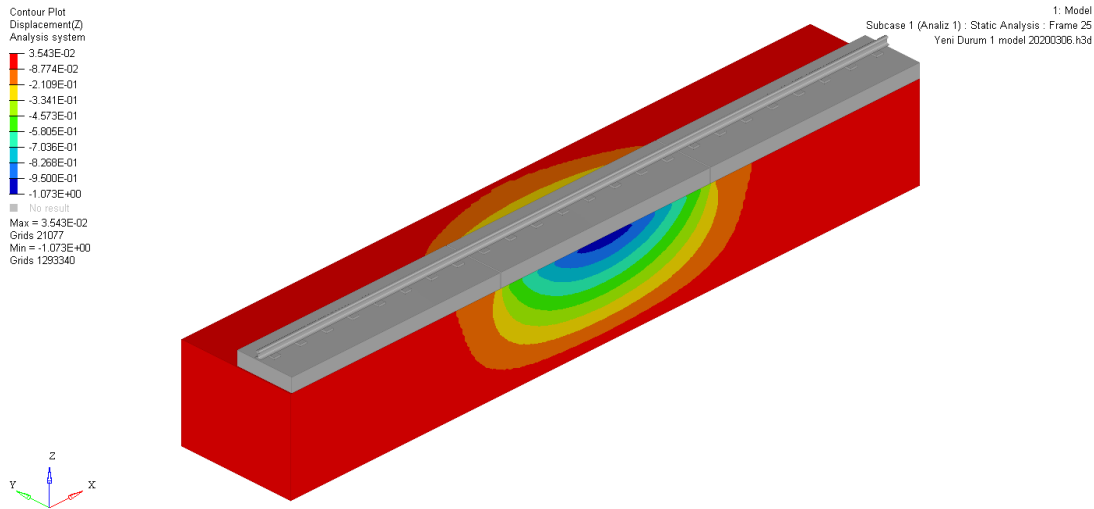
Standart durumda oluşan maksimum ray deplasmanı 2.09 mm'dir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Durum 1 ray deplasmanı grafiği.

4.5.1.2 Zemin deplasmanı

Standart durumda oluşan zemin deplasmanı 1.07mm'dir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : Durum 1 zemin deplasmanı grafiği.

4.5.2 Oluklu ray etkisi-Durum 2

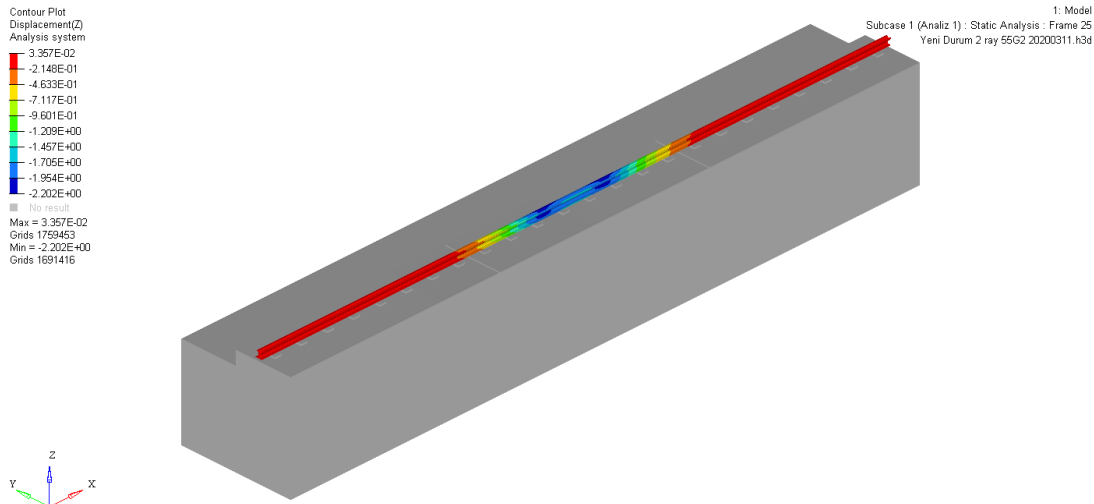
Bu durumda oluklu ray kullanmanın betonun yorulma ömrüne etkisini araştırmak için standart durumdan farklı olarak vinyol tipi ray yerine aynı yükseklikte ve yakın geometrik özelliklerde oluklu ray kullanılmıştır.

- Ray tipi : 55G2 (oluklu ray)
- Selet aralığı : 600 mm
- Ray altı yastığı rijitliği: 50 kN/mm
- Selet boyutları : 300 mm x 150 mm
- İki dingil arası mesafe : 1600 mm

Aşağıdaki grafiklerle gösterildiği gibi analiz sonuçları kaydedilmiştir.

4.5.2.1 Ray deplasmanı

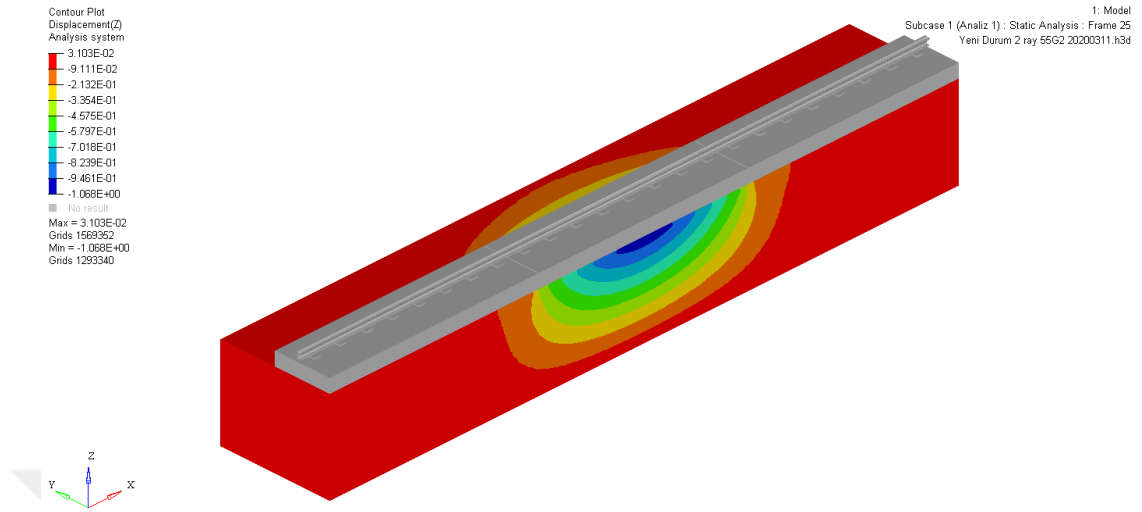
Standart durumda oluşan maksimum ray deplasmanı 2.20 mm'dir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : Durum 2 ray deplasmanı grafiği.

4.5.2.2 Zemin deplasmanı

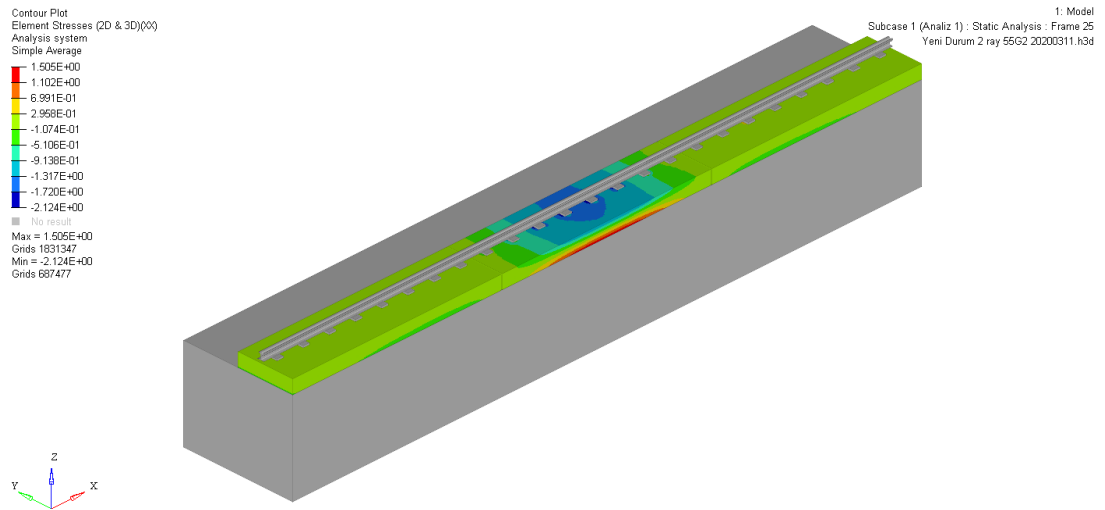
Standart durumda oluşan zemin deplasmanı 1.06mm'dir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : Durum 2 zemin deplasmanı grafiği.

4.5.2.3 Boyuna gerilme dağılımı

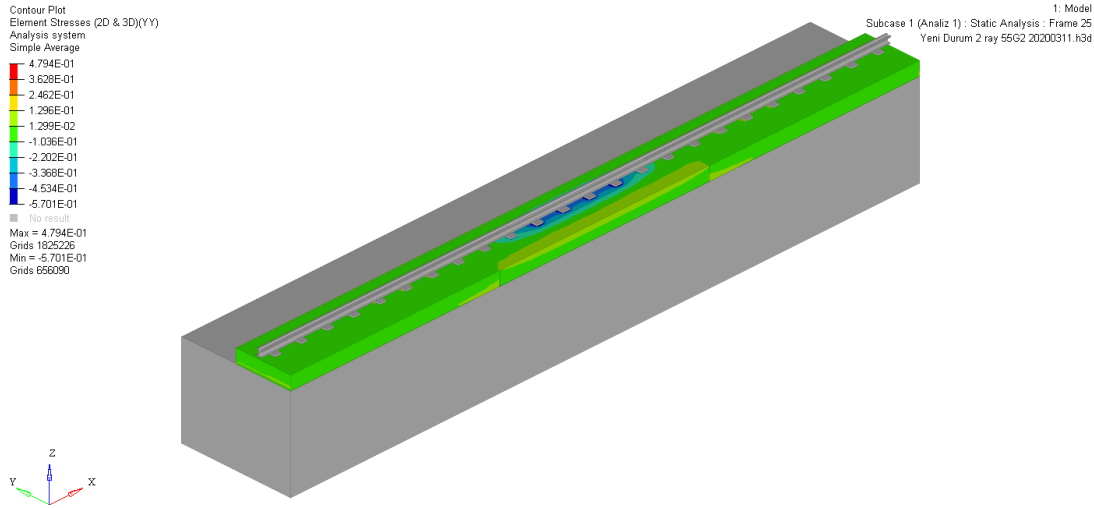
Yorulma yükleme koşulunda oluşan boyuna gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 1.51 N/mm², maksimum basınç gerilmesi 2.12 N/mm² olarak okunmuştur (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Durum 2 plak boyuna gerilme grafiği.

4.5.2.4 Enine gerilme dağılımı

Yorulma yükleme koşulunda oluşan enine gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 0.47 N/mm², maksimum basınç gerilmesi 0.57 N/mm² olarak okunmuştur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 : Durum 2 plak enine gerilme grafiği.

4.5.3 Selet aralığı etkisi-Durum 3

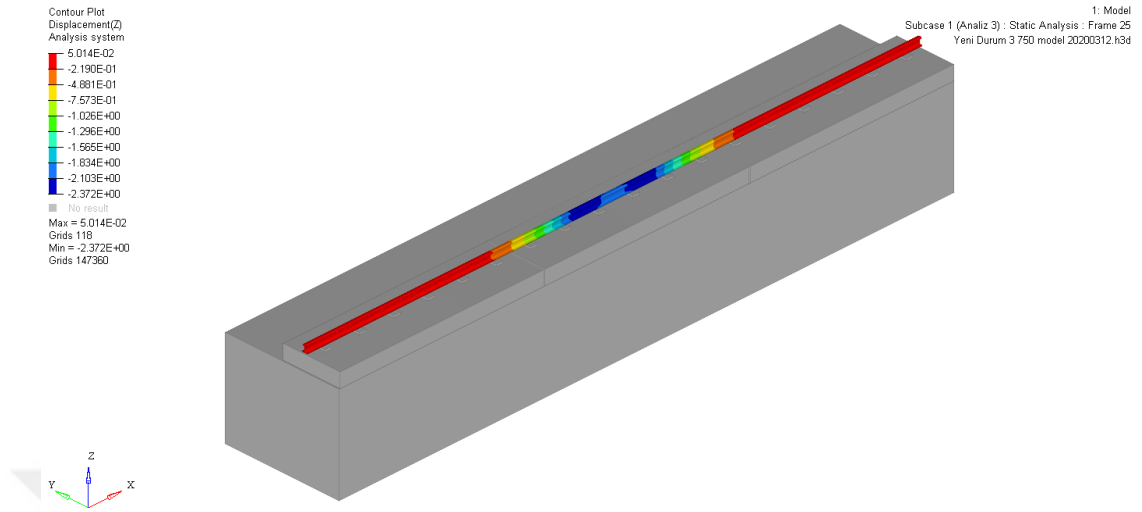
Bu durumda farklı selet aralığı ile yani daha az selet kullanmanın betonun yorulma ömrüne etkisini araştırmak için standart durumdan farklı olarak her 600 mm’de bir selet koymak yerine aynı fiziksel ve geometrik özelliklerde her 750 mm’de bir selet kullanılmıştır.

- Ray tipi : 50E4
- Selet aralığı : 750 mm
- Ray altı yastığı rijitliği: 50 kN/mm
- Selet boyutları : 300 mm x 150 mm
- İki dingil arası mesafe : 1600 mm

Aşağıdaki grafiklerle gösterildiği gibi analiz sonuçları kaydedilmiştir.

4.5.3.1 Ray deplasmanı

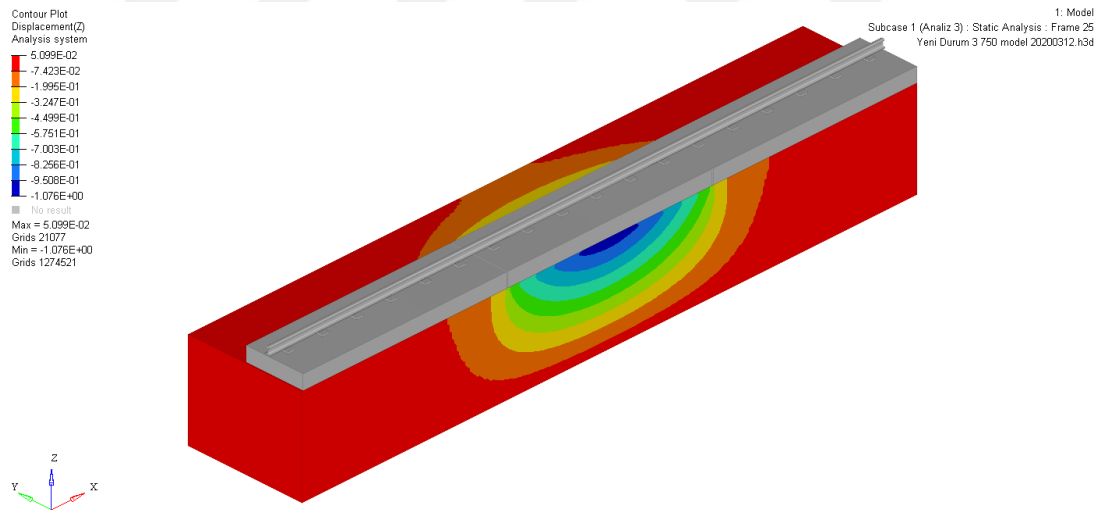
Standart durumda oluşan maksimum ray deplasmanı 2.37 mm'dir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : Durum 3 ray deplasmanı grafiği.

4.5.3.2 Zemin deplasmanı

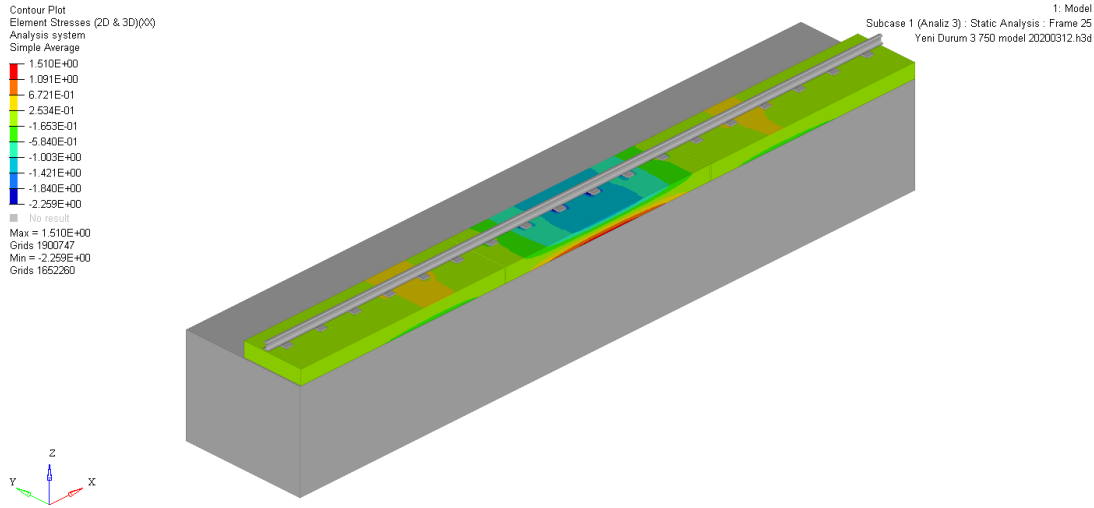
Standart durumda oluşan zemin deplasmanı 1.08mm'dir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Durum 3 zemin deplasmanı grafiği.

4.5.3.3 Boyuna gerilme dağılımı

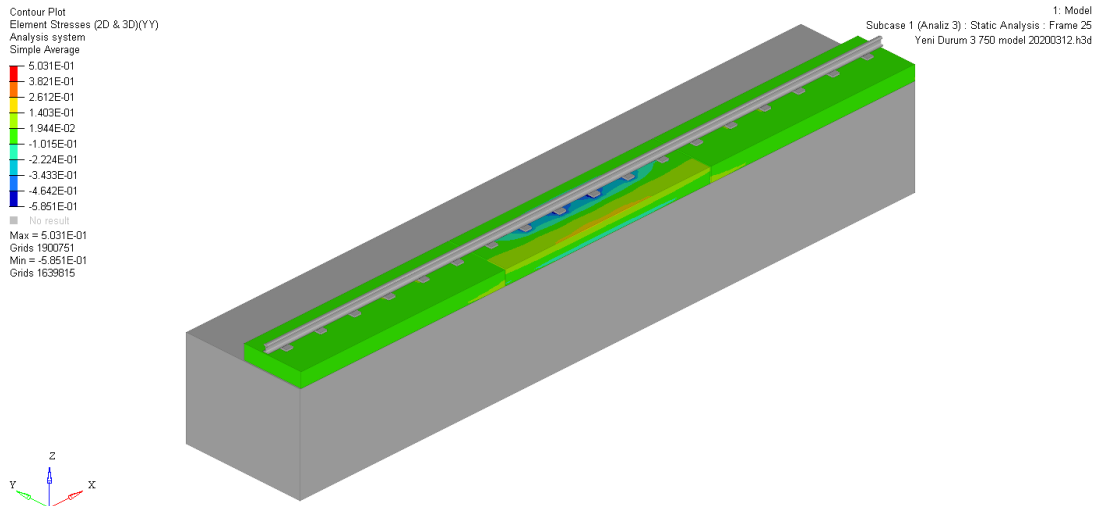
Yorulma yükleme koşulunda oluşan boyuna gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 1.51 N/mm^2 , maksimum basınç gerilmesi 2.26 N/mm^2 olarak okunmuştur (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 : Durum 3 plak boyuna gerilme grafiği.

4.5.3.4 Enine gerilme dağılımı

Yorulma yükleme koşulunda oluşan enine gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 0.50 N/mm^2 , maksimum basınç gerilmesi 0.59 N/mm^2 olarak okunmuştur (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 : Durum 3 plak enine gerilme grafiği.

4.5.4 Ray yastığı rijitliğinin etkisi-Durum 4

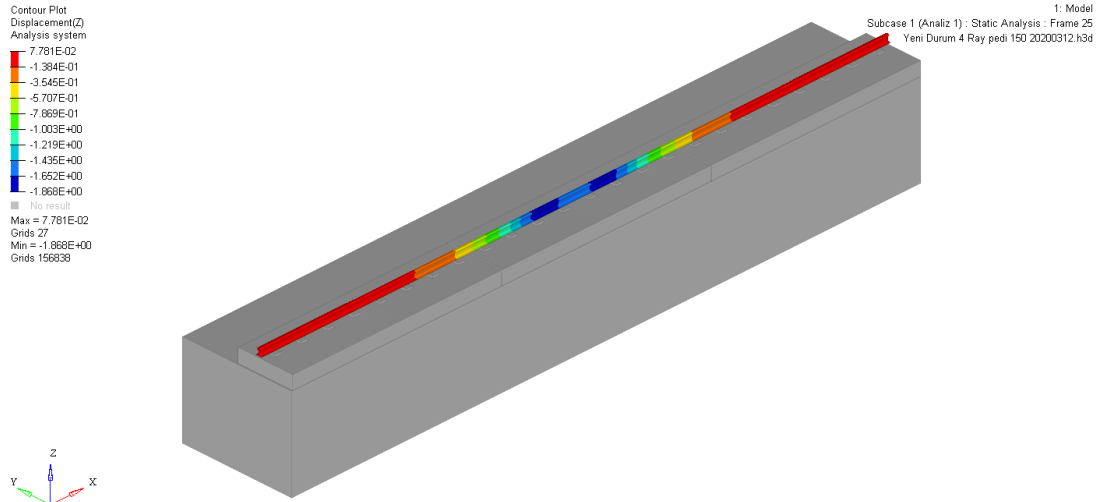
Bu durumda farklı rijitlikte bir ray yastığının (daha rijit) kullanmanın betonun yorulma ömrüne etkisini araştırmak için standart durumdan farklı olarak 50 kN/mm 150 kN/mm olan ray yastığı kullanılmıştır.

- Ray tipi : 50E4
- Selet aralığı : 600 mm
- Ray altı yastığı rijitliği: 150 kN/mm
- Selet boyutları : 300 mm x 150 mm
- İki dingil arası mesafe : 1600 mm

Aşağıdaki grafiklerle gösterildiği gibi analiz sonuçları kaydedilmiştir.

4.5.4.1 Ray deplasmanı

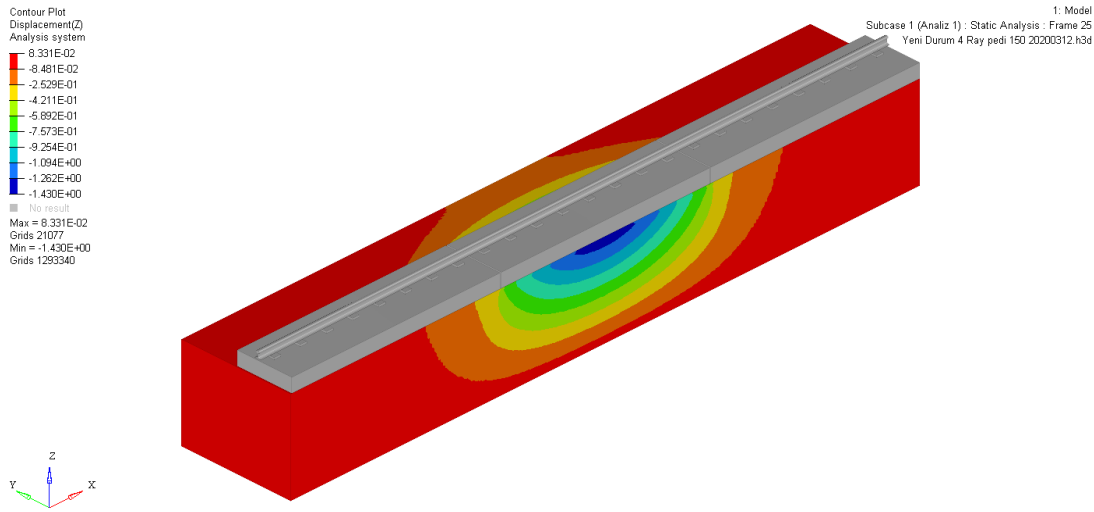
Standart durumda oluşan maksimum ray deplasmanı 1.87 mm'dir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 : Durum 4 ray deplasmanı grafiği.

4.5.4.2 Zemin deplasmanı

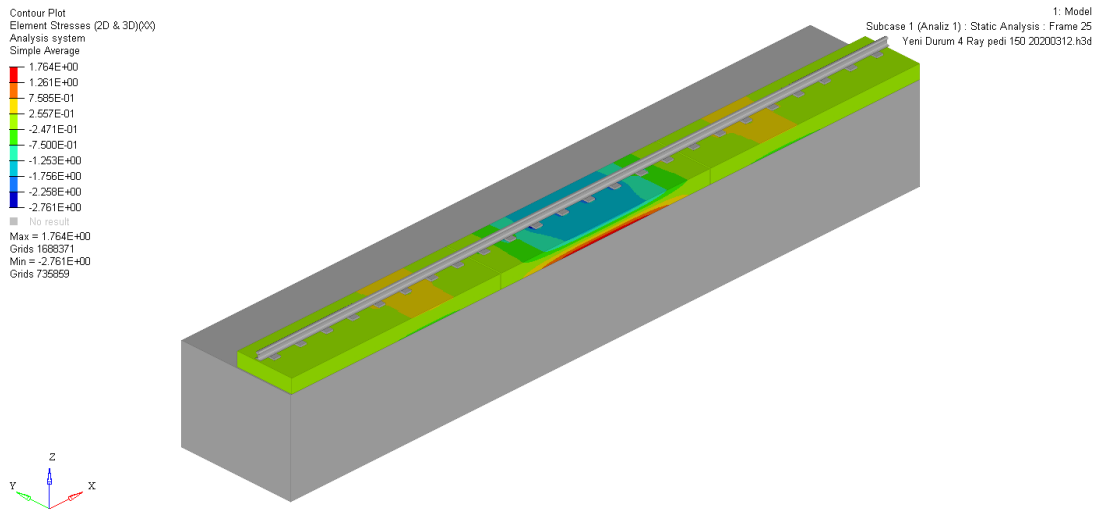
Standart durumda oluşan zemin deplasmanı 1.43 mm'dir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 : Durum 4 zemin deplasmanı grafiği.

4.5.4.3 Boyuna gerilme dağılımı

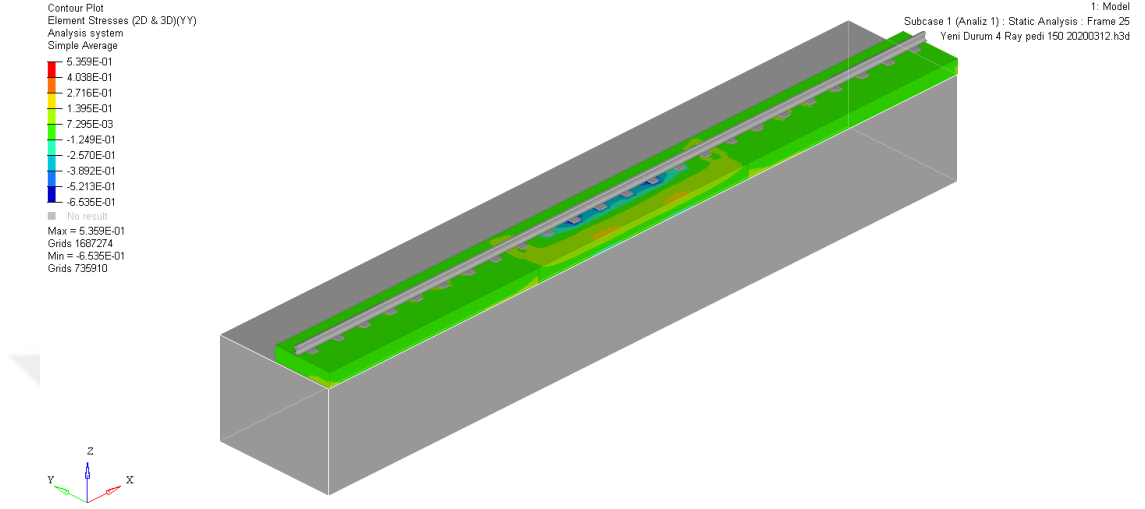
Yorulma yükleme koşulunda oluşan boyuna gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 1.76 N/mm², maksimum basınç gerilmesi 2.76 N/mm² olarak okunmuştur (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 : Durum 4 plak boyuna gerilme grafiği.

4.5.4.4 Enine gerilme dağılımı

Yorulma yükleme koşulunda oluşan enine gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 0.54 N/mm², maksimum basınç gerilmesi 0.65 N/mm² olarak okunmuştur (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 : Durum 4 plak enine gerilme grafiği.

4.5.5 Selet boyutlarının etkisi-Durum 5

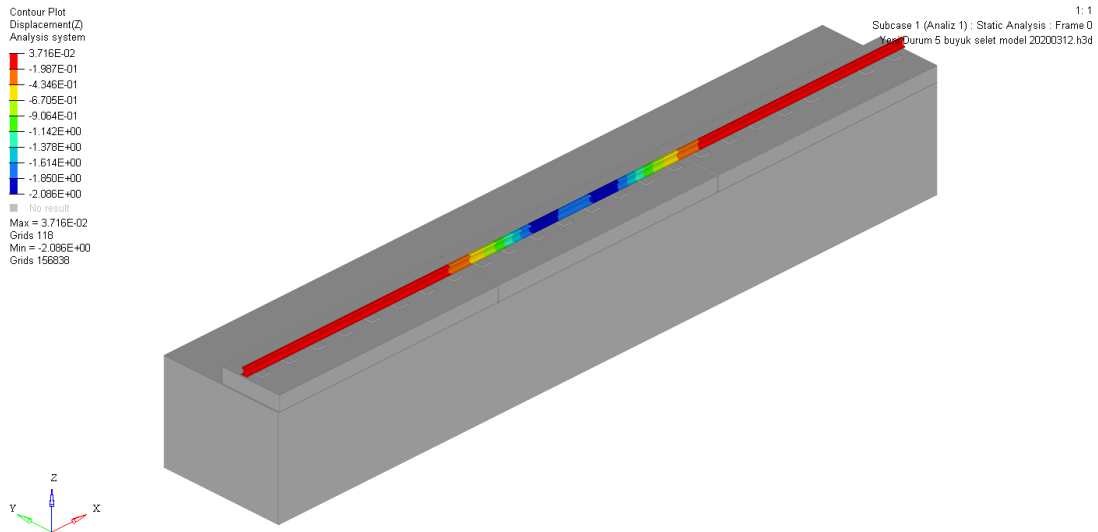
Bu durumda farklı boyutlarda (daha geniş taban alanlı) selet kullanmanın betonun yorulma ömrüne etkisini araştırmak için standart durumdan farklı olarak 300mm x 150 mm boyutlarında selet yerine 400 mm x 200 mm boyutlarında selet kullanılmıştır.

- Ray tipi : 50E4
- Selet aralığı : 600 mm
- Ray altı yastığı rijitliği: 50 kN/mm
- Selet boyutları : 400 mm x 200 mm
- İki dingil arası mesafe : 1600 mm

Aşağıdaki grafiklerle gösterildiği gibi analiz sonuçları kaydedilmiştir.

4.5.5.1 Ray deplasmanı

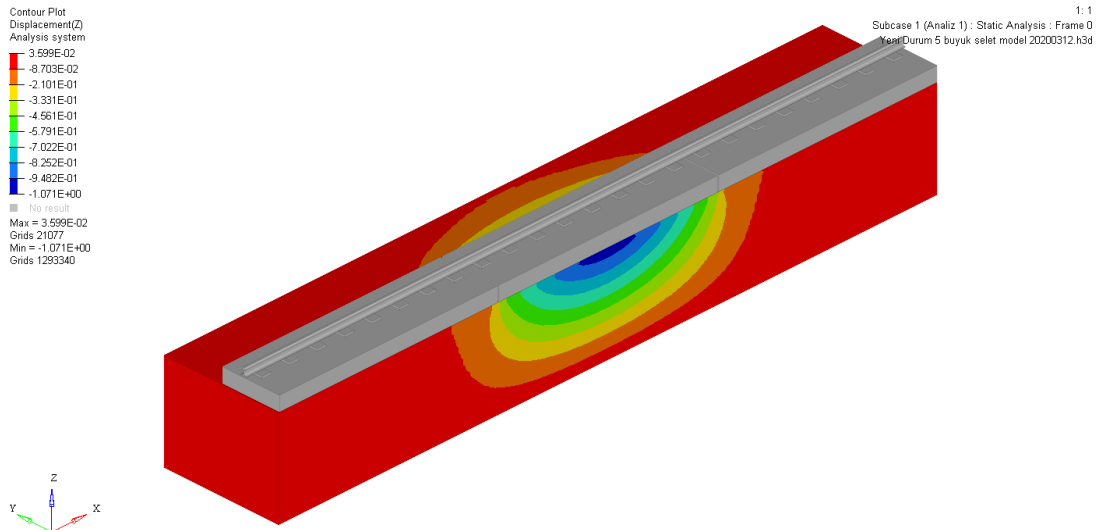
Standart durumda oluşan maksimum ray deplasmanı 2.08 mm'dir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 : Durum 5 ray deplasmanı grafiği.

4.5.5.2 Zemin deplasmanı

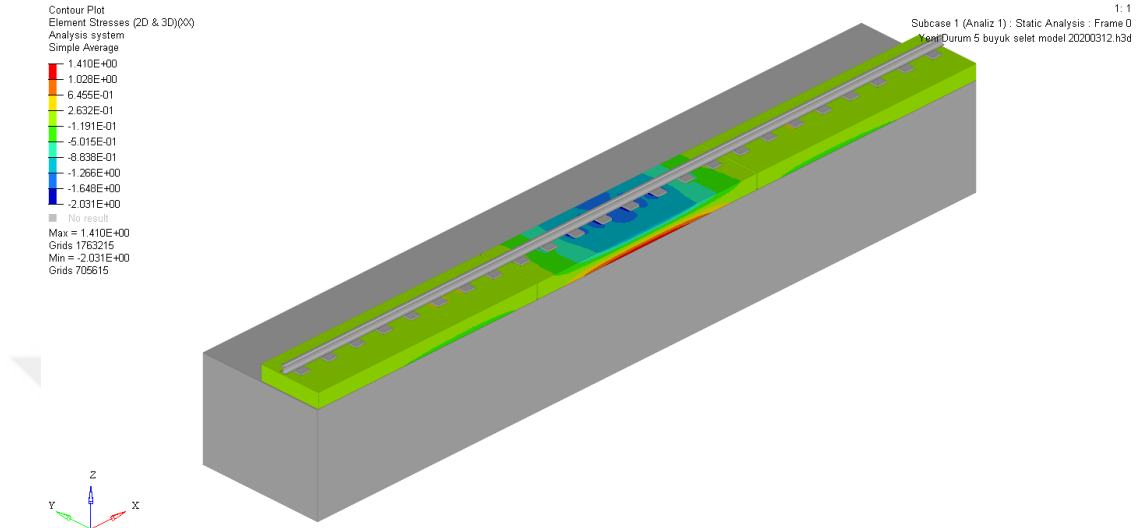
Standart durumda oluşan zemin deplasmanı 1.07mm'dir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 : Durum 5 zemin deplasmanı grafiği.

4.5.5.3 Boyuna gerilme dağılımı

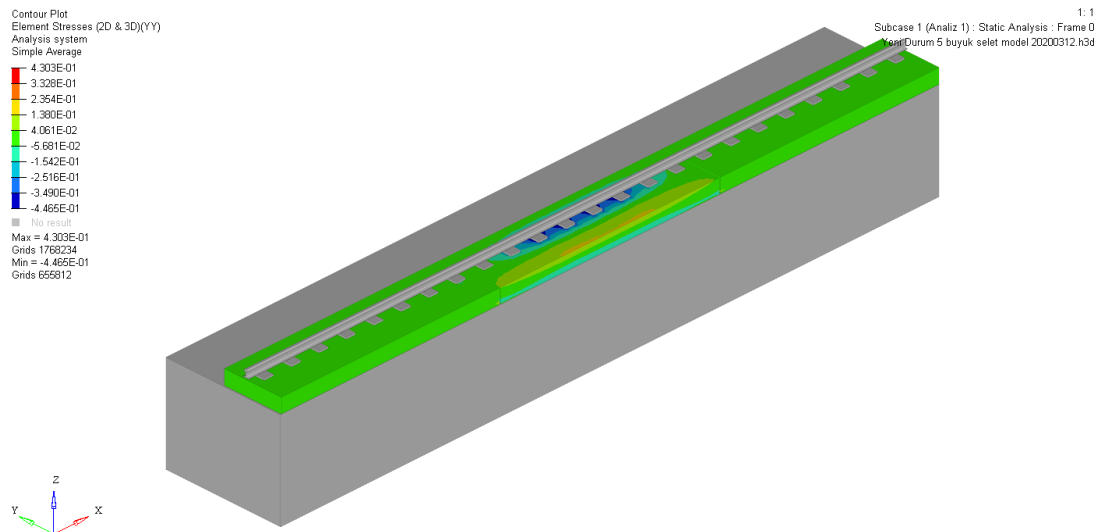
Yorulma yükleme koşulunda oluşan boyuna gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 1.41 N/mm^2 , maksimum basınç gerilmesi 2.03 N/mm^2 olarak okunmuştur (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 : Durum 5 plak boyuna gerilme grafiği.

4.5.5.4 Enine gerilme dağılımı

Yorulma yükleme koşulunda oluşan enine gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 0.44 N/mm^2 , maksimum basınç gerilmesi 0.45 N/mm^2 olarak okunmuştur (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 : Durum 5 plak enine gerilme grafiği.

4.5.6 Dingiller arası mesafe etkisi-Durum 6

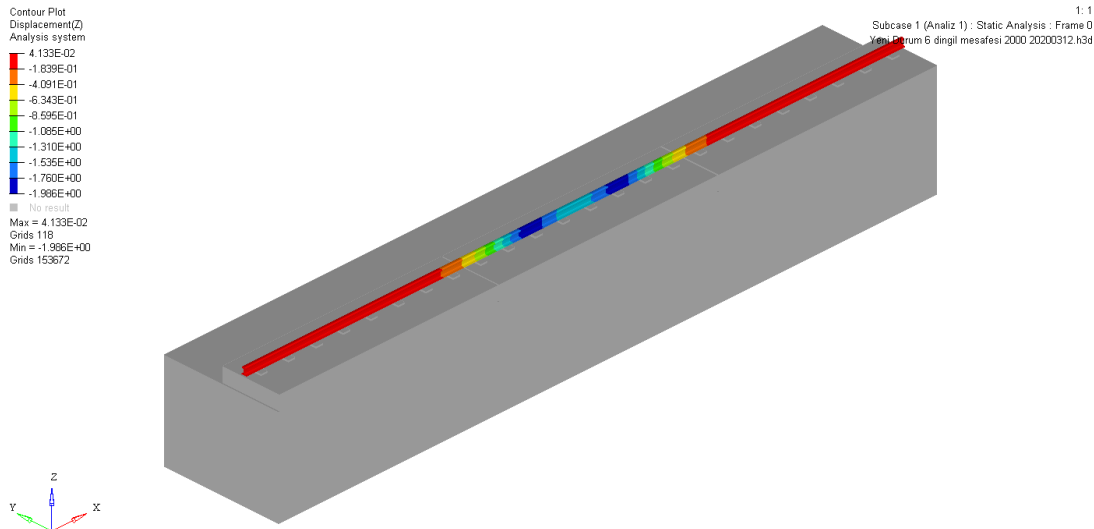
Bu durumda hat üstyapısında herhangi bir değişiklik yapılmadan araç bojisindeki dingiller arası mesafe makul bir şekilde artırılarak bu durumun beton plakta oluşan maksimum gerilmelere etkisi araştırılmaktadır.

- Ray tipi : 50E4
- Selet aralığı : 600 mm
- Ray altı yastığı rijitliği: 50 kN/mm
- Selet boyutları : 300 mm x150 mm
- İki dingil arası mesafe : 2000 mm

Aşağıdaki grafiklerle gösterildiği gibi analiz sonuçları kaydedilmiştir.

4.5.6.1 Ray deplasmanı

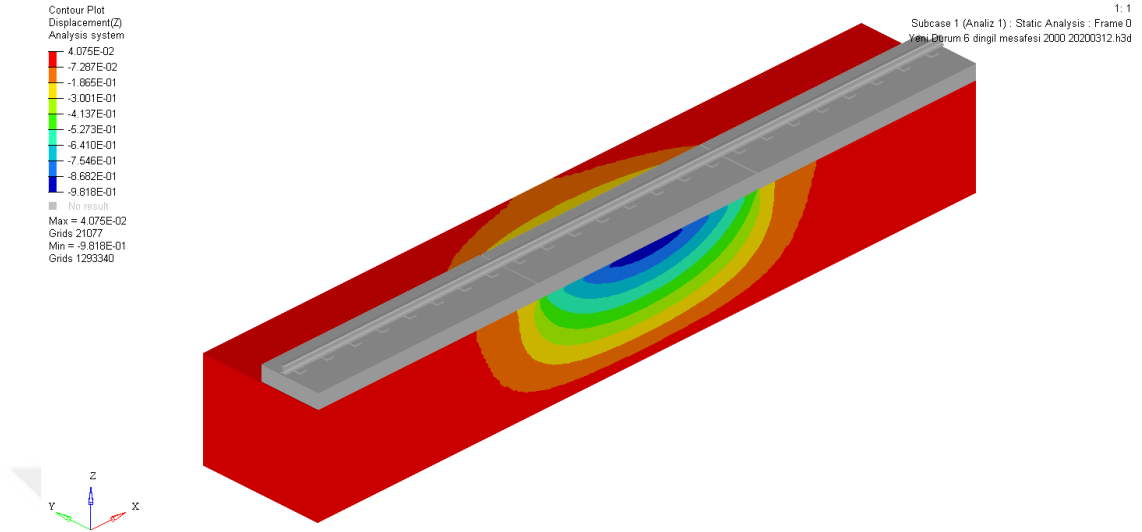
Standart durumda oluşan maksimum ray deplasmanı 1.87 mm'dir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 : Durum 6 ray deplasmanı grafiği.

4.5.6.2 Zemin deplasmanı

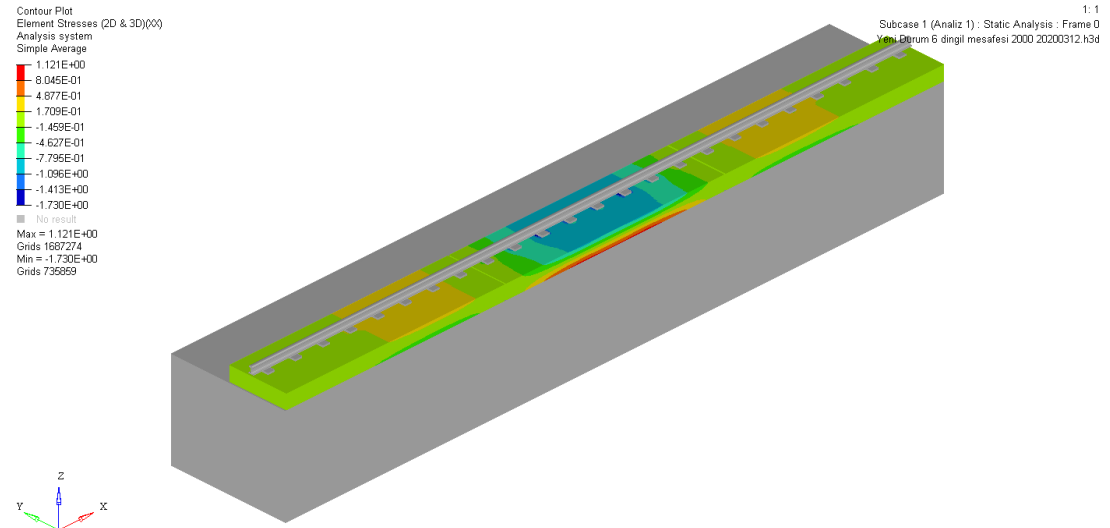
Standart durumda oluşan zemin deplasmanı 0.98mm'dir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 : Durum 6 zemin deplasmanı grafiği.

4.5.6.3 Boyuna gerilme dağılımı

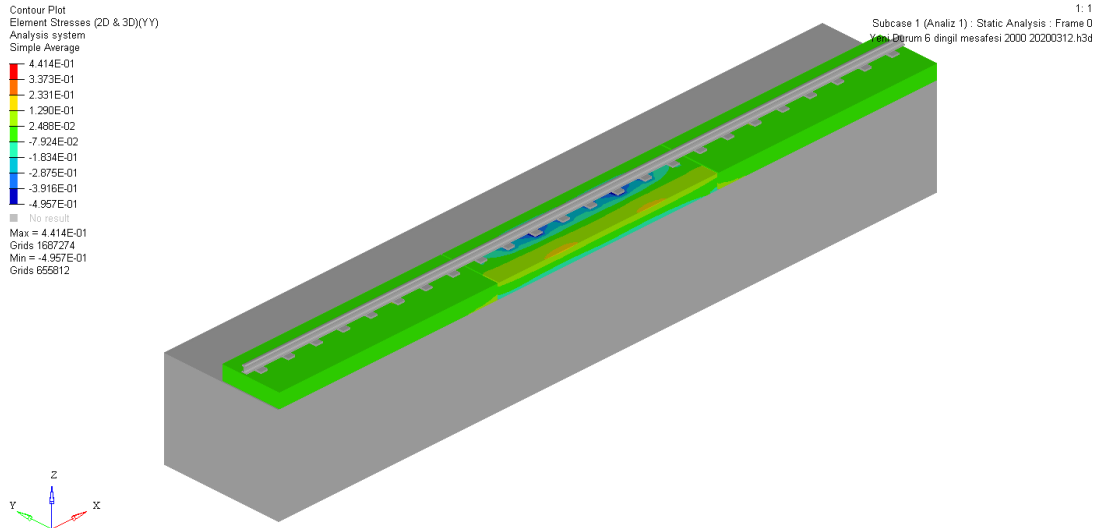
Yorulma yükleme koşulunda oluşan boyuna gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 1.12 N/mm², maksimum basınç gerilmesi 1.73 N/mm² olarak okunmuştur (Şekil 4.28).



Şekil 4.28 : Durum 6 plak boyuna gerilme grafiği.

4.5.6.4 Enine gerilme dağılımı

Yorulma yükleme koşulunda oluşan enine gerilmeleri grafiğine göre maksimum çekme gerilmesi 0.44 N/mm^2 , maksimum basınç gerilmesi 0.50 N/mm^2 olarak okunmuştur (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 : Durum 6 plak enine gerilme grafiği.

4.5.7 Analiz sonuçlarının yorumlanması

Beş farklı parametrenin yorulma yükleme koşulu altında hat plağında oluşturduğu gerilmeler üzerinden yük tekrar sayısı kapasiteleri irdelenmiştir. Ayrıca ray ve zemin deplasmanları ile ilgili veriler de irdelenmiştir. Gerilme ve deplasman grafikleri tablolastırılarak yorulma kapasiteleri analiz edilmiştir. Analiz yapılırken en kritik olan çekme gerilmesi değerine bakılmıştır. Yük tekrar sayıları Şekil 4.5 üzerinden gerilme değerlerine göre bulunmuştur.

4.5.7.1 Ray tipinin etkisi

Vinyol tipi (50E4) ve oluklu tip (55G2) raylar kullanılmıştır ve analiz sonuçları çizelgede sonuçlar gösterilmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 : Ray tipine göre analiz verileri

Parametre	Vinyol Tipi Ray	Oluklu Ray
Maksimum Boyuna Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	1.45	1.51
Maksimum Boyuna Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-2.07	-2.12
Maksimum Enine Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	0.46	0.47
Maksimum Enine Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-0.53	-0.57
Ray Deplasmanı (mm)	-2.09	-2.20
Zemin Deplasmanı (mm)	-1.07	-1.07
Yük Tekrar Kapasitesi	>150 Milyon	125-150 Milyon

Ray yükseklikleri ve eylemsizlik momentleri birbirine yakın olmasına rağmen ağırlık noktalarının teker ray temas noktasına olan farklılığı bu sonucu getirmiştir. Benzer özelliklerde vinyol ray kullanımının yorulma ömrü açısından daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçla ray tipinin kullanım ömrü üzerindeki etkisi tasarım aşamasında incelenebilir.

4.5.7.2 Selet aralığının etkisi

Ray bağlantı elemanlarını daha geniş aralıklarla yerleştirmenin betonda oluşacak gerilme dağılımını nasıl etkilediğini incelemek için selet aralığı 600 mm'den 750 mm'ye çıkartılmıştır. Bu değerler tramvay hatları için genel uygulama değerleridir. Analiz sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Selet aralığına göre analiz verileri

Parametre	600 mm aralıklı	700 mm aralıklı
Maksimum Boyuna Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	1.45	1.51
Maksimum Boyuna Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-2.07	-2.26
Maksimum Enine Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	0.46	0.50
Maksimum Enine Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-0.53	-0.59
Ray Deplasmanı (mm)	-2.09	-2.37
Zemin Deplasmanı (mm)	-1.07	-1.08
Yük Tekrar Kapasitesi	>150 Milyon	125-150 Milyon

Selet boşluğunun arttığı durumda tekrarlı yükleme durumunda beton üzerinde oluşan maksimum çekme gerilmesi artarak yorulma kapasitesi azalmıştır. Aynı zamanda ray

deplasmanı %10 artmıştır. Bu durumun rayda oluşan gerilmeleri arttırması beklenir ve bu aynı zamanda rayın yorulma kapasitesini azaltabilir.

4.5.7.3 Ray yastığı rijitliği

Rayın boyuna hareketinin sınırlandırılması ve ray üzerinden aktarılan yüklerin daha iyi dağıtılması için kullanılan ray yastıklarının rijitlikleri yük dağılımını belirlemekte çok önemlidir. Standart tasarıma (50 kN/mm) oranla daha rijit (150 kN/mm) bir ray yastığı ile model oluşturulmuş ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.4).

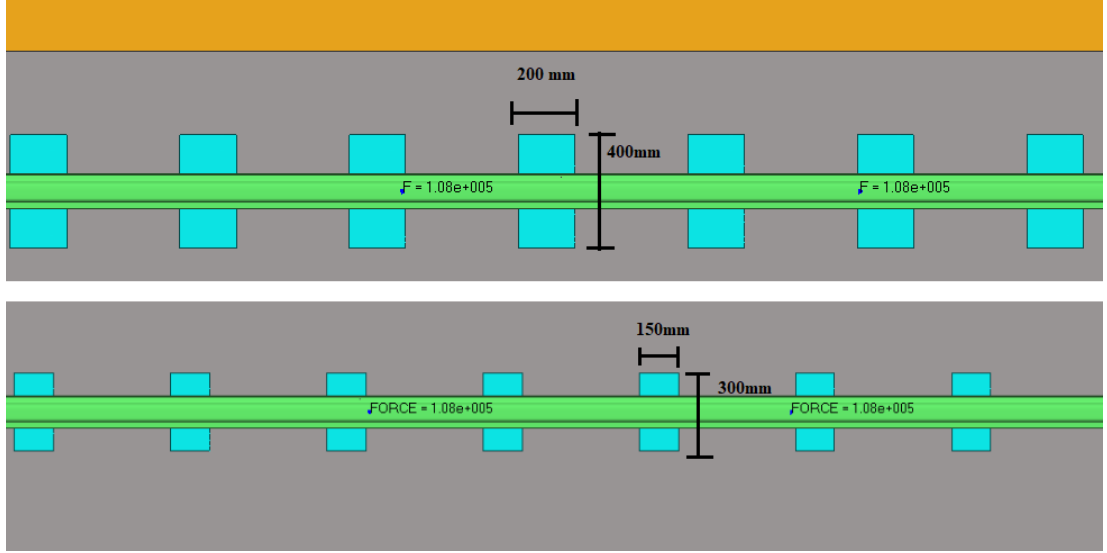
Çizelge 4.4 : Ray yastığı rijitliğine göre analiz verileri

Parametre	50 kN/mm	150 kN/mm
Maksimum Boyuna Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	1.45	1.76
Maksimum Boyuna Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-2.07	-2.76
Maksimum Enine Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	0.46	0.54
Maksimum Enine Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-0.53	-0.65
Ray Deplasmanı (mm)	-2.09	-1.87
Zemin Deplasmanı (mm)	-1.07	-1.43
Yük Tekrar Kapasitesi	>150 Milyon	25-50 Milyon

Ray yastığının rijitliğinin arttırılması beton plakta ciddi bir gerilme artışına ve yorulma ömründe oldukça dramatik bir azalmaya neden olmuştur. Ancak fark edilen diğer bir değişiklik ise ray deplasmanı azalmıştır, bu durumda ray üzerinde olan gerilmeler daha az olacaktır. Ray yastığının rijitliğini arttırmak betonun gerilme dağılımına ve yorulma ömrüne olumsuz etki edecektir.

4.5.7.4 Selet genişliği

Demiryollarında dingil ağırlıkları azaldıkça aktarılan kuvvetler de büyük ölçüde azalmakta bu nedenle ray tabanı, ray yastığı ve bunlara bağlı olarak da selet genişliği düşmektedir. Ancak bu çalışmada daha geniş bir seletle (Şekil 4.30) daha iyi bir yük dağılımı sağlanıp sağlanamayacağı ve bunun da yorulma üzerinde etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.30 : Geniş (üstteki) ve standart (alttaki) selet plan krokisi.

İki farklı selet genişliği için analiz sonuçları gösterilmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.5 : Selet genişliğine göre analiz verileri

Parametre	300mm x 150mm	400mm x 200mm
Maksimum Boyuna Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	1.45	1.41
Maksimum Boyuna Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-2.07	-2.03
Maksimum Enine Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	0.46	0.44
Maksimum Enine Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-0.53	-0.45
Ray Deplasmanı (mm)	-2.09	-2.08
Zemin Deplasmanı (mm)	-1.07	-1.07
Yük Tekrar Kapasitesi	>150 Milyon	>150 Milyon

Daha geniş selet kullanımının gerilmeyi düşürmeye katkısı olsa da yorulma kapasitesi 150 milyon yüklemeden fazla olmuş ve ray deplasman değerlerinde büyük değişimler gözlemlenmemiştir.

4.5.7.5 Dingiller arası mesafenin etkisi

Dingil mesafesi hat tasarım parametresi olabilir ancak tasarımında araç dinamikleri göz önünde bulundurulur ve demiryolu hattı buna göre tasarlanır. Ancak raylı sistemler birbirinden farklı birçok dalda uzmanlık gerektiren bir dal olduğundan bu konu bir araç ve hat tasarımcıları arasında bir ara yüz konusu olabilir.

Bu nedenle son karşılaştırma dingil mesafeleri üzerinden yapılmıştır. Standart modelde teker yükleri arasındaki mesafe 1600 mm iken diğer modelde 2000mm olarak alınmıştır. Karşılaştırılmalı analiz sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Dingil mesafesine göre analiz verileri

Parametre	1600mm	2000mm
Maksimum Boyuna Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	1.45	1.12
Maksimum Boyuna Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-2.07	-1.73
Maksimum Enine Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	0.46	0.44
Maksimum Enine Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-0.53	-0.50
Ray Deplasmanı (mm)	-2.09	-1.87
Zemin Deplasmanı (mm)	-1.07	-0.98
Yük Tekrar Kapasitesi	>150 Milyon	>150 Milyon

Tekerlerin birbirinden uzak olması kuvvetin bileşik etkisini azaltarak ve gerilme dağılımını daha homojen yaparak oluşacak maksimum çekme gerilmesini oldukça azaltmıştır. Bu durumda diğer durumların aksine ray deplasmanı da oldukça azalmıştır.

4.6 Analiz Sonuçları

Yapılan yorulma analizleri göstermektedir ki hat plağında oluşan gerilme konsantrasyonları plakların yorulmaya karşı dayanım ömürlerini kısaltmaktadır. Yapılan değişiklikler gerilme dağılımına ve deplasmanlara etki etmiştir. Gerilmelerde değişimler olmuş olsa da ray deplasmanları da değiştiğinden rayların da yorulma ömürleri bu durumdan etkilenmiştir.

Gerilme değerleri, ray deplasmanları ve tüm durumların özet bir gösterimi Çizelge 4.7’de aşağıdaki gibi yapılmıştır. Her durumda değişen değer koyu fontla gösterilmiştir. Bu değerlerin değişimi sonucu enine ve boyuna doğrultularda oluşan asal gerilmeler ve maksimum deplasman değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Gerilme-Deplasman Özet Tablosu

	DURUM 1	DURUM 2	DURUM 3	DURUM 4	DURUM 5	DURUM 6
Durum 1 sırasıyla Durum 2,3,4 ve 5 ile ayrı ayrı karşılaştırılacaktır.	Referans Durum	Aynı yükseklikte iki farklı tip ray kullanılması ile karşılaştırma	Seletlerin daha geniş aralıklarla kullanılması	Ray Yastığının rijitliğini değiştirerek karşılaştırma	Selet Taban Alanını değiştirerek karşılaştırma	Dingil Mesafesini değiştirerek karşılaştırma
RAY TİPİ	50E4 (Vinyol tipi ray)	55G2 (Oluklu ray)	50E4 (Vinyol tipi ray)	50E4 (Vinyol tipi ray)	50E4 (Vinyol tipi ray)	50E4 (Vinyol tipi ray)
SELET ARALIĞI (mm)	600	600	750	600	600	600
YASTIK RİJİTLİĞİ (KN/mm)	50	50	50	150	50	50
SELET BOYUTLARI (EN x BOY) (mm)	300 x 150	300 x 150	300 x 150	300 x 150	400 x 200	300 x 150
DİNGİL MESAFESİ (mm)	1600	1600	1600	1600	1600	2000
Maksimum Değerler						
Plak Boyuna Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	1,450	1,505	1,510	1,764	1,781	1,121
Plak Boyuna Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-2,065	-2,124	-2,259	-2,761	-2,448	-1,730
Plak Enine Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	0,456	0,479	0,503	0,536	0,483	0,441
Plak Enine Basınç Gerilmesi (N/mm ²)	-0,526	-0,570	-0,585	-0,654	-0,583	-0,496
Ray Deplasmanı (mm)	-2,10	-2,20	-2,37	-1,87	-2,56	-1,87
Zemin Deplasmanı (mm)	-1,07	-1,07	-1,08	-1,43	-1,44	-0,98



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda raylı sistemlerde yorulmanın etkileri ve beton plakta yorulmaya etki edebilecek parametreler incelenmiştir. Demiryolu üst yapısında tasarım yorulma ömrünü oldukça pozitif yönde etkileyebilmektedir. Yapılan literatür araştırması ve analiz sonuçları göstermektedir ki en geniş tanımlama ile demiryolu üst yapı elemanları üzerine gelen gerilme konsantrasyonları azaltılırsa yani gerilme dağılımı homojenleştirilirse malzeme özellikleri değiştirilmeden de yorulma ömrü uzatılabilir.

Yapılan çalışmada da beton plağın geometrik veya yapısal özellikleri değiştirilmeden de yorulmaya karşı dayanımı ciddi şekilde artırılabilir. Ray tipi seçimi, ray yastığı rijitliği, selet mesafesi, selet boyutları ve dingiller arası mesafe açısından yapılan analizler ray tipi seçiminde bir miktar ray yastığı rijitliği, selet aralığı ve dingiller arası mesafe değişiminin plak yorulması üzerinde etkisinin oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Ray tip 50E4 yerine benzer geometrik özelliklerde olan 55G2 yapıldığında hat plağında oluşan gerilmeler bir miktar değişmiştir. Bu sonuçlarla doğrudan vinyol tip ray kullanılması önerilemez. Vinyol raylar bir miktar olumlu katkıda da bulunsa drenaj, demiryolu emniyeti, hatların hemzemin olarak kullanımı açısından tramvay projelerinde dezavantajları olabilir. Ayrıca tramvay hatlarında ana hatta kurp yarıçapları 25 metreye kadar düşebileceğinden oluklu raylardaki kılavuz olma özelliği bu konuda oldukça kullanışlı olacaktır.

Demiryolu üst yapılarında traverslerin veya bağlantı elemanlarının sıklığı birçok etkiye sahiptir. Hem ray hem de bağlantı elemanlarında oluşacak gerilmelerin azalması nedeniyle daha sık ray bağlantı elemanı kullanmak yani aralıklarını azaltmak olumlu katkılar sunacaktır. Ancak diğer bir yandan da maliyeti oldukça arttıracaktır. Örneğin bir demiryolunda 0.75 metre selet açıklığını 0.6 metreye düşürmek bağlantı elemanı maliyetini %25 arttıracaktır. Bu nedenle tasarım yapılırken enine kuvvetlerin fazla olduğu kurp bölgelerinde raydan bağlantı

elemanına aktarılacak enine kuvvetleri karşılamak adına bağlantı elemanı sayısı arttırılabilir.

Ray yastığı rijitliği 50 kN/mm'den 150 kN/mm'ye çıkarılmıştır. Bu durumda plakta oluşan çekme gerilmeleri oldukça artmış ancak ray deplasmanı 0.3 mm ve ray yastığı deplasmanı yarı yarıya azalmıştır. Bu durumda düşük rijitlikte ray yastığı kullanımı plak yorulma ömrüne pozitif etki etse de rayda oluşacak deplasman ve gerilmeleri olumsuz yönde etkileyecektir. Ray yastığı rijitliği belirlenirken sadece bu iki eleman göz önünde bulundurulamaz ancak hesaplamalarda çok etken pozisyon alır. Ray yastığı rijitliğinin en önemli tasarım girdilerinden bir tanesi de gürültü ve titreşim azaltma koşullarıdır. Özellikle şehir içi hatlarda hastane, okul, müze gibi yerlerden geçerken gürültü ve titreşim azaltmak adına ray yastığı rijitlikleri oldukça düşürülür.

Dingiller arası mesafe bir demiryolu üst yapı tasarım kriteri olsa da tasarımı üst yapı tasarımcısının değil araç tasarımcısının inisiyatifindedir. Bu tasarım yapılırken aracın ulaşacağı hız, dinamik etkiler, taşıyacağı yük ve aks yükleri hesaba katılabilir. Ancak yapımı tamamen yeniden tasarlanan tramvay projelerinde bu konu demiryolu üst yapı elemanlarının ömrüne etkisi açısından hat tasarım ekibi ile araç tasarım ekibi arasında bir ara yüz konusu olabilir.

Demiryollarında yorulma sadece üst yapıların konusu değil tüm alt sistemlerin bir konusudur. Demiryolu araçlarının, boji elemanlarının yorulma ömürlerinin çok iyi saptanması gerekmektedir. Bir tekerin yorulma nedeniyle kırılması sonucu Eschede kazasında olduğu gibi çok dramatik sonuçlar ortaya çıkabilir.

Raylı sistem araçları ve demiryolları tasarımları-testleri sonucunda yorulma ömürleri tahmin edilebilir ancak işletme sırasında bir takım önleyici ve öngörücü bakım yöntemleri kullanılmalıdır. Lazer tarayıcılar, ultrasonik cihazlar gibi anlık veri aktarımı yapabilen sistemlerin kullanımı üstyapı ve araç elemanlarının anlık durumlarını raporlayarak yorulma kaynaklı oluşabilecek hasarları ciddi ölçüde azaltabilir. Bu sistemlerin yorulma ömrünü uzatmaya katkısı ayrı bir araştırma konusu olabilir. Önleyici ve öngörücü bakım ile çok ciddi malzeme ve yedek parça tasarrufu yapılabilmektedir.

Çalışmalar göstermektedir ki demiryollarında düzenli bakım ve gerekirse onarım yorulma nedeni hasarları tespit etmek ve tehlikeli sonuçlarını önlemek adına oldukça önemlidir. Aynı zamanda tekrarlı yüklerin etkisi altında oluşacak

gerilmelere karşı yüksek kapasiteli malzemeleri kullanmak da malzemenin ömrünü uzatacaktır. Yapılan literatür araştırması ve sonlu elemanlar analizleri göstermektedir ki beton plaklar yorulmaya karşı uzun yıllar dayanma kapasitesine sahiptirler. Sefer sıklığının 3 dakika, bir araçtaki dingil sayısının 10 ve bir günde 18 saat hizmet vereceği düşünülecek bir hatta demiryolu üst yapısının bir kesitine gelecek teker yükü sayısı yıllık 1.314.000 olacaktır ve hesaplarımızda belirli tasarım durumları ve teker yükleri altında 150.000.000 tekrar sayısı gibi bir kapasiteye ulaştığımızdan beton plak için ortalama 100 yıllık gibi bir kullanım ömrü ortaya çıkacaktır. Bu durum balastsız hat yapısının getirdiği en büyük faydalardan birisidir.

Dördüncü bölümde yapılan analizde hat yapısı ile literatür taramasında verilen CRTS-III tipi hat düzeninin ciddi farklar olmasının nedeni bir hattın kullanım amacının hızlı tren yolu diğerinin ise tramvay yolu olmasıdır. Dingil yüklerindeki ihtiyaçlara göre hat kesiti düzenlenebilir veya döşemelerin kalınlıkları değiştirilebilir. Ancak burada en önemli sorulması gereken soru bu hattın beklenen kullanım ömrü nedir ve bu hattı kullanması beklenen trenlerin aks yükü ne kadardır.

Balastsız hatlarda yapılan analizde gerilme yükler ve temel hat kesiti değiştirilememesine rağmen gerilme konsantrasyonlarının fazlalığı yorulma ömrünü kısaltmıştır. Yani plakta oluşan bir homojen gerilme dağılımı plak yorulma dayanımı arttıracaktır.

Yorulma kıyaslanması sadece balastsız hatların elemanları üzerinden değil aynı zamanda balastlı balastsız hat arasında da yapıldığında balastsız hatların daha stabil olması nedeniyle elemanların yorulma ömürlerinin daha uzun olduğu görülmüştür. Yorulma açısından balastsız hatların balastlı hatlara karşı görülen bir üstünlüğü olmuştur.

Bu çalışmada yapılan literatür taraması ve sonlu elemanlar yöntemi analizi yorulmanın demiryolları üzerinde etkisinin araştırılması elzem bir durumdur. Dünyada her geçen gün gelişmekte olan hat üst yapılarında yorulma özelinde beton plakların yorulma davranışları, balastsız hatların balastlı hatlara göre yorulma açısından avantajları ve benzeri araştırmalar yapılan gerçek boyutlu testlerle incelenmektedir.

Bu çalışmada daha önce etkileri araştırılmamış bazı tasarım parametreleri üzerinde değişimler yapılmış ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma demiryolu üst yapı

tasarımı için kayda değer sonuçlar ortaya koymuştur. Bunun bir üst aşaması olan laboratuvar testleri veya benzer yöntemlerle farklı parametreleri değiştirerek yorulma ömrü incelenmesi gibi konular için de kapı açmaktadır.



KAYNAKLAR

- Albert, W. A. J.**(1838).Über Treibseile am Harz. *Archiv für Mineralogie Geognosie Bergbau und Hüttenkunde*, vol. 10, pp 215-34
<<https://books.google.com.tr/>> Erişim: 25 Nisan, 2020
- ASTM** (1974). *Handbook of Fatigue Testing*.
- Marolt Cebasek, T. & Esen, A.P. & Woodward, P.K. & Laghrouche, O. & Connolly, D.P.** (2018). Full scale labrotary testing of ballast and concrete slab track under phased cyclic load. *Transportation Geotechnic*, vol. 17 pp 33-40
- CEN** (2017). *Railway applications - Ballastless track systems* (EN 16432 Part 1-2)
- CEN** (2011). *Railway applications - Track — Rail* (EN 13674 Part 1)
- CEN** (2011). *Railway applications - Track — Special purpose rail* (EN 14811)
- Çöl, M., Koç, F.G. ve Ymanoğlu, R.,** (2013). H. Wendel S40 Ray Çeliğinde Yorulma Çatlaklarının Mikroyapısal Karakterizasyonu. 2. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13) , 9-11 Ekim, Karabük, 372-383.
- Esveld, C.** (2001). *Modern Railway Track* (2nd ed.). MRT Productions, Hollanda.
- González-Velázquez, J.** (2020). Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials. 10.1007/978-3-030-29241-6.
- Kohring, H.** (Photographer). (2007). Schienen mit Linienzugbeeinflussung auf Fester Fahrbahn im Bahnhof Rheda-Wiedenbrück
<https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Rails_on_slab_track_Rheda_Wiedenbrueck1.jpg> Erişim tarihi: 27 Şubat, 2020
- Laurinavičius, A.,&Gailiene, I.** (2017). *The need and benefit of slab track:case of Lithuania*.Gradevinar. 399-408.
- Lesley, L.,** (2009). Fatigue in railway and tramway track. İçinde Kapoor, A., Robinson, M. (Editörler) *Fatigue in Railway Infrastructure* (Vol.1, pp.1-19), Woodhead, Publishing.
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781855737402500018>>
- NASA** (2007). Derailed. *System Failure Case Studies*, volume 1 issue 5.
<https://nsc.nasa.gov/docs/default-source/system-failure-case-studies/sfcs-2007-05-01-eschedetraindisaster.pdf?sfvrsn=4240ecf8_2> Erişim tarihi: 21 Mayıs, 2020
- NSW Transport** (2019). *RailCorp Engineering Manual — Rail Defects Handbook*.
<https://www.transport.nsw.gov.au/system/files/media/asa_standards/2019/tmc-226.pdf> Erişim tarihi: 21 Şubat, .2020

- Öztürk, Z., ve Öztürk, T.,** (2005). Kentiçi Demiryolunda Balastsız Üstyapı Tasarımları ve Uygulama Esasları. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 22-24 Eylül, Antalya, 372-383.
- Paris, P.C., Gomez, M.P. and Anderson, W.E.**(1961).A rational analytical theory of fatigue.*The Trend of Engineering*,Vol. 13 pp. 9–14.
- Poveda, E. & Yu, R.& Lancha, J.& Ruiz, G.** (2015). A numerical study on the fatigue life design of concrete slabs for railway tracks. *Engineering Structures*. 100. 455-467.
- Poveda, E. & Ruiz, G. & Cifuentes, H. & Yu, R.C. & Zhang, X.X.**(2017.) Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC, *International Journal of Fatigue* 101 9–17
- Rail Accident Investigation Branch (RAIB).** (2014). *Class investigation into rail breaks on the East Coast Main Line* (Report No. 24). United Kingdom: Rail Accident Investigation Branch, Rail Accident Report. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c8fc1ed915d4c0d000161/R242014_141113_ECML_Rail_Breaks.pdf>Erişim: 23 Nisan, 2020
- Sievering, S.** (2018, 3 Haziran). Die ICE-Katastrophe von Eschede jährt sich zum 20. Mal. *Bild Gazetesi*.
Erişim adresi: <https://www.bild.de/regional/hannover/eschede/vor-20-jahren-geschah-die-ice-katastrophe-in-eschede-55822716.bild.html>
- Smith, R.A.,** (2009). Fatigue and the railways: an overview. İçinde Kapoor, A., Robinson, M. (Editörler) *Fatigue in Railway Infrastructure* (Vol.1, pp.1-19), Woodhead, Publishing. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781855737402500018>
- Tarifa, M. & Zhang, X. & Ruiz, G. & Poveda, E.** (2015). Full-scale fatigue tests of precast reinforced concrete slabs for railway tracks. *Engineering Structures*, 100, 610-621.
- Xavier, N.C. & Abraham, G.V. & Varkey, M.V.,** (2016). Fatigue Evaluation of Track Slabs Reinforced with Steel and CFRP Bars using Finite Element Analysis, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* Vol 5, Issue 9, 16241-16248
- Yu, Z.& Xie, Y. & Shan, Z. & Li, X.,** (2018). Fatigue Performance of CRTS III Slab Ballastless Track Structure un-der High-speed Train Load Based on Concrete Fatigue Damage Constitutive Law, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume 16, Issue 5, Pages 233-249, ISSN 1347-3913,
< <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>, https://www.jstage.jst.go.jp/article/act/16/5/16_233/_article/-char/en>
- Url-1**<<https://www.edilonsedra.com/edilonsedra-ers-trams/>>, erişim tarihi 12.03.2020

Url-2<<http://railmeasurement.com/railhead-damage/fundamental-damage-mechanisms/rolling-contact-fatigue-gauge-corner-cracking/>
Erişim tarihi 28.02.2020

Url-3<<https://www.bochumer-verein.de/en/gummigefedertes-bvv-rad-dreiteilig/>>
Erişim tarihi 21.05.2020



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Efe Erdem
Doğum Tarihi ve Yeri : 08.08.1994/ Antalya, TÜRKİYE
E-posta : efeerdm@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017- Halen, ALSTOM- Hat İşleri Yapısal Tasarım Mühendisi