



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEMİRYOLU ÜSTYAPI YÖNETİMİ İÇİN BULANIK TABANLI
BİR KARAR DESTEK MODELİ

SUEDA MUTLU

Ocak 2021

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DEMİRYOLU ÜSTYAPI YÖNETİMİ İÇİN BULANIK TABANLI
BİR KARAR DESTEK MODELİ

SUEDA MUTLU

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI

Ocak 2021

Sueda MUTLU tarafından **Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI** danışmanlığında hazırlanan “**Demiryolu Üstyapı Yönetimi İçin Bulanık Tabanlı Bir Karar Destek Modeli**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökçe AYDIN, Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Sueda MUTLU

ÖZET

DEMİRYOLU ÜSTYAPI YÖNETİMİ İÇİN BULANIK TABANLI BİR KARAR DESTEK MODELİ

MUTLU, Sueda

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI

Ocak 2021, 70 sayfa

Demiryolu ulaştırması; güvenlik ve yüksek kapasite imkânları ile diğer ulaşım türlerine kıyasla önemli bir konuma sahiptir. Bu avantajları ile kullanım hacmi gün geçtikçe artmaktadır. Artan demiryolu kullanımı Bakım ve Yenileme (B&Y) çalışmalarını hızlandırmakta, etkili bir üstyapı yönetimini önemli hale getirmektedir. Farklı bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşan demiryolu üstyapısı, işletme aşamasında birçok belirsiz faktörden etkilenir. Bu durum demiryolu üstyapı yönetimini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple başarılı bir üstyapı yönetimi için belirsizlik etkin bir şekilde ele alınmalıdır. Bahsedilen sorunların üstesinden gelecek bir karar verme modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tezde, demiryolu bileşenlerinden bir olan traverse odaklanarak demiryolu hattı B&Y çalışmalarında belirsizlikle nasıl mücadele edilebileceği açıklanmıştır. Tüm hesaplamalar, gelecekteki çalışmalara rehberlik etmesi için ayrıntılı bir şekilde verilmektedir. Önerilen model Türkiye'de bir demiryolu hattına uygulanmış ve başarısı ortaya konmuştur. Bu çalışmayla, etkili bir üstyapı yönetimi için belirsizlikle mücadele etmenin ne kadar önemli olduğu gösterilmektedir. Önerilen modelin demiryolu üstyapı yönetiminde hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için umut verici olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Bakım ve yenileme, demiryolu hattı, hat geometrisi, karar-destek modeli

SUMMARY

A FUZZY-BASED DECISION SUPPORT MODEL FOR RAILWAY SUPERSTRUCTURE MANAGEMENT

MUTLU, Sueda

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI

January 2021, 70 pages

Railway transport has an important position compared to other modes of transportation with its safety and high capacity possibilities. With these advantages, the usage volume is increasing day by day. This activity in railways accelerates maintenance and renewal requirements and makes effective railway track management important. The railway track, which is formed by the combination of different components, is affected by many uncertain factors during the operational phase. This situation complicates the railway track management. Therefore, uncertainty must be dealt with effectively for a successful track management. There is a need for a decision-making model that will overcome these problems. In this thesis, it is explained how uncertainty can be tackled in railway track maintenance and renewal studies by focusing on the sleeper from railway components. All calculations are given in detail to guide future studies. The proposed model was applied to a railway line in Turkey and demonstrated its successful performance. This study indicates how important it is to handle uncertainty for effective railway track management. The proposed model is believed to be promising for both researchers and practitioners in railway track management.

Keywords: Maintenance and renewal, railway track, track geometry, decision-support model

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında artan talepler doğrultusunda demiryolu taşımacılığında ortaya çıkabilecek üstyapı problemlerinden bahsedilmiştir. Demiryolu sisteminin kalite sürekliliğini ve güvenliğini sağlayabilmek için doğru bakım ve yenileme faaliyetlerinin uygun zamanda uygulanması esasına dayanan, sürdürülebilir ulaşımı amaçlayan bir model önerisi sunulmuştur.

Bu çalışmanın konusunun belirlenmesinde ve hazırlanma sürecinin her aşamasında değerli bilgilerini ve zamanını benden esirgemeyerek her fırsatta çalışmamla yakından ilgilenen, eleştirileriyle yol gösteren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI' ya teşekkürümü özellikle belirtmek isterim.

Çalışmamda yardımda bulunarak yol gösteren TCDD personellerine ve her koşulda bana destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Gerçekleştirmiş olduğum çalışma bu alanla ilgili bundan sonraki çalışmalara bir nebze de olsa ışık tutabilirse amacıma ulaşmış olacağımı ifade etmek isterim. Ayrıca çalışma ile ilgili tüm eksik, hata ve sorumluluğun bana ait olduğunun bilinmesini ister ve çalışmanın yararlı olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	iv
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	x
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI	4
BÖLÜM III DEMİRYOLU ÜSTYAPI BAKIM VE YENİLME FAALİYETLERİ	14
3.1 Hat Geometrisi	20
3.2 Ray	22
3.3 Travers	24
3.4 Hat Yatağı Katmanı	28
3.5 Bakım ve Yenileme Çalışmalarında Maliyet Yönetimi	29
BÖLÜM IV METODOLOJİ	33
4.1 Bulanık Uzantı Prensipleri	33
4.1.1 Vertex Yöntemi	37
4.1.2 DSW Algoritması	37
BÖLÜM V MODELİN GELİŞTİRİLMESİ VE DURUM ÇALIŞMASI	39
5.1 Önerilen Bakım ve Yenileme Modeli	39
5.2 Önerilen Maliyet Modeli	49
5.3 Durum Çalışması	56
BÖLÜM VI SONUÇ VE TARTIŞMA	59
KAYNAKLAR	61
EKLER	68
ÖZ GEÇMİŞ	69
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. QI ve C değerlerinin sınırları	21
Çizelge 3.2. β ve η parametrelerine göre ray durumu.....	24
Çizelge 3.3. Travers kusurlar için B&Y faaliyetleri	25
Çizelge 3.4. Traversler için B&Y kararları.....	26
Çizelge 3.5. Balast ve balast altı malzemeler için referans değerler.	28
Çizelge 3.6. Balast ve balast altı malzemeler için referans değerler	29
Çizelge 5.1. İncelenen demiryolu hat bölümü hakkında bilgiler	43
Çizelge 5.2. $\lambda=0.60$ kesimi için bulanık girdi değişkenlerine ait aralık değerleri	44
Çizelge 5.3. $\lambda=0.40$ kesimi için bulanık girdi değişkenlerine ait aralık değerleri	46
Çizelge 5.4. Hat bölümü için travers B&Y işleri maliyetleri	50
Çizelge 5.5. B&Y 2. dönem $\lambda = 0.6$ kesim için bulanık maliyet değişkenlerinin aralık değerleri	50
Çizelge 5.6. B&Y 3. dönem $\lambda = 0.4$ kesim için bulanık maliyet değişkenlerinin aralık değerleri	52
Çizelge 5.7. PSI ve bulanık PSI kararlarının sahadaki vakalarla karşılaştırılması	57
Çizelge 5.8. Önerilen modelin performans karşılaştırması.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Demiryolu hat parametreleri üzerinde etkisi olan önemli bileşenler	15
Şekil 3.2. Demiryolu hattının teorik bozulması ve alınan önlemler	16
Şekil 3.3. TCDD hat bakım programı	17
Şekil 4.1. Klasik kesin küme kavramı a_1 veya a_2 'nin üyelik derecesi 0 veya 1'dir (a) ve bulanık küme teorisinde iki kümenin kesişmesine izin verilir (b).....	34
Şekil 4.2. Üçgensel bulanık fonksiyon	35
Şekil 4.3. Yamuk bulanık fonksiyon.	36
Şekil 4.4. Bulanık Küme A'da λ -kesim seviyesi aralığı	37
Şekil 5.1. Demiryolu üstyapısı için bir yönetim modeli önerisi	40
Şekil 5.2. Önerilen modelin akış şeması.....	42
Şekil 5.3. Travers yaşının (mevcut), $\lambda = 0.6$ aralığında bulanık değerleri.....	44
Şekil 5.4. Hat bölümü için toplam PSI üyelik fonksiyonları	45
Şekil 5.5. Ort. trafik yükünün $\lambda = 0.4$ aralığında bulanık değerleri.....	46
Şekil 5.6. Hat bölümü için toplam PSI üyelik fonksiyonları	48
Şekil 5.7. İncelenen hat bölümü için bulanık PSI değerinin duyarlılığı.....	49
Şekil 5.8. B&Y 2. dönem için toplam EAC üyelik fonksiyonları	52
Şekil 5.9. B&Y 3. dönem için toplam EAC üyelik fonksiyonları	54
Şekil 5.10. B&Y maliyet aşamalarının toplam bulanık EAC üyelik fonksiyonları.....	55
Şekil 5.11. PSI'nın maliyet ile ilişkisi	56
Şekil 5.12. TCDD demiryolu ağı ve vaka çalışmasının yeri	56

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
°	Derece
$\mu(s)$	Üyelik fonksiyonu
c	Kohezyon
C	Koşul indeksi,
cm	Santimetre
F (M)	Kümülatif demiryolu arızası dağılımı
k	Ray yatağı bakım katsayısı
kf	Kümülatif yaş (veya yük) ayarlama faktörü
kg/m	Kilogram/Metre
km/h	Kilometre/Saat
kN	KiloNewton
kN/m^3	KiloNewton/Metreküp
l	Belirli bir yaş için sıkıştırma işlemlerinin sayısı
L	Ortalama Trafik Yüğü
L_a	Yıllık trafik yüğü
l_m	Ortalama sıkıştırma işlemi sayısıdır
m	Metre
m^3	Metreküp
M_L	Kümülatif yük
mm	Milimetre
Mpa	Megapaskal
n	Analiz periyodu
S	Travers yaşı (mevcut)
S_a	Travers yaşı (limit)
r	İskonto oranı (%)
Λ (m)	Başarısızlık yoğunluğu fonksiyonu
β	Şekil parametresidir
η	Ölçek parametresi

ν	Poisson katsayısı
σ_H	Ortalama yüksekliğin standart sapması,
σ_I	Etkileşimin ortalama standart sapması
σ_{HLim}	Tanımlı bir hat sınıfı için konfor sınırları
σ_{ILim}	Tanımlı bir hat sınıfı için konfor sınırları
γ	Özgül ağırlık
ϕ	Kayma açısı

Kısaltmalar

Açıklama

AL	Uyarı Sınırı
BY	Bölgesel Yenileme
B&Y	Bakım ve Yenileme
DHS	Demiryolu Hat Segmenti
TL	Türk Lirası
DHS	Demiryolu Hat Segmenti
DSW	Dong, Shah ve Wong
EAC	Eşdeğer Yıllık Maliyet
E	Elastisite Modülü
IAL	Acil Eylem Limiti
IL	Müdahale Sınırı
M	Yük
MGT	Milyon Gros Ton
NPV	Net Şimdiki Değer
PSI	Mevcut Hizmet Verebilirlik İndeksi
PVF	Şimdiki Değer Faktörü
QI	Koşul İndeksi
RF	Geri Kazanım Faktörü
SB	Sadece Bakım
TL	Türk Lirası
TU	Toplam Yol Uzunluğu
Y	Yenileme
YP	Yenileme Planı

BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünya genelinde karayolu ulaştırmasının doyum noktasına ulaşması ve çevre ile ilgili duyarlılıkların artmasıyla son yıllarda demiryolu taşımacılığı daha da önem kazanmıştır. Demiryolu ulaşımı diğer ulaşım türleriyle kıyaslandığında; kaza oranları, enerji tasarrufu, ekonomiklik ve hatta insan sağlığı açısından birçok olumlu özelliğe sahiptir. Söz konusu avantajları nedeniyle; ülkeler, demiryolu yatırımlarında bir taraftan yüksek hızlı ve/veya konvansiyonel hatlar inşa ederken, diğer taraftan da mevcut hatlarda Bakım ve Yenileme (B&Y) çalışmalarını sürdürmektedir (UAB, 2018).

Demiryollarında; hız, konfor ve güvenlik kavramları son yıllarda daha çok önem kazanmıştır. Ancak hız ve kapasitenin artması, demiryolu sisteminin verimini artırmakla birlikte, bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu özelliklerin istenilen düzeyde olabilmesi için birçok faktörün yanı sıra B&Y planlaması önem kazanmaktadır. B&Y faaliyetleri, demiryolu hatlarının kalite seviyesini artırmak için belirli bir zamanlarda hatlara uygulanan iyileştirme eylemleridir. Hat geometrisi işletme yüklerinden dolayı maruz kaldığı statik ve dinamik etkilerin dışında, hava şartlarının da etkisi altındadır. Hattın ana yapısı, kullanım süreleri ve kullanım frekansına göre sınırlı bir ömre sahiptir ve bu sürenin sonunda değiştirilmesi veya yenilenmesi gerekmektedir (Lichtberger, 2011).

Demiryolu B&Y faaliyetlerinin maliyeti oldukça yüksektir. Bu maliyeti azaltmak için demiryolu hattından sorumlu uzmanların yeterli veriye sahip olması ve bu verilerle etkili B&Y planları hazırlaması gerekir (Jovanovic & Korpanec, 2000). Doğru zamanda gerçekleştirilen doğru B&Y faaliyetleri hattın toplam ömrünü uzatmakta ve maliyetleri azaltmaktadır.

Demiryolu hattının kontrol edilmesinde en önemli amaç yüksek düzeyde güvenliği sağlamak ve hat bileşenlerinden servis ömrü boyunca en iyi ekonomik verimi elde etmektir (TCDD, 2013). Demiryolu sisteminde oluşabilecek hasarları ve B&Y masraflarını minimuma indirmek, kalite ve güvenliği en iyi şekilde sağlayabilmek için demiryolu yapısının ve elemanlarının dinamik davranışlarının çok iyi bilinmesi ve gerekli

analizlerin yapılması gerekmektedir. Raylı sistemlerde hat bakım işleri genellikle üst yapıda yapılmaktadır. Demiryolunda yapılan hat bakım periyotlarının sık olması, yapılan bakım çeşitliliğinin fazla olması, bakımın kolay veya zorluk derecesi işletmeyi olumsuz yönde etkileyip, zaman ve para kaybına sebep olmakta; demiryolu sisteminin olumlu yönlerini ortadan kaldırarak cazibesinin azalmasına yol açmaktadır (TCDD, 2013). Modern demiryolu B&Y sistemi, duruma dayalı yaklaşımın yanı sıra tüm temel bileşenlerin kritiklik ve acil durum analizleri anlamına gelen teşhis kavramını gerektirmektedir. Demiryolu kuruluşları, B&Y işleri arasında bir optimizasyon gerçekleştirmenin yanı sıra, işlerin mekânsal ve zamansal tutarlılığı için bir optimizasyon gerçekleştirerek verimli B&Y yönetimi sağlayabilmektedir (Güler, 2013).

B&Y planlamasının önündeki en büyük zorluk, demiryolu hattının maruz kaldığı belirsizliklerdir. Demiryolu hattı bileşenlerinin her biri işletme sırasında birçok belirsiz faktörün etkisi altındadır. Bu nedenle belirsizlik etkisinin göz ardı edilmesi, B&Y çalışmalarının başarısını sınırlamaktadır. Etkili bir yönetim için belirsizlik etkisinin kapsamlı bir çerçevede ele alınması gerekir (Bağdatlı ve Mutlu, 2019). Bu çalışma, yukarıda belirtilen ihtiyacı karşılamak için bir demiryolu hattı B&Y yönetim yöntemi sağlamayı amaçlamıştır. Bu amaçla, belirsizlik sorununa karşı bir model önerilmiş ve önerilen model travers B&Y çalışmalarına odaklanılarak detaylandırılmıştır.

Çalışmada önerilen model ile demiryolu hattında servis ömrü boyunca ortaya çıkacak B&Y maliyetlerinin minimize edilmesi hedeflenmektedir. Bununla birlikte veri toplama için harcanan zaman kaybının minimum düzeye indirilmesi çalışmanın hedefleri arasında yer almaktadır. Tüm bu hedefler doğrultusunda, bu çalışmada demiryolu üstyapı yönetiminin uygulaması için kapsamlı bir kavramsal çerçeve önerisinde bulunulmuştur. Bununla birlikte B&Y çalışmalarını optimize edecek modelinin akış diyagramı sunulmuştur. Önerilen modelin çalışma adımlarına ait detaylı hesaplama adımları çalışma içerisinde sunulmuştur.

Problemin ana gövdesini belirsizlik ve verilere erişme zorluğu oluşturduğundan, önerilen model için bulanık mantığa dayalı bir yaklaşımın uygulanmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Bulanık yaklaşımların belirsizlik ve yetersiz verilerle mücadelede çok başarılı olduğu literatürdeki önceki çalışmalardan bilinmektedir (Bağdatlı, 2018). Bu çalışma kapsamında önerilen bulanık tabanlı karar destek modelinin, demiryolu hat

yönetimindeki belirsizlikle etkin bir şekilde mücadele ederek B&Y çalışmalarında optimum kararların alınmasını sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın organizasyonu dört ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve literatürün sınırlılığı ortaya konulmuş ve geliştirilen modelin bu alana katkısı belirtilmiştir. Üçüncü bölümde geleneksel demiryolu üstyapı yönetimi hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde çalışmanın metodolojisi açıklanmıştır. Beşinci bölümde modelleme ve senaryo çalışmalarına yer verilmiştir. Modelin geliştirilme aşamaları anlatılmış kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Geliştirilen modelin başarısını ortaya koymak için mevcut bir demiryolu hattında uygulaması sunulmuştur. Altıncı bölümde önerilen model tartışılmış, çalışmanın sınırlılığı ifade edilmiş ve gelecekteki çalışmalardan bahsedilmiştir.

BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

Son zamanlarda hızla artan demiryolu ağı nedeniyle B&Y yönetiminin önemi gündeme gelmiş ve etkili yönetim modeli geliştirilmesine dair çeşitli çalışmalar yürütülmeye başlamıştır. Demiryolu üstyapı yönetiminin geliştirilmesine ilişkin incelenen çalışmalara ait kısa özetler aşağıda verilmiştir.

Crainic (1988) yaptığı çalışmada demiryolu yük taşımacılığının ekonomik açıdan verimli olması için demiryolu kalitesinin korunmasının gerekliliğini savunmuştur. Kullanılan yüksek hızlar, taşınan yüklerin boyutlarındaki artış gibi faktörler ile demiryolu hatlarının uyum içinde olması gerektiğini ifade etmiştir. Demiryolu taşımacılığında planlamalar ve bu planlamalarda ortaya çıkan sorunları gözlemlemiştir. Bu sorunları ele alan temel modelleri incelemiştir. Kapsamlı bir stratejik planlama modeli oluşturmayı amaçlamıştır. Bu planlamada kullanılabilecek optimizasyon modellerine dayanan genel bir çerçeve sunmuştur.

Grimes (1995) demiryolu hattının güvenilir bir şekilde işletmeye devam edebilmesinde B&Y faaliyetlerinin son derece önemli olduğunu vurgulamıştır. Hat B&Y faaliyetleri için maliyet tabanlı bir çalışma yapmıştır. Genetik algoritma ve genetik programlama yöntemlerini kullanarak bakım modelleri geliştirmiştir. Elde ettiği modelleri deterministik yöntemler ile karşılaştırmıştır. Genetik algoritmanın küçük bir bölümde başarılı olduğu ama genel anlamda başarısız olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Ferreira ve Higgins (1998) yaptıkları çalışmada demiryolu hatlarının bakımının bir plana göre yapılmasının faydayı üst düzeye çıkardığını belirtmişlerdir. İnceledikleri bir operasyonda bakım maliyetinin toplam tren işletme maliyetinin %25-35'ini oluşturduğunu iddia etmişlerdir. Bu nedenle planlama fonksiyonunun etkin ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi gerektiğinin üzerinde durmuşlardır. Demiryolu hat bakımında zamanlama problemini tam sayı programlama modeli olarak formülize etmişlerdir. Önerdikleri modeli Avustralya'da 89 km'lik bir hatta uygulamışlardır. Modelin esas olarak demiryolu bakım uzmanları ve tren planlamacıları tarafından kullanılabildiğini

açıklamışlardır. Böylece tren iptalleri ve ani gelişen olaylar ışığında bir bakım planlaması yapılabileceğini göstermişlerdir.

Miwa ve Oyama (2004) demiryolu raylarındaki düzensizliklerin tespiti ve iyileştirme çalışmaları üzerinde durmuşlardır. Demiryolu hat bileşeninin bozulmasını modellemek için tamsayı doğrusal programlama modeli kullanmışlardır. Bu programlama modeli ile yüksek seyir kalitesi ve güvenlik için optimum bir bakım stratejisi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirdikleri model Japon demiryolu ağında uygulanmıştır. Modelin pratik, etkili ve kullanışlı olduğunu iddia etmişlerdir.

Budai vd. (2006) demiryolunda beklenmedik problemleri minimize etmek için önleyici bakımın gerekliliğinden bahsetmişlerdir. Maliyetlerin ve problemlerin azaltılması için rutin faaliyetlerin ve önleyici planların birlikte planlanması gerektiğini vurgulayarak, önleyici bakımların planlanması için matematiksel programlama formülasyonu sunmuşlardır. Bununla birlikte sezgisel yöntemler üzerinde durmuşlardır. Önerdikleri modelin performansını değerlendirmek için rastgele oluşturulan örnekleri uygun çözümlerle karşılaştırmışlardır.

Grimes ve Barkan (2006) üst düzey finansal verileri kullanarak yenileme temelli bakım planlarının maliyet araştırmasını yapmışlardır. Sonuçlardan elde ettikleri veriler ışığında, belirli bir süre gözleme vakit ayıran bakım faaliyetlerinin, yenilemeye ağırlık veren faaliyetlere göre maliyetinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Nihai olarak demiryollarında toplam sermaye azaltımı için gözlem masraflarının kısılmasının yenileme masraflarını artıracakını savunmuşlardır. Sözde tasarrufun sebep olacağı yenileme maliyetinin geçici düşüşleri dengelediğini göstermişlerdir.

Bocciolone vd. (2007), yapmış oldukları çalışmada demiryolu üstyapı yönetiminde kritik sorunlardan birinin hat durumunun güvenilir bir şekilde bilinmesini gerektiren hat bakım faaliyeti olduğu ve böylece sadece gerekli olduğunda uygun bir müdahalenin yapılabileceğini belirtmişlerdir. Bojiler üzerine yerleştirilen ivmeölçerler ile demiryolu bileşenlerinin durumunu tespit etmek için yeni yöntemler geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu sayede yalnızca trafik durduğunda çalışabilen gözlem araçlarının yerine sürekli ve daha büyük miktarda veri toplanması sağlanmıştır. Fizibilite çalışmaları için güvenilir bir teknik geliştirdiklerini iddia etmişlerdir.

Rausand ve Vatn (2008), yapmış oldukları çalışmalarında güvenlik, hız ve ulaşılabilirlikle ilgili maliyetleri en aza indirerek bakım aralıklarını optimize etmek için bir güvenilirlik merkezli bakım prosedürü sunan planlama yönteminin üzerinde durmuşlardır. Bu yöntemin etkili bir önleyici bakım tanımlamak için sistematik bir yaklaşım olduğunu savunmuşlardır. Bu sürecin en büyük avantajı en uygun önleyici bakım türünü belirlemek için yapılandırılmış ve izlenebilir bir yaklaşım olmasıdır. Bu, arıza modlarının ve arıza nedenlerinin ayrıntılı bir analizi ile elde edileceğini belirtmişlerdir. Güvenilirlik merkezli bakımın temel amacı önleyici bakımın belirlenmesi olmasına rağmen, analizden elde edilen sonuçlar düzeltici bakım stratejileri, yedek parça optimizasyonu vb. ilgili alanlarda da kullanılabilir olduğunu söylemektedirler. Ek olarak, güvenilirlik merkezli bakımın genel sistem güvenliği yönetiminde de önemli bir role sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Patra vd. (2009) ömür döngü maliyetinin demiryolu bileşenlerinin bakımı için karar vermede etkili bir yaklaşım olduğunu açıklamışlardır. Ömür döngü maliyet tahminindeki belirsizliklerin parametrelerin istatistiksel özelliklerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada Monte Carlo simülasyonu ile ömür döngü maliyetinin kombinasyonu bir metodoloji sunmuşlardır. Önerdikleri metodolojiyi İsveç ulusal demiryolu idaresi ile test ettiklerini belirtmişlerdir. Makale ayrıca hat bileşenleri için geliştirilmiş bakım maliyeti modellerini de içermektedir.

Güler (2012) yaptığı çalışmada demiryolu bileşenlerini analiz etmiştir. Gerekli B&Y için uzmanlara yardım edecek bir karar destek sistemi geliştirmeyi amaçlamıştır. Karar destek sistemini geliştirmek için kapsamlı bir literatür taraması, ulusal çapta bir anket ve yol bakım uzmanlarıyla görüşmeler yaptığı görülmektedir. B&Y için en uygun zaman konusunda karar vermelerine yardımcı olacak sistem geliştirmiştir. Sistemin, geliştirilen karar kuralları ve zengin veri tabanı ile analiz yaparak başarılı sonuçlar ortaya koyduğu belirtilmiştir. Karar kuralları temelinde analizler: birinci aşama, ikinci aşama, tutarlılık aşaması, optimizasyon aşaması ve değerlendirme aşaması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında planlı B&Y yönetiminin geliştirilmesinde bilgisayar ve gelişmiş ölçüm sistemlerinin başarısını savunmuştur.

Quiroga ve Schnieder (2012) yaptıkları çalışmada demiryolu hat bakım faaliyetlerinin optimizasyonu ve planlaması için güvenilir bir hat bozulma simülasyonuna ihtiyaç olduğunu ifade etmişlerdir. Simülasyonun oluşturulması için hat geometrisinin bozulma

davranışını ve bakım faaliyetlerinin etkilerini açıklayan istatistiksel bir model gerekliliğinin önemini vurgulamışlardır. Bu ihtiyaçlarını Fransız demiryolu şirketinin 20 yıldan fazla süredir yüksek hızlı demiryolu ağının geometrik özelliklerini periyodik olarak ölçerek kaydettiği veri akışından sağlamışlardır. Elde edilen veriler ile bahsedilen simülasyonu elde etmek için bir sistem tanımlama yöntemi sunmuşlardır. Ayrıca sunulan modeli hat bozulma sürecini etkileyen faktörlerin çeşitliliğinin etkisini analiz etmek için genişletmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemi Fransız yüksek hızlı (TVG) hattına uygulayarak doğrulamışlardır.

Vale vd. (2012) demiryolu mühendisliği alanında, önleyici bakım faaliyetlerinin planlanmasının önemi üzerinde durmuşlardır. Başarılı yapılmış bir planlama optimizasyonu demiryolu hat bileşenlerinin, ömür döngüsü boyunca geometrik kalitesinin korunmasını hususunda maliyetlerin azalacağını belirtmişlerdir. Çalışmalarında önleyici bakım olarak balastlı hatlardaki buraj işlemlerini optimize etmek için tasarlanmış bir model sunmuşlardır. Tamsayı doğrusal program olarak formüle edilen model, hat bakımının optimizasyonunda yeni bir yaklaşım olduğunu vurgulamışlardır. Önerilen metodolojinin etkisini göstermek amacıyla Portekiz Kuzey Demiryolu Hattının iki bölümü ile yapılan hesaplamaları dahil etmişlerdir.

Zhang vd. (2013) demiryolu ağ sisteminin güvenliğini ve sürekliliğini sağlamak için B&Y faaliyetlerinin gerekliliğinden bahsetmişlerdir. Plansız bakım faaliyetlerinin daha maliyetli olduğunu belirterek hizmet kalitesini düşürdüğünü açıklamışlardır. Hattın sürekli kontrol altında tutularak parça durumunun izlenmesi ve kabul edilebilir sınır değerler üzerindeki bozulmalarda, daha büyük arıza oluşmadan bakım planlamasının yapılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Hat bozulma sürecindeki belirsizlikleri değerlendirerek maliyetleri azaltan bir bakım planlaması oluşturmuşlardır. Bozulma sürecinin belirsizlikleri, hizmetin güvenliği, bakım maliyeti ve ulaşım maliyeti göz önüne alınarak bölgesel bir demiryolu ağının bakım planlaması için bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Oluşturulan modelde genetik algoritma yaklaşımını kullanmışlardır. Modelin başarısını ortaya koymak için bir vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir.

Caetano ve Teixeira (2013) demiryolu hattında balast ve travers yenileme faaliyetlerini planlamak için çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Modelin karar aşamasında, sadece demiryolu hattının ömür döngü maliyetlerini değil aynı zamanda

müdahaleleri gerçekleştirmek için hattın trafiğe kapatılma süresini de dikkate aldığını belirtmişlerdir. B&Y çalışmalarının neden olduğu demiryolu hattı erişilmezliği ve demiryolu bileşenlerinin ömür döngü maliyetini en aza indirdiğini açıklamışlardır. Ayrıca, bakım stratejisini rasyonelize etmek için, model; zaman ve mekânda demiryolu hattı B&Y faaliyetlerinin kombinasyonunu değerlendiren çok bileşenli bir formülasyonu ele almaktadır. Son olarak bir vaka çalışmasında uygulayarak, sonuçları tartışmışlardır. Sonuçlar, karar verme sürecini sağlıklı bir şekilde yürütebilmek için bu basit, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımını kullanmanın önemini vurgulamışlardır.

Caetano ve Teixeira (2015) demiryollarında ilk yapım maliyeti ile birlikte B&Y maliyetlerinin de yüksek olduğunu açıklamışlardır. Bu durumun demiryolu B&Y kararında karar destek sistemlerinin önemini artırdığına dikkat çekmişlerdir. Çalışmalarında balast travers ve ray için tamsayılı doğrusal programlama yöntemiyle bir optimizasyon modeli sunmuşlardır. Bu model ile uygun hat bakım kararı belirleyerek ömür döngü maliyetini azaltmayı amaçlamışlardır. Model Portekiz Lizbon – Porto hattında uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda demiryolu bileşenlerinin gruplandırılarak uygun zaman aralığında B&Y yapılması halinde maliyette bir azalma olduğunu ifade etmişlerdir. Buna ek olarak yıllık bütçe kısıtlamalarının demiryolu raylarının ömür döngü maliyetleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini ifade etmişlerdir.

Jovanoviç ve Guler (2015), demiryolu altyapı ağlarının B&Y maliyetlerinin yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Demiryolu altyapı bakımı ile ilgili verilerin yönetimi için entegre bir yazılım platformu olan demiryolu varlık yönetim sistemini sunmuşlardır. Önerilen sistemin, demiryolları altyapısı ile ilgili verilerin yönetimini, duruma dayalı ve öngörücü B&Y mümkün kılacak şekilde tasarlandığı savunulmuştur. Demiryolu hattının geçmiş davranışlarını gözlemleyip gelecek davranışla ilişkilendiren bozulma modellerine ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Bozulma modellerini demiryolu bakım yönetim sistemine dahil edilmesi, davranışın daha gerçekçi ve uzun vadeli simülasyonlarının gerçekleştirilmesine izin verdiğini açıklamışlardır. Günümüz koşullarında, uygun maliyetli bir demiryolu altyapısı yalnızca geliştirilen stratejinin ana hedefleri olan; performansın düzenli olarak izlenmesiyle, güvenilir tahmin, planlama ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilebileceğini savunmuşlardır.

Andersson vd. (2016) demiryolu raylarının, yenileme maliyetleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Artan trafik hacminin, hattın yenilenme döngüsü üzerindeki etkisini inceleyerek ilgili marjinal maliyetleri hesaplamayı amaçlamışlardır. İsveç ana demiryolu ağına gözlem için 1300 sensör yerleştirilerek veriler elde etmişlerdir. Elde ettikleri veriler yardımıyla toplam tonajın yanı sıra yük ve yolcu tonajları için ayrı ayrı bozulma modellerini Weibull regresyonu ile tahmin etmişlerdir.

Güler (2016) yaptığı çalışmada demiryolu hatlarının B&Y çalışmalarının genetik algoritmalar ile optimizasyonu için yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Demiryolunda B&Y faaliyetlerini optimize etmek için karar destek sistemleri ve genetik algoritma kullanmıştır. Bu çalışma kapsamında düzeltici bakım faaliyetlerine başvurmadan, planlı B&Y yönetim sistemlerinin geliştirilebileceğini ve başarıyla kullanılabilirliğini göstermiştir.

Yaman vd. (2017) Demiryollarında meydana gelen büyük çaplı yenilemelerin ulaşım problemlerine yol açtığını belirtmiştir ve dinamik yükler ile üretim hatalarından kaynaklanan deformasyonlardan bahsetmişlerdir. Bu deformasyonların erken tespitinin ve bakımının çok önemli olduğunu vurgulayarak erken arıza tespiti için bir öneride bulunmuşlardır. Rayları demiryolu aracına sabitlenmiş kameralardan izlemeyi önermişlerdir. Ray yüzeyini görüntü işleme teknikleri kullanarak tespit etmişler ve bu tekniklerin temel prensibinin bulanık mantık olduğu belirtmişlerdir.

Mieloszyk vd. (2018) çalışmalarında dinamik yükler altında balastların kırılması ile traverslerde meydana gelen oturma probleminden bahsetmişler ve bu problemin ray stabilitesi üzerindeki etkisini açıklamışlardır. Balast kalınlığı, kirlenme derecesi, yoğunluğu ve traverslerin oturması gibi parametrelerin ölçüm güçlüğüne vurgulamışlardır. Bu güçlükte başa çıkmak için bulanık yaklaşım ile çalışmalarına devam edeceklerini belirtmişlerdir. Bu parametreleri belirlemek için bulanık kümeler ve dönüşüm fonksiyonları kullanmışlardır. Demiryolu parametreleri için sebep sonuç ilişkileri kurarak bulanık işlemler ile analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Hattın, altındaki toprak zeminle etkileşimini ve güvenliği artırmak için hattın buraj çalışmasında bu konseptin kullanılmasının önemli olduğunu açıklamışlardır.

Sharma vd. (2018) demiryolu hattının parça geometrisinin incelenmesi ve bakımı için veriye dayalı politika geliştirmişlerdir. Hem önleyici bakım hem de düzeltici bakım için hatta çeşitli geometrik ölçümleri içeren 33 aylık bir denetim ile veri toplamışlardır. İlk olarak, oluşturdukları model ile verileri muayene çalışmasının zaman aralığına göre ayırmışlar ve her bir parça bölümü için toplam parça kalite endeksini hesaplamışlardır. Algoritmik çalışma ile parçanın fiziki kusur oluşma olasılığını tahmin etmişlerdir. Daha sonra, toplu parça bozulmasını modellemek için bir Markov zinciri oluşturarak kusurları Bernoulli işlemi ile modellemişlerdir. Son olarak, parça bakım karar vermesi için bir Markov karar süreci geliştirmişlerdir ve bir değer yineleme algoritması kullanılarak optimize edilmişlerdir. Markov zinciri, Monte Carlo simülasyonu kullanan mevcut bakım politikası ile karşılaştırıldığında, geliştirilen bakım politikası, her parça için toplam bakım maliyetlerinde yaklaşık %10 tasarruf sağladığı ortaya konulmuştur.

Dao vd. (2019) yaptıkları çalışmada gelişmiş demiryolu sistemlerinde altyapı yenilenmesinin öneminden bahsetmişlerdir. Bir demiryolu ağı için yenileme faaliyetlerinin planlanmasının kritik bir görev olduğunu, bu faaliyetlerin genellikle önemli miktarda zaman ve maliyet gerektirdiğini belirtmişlerdir. Makalelerinde, bir demiryolu ağının çeşitli yerlerinde birden fazla demiryolu altyapı bileşeninin yenilenmesindeki ekonomik ve teknolojik yönleri, fırsatları ve kısıtlamaları tartışmaktadırlar. Farklı hatların iç içe olduğu zorlu bir durumu ele alarak modellemişler ve B&Y faaliyetlerinde bu durumu değerlendirmişlerdir. Toplam yenileme maliyeti ve işletim sisteminin durmasından kaynaklı mali hasarı en aza indirmek için genel ağ kapsamında planlama problemine yönelik matematiksel bir formülasyon sunmuşlardır. Sorunu çözmek için üçlü önceliklendirme kuralına dayanan bir yöntem ve farklı demiryolu altyapı bileşenleri için ayrılan yenileme sürelerinin optimal bir şekilde paylaşılması önerilmektedir. Bu yöntem, Kuzey Hollanda'daki bölgesel demiryolu ağına uygulanmış ve mevcut planlama uygulamasına kıyasla toplam maliyetlerin %13'üne kadar tasarruf sağladığı paylaşılmıştır.

Sousa vd. (2019), yaptıkları çalışmada çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Model, operasyonel kısıtlamalara uyarak üç hedefi optimize etmeyi amaçlamaktadır: yatırımı dengelemek, toplam maliyeti en aza indirmek ve tekrar çalışmaya başlama süresini en aza indirmektir. Modeli, hedefleri ve kısıtlamaları belirleyerek demiryolu altyapısı üzerindeki yönetim uygulamalarını yansıtan bir altyapı şirketinin vaka çalışmasına

dayandırmışlardır. Araştırmacılar, yatırım seviyelemesinin diğer hedefleri büyük ölçüde etkilediğini ve toplam maliyet dalgalanmalarının altyapının durumuna bağlı olarak değişebileceğini göstermektedirler.

Nielsen vd. (2020), yaptıkları çalışmada hat ölçüm araçlarının kayıtlarına dayanarak dikey geometrik bozulmayı 1 – 25 metre aralığında dalga boyları için analiz etmişlerdir. Paralel olarak hat boyunca dikey sertliği zayıf olan ray bölümlerinin tespit edilmesine ilişkin bir yöntem tarif etmişlerdir. Analiz verilerine dayanarak bozulma oranlarını belirlemişler ve burajın hat geometrisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Altyapı sertliği ve bozulma arasındaki korelasyonu araştırmışlardır. Altyapının problemlili olan kesimlerde bu sorunun çok sık tekrarlandığını görmüşlerdir ve bu kesimlerde sürekli bakımın ekonomik olarak uygun olmadığını, başka bir yöntem uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Buna öneri olarak balast ve balast altı katmanlarının yükseltilmesini bir seçenek olarak sunmuşlardır. Sonuç olarak ray dikey sertliğinin ölçülmesinin, daha sağlıklı bir demiryolu bakım planlaması için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır.

Neuhold vd. (2020) ulaştırma mühendislerinin projelerde artan maliyet baskısı ve bütçe kısıtlamaları gibi zorluklarla karşı karşıya kaldığına değinmişlerdir. Uzmanların, sınırlı kaynaklarla sürdürülebilir ve verimli bir şekilde yatırım yapma çabalarında bahsetmişlerdir. Bu durumun B&Y planlamalarının önemini artırdığını belirtmişlerdir. B&Y planlamasıyla hem bileşene özgü durum değerlendirmesi hem de önleyici bakımı sağlayan bir araç gerektiğini açıklamışlardır. Çalışmalarında demiryolu rayları için veri analizlerine dayanan bir model sunmuşlardır. Bu model ile gelecekteki parça kalitesini zaman analizi ile tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Model ile her bir bileşen için teknik olarak gerekli bakım eylemlerini üretmişlerdir. Bir sonraki adımda, devam eden parça bakımının veya tam parça yenilemesinin en ekonomik çözüm olup olmadığını belirlemek için yıllık izleme yoluyla iş değerlendirmeleri yapmışlardır. Bu metodolojinin aynı zamanda yeniden yatırım için ideal zamanın ihmal edilmesinden kaynaklanan ekonomik hasarın hesaplanmasını da sağladığını açıklamışlardır. Bu ekonomik zarar temelinde, bütçelerin yetersiz olması durumunda projeleri önceliğe göre sıralamak ve mevcut tüm kaynakların mümkün olan en makul şekilde yatırılmasını sağlamanın mümkün olduğunu göstermişlerdir. Buna ek olarak, bu tür analizlerin, demiryolu rayının belirli bir bozulma

seviyesine ulaşıldığında, rayın yenilenmesinin, ömür döngüsü maliyetlerine göre devam eden bakımdan daha ekonomik olduğunu açıkça göstermişlerdir.

Sedghi (2020) optimize edilmiş planlama yoluyla bakım verimliliğinin artırılması ve yüksek miktarda maliyet tasarrufu sağlandığını savunmuştur. Ayrıca geç bakım müdahalesinin güvenliği tehdit ettiğini ve ciddi kazalara sebep olabileceğini belirtmiştir. Altyapı sisteminin kullanılabilirliğini sağlamak ve artan kapasite talebini karşılamak için etkili bir bakım yönetim sistemi gerekliliğini vurgulamıştır. Son zamanlardaki hızlı teknolojik devrim ve sensörlerin, buna bağlı cihazların artan dağıtımı, demiryolu ağındaki bakım stratejisinin etkinliğini artırmak için yeni fırsatlar meydana getirdiğini belirtmiştir. Demiryolu altyapısının bakımının planlanması ve planlanma için bilgi ve yöntemleri genişletmeyi amaçlamıştır. Pratik kullanıma sunulabilecek ve demiryolu sisteminin verimliliğini artıracak tahmini koşullara dayalı bakımın planlanması için niceliksel yaklaşımlar bulmayı vadetmiştir. Bakım planlama ve zamanlama verimliliğini artırmak için yeni bir veri odaklı çok seviyeli karar verme erevesi geliştirilmiştir. Önerilen ereve, mevcut durum ölçüm verilerine dayanan pratik bir bozulma tahmin modeli sağlayarak bakım için parça segmentlerinin seçimini desteklemeyi amaçlamaktadır. ereve, tahmin edilen değeri kullanmak yerine bir bakım sınırını aşma olasılığını kullanarak gelecekteki tahminlerin belirsizliğini dikkate almaktadır. Ayrıca, operasyonel planlama düzeyinde maliyet optimizasyonu ve gruplama algoritmalarının kullanılmasının etkisini gözlemlemek için hem doğrudan hem de dolaylı önleyici ve düzeltici maliyetleri içerecek şekilde kapsamlı bir toplam bakım maliyeti formülasyonu geliştirilmiştir. Önerilen çerçevenin performansı, Boden ve Lule arasındaki hattın bir parça bölümünden elde edilen verilere dayanan bir vaka çalışması ile değerlendirmiştir. Sonuçlar, nerilen yaklaşımın hem optimal hem de gruplama planlarında maliyet tasarrufuna yol açabileceğini göstermektedir. Bu ereve, parça geometrisi ölçümlerine dayalı otomatik bakım planlaması ve planlamasında yararlı bir karar destek aracı olabileceğini savunmuştur.

Verma vd. (2020) Hint Demiryollarında demiryolu raylarının B&Y operasyonu için karar vermeyi kolaylaştıran uzman bir sistem geliştirmişlerdir. Demiryolu hattı operasyonlarını anlamak için seçilen üç alanda (raylar, traversler ve balast) uzmanlarla mülakatlar yaptıktan sonra bir dizi kural formüle etmişlerdir. Kurallar kümesine dayanarak, karar

verme için bir arayüz sistemi tasarlanmışlardır. Arayüz sistemiyle uzmanların karar verme aşamasında onlara güvenilir bir yol sunduklarını iddia etmişlerdir.

Literatür incelendiğinde, demiryolu hattı B&Y faaliyetlerinin ve planmasının modellenmesine yönelik birçok çalışma olduğu görülmektedir. Özellikle son yıllarda demiryolu üstyapı yönetiminde yeni nesil yöntemler başarıyla uygulanmaktadır. Literatüre yansıyan bu durum, etkili bir demiryolu üstyapı yönetiminin sağlanması için önemli bir başarıdır. Bununla birlikte, literatürün sınırlılığı hakkında şunlar söylenebilir: Belirsizlik B&Y faaliyetlerinin doğasında yer almakta ve planlama sürecini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle belirsizliğin minimize edilmesi demiryolu üstyapı B&Y yönetimi için en önemli konulardan biri olduğundan, B&Y modellemesinde belirsizlik etkisinin de dikkate alınması gerekmektedir. Böylece doğruya daha yakın B&Y planlamaları temin edilecektir. Ancak, literatürde belirsizlik etkisinin dikkate alındığı modelleme çalışmaları sınırlıdır. Belirsizliği ele almada başarılı ve etkili alternatif yaklaşım ve modellerin ortaya çıkması, literatüre ve pratik uygulamalara önemli bir katkı sağlayacaktır. Literatürde bulunan bu boşluğa katkı sağlamak için bu çalışmada belirsizlik etkisini dikkate alan bir model önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntemler yardımı ile demiryolu üstyapı B&Y yönetiminde belirsizlikle nasıl başa çıkılacağı detaylı bir şekilde anlatılarak literatüre ve pratikteki uygulamalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

BÖLÜM III

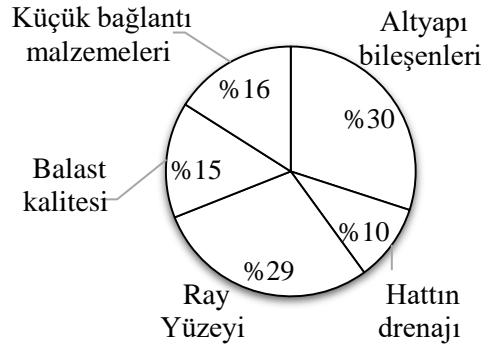
DEMİRYOLU ÜSTYAPI BAKIM VE YENİLEME FAALİYETLERİ

Demiryolu hatlarında işletme sisteminin güvenliğini sağlayabilmek amacıyla belirli dönemlerde veya gerekli durumlarda B&Y çalışmalarının yapılması çok önemlidir. İşletme sistemine uygun, uzun vadede emniyeti sağlayacak ve düşük maliyetli bakımları gerçekleştirmek için gelişmiş, güvenilir sistemlerin kurulması gereklidir. Bu amaçları gerçekleştirebilmek için hat kontrollerinde ve bakım çalışmalarında standartlar yüksek düzeyde tutulmalı ve güvenilir uygulamalar yapılmalıdır. Demiryolu hattında B&Y işlerinde yapılan bir ihmal büyük kazalara sebebiyet verebilir. B&Y planlamalarının takibi düzenli bir şekilde işletilmezse hattı oluşturan bileşenlerin verimi azalır. Demiryolu hattına yapılacak B&Y faaliyetleri ile ilgili temel ilke, demiryolu hattında meydana gelen bozulmaların zaman içinde gözlenmesi ve saptanması temeline dayanmaktadır. Hattı oluşturan bileşenler ve bunların durumlarıyla demiryolu hattının kalitesi ifade edilebilir. Demiryolu hattının tüm parçaları ve hattın genel durumu B&Y süreçlerinde birbiriyle yakın ilişki içindedirler. Bu bileşenlerden herhangi birinin geometrik kalitesi kötü durumdaysa diğerinin de bozulmasına sebep olacaktır. Yani hattın konumunu istenilen seviyede tutabilmek için tüm bileşenlerin istenilen kalitede olması gerekir.

Demiryolu hatlarında; hava koşulları, çeken çekilen araçların durumu ve trafik yükleri yanında ekartman, fleş, nivelman gibi hat parametreleri üzerinde etkisi olan önemli sistem altyapısı bileşenleri;

- altyapı,
- ray yüzey durumu,
- hattı oluşturan bileşenler (küçük bağlantı malzemeleri),
- balast kalitesi,
- hattın drenajı şeklindedir.

Bu bileşenlerin etkileri ve ağırlıkları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Her bir faktör diğerini etkilediği için, genel hat sistemi bir bütün olarak değerlendirilmelidir (TCDD, 2013).

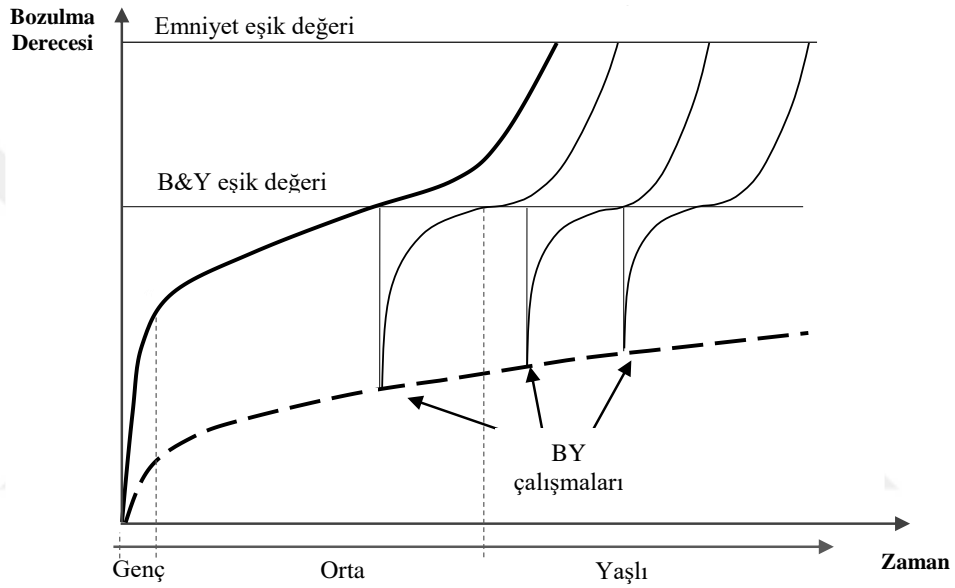


Şekil 3.1. Demiryolu hat parametreleri üzerinde etkisi olan önemli bileşenler (TCDD, 2013)

Demiryolu kalitesinin korunmasında en önemli unsur hat geometrisi kusurlarının sürekli olarak gözlem altında tutularak bakım faaliyetlerinin zamanında yapılmasıdır. Demiryolu hattının ilk işletmeye alınmasından itibaren üstyapı performansına ilişkin değişim grafiği Şekil 3.2'deki gibidir. Şekilde görülen birinci aşama, demiryolu hattının işletmeye açılmasının ilk 2–3 yıl içerisinde lineer olarak geometrik değişimlerdir. İkinci aşamada, birinci aşamanın tamamlanmasından sonraki 10 yıl içinde fark edilebilir geometrik değişiklikler olmaksızın durağan bir durum sergiler. Üçüncü aşamada, ikinci aşamanın tamamlanmasından sonraki yıllarda meydana gelen malzeme aşınmaları nedeniyle geometrik değişimler hızla arttığı görülmektedir. (TCDD, 2013; Hidirov, 2019).

Demiryolu B&Y planlamaları oluşturulurken demiryolu hattının yaşı dikkate alınmaktadır. Oluşturulan modellemelerde genelde demiryolu hattı “genç”, “orta” ve “yaşlı” diye yaş dönemlerine ayrılmaktadır. Bu dönemlerin her birinin devamlılığı ve ömrü hattın özelliklerine bağlı olarak değişir. Ayrıca demiryolu hattının etkisi altında olduğu yükler, B&Y faaliyetlerinin sayısı ve niteliği bu gruplar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Demiryolu hattına yapılacak B&Y faaliyetlerinde en önemli noktalardan biri, demiryolu hattının sürekli gözlenmesi ve meydana gelen/gelebilecek problemlerin saptanmasıdır. Şekil 3.2'de gösterilen kalın siyah eğrisel çizgi, herhangi bir bakım yapılmayan hatta ait kuramsal bozulmayı göstermektedir. Aynı zamanda bu eğri üzerinde hattın üç yaş dönemi gözlemlenebilir. “Genç” yaş dönemi olarak ifade edilen ilk kısım, demiryolu hattının ana yenilemesi veya ilk inşasından hemen sonra aniden görülen ve hattın ilk kurulumunun sebep olduğu hızlı bozulmaları karakterize eder. Bu dönemin tahmin edilmesi zor olduğu gibi her demiryolu hat kesiminde önemli derecede farklılık gösterir. Bu sebeple bu dönemin modellendirilmesi oldukça zordur. Bu dönemin çok kısa

olması, ihmal edilen sonuçlarında az olmasını sağlar. “Orta” yaş döneminde yeterince dengeye ulaşan demiryolu hattı lineer bir bozulma gösterir. Demiryolu hatlarının ekonomik ömürleri süresince sıkça görülen bu dönemde modeller kurularak analizler yapmak mümkündür. Bozulma değeri B&Y eşik değerine ulaştığında demiryolu hattına B&Y çalışmaları yapılır. Bozulmaların emniyet eşik değerini aşmasına asla izin verilmez. “Yaşlı” dönem ise demiryolu hatlarının ömürlerinin en son bölümünde görülür ve çok hızlı bir bozulmayla karakterize edilir. Bu dönemde bozulma üstel bir şekil gösterir (Güler, 2005).



Şekil 3.2. Demiryolu hattının teorik bozulması ve alınan önlemler (Güler, 2005)

Demiryolu hattında B&Y faaliyetleri ile ilgili bir modelleme yapılacağı zaman, demiryolu hattının bozulmasının lineer olduğu dönem içindeki ölçülen veriler analiz edilmelidir. Demiryolu hattının bozulma derecesini gösteren bu ölçülmüş değerlerin analiz edilmesiyle bunların dağılımına uygun hesap yöntemleri ve enterpolasyonlarla, demiryolu hattının bozulma davranışı tespit edilmeye çalışılır. Demiryolu hattında B&Y faaliyetleri ile ilgili eşik belirlenmesinden sonra, hattın bozulmasını gösteren doğrunun B&Y eşik değerine varacağı zaman (veya yük) hesaplanır. Hattın bozulmasını gösteren doğrunun eşik değerine ulaştığı kesimine uygun B&Y faaliyeti yapılarak o kesimin kalite düzeyinin artması sağlanır. Uygun B&Y faaliyetleriyle hattın kalitesi istenilen düzeye getirildikten sonra, hattın bozulma süreci tekrar başlar. Demiryolu hattının yaşlanmasıyla birlikte, zamanla bazı durumlarda değişmektedir. Demiryolu hattının yaşlanmasıyla değişen durumlardan biri bozulma oranıdır diğeri ise yapılan B&Y faaliyetlerinin

performansdır. Bozulma oranları zamanla değişir. Zaman ilerledikçe B&Y faaliyetlerinin tekrarlanma süresi kısaltmaya başlar. Sonunda B&Y faaliyetlerinin frekansı çok fazla olur. B&Y faaliyetlerine devam etmek ekonomik ve teknik yönden mantıklı olmaz. Bu sebeple demiryolu hattının yeniden yapılması gerekir (Güler vd., 2004; Güler, 2005; Hidirov, 2019).

Eğrinin düz bir şekilde seyir etmesi bakım aralıklarının uzaması ve bakım maliyetlerinin azalması anlamına gelmektedir. Yoldaki bozulma derecesi aşağıdaki parametreler ile değerlendirilecek olursa;

- Daha büyük atalet momentli raylar bozulmaları yavaşlatmaktadır.
- Travers aralıklarındaki azalmaların olumlu etkisi bulunmaktadır.
- Dar dönüş çaplı kurpların olumsuz etkileri bulunmaktadır.
- Homojen şekilde teşkil edilmiş altyapı ve balast tabakaları yolun dayanıklılığında çok önemli birer faktördür.
- Düşey elastisitedeki dalgalanmalar negatif etki yapmaktadır. (Lichtberger, 2011).
- Yola etki eden kuvvetler belirleyici faktördür. Maksimum dinamik kuvvet yolda orantısız hasarlara sebep olmakta ve bu da yolun bozulma oranını büyük ölçüde etkilemektedir (Eisenmann, 1996).
- Buraj sonrası yapılan taşlama kombinasyonu ise bu etkileri önemli ölçekte azaltabilmektedir. Bu taşlama yöntemi ile dinamik kuvvetlerin azaltılması olarak açıklanabilir.
- Balastın köşeli yapısının oturmalarda önemli bir etkisi bulunmaktadır. Balastın kirlenmesi balast tabakası içerisindeki boşlukların dolmasına ve drenaj problemlerine sebep olmakta bu da yol geometrisinin kalitesinde kötüleşmelere sebebiyet vermektedir. (Bilgiç vd., 2017)



Şekil 3.3. TCDD hat bakım programı (Bilgiç vd., 2017; TCDD, 2013)

TCDD hat bakım programına göre B&Y faaliyetleri dört başlık altında yapılmaktadır. Bakım faaliyetleri Şekil 3.3’de yer alan şemadaki sıra içerisinde yürütülmektedir.

Demiryolu hatlarında yapılan gözlem ve ölçüm faaliyetleri B&Y zamanını belirleyen en önemli çalışmalardır. Güvenliği yüksek düzeyde sağlayabilmek ve hattı oluşturan tüm bileşenlerden yaşam süreleri boyunca yüksek derecede ekonomik verim alabilmek amacıyla hattın kontrolünde süreklilik sağlanması gerekmektedir. Emniyet amacıyla yapılan kontroller, kazalara sebep olabilecek (deray gibi) trenlerin karşılaşılabileceği veya güvenlikle ilgili durumları tehlikeye sokabilecek kusurların olup olmadığını tespit amacıyla yapılır. Ölçümlerdeki diğer amaç, kusurların önlenmesi için sistemin bozulma derecesini takip etmektir. Demiryolu hatlarının kontrol edilmesi sistemin yapısal özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Maksimum tren hızı, trafik tipi ve yoğunluğu, altyapı bileşenlerinin teknik standartları, fonksiyonel güvenlik düzeyi gibi parametrelere göre kontrol periyotları değişmektedir.

Yürüyerek denetimin gerçekleştirilmesi esnasında göz ile geniş kapsamlı bir değerlendirme yapılmalıdır. Yürüyerek hat denetimi sırasında, düzensizlikler ve şekil bozuklukları gözle değerlendirilir. Turne sırasında; ray yüzey kusurları, balastın geometrik yapısı, balast şev eğimi, travers seviyesi ile balast seviyesi arası mesafe, yarma ve dolmalarda olağan dışı değişiklikler, köprü-tünel ve diğer sanat yapılarında olağan dışı gözle görünür değişiklikler gibi parametreler kontrol edilmelidir (Bilgiç vd., 2017).

Ülkemizde TCDD tarafından yol muayene makineleri kullanılarak da ölçüm çalışmaları yapılmaktadır. Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar, “EN:13848 Demiryolu Uygulamaları-Yol Geometrisi Kalitesi” standardına göre gerekli alanlarda ve toleranslarda değerlendirilmektedir. Söz konusu standartta hattın kalite düzeyini belirlemede kullanılan ekartman, nivelman, fleş, dever ve burulma parametrelerinden oluşan beş temel yol geometrisi parametresine yer verilmektedir. Ekartman, demiryolu hattındaki rayın üst yüzeyinden 14 mm aşağıdan olmak üzere iki ray arasındaki genişliği ifade etmektedir. Yoldaki nivelman hatası, iki ray arasındaki seviye farkı ve gizli boşlukların tespiti ile değerlendirilen bir bozukluktur. Bir boji düzleminde 3 tekerin raya basıp, bir tekerin yoldaki nivelman hatası nedeniyle raya basmaması neticesi tekerin boşa kalıp tekrar raya basması esnasında ray mantarı üstüne veya ray dışına basarak deraya sebebiyet verebilecek düşüklüklere burulma denilmektedir. Fleş bir daire yayını kesen

kirişin herhangi bir noktasından daire yayına olan dik mesafeyi ifade etmektedir. Dever ise yatay kurplarda merkezkaç kuvvetinin etkisini azaltmak amacıyla iç raya nazaran dış raya verilen yükseklik fazlasını ifade etmektedir. Bu beş yol geometrisi parametresi ile yapılan değerlendirilmeler sonucunda hattın genel kalitesi belirlenmekte, bakım ve yol yenileme ihtiyaçları saptanmaktadır (TCDD, 2013).

Koruyucu bakımlar önceden planlanmış, periyotları ve süreleri belirlenmiş rutin bakımlardır. Planlı bakımların temelini hat görsel kontrolü, makas yağlama, makas boyutsal kontrol, makas görsel kontrol, hat geometrisi ölçümü gibi periyodik bakımlar oluşturur. Bu periyodik bakımlar neticesinde görülen kusurlar ise rayların taşlanması, bağlantı malzemelerinin tork ayarlarının yapılması gibi “duruma bağlı koruyucu bakımlar” ile giderilmeye çalışılır (TCDD, 2013). Düzeltici bakımlar ise, bakım planında yer almayan, hatta bir bozulma ya da yapısal elemanlarda yıpranmalar olması durumunda yapılan bir bakımdır, bu nedenle belirsiz aralıklarda uygulanır. Düzeltici bakım, kusurlu parçaların değiştirilmesi ve onarım olmak üzere iki aşamalı olabilir. Bunlar arasındaki tercih maliyete ve bu seçeneklerden sağlanacak faydaya göre belirlenmelidir (Berawi, 2013). Teknik veya ekonomik olarak ömrünü doldurmuş hat bileşenlerinin değiştirilmesi için yol yenileme çalışmalarının yapılması gerekir. Yenileme çalışmalarında, hatta oluşan kusurların veya hattın kalitesini bozan bütün bileşenlerin değiştirilmesi gerekir. Demiryolu sistemi bir bütün olarak ele alınmalıdır. Sistem içerisindeki herhangi düzensizlik, tüm sistemi etkileyecek ve hattın kalitesini düşürecektir. Demiryolunda en önemli B&Y işlemleri şunlardır:

- Yol geometrisinin ölçümü, değerlendirilmesi, çeşitli yöntemlerle düzeltilmesi
- Makasların bakımı
- Balastın temizliği ve değiştirilmesi
- Traverslerin değiştirilmesi
- Yolun yenilenmesi ve altyapının rehabilite edilmesi (Plasser&Theurer, 2013)

Demiryolu hattı B&Y çalışmaları esas olarak:

- Hat geometrisi,
- Raylar,

- Traversler,
- Hat yatağı katmanları bölümlerden oluşmaktadır.

3.1 Hat Geometrisi

Demiryolu hattının planlanmış olan geometrik konumunda değişmelerin olması hat geometrisinin bozulması olarak tanımlanabilir. Demiryolu hat geometrisinde meydana gelen bozulmalar düşey geometrik bozulma ve yatay geometrik bozulma şeklinde sınıflandırılabilir. Düşey geometrinin bozulması; burulma, dever ve nivelman bozulmalarıdır. Yatay geometrinin bozulması ise; hat genişliğinin bozulması ve demiryolu hattının ekseninden sapması olarak kendini gösterir. Hat geometrisinin değerlendirilmesi, EN 13848-5'e göre doğrudan yol ölçüm araçlarıyla gerçekleştirilir (BSI, 2008; Luber, 2009). Hat geometrisinin kalitesi, dikey ve yanal parametrelerin geometrik özelliklerden sapmaları değerlendirilerek tanımlanmaktadır (Güler vd, 2011). Demiryolu hattının genel geometrisi tüm hat bileşenleri üzerinde etkilidir ve kalitesini tanımlayan üç gösterge vardır:

- Kusurların sınır değerleri,
- Belirli bir ray uzunluğundaki kusurların ortalama değeri,
- Standart sapma (Jovanovic vd., 2014).

Yukarıda sıralanan konfor, güvenilirlik ve güvenlik göstergeleri; önceden tanımlanmış sınır değerlerle kontrol edilir. Limit değerlerin aşılması durumunda demiryolu hattına müdahale yapılmalıdır. Bu sınır değerleri aşağıdaki gibidir:

- Uyarı Sınırı (AL): Bu sınır aşılsa, yol geometrisi durumu gözlem altında tutulur ve planlı bir şekilde analiz edilmelidir.
- Müdahale Sınırı (IL): Bu sınır aşılsa, bir sonraki incelemeden önce acil eylem sınırına ulaşılmaması için gerekli düzeltici bakım yapılmalıdır.
- Acil Eylem Limiti (IAL): Bu limitin aşılması durumunda trenlerin raydan çıkma riskini önlemek için gerekli önlemler alınmalıdır (BSI, 2008).

EN 13848-5'e göre tanımlanan yol geometrisi göstergesi ve sınır değerlerine ek olarak,

aracın yol etkileşimini ve sürüş kalitesini etkileyen başka parametreler de vardır. Bu parametreler doğrudan veya dolaylı olarak aşağıdaki şekilde elde edilir:

- Doğrudan ölçümle elde edilen parametreler: yatay eğrilik, dikey eğrilik, gradyan ve ivme
- Türetilmiş ölçümle elde edilen parametreler: eğim değişikliği, eğim değişim oranı, eksiklik, yokuş eksikliğinin değişim oranı, eksiklik değişimi, eğim eksikliği değişim oranı, eğim değişimi ve biniş indeksi;
- Destekleyici veriler: hat hızı ve mesafe ölçümü.

Hattın geometrik durumunu ifade etmek için sayısal bir kalite indeksi gereklidir. Literatürde hat geometri kalite indeksi için farklı formülasyonlar kullanılmaktadır (Sadeghi, 2010). Yol geometrisi kalite indeksi için yaygın olarak kullanılan bir formülasyon Denklem (3.1)'de olduğu gibidir. Rayın uzun bölümü için C değeri Denklem (3.2)'de olduğu gibi hesaplanmaktadır (Sadeghi, 2010; Patra ve Kumar, 2009).

$$QI = 150 - \frac{100}{3} \left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{HLim}} + 2 \times \frac{\sigma_I}{\sigma_{ILim}} \right] \quad (3.1)$$

$$C = \frac{\sum_i u_i}{TU} \times 100 \quad (3.2)$$

QI ve C'nin sınır değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. QI ve C değerlerinin sınırları (Güler, 2013)

Durum	AL	IL	IAL
QI	< 80	< 50	< 40
C	< 80	< 30	< 10

Hat üzerinde ekartman kusuru tespit edilmesi durumunda, bağlantı malzemeleri kontrol edilmeli ve düzeltilmelidir. Bu kusurun giderilmesinde makineli tamirata genellikle gerek duyulmamaktadır. Nivelman kusurunun olduğu kesimlerde, yol istenilen kota getirilmelidir. Kot seviyesini ayarlayabilmek için makineli veya el aletleri ile tamirat yapılmaktadır. Yapılan kaldırma işleminden sonra traverslerin altı balastla

doldurulmalıdır. Dresaj kusurunun olduğu kesimlere, makineli veya el aletleri ile tamirat yaparak yolu istenilen kota getirilir ve yolun yatay yöndeki hareketinden sonra da travers başlarına balast takviyesi yapılmalıdır. Mevcut balast yeterli ise regüle edilerek istenilen profil sağlanır. Balast reglesi demiryolu üzerindeki balastın düzenlemesini sağlamak amacıyla regülatör ile yapılmaktadır. Dever kusurunun olduğu kesimlerde, makineli veya el aletleri ile tamirat yaparak yolda istenilen deverin olması sağlanır. Bunun için deverin istenilen değerden düşük olması halinde dış rayı, deverin istenilen değerden yüksek olması halinde de i rayı kaldırarak, hatta buraj işlemi yapılır. Burulma kusurunun olduğu bölgede, makineli veya el aletleri ile tamirat yaparak yolda oluşan burulma giderilmektedir. Burulmanın durumunun kontrolü için ekartman-dever lme aletleri kullanılır. Ekartman ve dever lme aleti ile, her ölçüm noktası arasında dever farkı bulunur ve bulunan bu fark ölçüm boyuna (3 veya 6 mt gibi) bölünerek burulma değerleri elde edilir. Bu nedenle, yapılan ölçümlerde elde edilen değerler, tolerans dışında ise, bu noktalardaki dever dengelenmeli ve tolerans dhiline getirilmelidir. Tamirat sonrasında kusurun giderilip giderilmediği, kusurun giderilmesinde görevlendirilen yol bakım onarım memuru tarafından kontrol edilir ve raporlanır (TCDD, 2013)

3.2 Ray

Demiryolu hattı B&Y faaliyetleri; trafik yükü, zaman faktörü ve üretim hataları nedeniyle hattın sürekli izlenmesini gerektirir. Tren tekerlekleriyle doğrudan temas halinde olan raylar, gözlem sürecinde dikkatle takip edilmesi gereken önemli bir bileşendir. Gözlem sırasında, şu veriler toplanır:

- Raydaki kusur konumu,
- Kusur tespit tarihi,
- Kusur tespit yöntemi,
- Hatalı rayın zellikleri,
- Ray kaynak hataları,
- Ray bağlantı elemanlarının kusurları.

Ray kusurlarının sınır değerleri ve bu değerlerin aşılması durumunda raya yapılacak müdahaleler aşağdaki gibidir:

- Uyarı Sınırı (AL), ray izlenmeli;
- Müdahale Sınırı (IL), ray kaldırılmalıdır;
- Acil Eylem Sınırı (IAL), trafik yasaklanmalı ve demiryolu hattı derhal yenilenmelidir (Güler, 2013).

Ray kusurları görsel kontrol ve ultrasonik testlerle tespit edilir ve bir veri tabanına aktarılır. Bu verileri analiz etmek ve demiryolu kusur oranını tahmin etmek için, literatürde iki parametrelili Weibull dağılımının kullanılması önerilmiştir (Zhao ve diğerleri, 2006). İki parametrelili Weibull dağılımı, ray hatalarını tespit etmede başarılı sonuçlar elde etmiştir (Kumar, 2006). Önerilen dağıtım için formülasyonlar Denklem (3.3), Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'de olduğu gibidir:

$$F(M) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{M}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.3)$$

$$f(m) = \left(\frac{\beta m^{\beta-1}}{\eta^\beta} \right) \exp \left[- \left(\frac{m}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.4)$$

$$\Lambda(m) = \left(\frac{\beta m^{\beta-1}}{\eta^\beta} \right) \quad (3.5)$$

F(M): Kümülatif demiryolu arızası dağılımı

M: Kümülatif yük (veya zaman)

η : Ölçek parametresi

β : Şekil parametresi

$\Lambda(m)$: Başarısızlık yoğunluğu fonksiyonu

Biçim parametresi, bir bileşenin kusur oranı üzerindeki etkisini ifade eder. Ölçek parametresi, bir bileşenin karakteristik ömrü olarak da ifade edilebilir. Rayın durumu Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi β ve η parametrelerine göre ifade edilir.

Çizelge 3.2. β ve η parametrelerine göre ray durumu (Kumar, 2006; Güler, 2013)

Parametre	Değer	Karar
β	< 1	Başlangıç aşamasındaki kritik hata
β	$= 1$	Rastgele hatalar
β	>1	Bileşenlerin aşınması
η	≥ 1	Birimin % 63.2 den fazlasının başarısız olması

Hatta tespit edilecek ray aşınması kusurları, taşlama, frezeleme ile yeniden profilendirme veya rayın değiştirilmesi sureti ile giderilir. Yapılacak işleme karar vermeden önce, rayın kalan ömrünün hesaplanması, taşlama ve frezeleme maliyeti ile karşılaştırılması gerekir. Tespit edilen aşınma değerinin taşlanarak veya frezelenerek giderilmesi durumunda, rayın mevcut durumundaki aşınma durumu dikkate alınır. Eğer taşlama veya frezeleme sonrası ray aşınma değerleri, limit değerler içerisinde kalacaksa taşlama veya frezelemeye izin verilir. Hatta tespit edilecek ray ondülasyon kusurları, ondülasyonlu bölgede rayların taşlanması veya frezelenmesi veya rayın değiştirilmesi sureti ile giderilir (TCDD, 2013).

3.3 Travers

Demiryolu B&Y faaliyetlerinde en önemli maliyet kalemlerinden biri travers tadilatıdır. Traversler arası mesafe, UIC 60 (60 E1) ve daha büyük kesitli rayın kullanıldığı hatlarda tasarım değeri 60 – 62 cm olmalıdır. Bu değerlerden daha küçük aralık kullanılabilir. Ancak bu maliyeti yükseltmekte ve bakım çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Kusurlu traversler, yolun geometrik parametrelerinin normal sınırlarda kalmasını sağlayamayan traverslerdir. Yaygın travers kusurları şu şekildedir:

- Yüzey kusurları (kırık, çatlak vb.)
- Soyulmalar,
- Kaba ve tortu yüzeyler,
- Buraj çalışması, uygun olmayan balast kullanımı ya da omuz yerleşimine bağlı olarak ortaya çıkan aşınmalar.

Travers B&Y faaliyetleriyle ilgili gerekli veriler gözlem ve ölçüm araçlarından elde edilir. Gözlem süreci, demiryolu çalışanlarının her bir traversi güzergâh boyunca görsel

olarak incelemesi ve değerlendirme dönemlerine kaydetmesi için prosedürleri içerir. Traverslerdeki hasarlar ve ilgili B&Y faaliyetleri Çizelge 3.3'teki gibidir.

Çizelge 3.3.Travers kusurlar için B&Y faaliyetleri (Güler, 2016)

Travers	Hasar Durumu	B&Y Faaliyetleri
Beton Travers	Ciddi hasarlı (geniş çatlaklar)	3 Hafta içinde değiştir.
	Ciddi hasarlı (uzun çatlaklar)	12 Hafta içinde değiştir
	Hasarlı	Durum izleme
	Yüzey hasarları	İşlem yok
Ahşap Travers	Geniş çatlak, metal plaka gömülmüş	3 Hafta içinde değiştir.
	Geniş olmayan çatlak, metal plaka gömülmüş	12 Hafta içinde değiştir
	Çatlak var, metal plaka gömülmemiş	Durum izleme
	Çatlak yok, metal plaka gömülmemiş	İşlem yok

Birinci derece kusurlarda travers, üzerine gelen yükleri taşıyamaz durumdadır. Belirgin bir şekilde ayırık duran çatlak kusurları bu sınıfa girer. Kusurun tespit edilmesinden sonraki üç hafta içerisinde kusurlu travers doğrudan değiştirilmelidir. Kusurun durumuna bağlı olarak, ilave denetimler gerekli olabilir. İkinci derece kusurlar da travers, üzerine gelen yükleri taşıyabilecek durumdadır. Travers üzerindeki çatlak genişliği aşağıda verilen değer aralığındadır.

- Travers yüzeyinde uzun kenar doğrultusunda boylamasına çatlak $> 0,3$ mm
- Takviye kanadı çatlağı $> 0,1$ mm
- Travers başı çatlakları $> 0,3$ mm
- Travers kısa kenarı doğrultusunda enlemesine çatlak $> 0,3$ mm

Yukarıda belirtilen kriterlere ulaşılması veya bunların az miktarda aşılması durumunda, traversin değiştirilmesi gerekmez. Bu kusurlar izlenerek traversin değiştirme zamanı azami 12 aya kadar uzatılabilir. Üçüncü derece kusurlarda çatlak genişliği ikinci kusur derecesindeki benzer fakat çatlaklar kesintisiz değildir. Taşıma gücü ve bağlantı malzemelerin sıklığında henüz azalma yoktur. İlave denetimler çerçevesinde çatlakların gelişmesinin gözetim altında tutulması gereklidir. Dördüncü derece kusurlarda gelişmeleri belirsiz olan çatlaklar (kılcal çatlaklar) veya dökülmelerden dolayı yetersiz kalan beton kaplama hataları bu sınıfa girer. Düzenli denetim çerçevesinde kusur gelişmesinin gözetim altında tutulması gereklidir.

Literatürdeki çalışmalar traverslerin hasarının uzun sürede meydana geldiğini, ancak yıllar ilerledikçe hasar seviyesinin hızla arttığını göstermektedir. Bu nedenle, traverslerdeki bozulmalar nonlineer olarak gerçekleşir. Güler (2013), traverslerin genel durumunu ifade etmek için Mevcut Hizmet Verebilirlik İndeksi'ni (PSI) kullanmayı önermiştir. Denklem (3.7)'de PSI formülü verilmektedir.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.6)$$

$$PSI(M) = 1 - \exp \left[k_f \left(\frac{M}{M_L} - 1 \right) \right] \quad (3.7)$$

$$M_L = S_a \times L_a \quad (3.8)$$

M: Yük

M_L : Kümülatif yük

k_f : Kümülatif yük ayarlama faktörü

S_a : Travers yaş sınırı

L_a : Yıllık trafik yükü

B&Y sürecinde traverslerin durumunu belirlemek için PSI değerleri değerlendirilebilir. PSI için, TCDD'den alınan bilgilere göre ortalama olarak bu sınır değerlere karşılık gelen traverslerin sınır değerleri ve değiştirme sayıları Çizelge 3.4'teki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.4. Traversler için B&Y kararları

Aralık	Karar	Uygunluk		
		Limit	PSI	Ort. Değişecek travers adedi
			1	0
$0.8 < PSI \leq 1.0$	Sadece Bakım (SB)	AL	0.8	28-42
$0.6 < PSI \leq 0.8$	Bölgesel Yenileme (BY)	IL	0.6	79-95
$0.4 < PSI \leq 0.6$	Yenileme Planı (YP)	IAL	0.4	144-154
$0.0 \leq PSI \leq 0.4$	Yenileme (Y)	IAL	0.2	211-215
			0	268-272

Çizelge 3.4, TCDD deneyimi ve saha çalışmalarından elde edilen verilere göre hazırlanmıştır. Türkiye'deki farklı demiryolu hatlarından toplanan bilgilere dayanarak, 250 metre uzunluğundaki bir demiryolu kesimi için her bir PSI'nın değerine karşılık gelen ortalama travers değiştirme aralığı gösterilmektedir.

Traversin elle değiştirilmesi için, değiştirilecek traversin kenarlarındaki balast boşaltılmakta ve balast seviyesi travers alt seviyesinden 50 mm aşağıya düşürülmektedir. Değiştirilecek traversin baş kısmındaki balast seviyesi de traversin alt kenarına kadar düşürülmektedir. Rayların bağlantı malzemeleri sökülerek boşta kalan travers, yolun dışına doğru çıkartılmaktadır. Değiştirilecek travers hattın dışına alındıktan sonra, yeni hatta konulacak travers aynı yöntemler rayın altına sürülerek yerine yerleştirilmelidir. Yerine yerleşimi ve ekeri kontrol edildikten sonra, bağlantı malzemeleri sıkılmakta ve el aletleriyle travers altı boşluğu doldurulmaktadır. Peş peşe gelen iki veya daha fazla traversin elle değiştirilmesi, elle tek travers değiştirme yöntemi ile aynı şekilde yapılmaktadır. Elle travers değiştirilme yöntemi ile peş peşe en fazla 3 (yüksek hızlı tren hatları için 1 travers) travers değiştirilmelidir. Peş peşe 3 (yüksek hızlı tren hatları için 1 travers) traversden fazla traversin değiştirilmesi gerekirse, travers değiştirilen kesimde buraj makineleri çalıştırılarak travers değiştirilen kesimin buraj işlemi yapılmalıdır. Alet ve makine ile tek travers değiştirilmesi, değişimin hızlı ve çabuk olması, balast yatağından fazla balast boşaltılmasına ihtiyaç duyulmaması nedeniyle ekonomik bir yöntemdir. Sıralı birçok traversin veya travers grubunun değiştirilmesi sırasında bu yöntem kullanılmaktadır. Kusurlu traverslerin sökülmesi ve yedek traverslerin bunların yerine monte edilmesi, kullanılacak aletin kullanım kılavuzuna göre yapılmalıdır. Alet ve makine veya elle travers değişiminin yapılmasından sonra, hattan çıkartılan balast tekrar yerine konulur ve tamirata yapılır. Tamirat sonrasında, balast profili dizayn değerlerine getirilmelidir. Tek traversin değiştirilmesinden sonra hatta tren trafiği işletme hızı ile devam edebilmektedir. Değiştirilen travers sayısı 2 ila 5 arasında olduğunda (yüksek hızlı tren hatlarında sadece 1 travers), değiştirme yapılan kesimde tren trafiği konvansiyonel hatlarda 50 km/h, hızlı tren ve yüksek hızlı tren hatlarında 160 km/h olarak devam etmelidir. Değişim yapılan kesimde gerekli tamiratların yapılmasını takiben stabilizasyon yapılmasa bile gerçekleştirilen elle veya makineli buraj tamirata sonrası tren trafiği, normal işletme hızı ile devam edebilmektedir (TCDD, 2013).

3.4 Hat Yatağı Katmanları

Hat yatağı katmanları genellikle hem balast hem de balast altı katmanlarını ifade eder. Balast katmanları 20 ile 63 mm arasında değişen çaplarda kırma taştan oluşmaktadır. Balast malzemesinin özelliklerinin ayrıntıları EN13450’de açıklanmaktadır. (BSI, 2003). İyi bir balast tabakası, iyi derecelendirilmiş agregalardan oluşmalıdır, ancak balast tabakasındaki yüksek miktarda toz, yolun oturmasına ve drenaj sorunlarına neden olur. Balast ve alt balast için referans değerler Çizelge 3.5’te verilmiştir. Bu değerler B&Y kararlarında dikkate alınır (Güler, 2016).

Çizelge 3.5. Balast ve balast altı malzemeler için referans değerler (BSI, 2003)

Malzeme	E (MPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	Minimum Derinlik (mm)
Balast	130	0.2	0	45	15	300
Balast altı	120	0.3	0	35	19	150

- E: Elastisite modülü
 ν : Poisson katsayısı
c: Kohezyon
 γ : Özgül ağırlık
 Φ : Kayma Açısı

Yıllık ortalama buraj işlemi sayısı (l_m), belirli bir trafik kategorisi için hat yaşının istatistiksel bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Belirli bir yaş için buraj işlemlerinin sayısı, yıllık ortalama buraj işlemi sayısından farklı olabilir. Bu durumda, belirli bir hat bölümündeki hat yatağı bakım katsayısı Denklem (3.9)’daki gibi tanımlanır.

$$k = \frac{l}{l_m} \quad (3.9)$$

- l: Belirli bir yaş için sıkıştırma işlemlerinin sayısı
 l_m : Ortalama sıkıştırma işlemi sayısı
k: Ray yatağı bakım katsayısı

Hat yatağı bakım katsayısı, tesviye işlemleriyle ilgili kayıtlardan elde edilir. K faktörü normalde 1'e eşittir. Ancak, temel çok zayıfsa k faktörü yüksek değerlere ulaşır. k için sınır değerler ve ilgili kararlar Çizelge 3.6'da verilmiştir (Güler, 2013).

Çizelge 3.6. Balast ve balast altı malzemeler için referans değerler (Güler, 2013)

Limit (k)	Karar
$k < 1$	Uygun hat yatağı katmanları
$1 < k < 2.5$	Yetersiz boyutlandırılmış hat yatağı katmanları
$2.5 < k < 5$	Yetersiz boyutlandırılmış hat yatağı katmanları, Düşük kaliteli alt balast katmanları Kötü drenaj işleyişi
$k > 5$	Yetersiz boyutlandırılmış hat yatağı katmanları, Düşük kaliteli veya var olmayan alt balast katmanları Kötü drenaj işleyişi

3.5 Bakım ve Yenileme Çalışmalarında Maliyet Yönetimi

Taşımacılığın ekonomik yönünün, özellikle de ulaşım maliyetinin incelenmesi hem mühendisler için hem de ekonomistler için büyük önem taşımaktadır. Maliyet yönetimi kavramı, bileşen maliyetlerini doğru olarak saptamak, işletmedeki süreçleri geliştirmek, maliyet etmenlerini tanımlamak, faaliyetleri planlamak ve işletmenin stratejilerini oluşturmak için faaliyetlerin yönetimi ve kontrolü olarak tanımlanmaktadır. Maliyet yönetimi, demiryolu hattı B&Y çalışmalarının önemli bir bileşenidir ve başarılı bir B&Y yönetimi için hayati önem taşımaktadır. Teknolojik ve ekonomik alanda meydana gelen değişimler ve buna bağlı olarak her geçen gün artan riskler ve belirsizlikler karar vericilerin alacağı karar mekanizmalarında önemli rol oynamaktadır. Mevcut belirsizliklerin meydana getirdiği risklerin yanı sıra dinamik yapısı nedeniyle pek çok risk faktörü barındıran ulaştırma sektöründe risklerin sistematik olarak değerlendirilmesi ve karar süreçlerinde yer alarak stratejilerin ve hedeflerin doğru tayin edilmesi büyük önem arz etmektedir (Bağdatlı, 2016). Tüm bunların ışığında maliyet yönetimi içerisinde maliyet modellerinin ve performans modellerinin geliştirilmesi, pratik uygulamalara önemli katkı sağlamaktadır.

Demiryollarının maliyet yapısı incelendiğinde çeşitli faktörlerden etkilenecek ortaya çıkan maliyetler; sabit ve değişken maliyetler olarak iki grupta incelenebilmektedir

(Doğan ve Dikmen, 2018). Çeşitli ulaştırma modlarının temel teknolojisindeki farklılıklar nedeniyle, toplam maliyetlerdeki sabit ve değişken maliyetlerin oranı değişmektedir. Örneğin, demiryolu, toplam maliyetlerinde yüksek oranda sabit maliyete sahip olması ile karakterize edilir. Demiryolu maliyetlerinin yüzde 44'ünün sabit, yüzde 56'sının değişken olduğu hesaplanmıştır (Munby, 1968).

Çalışmada B&Y maliyet yönetiminde kullanılan geleneksel ekonomik değerlendirme formülleri Denklem (3.10), Denklem (3.11), Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)'te verilmektedir.

$$NPV = \sum_{i=1}^n (FC_i \times PVF_i) \quad (3.10)$$

$$PVF = \frac{1}{(1+r)^n} \quad (3.11)$$

$$EAC_i = NPV_i \times RF_i \quad (3.12)$$

$$RF = r \times (1+r)^n / [(1+r)^n - 1] \quad (3.13)$$

NPV: Net Şimdiki Değer (Net Present Value)

FC: Gelecekteki Maliyetler (Future Cost)

PVF: Şimdiki Değer Faktörü (Present Value Factor)

n: Analiz Periyodu

r: İskonto Oranı

EAC: Eşdeğer Yıllık Maliyet (Equivalent Annual Cost)

RF: Geri Kazanım Faktörü (Recovery Factor)

Net Şimdiki değer (NPV), proje ile ilgili fayda ve maliyetlere ait parasal değerlerin güncelleştirilmesi hesabına dayanmaktadır. Güncelleştirme işleminde farklı yıllara yayılmış olan fayda ve maliyetler belirlenen bir iskonto oranı ile indirgenerek bugünkü değerler elde edilir (Bağdatlı ve Akbıyıklı, 2014). NPV, paranın zaman değerini dikkate almaktadır ve kurumsal btçleme için önemli bir araçtır. NPV hesaplanması iki aşamalı

bir süreçtir. Öncelikle, projenin ömrü boyunca net nakit akışlarını tahmin edilmesi gerekir. Ardından, bu nakit akışlarını hedeflenen bir getiri oranına indirgenmesi gerekir.

Gelecekte farklı yıllarda ortaya çıkması beklenen maliyetlerin, tüm maliyetlerin; yıllar içinde eşit bir şekilde dağıtılmasıyla bugünkü değer ve/veya Eşdeğer Yıllık Maliyete (EAC) göre değerlendirilmiştir. EAC, bir varlığın mülkiyeti, bakımı ve işletilmesiyle ilgili yıllık maliyettir. Bu, varlık alımları ve bütçeleme hakkında karar alırken önemli bir husustur. İnsanlar, EAC'yi, varlığın temel fiyatına ve bakım ve işletme için beklenen maliyetlere bakarak ve bunları varlığın hizmette bulunmasının beklenebileceği yıl sayısına bölerek belirlemektedir. NPV ve EAC değerleri alternatifler arasında karşılaştırma yapılmasına imkân sağlayan ölçütlerdir. Alternatifler arasında karşılaştırma yapılırken en küçük NPV veya EAC değeri “kabul edilir alternatif” olarak değerlendirilmektedir (Akbıyıklı ve Bağdatlı, 2016).

Buradaki önemli değişkenlerden ikisi analiz süresi ve iskonto oranıdır. Ulaştırma yatırımları uzun yıllar kamuya hizmet veren projelerdir. Projenin büyüklüğüne ve önemine göre kimi zaman projeler için 100-150 yıllık ömürler belirlenebilmektedir. Ancak yapılacak ekonomik analizler için analiz süresinde kısıtlar getirilmesi gerekmektedir (Rogers, 2003). Çünkü analiz periyodunun uzun tutulması geleceğe dair yapılacak olan tahminlerdeki hata payını arttırmaktadır. Analiz süresi, her bir demiryolu hattı bileşeni için farklılık gösterir. Örneğin beton traversler için analiz süresi 30-40 yıl olarak kabul edilmektedir (Güler, 2014). Bu analiz süresi içerisindeki tüm fayda ve maliyetlere ilişkin parasal değerler elde edilerek ekonomik analizler gerçekleştirilmektedir. Ekonomik analizlerde gerekli olan ve bütün analizi doğrudan etkilemesi nedeniyle önemli bir yeri bulunan bir diğer parametre de iskonto oranıdır. Ekonomik analizi yapılan projeden elde edilen fayda ve maliyetlere ilişkin nakit akışın bugünkü değerlere indirgenmesini sağlayarak yatırımın yapılabilirliğine dair karar verme sürecinde etkili rol oynamaktadır. İskonto oranının belirlenmesinde birçok yaklaşımlar bulunmakta olup kamu yatırımlarında uygulanacak iskonto oranı hakkında genel bir görüş birliği ve kesin bir yaklaşım bulunmamaktadır. Burada önemli olan belirlenen iskonto oranının, kullanılan sermayenin fırsat maliyetini yansıtmasıdır. Çünkü projede kullanılan sermaye, sermaye piyasasında veya diğer bir sektör projesinde değerlendirilmek yerine projeye yatırılmaktadır (KGM, 2013). Bu nedenle yatırım için ayrılan sermaye bir getiriye temin etmelidir düşüncesi hâkim olmaktadır. Ülkemizde

kullanılan iskonto oranları ekonomik gelişmelere bağlı olarak zaman içerisinde değişiklikler göstermiştir. Ulaştırma yapılarının değerlendirmelerinde kullanılan %15 iskonto oranı, gelişen ekonomik göstergeler ile %12 seviyesine inmiştir. Son yıllarda ekonomideki büyüme ve belirsizliklerin azalması iskonto oranında %8 mertebesinin kullanılmasını temin etmektedir (Bağdatlı vd, 2017; Akbıyıklı ve Bağdatlı, 2016).



BÖLÜM IV

METODOLOJİ

4.1 Bulanık Uzantı Prensipleri

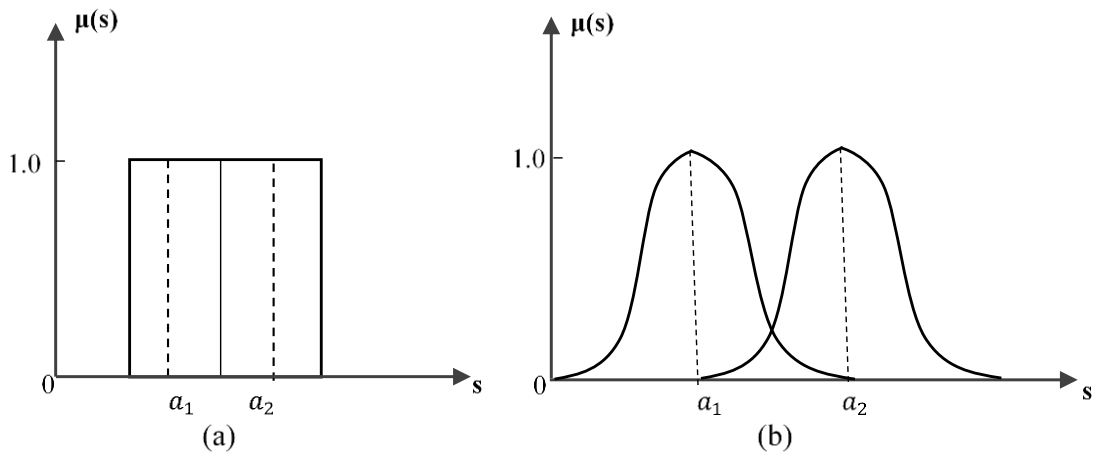
Demiryolu hattı B&Y yönetimi için en önemli konulardan biri belirsizlik etkisinin ortadan kaldırılmasıdır, bu nedenle belirsizlikle başarılı bir şekilde mücadele edebilecek bir tekniğe ihtiyaç vardır. Literatürde bulanık yaklaşımların farklı mühendislik problemlerinde, özellikle karar verme ve desteklemede belirsizlik etkisini aştığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada bulanık yaklaşımlar kullanılmıştır. Bulanık mantık teorisi, insan gibi düşünmeye ve bu düşünceyi matematiksel fonksiyonlara dönüştürmeye dayanan bir yaklaşımdır.

Günlük hayatta bir şeyi tanımlarken, açıklarken, komut verirken vs. birçok durumda kullandığımız ifadeler bulanık bir yapıya sahiptir. İnsan beyni bir durum karşısında genelde kesinlik içermeyen ifadeleri kullanır. Bulanık mantığın ve bu mantık kurallarını kullanan bulanık küme teorisinin geliştirilmesinden sonra belirsizlik içeren sistemlerin incelenmesi yeni bir boyut kazanmıştır. Artık hemen her alanda bulanık mantık uygulamalarına rastlamak mümkündür. Gerçek dünyaya daha yakın olduğundan, bulanık mantık doğrusal olmayan denetim için alternatif bir yaklaşım olarak benimsenmiştir. Sistemlerin doğrusal olmayan karakteristikleri kurallar, üyelik fonksiyonları ve sonuca varma işlemi ile temsil edilir. Bulanık mantık yaklaşımının kullanılmasıyla sistem performansı artar, uygulama basitleşir ve mali giderler azalır. Gerçek sisteme daha yakın olan, daha doğal bir kural tabanı kullanılarak doğrusal olmayan denetim alışlagelmiş yöntemlere göre daha iyi biçimde gerçekleştirilebilir. Bu durumda sistem performansı mükemmel bir şekilde iyileştirilip daha etkili ve duyarlı bir denetim elde edilebilir. Çoğu kontrol uygulamaları çok girdili olup çok sayıda parametrenin tasarlanıp, ayarlanmasını gerektirirler. Bu da uygulamayı zorlaştırıcı ve zaman alıcı bir işlemdir. Oysa bulanık mantık tabanlı bir denetleyicinin kuralları, doğrusal olmayan özellikleri de dikkate alarak, çok sayıdaki girişi tekli sözel ifadeleriyle birleştirip uygulamayı basitleştirir (Altaş, 1999). Karmaşıklık ve belirsizlik içeren büyüklükler, bulanık sayılar olarak da isimlendirilebilen ve bulanık kümeleri karakterize eden üyelik fonksiyonları ile tanımlanırlar.

Bulanık sayılar, yine bulanık bir ortamda insan düşünce ve karar verme mekanizmasına benzer şekilde önerme ve kural yürütme işlemlerine tabi tutularak yine bulanık bir sonuca varılır. Nasıl ki insan karşılaştığı bir problemi çözerken kafasındaki bilgi bankasını kullanıp, bu bilgiler ışığında sonuca gidiyorsa, bulanık mantık esaslarına göre işlem yapan bir sistem de kendisine daha önceden öğretilen bilgileri kullanarak, yeni durum hakkında bir sonuca varır. Bu durum insan-makina iletişimine yeni bir boyut kazandırmıştır.

Bu teorinin en önemli özelliği, ikili Aristo mantığı (katı küme, $\{0,1\}$) yerine bulanık kümelere dayanan bir matematik disiplini olmasıdır. Bulanık mantık konusunun temel elemanı bulanık kümedir. Bulanık kümeler, üyelik fonksiyonları ile karakterize edilirler. Aslında bu üyelik fonksiyonlar da birer bulanık sayıdan başka bir şey değildir.

Katı küme ve bulanık küme arasındaki fark üyelik fonksiyonu yardımıyla açıklanabilir. Bulanık kümeleme kavramı, katı kümedeki kısıtlamaları yumuşatır ve kısmi üyelik kavramına izin olarak tanır. Bir veri elemanı farklı gruplar için aynı anda sıfır değeri almayan birçok üyelik derecesi alabilir. Katı yaklaşıma göre bulanık yaklaşım daha fazla esneklik sağlar. Şekil 4.1’de katı ve bulanık fonksiyonlar karşılaştırılmıştır (Tso ve Mather, 2001).



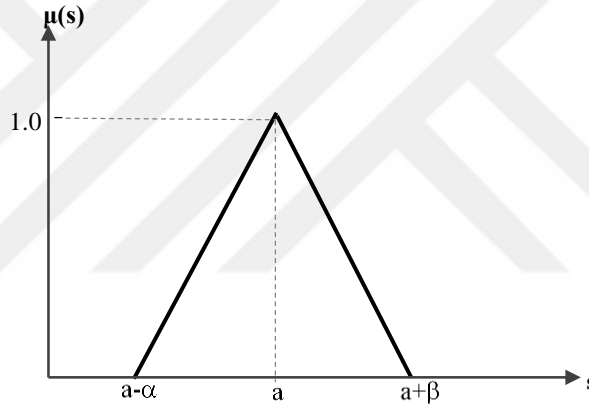
Şekil 4.1. Klasik kesin küme kavramı a_1 veya a_2 'nin üyelik derecesi 0 veya 1'dir (a) ve bulanık küme teorisinde iki kümenin kesişmesine izin verilir (b)

Üyelik fonksiyonu (üçgensel bulanık sayı):

$$A(t) = \begin{cases} 1 - \frac{a-t}{\alpha} & \text{eğer } a-\alpha \leq t \leq a \text{ ise} \\ 1 - \frac{t-a}{\beta} & \text{eğer } a \leq t \leq a+\beta \text{ ise} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases} \quad (4.1)$$

şeklinde ise bulanık bir küme A tepe (veya merkez) a, sol taraf $\alpha > 0$ ve sağ taraf $\beta > 0$ ile üçgensel bulanık sayı adını alır.

$a-\alpha$ ve $a+\beta$ A'nın desteğidir. A bulanık sayısının üçgensel normda gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir.



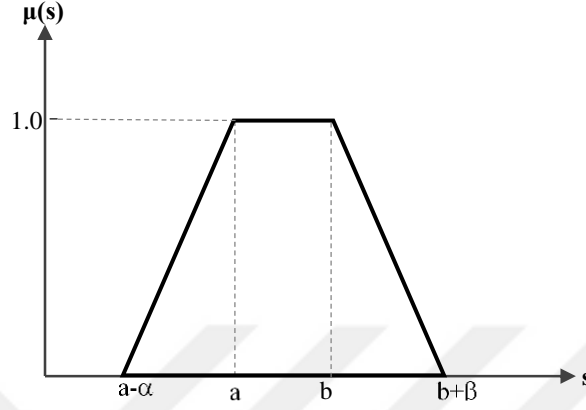
Şekil 4.2. Üçgensel bulanık fonksiyon

a merkezli bulanık sayı bulanık miktar olarak görülebilir. “X yaklaşık a’ya eşittir.”

Üyelik fonksiyonu (üçgensel bulanık sayı):

$$A(t) = \begin{cases} 1 - \frac{a-t}{\alpha} & \text{eğer } a-\alpha \leq t \leq a \text{ ise} \\ 1 & \text{eğer } a \leq t \leq b \text{ ise} \\ 1 - \frac{t-b}{\beta} & \text{eğer } a \leq t \leq a+\beta \text{ ise} \\ 0 & \text{diğer durum} \end{cases} \quad (4.3)$$

Şeklinde üyelik fonksiyonuna sahipse $[a,b]$ tolerans aralığı, sol genişlik α ve sağ genişlik β ile yamuk bulanık sayı adını alır. Burada $A=(a,b, \alpha,\beta)$ notasyonunu kullanırız. Yamuk bir sayı “X yaklaşık olarak $[a,b]$ aralığındadır” bulanık bir miktar olarak görülebilir. Şekil 4.3’te yamuk bulanık fonksiyon gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Yamuk bulanık fonksiyon

Bulanık küme teorisinin önemli bir katkısı, belirsiz bilgileri temsil etme yeteneğidir. Belirsizlik, günlük yaşamda alınan birçok kararı etkiler. Bulanık kümeler bir belirsizliği işler ve matematiksel bir yapı ortaya çıkarır. Karar verme sürecinde karşılaşılan belirsizliklerin modellenmesinde özellikle başarılıdır ve gerçeğe en yakın sonuçları verir (Ross, 2010).

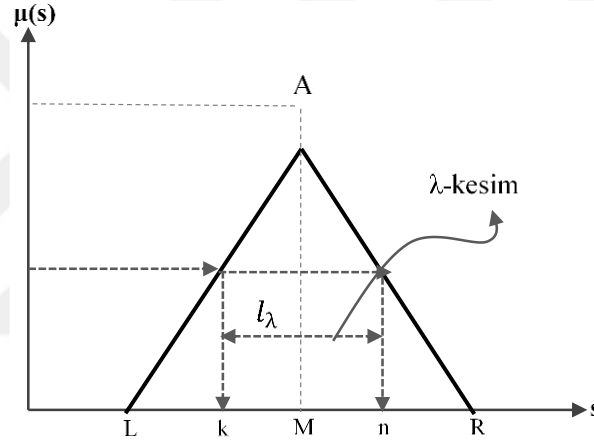
Bulanık yaklaşımlar ayrıca matematiksel işlemlere ve algoritmik uygulamaların insan zihniyetine daha yakın sonuçlar sağlamasına izin verir. Böylece birçok problem yapısı kolaylıkla modellenebilir.

Bu çalışmada, demiryolu hattı B&Y yönetimine uygun bir model geliştirmek için DSW algoritması (Dong vd, 1985) ve Vertex yöntemi (Dong vd. 1987) kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar, bulanık genişletme ilkeleri arasındadır ve bulanık bir hesap makinesi sağlayan güçlü araçlardır (Ross, 2010). Bağdatlı (2018), yol kaplama yönetiminde yaşam döngüsü maliyet analizi için Vertex ve DSW algoritmalarını başarıyla uyguladı. Bu yöntemlerin ayrıca demiryolu hattı B&Y yönetimi için başarılı sonuçlar verdiği düşünülmektedir.

4.1.1. Vertex yöntemi

Vertex yöntemi, λ -kesim ve aralık analizi kavramına dayanmaktadır. Yöntem, bulanık üyelik fonksiyon alanlarını ayırmaktadır. Bu nedenle, bulanık çıktı üyelik fonksiyonlarındaki işlevselliğin anormalliğini önleyebilmektedir. Vertex yöntemi birçok probleme kolaylıkla uygulanabilmektedir (Dong ve Shah, 1987). Yöntemin uygulanması şu şekildedir:

Herhangi bir sürekli üyelik işlevi, $\lambda = 0+$ ile $\lambda = 1$ arasındaki λ -kesim aralıklarının sürekli taranması ile temsil edilmektedir. Şekil 4.4, bulanık bir fonksiyonda belirli bir λ değerine karşılık gelen aralığı göstermektedir.



Şekil 4.4. Bulanık Küme A'da λ -kesim seviyesi aralığı

Bulanık kümeler için $y = f(x)$ ve $B = f(A)$ ile verilen tek girdili bir eşlememiz olduğunu ve A'yı λ -kesim aralıkları serisine ayırmak istediğimizi varsayalım. $F(x)$ fonksiyonu sürekli ve $\lambda = [k, n]$ üzerinde monoton olduğunda, verilen bir λ değerinde B'yi temsil eden aralık (B- λ diyelim) Denklem (4.1) ile bulunur (Ross, 2010):

$$B-\lambda = f(l_\lambda) = [\min(f(k), f(n)), \max(f(k), f(n))] \quad (4.4)$$

4.1.2. DSW algoritması

DSW (Dong, Shah ve Wong) algoritması, üyelik fonksiyonunun tanımlanmasında çeşitli λ -kesim seviyelerinde, aralıklardan yararlanan uygun yöntemlerden biridir. DSW algoritması, sürekli değerli bulanık değişkenler için uzantı prensiplerinin uygulanmasını

kolaylaştırmaktadır. Tanımlanmış belirsiz bir sayı, bulanık değişkenin üyelik fonksiyonundaki düzensizliği önlemekte ve ortaya çıkan fonksiyonel ifadenin geleneksel aralık analizi yöntemi ile yayılmasını engellemektedir (Kumar, 2017; Narayanamoorthy ve Ramya, 2017).

DSW algoritması ayrıca bulanık kümelerin λ -kesim gösterimini kullanmaktadır, ancak köşe yönteminden farklı olarak, standart aralık analizine dahil edilen λ -kesim aralıklarını kullanır.

DSW algoritması aşağıdaki adımlardan oluşur (Ross, 2010):

1. $0 \leq \lambda \leq 1$ aralığında bir λ değeri seçin.
2. Seçilen λ değerine karşılık gelen X_1, X_2, \dots, X_n aralıklarını bulun. Bu aralıklar, tabii ki, X_1, X_2 ve X_n 'nin λ kesimleridir.
3. Aralık cebirsel işlemlerini kullanarak, X_1, X_2, \dots, X_n 'ye karşılık gelen Y aralıklarını hesaplayın. Böyle bir aralık, Y 'ye karşılık gelen λ kesimidir.
4. Çözümün λ kesim gösterimini tamamlamak üzere diğer λ değerleri için önceki adımları tekrarlayın.

Vertex yöntemi ve DSW algoritması hakkında daha ayrıntılı bilgi edinmek için Ross, (2010); Ammar vd. (2013); Azeez vd. (2013) ve Bağdatlı (2018) tarafından yapılan çalışmalar incelenebilir.

BÖLÜM V

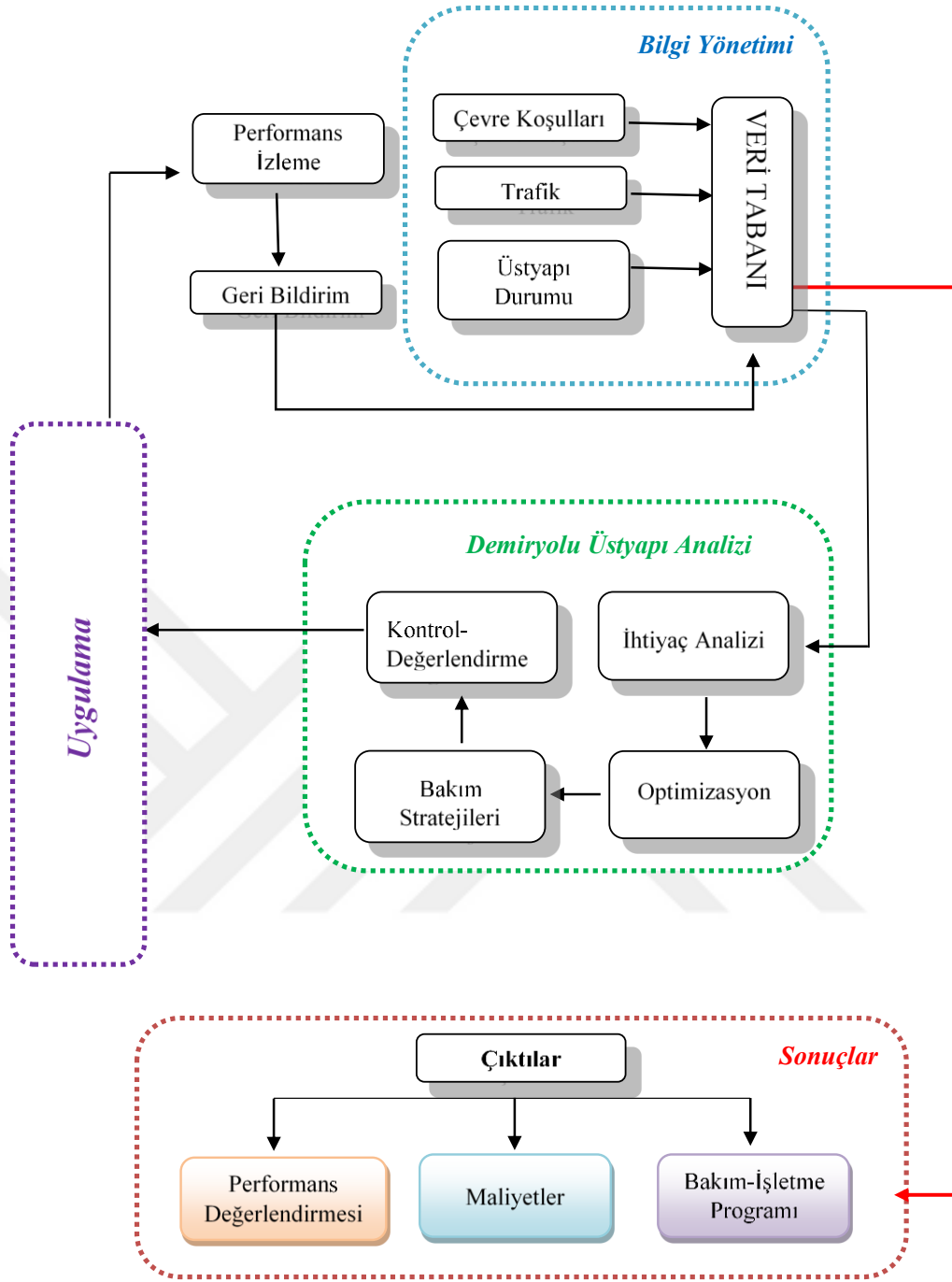
MODELİN GELİŞTİRİLMESİ VE DURUM ÇALIŞMASI

5.1. Önerilen Bakım ve Yenileme Modeli

Yapılan araştırmalardan elde edilen bulgular neticesinde demiryolu üstyapı B&Y modeli için bir kavramsal çerçeve Şekil 5.1’de sunulmuştur. Kavramsal çerçeve bilgi yönetimi, üstyapı analizi ve sonuçlar olmak üzere üç esas üzerine kurulmuştur. Demiryolu üst yapısının mevcut durumu, trafik ve çevre koşulları bilgi yönetimini şekillendirmektedir. Analiz safhasında uygulama öncesi gerekli planlamaların yapılması gerekmektedir. İhtiyaç analizi için gerekli bilgiler veri tabanından elde edilir ve sistemdeki girdiler modelleme sürecine hazır hale getirilmektedir.

Optimizasyon sürecinde, belirlenen girdi verileri ile bakım stratejileri belirlenmektedir. Elde edilen stratejilere ait kontroller ve son değerlendirmeler sonucunda uygulama safhasına geçilmektedir. Uygulama safhası ile birlikte performans izleme süreci de başlamaktadır. Üstyapı performansına ilişkin elde edilen tüm tecrübeler geribildirimle tekrar veri tabanında toplanmaktadır. Uygulama öncesi ve sonrası elde edilen tüm bilgiler sonuçlar aşamasında toplanarak çıktılar elde edilmektedir. Bu çıktılar, performans değerlendirmesi, maliyetler ve bakım-işletme programı olarak üç başlıkta sunulmaktadır.

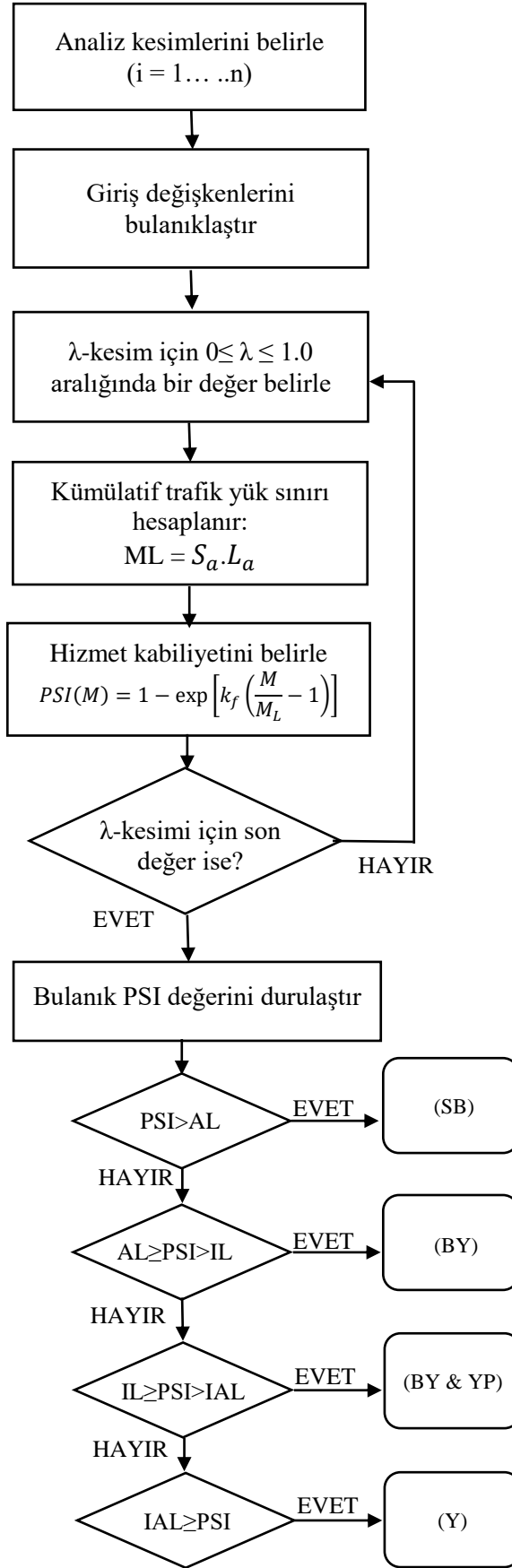
Efektif bilgi yönetimi ile gerçekleşen bu yönetim çerçevesi, demiryolu üstyapı yönetim sistem performansını geliştireceği öngörülmektedir. Tüm adımların eksiksiz uygulanması halinde başarılı bir performans sunacağı düşünülen bu yönetim çerçevesi için en kritik engel; istenilen veriye tam olarak ulaşılamaması ve süreç içerisinde öngörülemeyen belirsizliklerdir. Bu durum, üstyapı analizini başarısız kılmaktadır. Bunun sonucu olarak doğru bakım stratejileri belirlememekte ve uygun bir üstyapı performansı elde edilememektedir. Yetersiz veri ve belirsizlikler tüm yönetim modellerinin ortak bir sorunu olmakta ve hedeflenen başarının önünde engel oluşturmaktadır. Başarılı bir yönetim modelinin elde edilebilmesi için öncelikle bu sorunun üstesinden gelinmesi gereklidir.



Şekil 5.1. Demiryolu üstyapısı için bir yönetim modeli önerisi

Demiryolu hattı B&Y yönetimindeki belirsizliğin nasıl minimize edileceğini göstermek amacıyla, modelin geliştirme sürecinin tüm detayları bu bölümde sunulmuştur. Buna göre, B&Y çalışmaları için geliştirilen karar destek modelinin detayları aşağıdaki gibidir. Vertex yöntemi ve DSW algoritması kullanılarak geliştirilen travers B&Y karar destek modelinin akış şeması Şekil 5.2’de verilmiştir. Önerilen modelin çalışma adımları şöyledir:

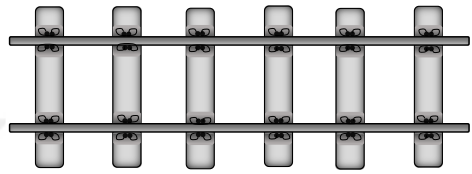
1. Demiryolu hattı belirli sabit uzunluklarla analiz segmentlerine ayrılır ve her bir segment ayrı ayrı değerlendirilir. İlk adım, incelenecek analiz segmentinin seçilmesiyle başlar.
2. Trafik yükleri, travers yaşı vb. ilgili yol bölümüne ait girdi değişkenleri bulanıklaştırılır.
3. Vertex yöntemini kullanarak, her bulanık girdi değişkeni λ -kesimlerine bölünür.
4. Girdi değişkenlerinden elde edilen λ -kesimler, DSW algoritması yardımıyla Denklem (3.8) ile hesaplanarak toplam yük limiti hesaplanır.
5. Girdi değişkenlerinin λ -kesimleri, PSI değerini hesaplamak için DSW algoritmasının yardımıyla Denklem (3.7) kullanılarak hesaplanır.
6. Tüm bulanık λ -kesimler için 4. ve 5. adımlar tekrarlanır.
7. Kümülatif bulanık PSI değeri, tüm λ -kesimlerinden elde edilen PSI değerleri aracılığıyla ortaya çıkarılır. Ardından, bu bulanık PSI değeri durulaştırılır.
8. Elde edilen durulaştırılmış PSI değeri, EN 13848-5 standardında tanımlanan kalite seviyesi sınır koşullarına göre değerlendirilir.
 - 8.1 PSI değeri AL'den büyükse, travers değişimine gerek yoktur, ihtiyaç duyulan yerlerde bakım yapılmasına karar verilir (SB Kararı).
 - 8.2 PSI değeri AL ile IL arasında ise incelenen yol bölümünde gerekli traverslerin değiştirilmesi gerektiğine karar verilir (BY Kararı).
 - 8.3 PSI değeri IL ve IAL arasında ise incelenen yol bölümünde gerekli traverslerin yerel olarak değiştirilmesi ve yenileme planlamasının yapılması gerektiğine karar verilir. (BY ve YP kararı)
 - 8.4 PSI değerinin IAL'ye eşit veya daha düşük olması durumunda gerekli önlemlerin alınmasına, çalışma hızlarının düşürülmesine veya gerekirse hattın trafiğe kapatılarak traverslerin yenilenmesine karar verilir. (Y Kararı)



Şekil 5.2. Önerilen modelin akış şeması

Karar destek süreci, demiryolunun tüm hat bölümleri için bu operasyonlar yapılarak sürdürülür. Yöntemin hesaplama aşamalarını ve modelleme sürecini göstermek için örnek bir uygulama hazırlanmıştır. Bu uygulama için Türkiye’de bir demiryolu hattında 250 metre uzunluğundaki hat kesimi bilgisi kullanılmıştır. Gerekli bilgiler, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları personellerinden alınmıştır. İlgili yol bölümü hakkında veriler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. İncelenen demiryolu hat bölümü hakkında bilgiler

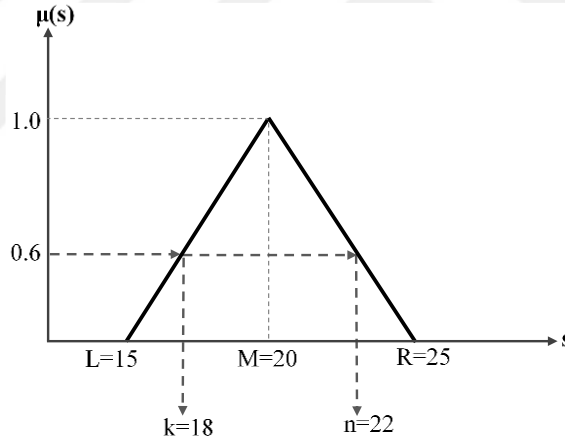
Demiryolu Hattı	
Hat türü	Konvansiyonel
Taşımacılık türü	Karma (Yük – Yolcu)
Yol kesimi	Aliyman
As uzunluğu	250 metre
Ray tipi	UIC 60 – 60.34 kg/m
Bağlantı malzemesi	WFP 14 K 12 plastik açılı klavuzu (4 adet) SKL 14 gergi kısıkaçı (4 adet) SS35 tirfon (4 adet) ZW 700 ray altı pedi (2 adet)
Travers tipi	B70 Betonarme Travers
Travers yaşı (limit)	35 yıl
Travers yaşı (mevcut)	20 yıl – 25 yıl
Yıllık trafik yükü	27 MGT/yıl – 30 MGT/yıl
Yaş & yük ayarlama faktörü	5.2

İşlem adımlarının daha net aktarılabilmesi amacıyla iki farklı senaryo üzerinden iki farklı hesaplama sunulmuştur. Modelin geliştirilme sürecinde öncelikle travers yaş sınırı, travers yaşı, ortalama trafik yükü ve yük ayarlama faktörü bulanıklaştırılmıştır. Yaş (veya yük) ayarlama faktörü hizmet endeksinin belirlenmesi için ampirik çalışmalar sonucunda elde edilen bir katsayı olup demiryolu otoriteleri tarafından hazırlanan el kitaplarından çizelgeler halinde yer almaktadır. Bulanıklaştırma sonrasında elde edilen değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. $\lambda=0.6$ kesimi için bulanık girdi değişkenlerine ait aralık değerleri

Değişkenler	Notasyon	Üyelik Fonksiyonları			Kesim Aralığı	
		L	M	R	k	n
Travers yaşı (limit)	S_a	30	35	40	33	37
Travers yaşı (mevcut)	S	15	20	25	18	22
Ortalama trafik yükü	L	22	27	32	25	29
Yaş (veya yük) ayarlama faktörü	k_f	2.8	5.2	7.6	4.24	6.16

Modelde kullanılan her bir değişken bulanıklaştırma işlemi yapılırken Şekil 5.3'te gösterildiği gibi bulanık üçgen fonksiyonlara dönüştürülmüştür. Bunun için her bir değişkenin L, M ve R değerleri belirlenmiştir. Bu değerler, bulanık üçgen işlevinin sol, orta ve sağ noktalarını gösterir. Bulanıklaştırma işleminden sonra, bulanık girdi değişkenleri Vertex yöntemi ile 0.1 aralığında kesilmiştir. Vertex yönteminin uygulanması ile her bir bulanık girdi değişkeninin k ve n değerleri bulunmuştur.



Şekil 5.3. Travers yaşının (mevcut), $\lambda = 0.6$ aralığında bulanık değerleri

Tüm bulanık girdi değişkenlerinin k ve n değerlerini bulduktan sonra DSW algoritmasının uygulama aşamaları takip edilerek Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'de gösterilen hesaplamalar yapılmıştır. Yöntemlerin uygulanmasına ilişkin hesaplamalar ilk olarak travers yaşı 20, yıllık trafik yükü 27 MGT/yıl kombinasyonunun $\lambda = 0.6$ kesim için işlemler detaylı olarak aşağıdadır;

$$M_{11} = 18 \times 22 = 450$$

$$M_{12} = 18 \times 29 = 522$$

$$M_{13} = 22 \times 25 = 550$$

$$M_{14} = 22 \times 29 = 638$$

$$M_1 = f(0.6) = \left[\begin{array}{l} \min(450, 522, 550, 638) \times \\ \max(450, 522, 550, 638) \end{array} \right]$$

$$= [450, 638]$$

$$M_{L11} = 33 \times 28 = 924$$

$$M_{L12} = 33 \times 32 = 1056$$

$$M_{L13} = 37 \times 28 = 1036$$

$$M_{L14} = 37 \times 32 = 1184$$

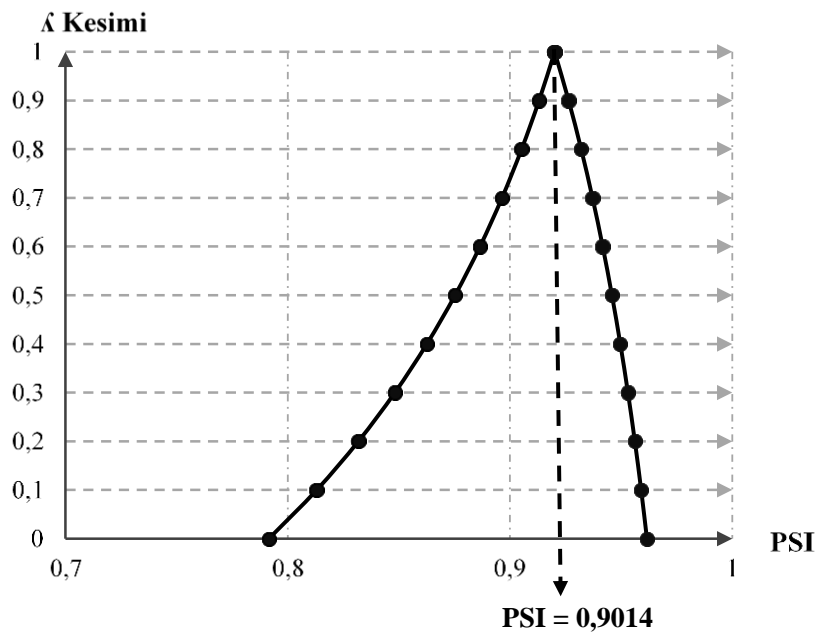
$$M_{L1} = f(0.4) = \left[\begin{array}{l} \min(924, 1056, 1036, 1184) \times \\ \max(924, 1056, 1036, 1184) \end{array} \right]$$

$$= [924, 1184]$$

$$PSI = \left[1 - \exp \left(4.24 \times \left(\frac{450}{924} - 1 \right) \right) \right], \left[1 - \exp \left(6.16 \times \left(\frac{638}{1184} - 1 \right) \right) \right]$$

$$= [0.8864, 0.9416]$$

Tüm hesaplamalarda, adım aralığı 0.1 olarak 11 λ -kesim için minimum ve maksimum PSI değerleri bulunmuş ve bu PSI değerleri kullanılarak incelenen yol kesimi için son bir grafiksel gösterim Şekil 5.4'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.4. Hat bölümü için toplam PSI üyelik fonksiyonları

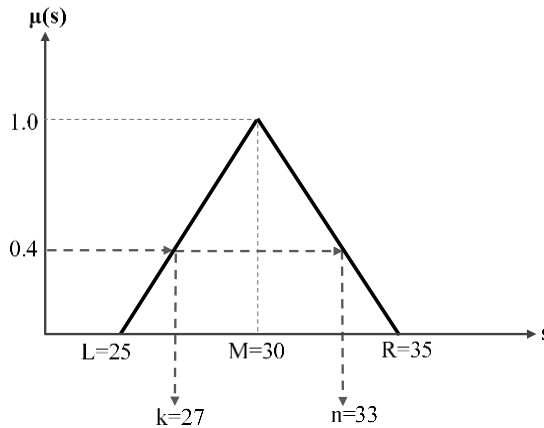
Bulanık değerleri durulaştırmak için ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Durulaştırma işleminden sonra net bir PSI değeri elde edilmiştir. Şekil 5.4’de görüldüğü gibi incelenen yol kesiminin nihai PSI sonuç değeri 0.9014 olarak bulunmuştur. Bu değer $0.8 < PSI \leq 1.0$ aralığına karşılık gelir ve bu yol bölümü için B&Y kararı Sadece Bakım (SB) olacaktır. (bkz. Çizelge 3.4. ve Şekil 5.2.)

Traversin mevcut yaşı 25, trafik yükü 30 ve $\lambda = 0.4$ için hesaplamaların detayları aşağıda verilmiştir. Bulanıklaştırma sonrasında elde edilen değerler izelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. $\lambda=0.40$ kesimi için bulanık girdi değişkenlerine ait aralık değerleri

Değişkenler	Notasyon	Üyelik Fonksiyonları			Kesim Aralığı	
		L	M	R	k	n
Travers yaşı (limit)	S_a	30	35	40	32	38
Travers yaşı (mevcut)	S	20	25	30	22	28
Ortalama trafik yükü	L	25	30	35	27	33
Yaş (veya yük) ayarlama faktörü	k_f	2.8	5.2	7.6	3.76	6.64

Bulanıklaştırma işlemi yapılırken Şekil 5.5’te gösterildiği gibi bulanık üçgen fonksiyonlara dönüştürülmüştür. Bunun için her bir değişkenin L, M ve R değerleri belirlenmiştir. Bulanıklaştırma işleminden sonra, bulanık girdi değişkenleri Vertex yöntemi ile 0.1 aralığında kesilmiştir. Vertex yönteminin uygulanması ile her bir bulanık girdi değişkeninin k ve n değerleri bulunmuştur.



Şekil 5.5. Ort. trafik yükünün $\lambda = 0.4$ aralığında bulanık değerleri

Tüm bulanık girdi değişkenlerinin k ve n değerlerini bulduktan sonra DSW algoritmasının uygulama aşamaları takip edilerek Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'de gösterilen hesaplamalar yapılmıştır.

$$M_{11} = 22 \times 27 = 594$$

$$M_{12} = 22 \times 33 = 726$$

$$M_{13} = 28 \times 27 = 756$$

$$M_{14} = 28 \times 33 = 924$$

$$M_1 = f(0.4) = \begin{bmatrix} \min(594, 726, 756, 924) \times \\ \max(594, 726, 756, 924) \end{bmatrix} \\ = [594, 924]$$

$$M_{L11} = 32 \times 27 = 864$$

$$M_{L12} = 32 \times 33 = 1056$$

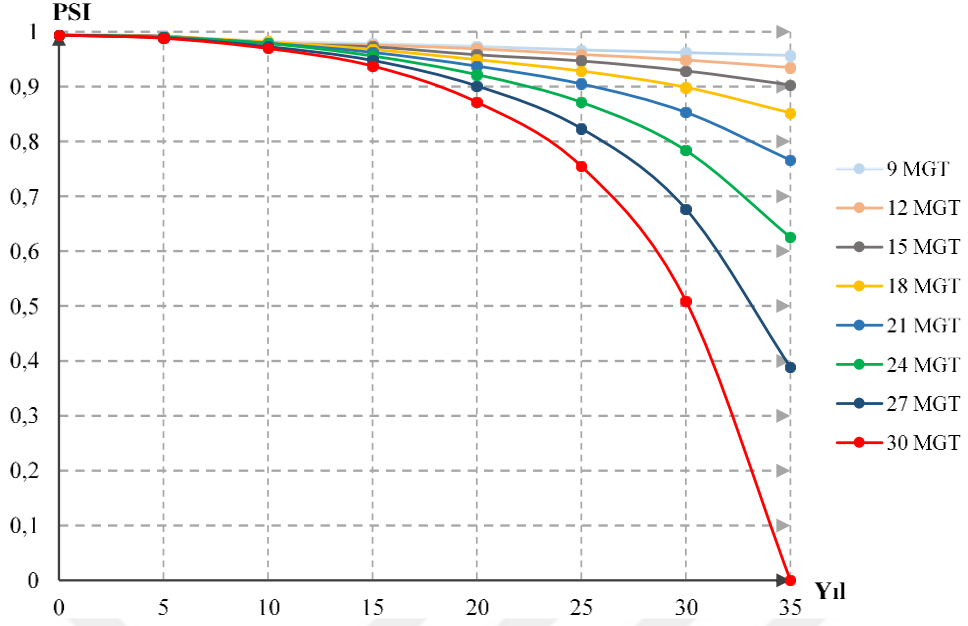
$$M_{L13} = 38 \times 27 = 1026$$

$$M_{L14} = 38 \times 33 = 1254$$

$$ML_1 = f(0.4) = \begin{bmatrix} \min(864, 1056, 1026, 1254) \times \\ \max(864, 1056, 1026, 1254) \end{bmatrix} \\ = [864, 1254]$$

$$PSI = \left[1 - \exp\left(3.76 \times \left(\frac{594}{864} - 1\right)\right) \right], \left[1 - \exp\left(6.64 \times \left(\frac{924}{1254} - 1\right)\right) \right] \\ = [0.6911, 0.8257]$$

Tüm hesaplamalarda, adım aralığı 0.1 olarak 11 λ -kesim için minimum ve maksimum PSI değerleri bulunmuş ve bu PSI değerleri kullanılarak incelenen yol kesimi için son bir grafiksel gösterim Şekil 5.6'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.7. İncelenen hat kesimi için bulanık PSI değerinin duyarlılığı

5.2. Önerilen Maliyet Modeli

Vertex yöntemi ve DSW algoritması, Çizelge 5.1’de verilen yol bölümlerinin travers B&Y faaliyetlerinin maliyet modellemesine uygulanmıştır. Uygulama adımları aşağıdaki gibidir:

1. Maliyetlerin tüm girdi değişkenleri bulanık kümeler olarak belirlenir.
2. λ -kesim için $0 \leq \lambda \leq 1,0$ arasında bir değer belirlenir.
3. Vertex yöntemini kullanarak, her bulanık girdi değişkeni λ -kesimlerine bölünür.
4. DSW algoritması yardımıyla, giriş değişkenlerinden elde edilen λ -kesimleri hesaplanır ve Denklem (3.11) kullanılarak PVF, Denklem (3.10) kullanılarak NPV ve denklem (3.13) kullanılarak RF hesaplanır ve EAC, Denklem (3.12) kullanılarak hesaplanır.
5. 4. adımdaki işlemler tüm λ kesimleri için tekrar edilir.
6. Kümülatif bulanık EAC değeri, tüm λ -kesimlerinden elde edilen EAC değerleri yardımıyla ortaya çıkar. Daha sonra bu bulanık EAC değeri, durulaştırma işlemine tabi tutulur ve yol bölümünün net bir EAC değeri elde edilir.

İncelenen parça bölümü için travers B&Y faaliyetleri dört etaba ayrılmıştır. Hat bölümünün farklı yıllarda ortaya koyacağı PSI değerleri dikkate alınarak dönem sayıları

ve yıl aralıkları belirlenir. Dönem sayıları ve yıl aralıkları farklı çalışmalar için değiştirilebilir.

TCDD'den elde edilen bilgiler doğrultusunda incelenen yol kesiminin travers B&Y işlerinin maliyetleri Çizelge 5.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 5.4. Hat bölümü için travers B&Y işleri maliyetleri

	Periyot (yıl)	İskonto Oranı	Maliyetler (TL)			
			Ekipman	İşçilik	Travers ve Diğer Malzemeler	Ulaşım
B&Y 1. dönem	0-23	%8	69000	201200.3	2000	276000
B&Y 2. dönem	23-28		51000	48939.2	10400	80000
B&Y 3. dönem	28-32		50000	44291.3	18600	78000
B&Y 4. dönem	32-35		46200	38943.5	25400	77000

Vertex yönteminin ve DSW algoritmasının uygulanması için tüm hesap ayrıntıları, B&Y 2. dönem ($\lambda = 0.6$ kesimi) ve 3. dönem ($\lambda = 0.4$ kesimi) için aşağıda gösterilmiştir. İlk olarak, tüm giriş değişkenleri bulanıklaştırılmıştır. Daha sonra her bir bulanık girdi değişkeni için λ -kesimine karşılık gelen k ve n değerleri Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6'daki gibi bulunmuştur.

DSW algoritması yardımıyla (Denklem (3.10), Denklem (3.11), Denklem (3.12) ve Denklem (3.13) kullanılarak) PVF, NPV, RF ve EAC değerleri elde edilmiştir.

B&Y 2. dönem , $\lambda = 0.6$ kesimi için gerekli hesaplamalar aşağıdaki gibidir;

Çizelge 5.5. B&Y 2. dönem $\lambda = 0.6$ kesim için bulanık maliyet değişkenlerinin aralık değerleri

Değişkenler	Üyelik Fonksiyonu			λ -Kesim Aralığı	
	L	M	R	k	n
Ekipman	41000	51000	61000	47000	55000
İşçilik	43126.56	48939.2	64940.8	43126.56	55087.84
Travers ve Diğer Malzemeler	6300	10400	15500	8640	12320
Ulaşım	64000	80000	96000	73600	86400
İskonto Oranı	0.06	0.08	1	0.072	0.088
Analiz Periyodu	3	5	7	4.2	5.8

$$FC_1 = [47000, 55000] + [43126.56, 55087.84] + [8640, 12320] + [73600, 86400]$$

$$= [172366.56, 208807.84]$$

$$PVF_{11} = 1/(1 + 0.072)^{4.2} = 0.7468$$

$$PVF_{12} = 1/(1 + 0.072)^{5.8} = 0.6681$$

$$PVF_{13} = 1/(1 + 0.088)^{4.2} = 0.7017$$

$$PVF_{14} = 1/(1 + 0.088)^{5.8} = 0.6131$$

$$PVF_1 = f(0.6) = \left[\begin{array}{l} \min(0.7468, 0.6681, 0.7017, 0.6131) \times \\ \max(0.7468, 0.6681, 0.7017, 0.6131) \end{array} \right]$$

$$= [0.6131, 0.7468]$$

$$NPV_{11} = 172366.56 \times 0.6131 = 105683.07$$

$$NPV_{12} = 172366.56 \times 0.7468 = 128716.71$$

$$NPV_{13} = 208807.84 \times 0.6131 = 128026.30$$

$$NPV_{14} = 208807.84 \times 0.7468 = 155929.65$$

$$NPV_1 = f(0.6) = \left[\begin{array}{l} \min(105683.07, 128716.71, 128026.30, 155929.65) \times \\ \max(105683.07, 128716.71, 128026.30, 155929.65) \end{array} \right]$$

$$= [105683.07, 155929.65]$$

$$RF_{11} = 0.072 \times (1 + 0.072)^{4.2} / [(1 + 0.072)^{4.2} - 1] = 0.2843$$

$$RF_{12} = 0.072 \times (1 + 0.072)^{5.8} / [(1 + 0.072)^{5.8} - 1] = 0.2169$$

$$RF_{13} = 0.088 \times (1 + 0.088)^{4.2} / [(1 + 0.088)^{4.2} - 1] = 0.2950$$

$$RF_{14} = 0.088 \times (1 + 0.088)^{5.8} / [(1 + 0.088)^{5.8} - 1] = 0.2274$$

$$RF_1 = f(0.4) = \left[\begin{array}{l} \min(0.2843, 0.2169, 0.2950, 0.2274) \times \\ \max(0.2843, 0.2169, 0.2950, 0.2274) \end{array} \right]$$

$$= [0.2169, 0.2950]$$

$$EAC_{11} = 105683.07 \times 0.2169 = 22929.18$$

$$EAC_{12} = 105683.07 \times 0.2950 = 31178.25$$

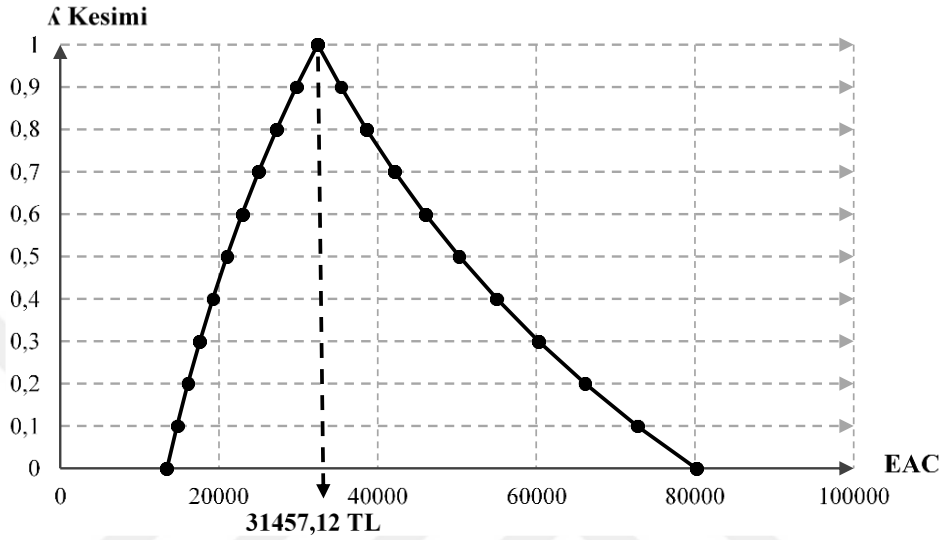
$$EAC_{13} = 155929.65 \times 0.2169 = 33830.77$$

$$EAC_{14} = 155929.65 \times 0.2950 = 46001.82$$

$$EAC_1 = f(0.4) = \left[\begin{array}{l} \min(22929.18, 31178.25, 33830.77, 46001.82) \times \\ \max(22929.18, 31178.25, 33830.77, 46001.82) \end{array} \right]$$

$$= [22929.18, 46001.82]$$

B&Y 2. dönemin $\lambda = 0,6$ kesimi için yapılan tüm hesaplamalar sonucunda minimum ve maksimum EAC değerleri sırasıyla 22929,18 TL ve 46001,82 TL olarak bulunmuştur. B&Y 2. dönemin tüm hesaplamalarla, adım aralığı 0.1 olarak 11 λ -kesim için minimum ve maksimum EAC değerleri bulunmuş ve bu EAC değerleri kullanılarak incelenen dönem için son bir grafiksel gösterim Şekil 5.8'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.8. B&Y 2. dönem için toplam EAC üyelik fonksiyonları

B&Y 3. dönem, $\lambda = 0.4$ kesimi için gerekli hesaplamalar aşağıdaki gibidir;

Çizelge 5.6. B&Y 3. dönem $\lambda = 0.4$ kesim için bulanık maliyet değişkenlerinin aralık değerleri

Değişkenler	Üyelik Fonksiyonu			λ -Kesim Aralığı	
	L	M	R	k	n
Ekipman	32000	48000	64000	38400	57600
İşçilik	31291.40	44291.4	57291.4	36491.4	52091
Travers ve Diğer Malzemeler	11250	18600	27500	13974	23736
Ulaşım	65000	78000	91000	70200	85800
İskonto Oranı	0.06	0.08	1	0.068	0.092
Analiz Periyodu	2	4	6	2.8	5.2

$$FC_1 = [69800, 84200] + [13974, 23736] + [36491.4, 52091] + [38400, 57600]$$

$$= [160486.2, 222488]$$

$$PVF_{11} = 1/(1 + 0.068)^{2.8} = 0.83176$$

$$PVF_{12} = 1/(1 + 0.068)^{5.2} = 0.71028$$

$$PVF_{13} = 1/(1 + 0.092)^{2.8} = 0.78158$$

$$PVF_{14} = 1/(1 + 0.092)^{5.2} = 0.63276$$

$$PVF_1 = f(0.4) = \left[\begin{array}{l} \min(0.83176, 0.71028, 0.78158, 0.63276) \times \\ \max(0.83176, 0.71028, 0.78158, 0.63276) \end{array} \right]$$
$$= [0.63276, 0.83176]$$

$$NPV_{11} = 160486.2 \times 0.6327 = 101550$$

$$NPV_{12} = 160486.2 \times 0.8317 = 133486.8$$

$$NPV_{13} = 222488.1 \times 0.6327 = 140782.6$$

$$NPV_{14} = 222488.1 \times 0.8317 = 185057.8$$

$$NPV_1 = f(0.4) = \left[\begin{array}{l} \min(101550, 133486.8, 140782.6, 185057.8) \times \\ \max(101550, 133486.8, 140782.6, 185057.8) \end{array} \right]$$
$$= [101550, 185057.8]$$

$$RF_{11} = 0.068 \times (1 + 0.068)^{2.8} / [(1 + 0.068)^{2.8} - 1] = 0.404196$$

$$RF_{12} = 0.068 \times (1 + 0.068)^{5.2} / [(1 + 0.068)^{5.2} - 1] = 0.234709$$

$$RF_{13} = 0.092 \times (1 + 0.092)^{2.8} / [(1 + 0.092)^{2.8} - 1] = 0.42121$$

$$RF_{14} = 0.092 \times (1 + 0.92)^{5.2} / [(1 + 0.092)^{5.2} - 1] = 0.250521$$

$$RF_1 = f(0.4) = \left[\begin{array}{l} \min(0.404196, 0.234709, 0.42121, 0.250521) \times \\ \max(0.404196, 0.234709, 0.42121, 0.250521) \end{array} \right]$$
$$= [0.234709, 0.42121]$$

$$EAC_{11} = 101550 \times 0.2347 = 23834.72$$

$$EAC_{12} = 101550 \times 0.4212 = 42774.68$$

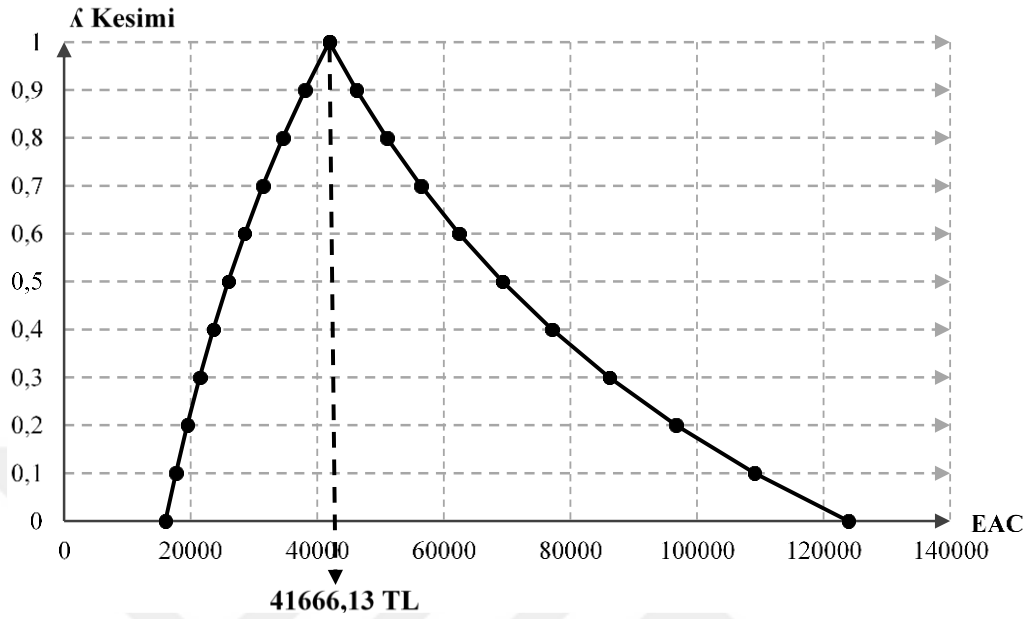
$$EAC_{13} = 185057.8 \times 0.2347 = 43434.77$$

$$EAC_{14} = 185057.8 \times 0.4212 = 77949.64$$

$$EAC_1 = f(0.4) = \left[\begin{array}{l} \min(23834.72, 42774.68, 43434.77, 77949.64) \times \\ \max(23834.72, 42774.68, 43434.77, 77949.64) \end{array} \right]$$
$$= [23834.72, 77949.64]$$

B&Y 3. dönemin $\lambda = 0,4$ kesimi için yapılan tüm hesaplamalar sonucunda minimum ve maksimum EAC değerleri sırasıyla 23834,72 TL ve 77949,64 TL olarak bulunmuştur. B&Y 3. dönemin tüm hesaplamalarla, adım aralığı 0.1 olarak 11 λ -kesim için minimum

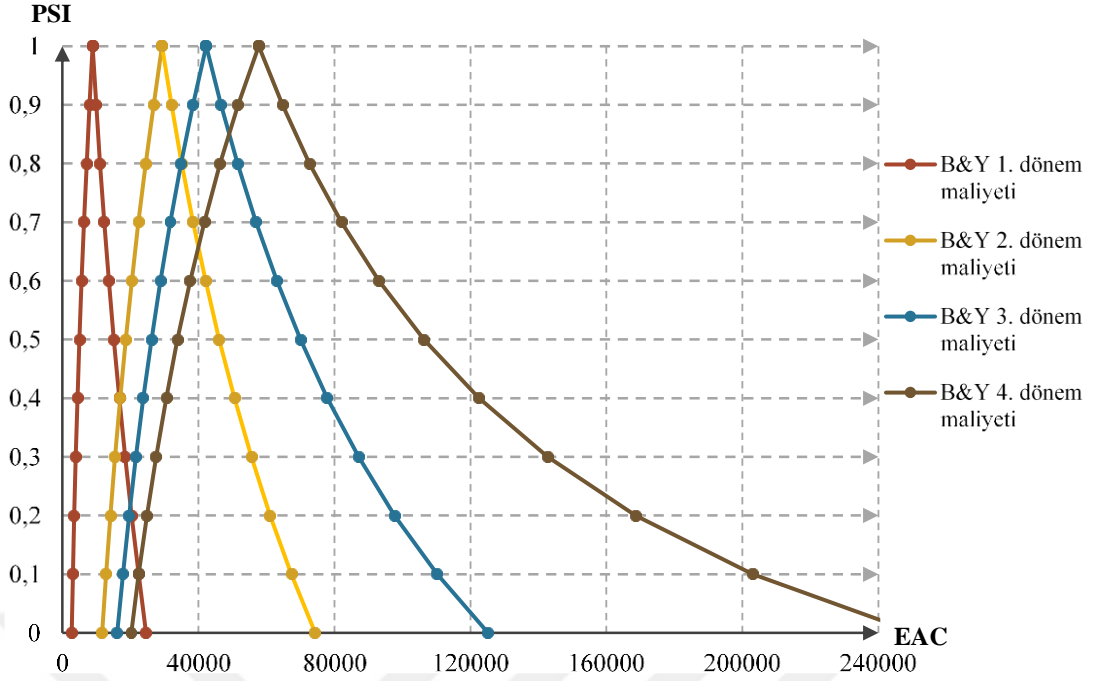
ve maksimum EAC değerleri bulunmuş ve bu EAC değerleri kullanılarak incelenen dönem için son bir grafiksel gösterim Şekil 5.9'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.9. B&Y 3. dönem için toplam EAC üyelik fonksiyonları

Tüm bu operasyonlar B&Y 1. dönem ve B&Y 4. dönem için de yapılmıştır. Hat bölümünün tüm B&Y aşaması maliyetleri Şekil 5.10'daki gibi toplam bulanık fonksiyonlara dönüştürülmüştür.

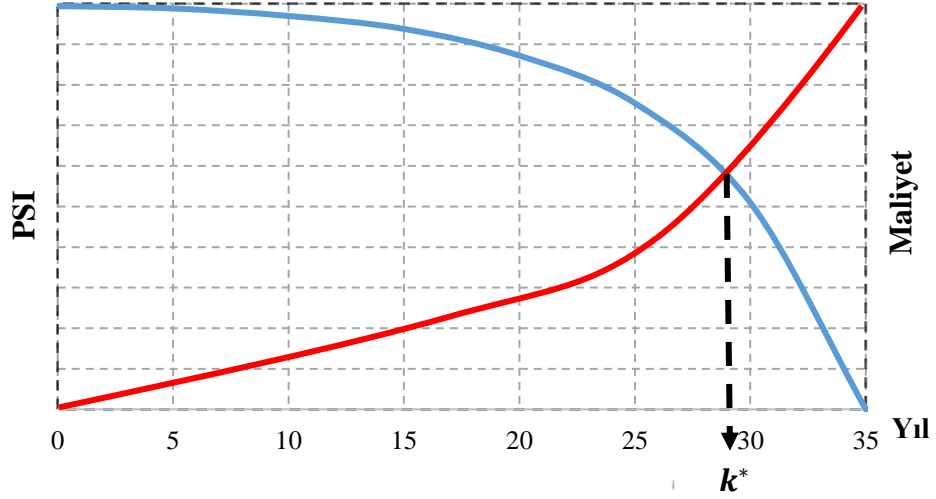
Şekil 5.10'da görülen toplam bulanık EAC üyelik fonksiyonlarının durulaştırma işlemi sonrasında, B&Y 1. dönem, B&Y 2. dönem, B&Y 3. dönem ve B&Y 4. dönem için elde edilen net EAC değerleri sırasıyla 8851,07 TL, 31457,12 TL, 41666,13 TL, 59579,52 TL'dir. Böylelikle belirsizlik etkisi en aza indirilmiş ve her bir B&Y aşaması için eşdeğer yıllık maliyetler bulunmuştur.



Şekil 5.10. B&Y maliyet aşamalarının toplam bulanık EAC üyelik fonksiyonları

Kümülatif PSI ile analiz edilen yol bölümünün kümülatif maliyet değerleri arasındaki ilişki, PSI ile maliyet arasında ters bir ilişki olduğu görülebilen Şekil 5.11’de gösterilmektedir. Her iki grafiğin kesiştiği noktaya karşılık gelen k^* yılı, yol bölümü için ekonomik bir eşik temsil eder. Diğer bir deyişle, k^* değerinden sonra, ilgili yol bölümü çok daha fazla B&Y faaliyetine ihtiyaç duyacak ve daha fazla maliyete neden olacaktır. k^* eşik, karar vericiye şu bilgi vermektedir: “Yolun yaşı bu eşik yıldan büyükse, daha fazla B&Y etkinliği gerçekleştirileceği için daha fazla bütçe tahsis edilmelidir.”

Bu çalışmada aktarılan travers yaşı 25 ve trafik yükü 30 MGT/yıl senaryosu için k^* değerinin yaklaşık 29 yıl olduğu grafikten görülmektedir. İncelenen yol kesimi için, bu analiz 25. yılda yapılmıştır ve bu yol bölümünün dört yıla varan bir süresi vardır. Ekonomik eşik olan 29. yıldan sonra, birçok B&Y faaliyetinin yapılması gerekecek ve maliyetler önemli ölçüde artacaktır. Özet olarak, Şekil 5.11, karar vericiye, yıllara karşılık gelen yol bölümünün B&Y faaliyetlerinin maliyetini göstermektedir.



Şekil 5.11. PSI'nın maliyet ile ilişkisi

5.3 Durum Çalışması

Önerilen modelin performansını göstermek için bir vaka çalışması yapılmıştır. Modelin uygulanması için belirlenen lokasyon, Türkiye'deki Kayseri ve Sivas illeri arasında 186 km uzunluğunda konvansiyonel bir demiryoludur. Konum Şekil 5.12'de gösterilmektedir. Demiryolu hattının türü yolcu ve yük taşımacılığı şeklindedir. Maksimum hız 120 km/s'dir. Hatta kullanılan travers tipi beton traversdir.



Şekil 5.12. TCDD demiryolu ağı ve vaka çalışmasının yeri (TCDD, 2019)

İncelenen demiryolu ile ilgili tüm gerekli bilgiler TCDD personelinden alınmıştır. 186 km uzunluğundaki demiryolu 250 metrelik segmentlere ayrılmıştır. Böylece toplam 744 hat kesimi değerlendirilmiştir. Denklem (3.7)'de verilen PSI hesabı ve önerilen bulanık

PSI hesap adımları, her hat segmentine ayrı ayrı uygulanmıştır. PSI ve bulanık PSI değerine karşılık gelen “kararlar” sahadaki gerçek durumla karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.7, örnek 180 hat segmenti için PSI ve bulanık PSI sonuçlarını göstermektedir. PSI ve bulanık PSI sonuçlarına karşılık gelen kararın sahadaki gerçek durumla uyumluluğu Çizelge 5.7’de "✓" işareti ile gösterilmiştir. Çizelge 5.7’deki DHS (Demiryolu Hat Segmenti) satırları, demiryolu hat segmentlerini ifade etmektedir.

Çizelge 5.7. PSI ve bulanık PSI kararlarının sahadaki vakalarla karşılaştırılması

DHS	PSI	Bulanık PSI	DHS	PSI	Bulanık PSI	DHS	PSI	Bulanık PSI	DHS	PSI	Bulanık PSI
1	✓	✓	46	✓	✓	91	✓	✓	136	✓	✓
2	✓	✓	47	✓	✓	92	✓	✓	137	✓	✓
3	✓	✓	48	✓	✓	93	✓	✓	138	✓	✓
4	✓	✓	49	✓	✓	94	✓	✓	139	✓	✓
5	✓	✓	50	✓	✓	95			140		
6	✓	✓	51	✓	✓	96	✓	✓	141	✓	✓
7	✓	✓	52	✓	✓	97	✓	✓	142	✓	✓
8	✓	✓	53	✓	✓	98	✓	✓	143	✓	✓
9		✓	54	✓	✓	99	✓	✓	144	✓	✓
10	✓	✓	55	✓	✓	100	✓	✓	145	✓	✓
11	✓	✓	56			101		✓	146	✓	✓
12	✓	✓	57	✓	✓	102	✓	✓	147	✓	✓
13	✓	✓	58	✓	✓	103			148	✓	✓
14			59		✓	104			149		
15	✓	✓	60	✓	✓	105	✓	✓	150	✓	✓
16	✓	✓	61	✓	✓	106	✓	✓	151	✓	✓
17	✓	✓	62		✓	107		✓	152		✓
18	✓	✓	63			108	✓	✓	153	✓	✓
19	✓	✓	64		✓	109	✓	✓	154	✓	✓
20		✓	65	✓	✓	110	✓	✓	155	✓	✓
21			66	✓	✓	111	✓	✓	156	✓	✓
22	✓	✓	67	✓	✓	112	✓	✓	157	✓	✓
23	✓	✓	68	✓	✓	113	✓	✓	158		✓
24	✓	✓	69	✓	✓	114	✓	✓	159	✓	✓
25	✓	✓	70			115	✓	✓	160	✓	✓

DHS	PSI	Bulanık PSI	DHS	PSI	Bulanık PSI	DHS	PSI	Bulanık PSI	DHS	PSI	Bulanık PSI
26	✓	✓	71	✓	✓	116	✓	✓	161	✓	✓
27	✓	✓	72	✓	✓	117	✓	✓	162		
28	✓	✓	73		✓	118		✓	163	✓	✓
29	✓	✓	74	✓	✓	119	✓	✓	164	✓	✓
30	✓	✓	75	✓	✓	120	✓	✓	165	✓	✓
31	✓	✓	76	✓	✓	121	✓	✓	166	✓	✓
32		✓	77	✓	✓	122		✓	167	✓	✓
33			78	✓	✓	123	✓	✓	168		✓
34		✓	79		✓	124	✓	✓	169	✓	✓
35	✓	✓	80	✓	✓	125	✓	✓	170	✓	✓
36	✓	✓	81			126	✓	✓	171	✓	✓
37	✓	✓	82	✓	✓	127	✓	✓	172	✓	✓
38	✓	✓	83	✓	✓	128			173		
39	✓	✓	84	✓	✓	129	✓	✓	174	✓	✓
40	✓	✓	85	✓	✓	130	✓	✓	175	✓	✓
41	✓	✓	86	✓	✓	131	✓	✓	176	✓	✓
42		✓	87	✓	✓	132	✓	✓	177	✓	✓
43	✓	✓	88			133	✓	✓	178	✓	✓
44	✓	✓	89	✓	✓	134	✓	✓	179	✓	✓
45	✓	✓	90	✓	✓	135	✓	✓	180	✓	✓

744 demiryolu hattı kesiminin PSI ve bulanık PSI değerleri hesaplanmış ve tüm çalışmada sahadaki fiili durum ile karşılaştırılmıştır. Önerilen modelin performans sonuçları, Bulanık PSI'nın PSI sonuçlarına göre daha başarılı olduğu Çizelge 5.8'de görülmektedir. PSI sonuçları 744 yol bölümünden 572 doğru karar verirken, bulanık PSI 662 doğru karar vermiştir. Bu durum, B&Y planlamasında belirsizlikle mücadele etmenin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.8 Önerilen modelin performans karşılaştırması

	PSI Sonuçları	Bulanık PSI Sonuçları
Performans	%77 (572/744)	%89 (662/744)

BÖLÜM VI

SONUÇ VE TARTIŞMA

Belirsizlik etkisinin ele alınması, demiryolu üstyapı B&Y yönetimi için kritik bir öneme sahiptir. Çünkü demiryolu üstyapı B&Y işleri doğasında yer alan birçok belirsiz faktöre maruz kalmaktadır. Hava ve çevresel koşullar, malzeme ve imalat kusurları, işletim koşulları gibi pek çok belirsizlik içeren faktör üstyapı yönetimini doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir. Bunun yanı sıra, demiryolu üstyapısı birçok farklı karakteristiklere sahip bileşenlerden (traversler, raylar, balast vb.) oluşmaktadır. Bu bileşenleri etkileyen belirsizlik parametreleri ve bu parametrelerin bileşenler üzerindeki etki düzeyleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu nedenle her bileşen için belirsizlik etkisi titiz bir şekilde ele alınmalıdır. Böylece, geliştirilen üstyapı modellerinin bu durumu dikkate alması önem taşımaktadır.

Bu çalışma yukarıda bahsi geçen konuya odaklanmış ve bu doğrultuda bir model önerisinde bulunmuştur. Önerilen modelin gelişim adımlarına ait gerekli tüm detaylar, çalışma kapsamında sunulmuştur. Böylelikle demiryolu üstyapı B&Y yönetimi için belirsizliklerin nasıl ele alınacağı, travers bileşenine odaklanılarak açıklanmıştır. Daha sonraki çalışmalara rehberlik etmesi ve katkı sağlaması amacıyla gereken tüm hesaplamalar mümkün olduğunca ayrıntılı verilmiştir.

Geliştirilen modelde belirsizlik, bulanık yöntemler yardımıyla ele alınmıştır. Bulanık yaklaşımların belirsizlikle ve yetersiz veri ile mücadelede oldukça başarılı olduğu önceki çalışmalardan bilinmektedir. Söz konusu yaklaşımın başarısı bu çalışma kapsamında kullanımı için tercih nedeni olmuştur. Bulanık uzantı prensiplerinden Vertex yöntemi ve DSW algoritması hibrit bir şekilde modelde uygulanmış ve başarılı bir performans elde edilmiştir. Böylelikle demiryolu B&Y faaliyetlerinde uzmanlara karar vermelerinde yardımcı olacak başarılı bir karar destek modeli sunulmuştur. Önerilen bulanık karar destek modeli Türkiye’de Kayseri-Sivas (Kalın) demiryolu hattına uygulanmış ve başarılı bir performans elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen kazanımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Demiryolu üstyapı yönetiminde belirsizliğin nasıl ele alınabileceği detaylandırılmıştır. Böylece gelecekteki çalışmalara katkı sağlayacaktır.
- Demiryolu üstyapı yönetimi için başarılı bir karar destek modeli geliştirilmiştir. Modelin performansı bir vaka çalışması ile test edilmiştir. 744 analiz segmentinde geleneksel yöntemlerle 572 doğru karara ulaşılırken, önerilen model 662 doğru karara ulaşmıştır. Yani geleneksel yöntemle %77 başarı elde edilirken önerilen model %89 başarı elde etmiştir. Bu sonuçlar önerilen modelin geleneksel yaklaşımdan daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur.
- Bu çalışmada performans modelinin yanı sıra aynı zamanda da maliyet modelinin de gelişim süreci detaylandırılmıştır. Maliyet modelinde de belirsizliğin nasıl ele alınacağı gösterilmiştir. Performans modeli ile maliyet modeli arasındaki ilişki çalışma kapsamında tartışılmıştır. Böylelikle özellikle pratikteki uygulamalar için bu çalışma anlamlı bir katkı sağlayacaktır.
- Önerilen model, herhangi bir paket yazılım kullanılmadan bir Excel sayfası yardımıyla hazırlanmıştır. Modeli hazırlama aşaması ve uygulaması oldukça kolaydır. Bu yönüyle herkes tarafından hazırlanabilir ve kullanılabilir bir niteliktedir.

Bu çalışmanın sınırlılığı hakkında şunlar söylenebilir:

- Bu çalışmada önerilen model, demiryolu üstyapısı bileşenlerinden sadece travers bakım ve yenileme faaliyetlerini dikkate almaktadır. Gelecek çalışmalarda detayları bu çalışma kapsamında verilen modelleme adımları doğrultusunda diğer üstyapı bileşenleri için de B&Y modelleri geliştirilebilir.
- Bulanık yaklaşımlar belirsizliği ele almada oldukça başarılıdır. Bu nedenle bu çalışmada bulanık yöntemler kullanılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda belirsizlikle baş edebilen diğer yöntemlerle (stokastik simülasyonlar gibi) ile önerilen modelin performansı karşılaştırılabilir.

Gelecekte, belirsizlik etkisini dikkate alan çalışmalarında, bu çalışmada detaylandırılan yöntemlerin uygulama aşamaları izlenerek demiryolu üstyapısının diğer bileşenleri için B&Y modelleri geliştirilebilir. Bu çalışmada önerilen modelin hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için umut verici olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Akbıyıklı, R. ve Bağdatlı, M. E. C., “Karayolu mühendisliğinde ekonomik analiz ölçütleri”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi* 5(1), 184-185, 2016.

Altaş, İ. H., Bulanık Mantık: Bulanıklılık kavramı, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e* 62, 80-85, 1999.

Andersson, M., Björklund, G. and Haraldsson, M., “Marginal railway track renewal costs: A Survival Data approach”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 87, 68-77, 2016.

Ammar, M., Zayed, T. and Moselhi, O., “Fuzzy-based life-cycle cost model for decision making under subjectivity”, *Journal of Construction Engineering and Management* 139(5), 556-563, 2013

Azeez, K., Zayed T. and Ammar M., “Fuzzy-Versus simulation based life-cycle cost for sewer rehabilitation alternatives.” *Journal of performance of Constructed Facilities* 27 (5), 656–665, 2013.

Bağdatlı, M.E.C., “Ulaştırma projeleri için bir stokastik risk analizi: Monte Carlo simülasyonu”, *1 St International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Çukurova Üniversitesi, Adana, 26-28 Ekim, 2016.

Bağdatlı, M. E. C., Akbıyıklı, R. and Papageorgiou, E. I., “A Fuzzy Cognitive Map approach applied in cost–benefit analysis for highway projects”, *International Journal of Fuzzy Systems, Springer* 19(5), 1512-1527, 2017.

Bağdatlı, M. E. C., “Fuzzy logic–based life-cycle cost analysis of road pavements”, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, ASCE* 144(4), 04018050, 2018.

Bağdatlı, M. E. C. ve Mutlu, S., “Demiryolu üstyapı bakım-yenileme çalışmaları için bir karar destek modeli önerisi”, *13. Ulaştırma Kongresi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 37-46, 10-12 Ekim, 2019.

Berawi, A. B., Improving railway track maintenance using Power Spectral Density (Psd), PhD Thesis, *Faculdade De Engenharia Universidade Do Porto*, Porto, Portugal, 2013.

Bilgiç, Ş., Yalınız, P. ve İca, S., “Demiryollarında bakım ve onarım faaliyetlerinin yol geometrisi kalitesine etkilerinin araştırılması: Kütahya-Afyonkarahisar Demiryolu Hattı örneği”, *Engineering Sciences* 12(1), 40-45, 2017.

Bocciolone, M., Caprioli, A., Cigada, A. and Collina, A., “A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy”, *Mech. Syst. Sig. Process.* 21(3), 1242–1254, 2007.

BSI 13450, Aggregates for railway ballast, *British Standards Institution*, London, 2003.

BSI 13848: Part 5, Railway applications/track-track geometry quality. Geometric quality levels, *British Standards Institution*, London, 2008.

Budai, G., Huisman, D. and Dekker, R., “Scheduling preventive railway maintenance activities”, *Journal of the Operational Research Society* 57(9), 1035-1044, 2006.

Caetano, L. F. and Teixeira, P. F., “Availability approach to optimizing railway track renewal operations”, *Journal of Transportation Engineering* 139(9), 941-948, 2013.

Caetano, L. F. and Teixeira, P. F., “Optimisation model to schedule railway track renewal operations: A life-cycle cost approach”, *Structure and Infrastructure Engineering* 11(11), 1524-1536, 2015.

Crainic, T. G., “Rail tactical planning: Issues, models and tools”, *In Freight Transport Planning and Logistics*, 463-509, 1988.

Dao, C. D., Hartmann, A., Lamper, A. and Herbert, P., “Scheduling infrastructure renewal for railway networks”, *Journal of Infrastructure Systems* 25(4), 04019027 2019.

Doğan, Z. ve Dikmen, B. B., “Ulaştırma sektöründe yer alan işletmelerde hizmet sunumu sırasında ortaya ıkan maliyetlerin izlenmesi”, **Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi** 11(2), 24-39, 2018.

Dong, W. M., Shah, H. C. and Wongt, F. S. (1985), “Fuzzy computations in risk and decision analysis”, *Civil Engineering Systems* 2(4), 201-208, 1985.

Dong, W. and Shah, H. C., “Vertex method for computing functions of fuzzy variables”, *Fuzzy Sets and Systems* 24(1), 65-78, 1987.

Eisenmann, J., “Die weiterentwicklung des Eisenbahn-Oberbaus-Auswirkung auf Langzeitverhalten und Körperschall-Emission”, *Zev+Det Glasers Annalen* 4/1996, 1996.

Ferreira, L. and Higgins, A., “Modelling aspects of rail track maintenance scheduling”, *American Society of Civil Engineers*, 1998.

Grimes, C. A., “Application of Genetic Techniques to the planning of railway track maintenance work”, *In First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, Sheffield, UK, s. 467-472, 12-14 September, 1995.

Grimes, G. A. and Barkan, C. P., “Cost-effectiveness of railway infrastructure renewal maintenance”, *Journal of Transportation Engineering* 132(8), 601-608, 2006.

Guler, H., Demiryolu hat geometrisi bozulmasının bilgi sistemler destekli modellenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2005.

Guler, H., Jovanovic, S. and Evren, G., “Modelling railway track geometry deterioration”, *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* 164/2, 65-75, 2011.

Guler, H., “Decision support system for railway track maintenance and renewal management”, *Journal Of Computing in Civil Engineering* 27(3), 292-306, 2013.

Guler, H., “Prediction of railway track geometry deterioration using Artificial Neural Networks: A case study for Turkish State Railways”, *Structure and Infrastructure Engineering* 10(5), 614-626, 2014.

Guler, H., “Optimisation of railway track maintenance and renewal works by Genetic Algorithms”, *Gradevinar* 68(12), 979-993, 2016.

Hidirov, S., Demiryolu altyapı yönetiminde güvenilirlik, bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analiz tekniklerinin kullanılması, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya 20-24, 2019

Jovanović, S., Božović, D. and Tomičić-Torlaković, M., “Railway infrastructure condition monitoring and analysis as a basis for maintenance management”, *Gradevinar* 66(04), 347-358, 2014.

Jovanovic, S. and Korpanec, I., “Ecotrack: experiences from implementation and use”, *Rivista Ingegneria Ferroviaria*, 2000.

Jovanovic, S., Guler, H. and Coko, B., “Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems”, *Gradevinar* 67(3), 247-257, 2015.

KGM, Karayolu Ekonomisi ve Proje Değerlendirme Teknikleri, Karayolu Temel Kursu, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, 2013.

Kumar, S., A Study of the Rail Degradation Process to Predict Rail Breaks. Doctoral Dissertation, PhD Thesis, *Luleå Tekniska Universitet*, Luleå, 2006.

Kumar, V. A., “Analysis of Fm/Fm/1 queueing system with Pentagon Fuzzy Numbers and using Dsw Algorithm”, *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology* 3(5), 2017.

Lichtberger, B., Railway Handbook, *Eurail Press Dvv Media Group*, Gmbh, Hamburg, Germany, 2011.

Luber, B., “Railway track quality assessment method based on vehicle system identification”, *E & I Elektrotechnik and Informationstechnik* 126(5), 180-185, 2009.

Mieloszyk, E., Grulkowski, S. and Milewska, A., “Forecasting of railway track tamping based on settlement of sleepers using Fuzzy Logic”, *Acta Scientiarum Polonorum. Seria: Architectura*, 135-142, 2018.

Miwa, M. and Oyama, T., “All-integer type linear programming model analyses for the optimal railway track maintenance scheduling”, *Opsearch* 41(3), 155-164, 2004.

Narayanamoorthy, S. and Ramya, L., “Multi server fuzzy queuing model using Dsw Algorithm with Hexagonal Fuzzy Number”, *International Journal of Pure and Applied Mathematics* 117(11), 385-392, 2017.

Neuhold, J., Landgraf, M., Marschnig, S. and Veit, P., “Measurement data-driven life-cycle management of railway track”, *Transportation Research Record*, 0361198120946007, 2020.

Nielsen, J. C., Berggren, E. G., Hammar, A., Jansson, F. and Bolmsvik, R., “Degradation of railway track geometry—correlation between track stiffness gradient and differential settlement”, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal Of Rail and Rapid Transit* 234(1), 108-119, 2020.

Patra, A. P., Söderholm, P. and Kumar, U., “Uncertainty estimation in railway track life-cycle cost: A case study from Swedish National Rail Administration”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 223(3), 285-293, 2009.

Plasser and Theurer, Export Von Bahnbaumaschinen Gesellschaft M.B.H, Johannesgasse 3, Wien, Austria, 42-123, 2013.

Quiroga, L. M. and Schnieder, E., “Monte Carlo simulation of railway track geometry deterioration and restoration”. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* 226(3), 274-282, 2012.

Rausand, M. and Vatn, J., Reliability Centred Maintenance, *In Complex System Maintenance Handbook*, Springer, London, s. 79-108, 2008.

Rogers, M., Highway Engineering, *Blackwell Publishing Ltd.*, Uk., 2003.

Ross, T. J., Fuzzy Logic with Engineering Applications, 3rd ed., *John Wiley & Sons.*, 2010.

Sadeghi, J., “Development of railway track geometry indexes based on statistical distribution of geometry data”, *Journal of Transportation Engineering* 136(8), 693-700, 2010.

Sedghi, M., Data-driven predictive maintenance planning and scheduling, PhD Thesis, *Luleå University Of Technology*, Luleå, 2020.

Sharma, S., Cui, Y., He, Q., Mohammadi, R. And Li, Z., “Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 90, 34-58, 2018.

Sousa, N., Alçada-Almeida, L. and Coutinho-Rodrigues, J., “Multi-objective model for optimizing railway infrastructure asset renewal”, *Engineering Optimization* 51(10), 1777-1793, 2019.

Tso, B. and Mather, P. M., “Classification methods for remotely sensed data”, *Taylor and Francis Group.*, 2001.

TCDD, TCDD hat bakımı el kitabı, *Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Yol Dairesi Başkanlığı*, Ankara, 2013.

TCDD-Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, Demiryolu haritası, Ölçek 1:1.800.00, 1 Sayfa, Tcdd, Ankara, 2019.

UAB, Ulaşan ve Erişen Türkiye 2018, *T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı*, Ankara, 2018.

Vale, C., Ribeiro, I. M. and Calçada, R., “Integer programming to optimize tamping in railway tracks as preventive maintenance”, *Journal of Transportation Engineering* 138(1), 123-131, 2012.

Verma, R., Koul, S. and Prasad, B., “Expert system—a case of Indian Railways Track maintenance and renewal operations”, *Available at Ssrn 3563091*, 2020.

Yaman, O., Karaköse, M. and Akın, E., “A vision based diagnosis approach for multi rail surface faults using fuzzy classification in railways”, *International Conference on Computer Science and Engineering (Ubmek)*, s.713-718, 5-7 October, 2017.

Zhang, T., Andrews, J. and Wang, R., “Optimal scheduling of track maintenance on a railway network”, *Quality and Reliability Engineering International* 29(2), 285-297, 2013.

Zhao, J., Chan, A. H. C., Roberts, C. and Stirling, A. B., “Assessing the economic life of rail using a stochastic analysis of failures.”, *J. Rail Rapid Trans. Part F* 220(2), 103–11, 2006.

EK- A Performans Modeli Excel (Örnek)

MI için değerler (Sa = 35 La = 30)					MI için değerler (S = 0 L = 3)					MI = Sa * La (Sa = 35 La = 30)					M = S * L (S = 5 L = 0)													
A kesimi	Sa		La		A kesimi	S		L		ML0	ML0,1		ML0,2		ML0,3		ML0,4		ML0,5	ML0,6		ML0,7		ML0,8		ML0,9		ML1
	k	n	k	n		k	n	k	n		k	n	k	n	k	n	k	n		k	n	k	n	k	n	k	n	
0	30	40	25	35	0	0	0	0	8	750	1050	1000	1400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	30,5	39,5	25,5	34,5	0.1	0	0	0	7,5	777,75	1052,25	1007,25	1362,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	31	39	26	34	0.2	0	0	0	7	806	1054	1014	1326	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	31,5	38,5	26,5	33,5	0.3	0	0	0	6,5	834,75	1055,25	1020,25	1289,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	32	38	27	33	0.4	0	0	0	6	864	1056	1026	1254	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	32,5	37,5	27,5	32,5	0.5	0	0	0,5	5,5	893,75	1056,25	1031,25	1218,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	33	37	28	32	0.6	0	0	1	5	924	1056	1036	1184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.7	33,5	36,5	28,5	31,5	0.7	0	0	1,5	4,5	954,75	1055,25	1040,25	1149,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	34	36	29	31	0.8	0	0	2	4	986	1054	1044	1116	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9	34,5	35,5	29,5	30,5	0.9	0	0	2,5	3,5	1017,75	1052,25	1047,25	1082,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	35	35	30	30	1	0	0	3	3	1050	1050	1050	1050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A kesimi	MIN	MAKS	Kf	Psi	n
0	0	0	4,4	0,987723	0,997521
0.1	0	0	4,48	0,988667	0,997315
0.2	0	0	4,56	0,989538	0,997091
0.3	0	0	4,64	0,990342	0,996849
0.4	0	0	4,72	0,991085	0,996586
0.5	0	0	4,8	0,991777	0,996302
0.6	0	0	4,88	0,992403	0,995994
0.7	0	0	4,96	0,992987	0,995661
0.8	0	0	5,04	0,993526	0,995299
0.9	0	0	5,12	0,994024	0,994908
1	0	0	5,2	0,994483	0,994483

A kesimi	MIN	MAKS	Kf	Psi	n
0	0	0	4,4	0,987723	0,997521
0.1	0	0	4,48	0,988667	0,997315
0.2	0	0	4,56	0,989538	0,997091
0.3	0	0	4,64	0,990342	0,996849
0.4	0	0	4,72	0,991085	0,996586
0.5	0	0	4,8	0,991777	0,996302
0.6	0	0	4,88	0,992403	0,995994
0.7	0	0	4,96	0,992987	0,995661
0.8	0	0	5,04	0,993526	0,995299
0.9	0	0	5,12	0,994024	0,994908
1	0	0	5,2	0,994483	0,994483

ÖZGEÇMİŞ

Sueda Mutlu, ilk ve orta öğrenimini Nevşehir-Kaymaklı Atatürk ilkokulunda tamamladı. 2011-2014 yılları arasında Ürgüp Tesan Anadolu Öğretmen lisesi, 2014-2015 yılları arasında Nevşehir Anadolu Lisesinde lise öğretimini tamamladı. 2015 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Kasım 2018'de mezun oldu. Lisans dönemi stajlarını demiryolu ulaştırma sistemi üzerine yaptı. Şantiye stajını İstanbul Marmaray Projesi, Söğütlüçeşme-Pendik güzergahı üstyapı inşası üzerine gerçekleştirdi. Büro stajını ise yine aynı şantiyenin ofisinde tamamladı. 2019 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet ulusal bildiri, 1 adet de uluslararası makale üretilmiştir. Üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Bağdatlı, M. E. C. & Mutlu, S. (2019). “Demiryolu Üstyapı Bakım-Yenileme Çalışmaları için Bir Karar Destek Modeli Önerisi”. 13. Ulaştırma Kongresi, Erzurum, Türkiye.

Bagdatli, M. E. C. & Mutlu, S. “A Fuzzy-Based Decision Support Model for Track Maintenance and Renewal Management”, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, (Under Review).