

# Demiryolu hat geometrisi bozulmasının bilgi sistemler destekli modellenmesi

Hakan GÜLER\*, Güngör EVREN

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Bu çalışmanın ana amacı, demiryolu hat geometrisi bozulmasını modellemek ve elde edilen modeli daha etkin ve verimli bir demiryolu hat bakım-yenileme yönetimi sağlamak için CBS ortamında çalıştırmaktır. Bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, veri tabanı oluşturmak ve analizler yapmak için CBS ortamına aktarılmıştır. Yaklaşık 180 km uzunluğunda ki demiryolu hattı analiz kesimlerine bölünmüştür. Göz önüne alınan her bir analiz kesimi en küçük temel uzunluğa sahiptir. Her bir temel analiz kesimi için, mümkün olan tüm genel hat verisi sağlanmıştır. Çok değişkenli istatistik analiz yapılarak hat geometrisi parametrelerinin katsayıları tahmin edilmiş ve sonuçlar verimli hat bakım-yenileme yönetimi sağlamak için CBS ortamına aktarılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** *Analiz kesimi, hat geometrisi, hat geometrisi bozulması, çok değişkenli istatistik analiz, Coğrafi Bilgi Sistemleri.*

## Modeling railway track geometry deterioration: information systems based study

### Abstract

*Geographic Information Systems (GIS) has been proving its capability as a powerful management system in railways. Currently, there are many studies focused on the way to enhancing existing GIS approaches to enable the complete range of capabilities needed in railways research and management. Costs of permanent way and its M&R are substantial and form a large part of the total infrastructure expenditure. Any reduction of these costs has a significant impact on the overall efficiency of the management of infrastructure. The process of determining whether, when, where and how to intervene and deciding on an optimum allocation of resources and minimizing the cost is a very complex problem. The main goal of this study is to model track geometry deterioration and to operate the deterioration model on GIS environment for efficient railway track maintenance and renewal management. In this study, Turkish State Railways were transferred into GIS environment to develop database and to realize analysis. A model length of about 180 kilometers was divided into analyses segments. The length of the individual analyses segments considered was the minimum basic length. For each basic analyses segment, the general information was provided as far as possible. Multivariate statistical analysis was performed to estimate the coefficients of track geometry parameters and the findings were transferred into GIS environment for efficient track maintenance and renewal management.*

**Keywords:** *Analysis segment, track geometry, track geometry deterioration, multivariate statistical analysis, geographical information systems.*

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hakan GÜLER. hguler@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 36 69.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Demiryolu hat geometrisi bozulmasının bilgi sistemler destekli modellenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 18.10.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 16.11.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Demiryolu hattına yapılan bakım ve yenileme (BY) çalışmalarının maliyeti oldukça yüksektir. BY çalışmalarına yapılan harcamaların azaltılabilmesi için hat bakımından sorumlu mühendislerin hatla ilgili yeteri verilere sahip olmaları gerekmektedir. Eldeki bu verilerle yapılacak bilgisayar destekli çalışmalarla etkin BY programları hazırlanabilir (Jovanovic ve Korpanec, 2000). Aynı zamanda bilgisayar destekli BY çalışmaları etkin bir demiryolu varlık yönetim sistemi için de gereklidir (Wittwer vd., 2002). Demiryolu hattında otomatik olarak elde edilen veriler, kullanılan teknoloji düzeyine bağlı olmakla birlikte bazı demiryollarında hâlâ sınırlı düzeydedir. Demiryolu hattıyla ilgili yapılacak geleceğe dönük çalışmalarda elde edilmesi gereken veriler şunlardır: görsel kontroller, hat planı, işletme verisi, hız azaltma sebepleriyle ilgili veriler, ufak bakımlar, değişen hat bileşenleri, geçmiş BY çalışmaları ve maliyetleri. BY modellerinin oluşturulmasında kullanılacak analiz kesimlerinin uzunlukları demiryolu organizasyonuna bağlı olarak değişir. Genellikle demiryolu kontrol araçlarıyla belirlenen kalite indekslerinin ait oldukları uzunluklar analiz kesimleri olarak alınır. Bu uzunluklar yaklaşık 100-200 m arasında veya kilometre düzeyinde olabilirler. Daha sonra bu analiz kesimleri bir araya gelerek BY amaçları için hat kesimlerini oluştururlar (Esveld, 2001).

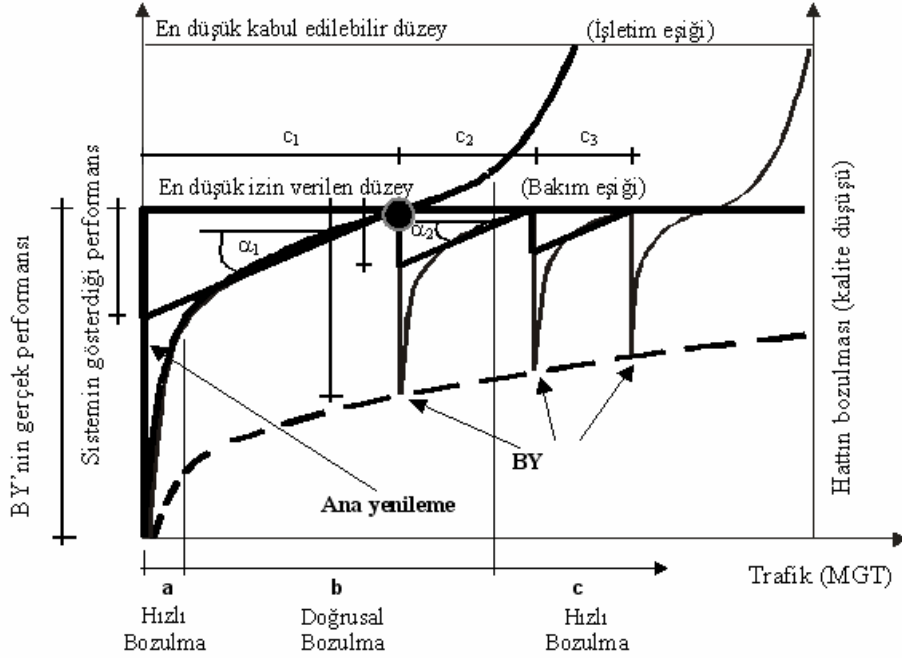
## Teorik hat bozulma modeli

Demiryolu hattının durumu, hattı oluşturan bileşenler ve bunların konumları ile ifade edilir. Hattı oluşturan bileşenler ve hattın durumu, hattın bozulması ve yenilenmesi gibi karmaşık süreçlerde birbirleriyle yakın ilişki içindedirler. Şayet bu elemanlardan birisi kötü durumdaysa, bu diğerinin bozulmasına da sebep olacaktır. Yani hattı oluşturan bileşenler kötü durumdaysa, hattın konumunu istenen düzeyde tutmak mümkün değildir. BY programları oluşturulurken demiryolu hattının yaşı dikkate alınır. Bu sebeple kurulan modelde demiryolu hattı “Genç”, “Yaşlı” ve “Orta” diye yaş dönemlerine ayrılır. Bu dönemlerin her birinin sürekliliği ve ömrü hattın karakteristiklerine bağlı olarak de-

ğişir. Bunun yanında hattın maruz kaldığı yükler, bakım faaliyetlerinin sayısı ve ölçeği bu gruplar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Demiryolu hattına yapılacak BY faaliyetleri ile ilgili temel ilke, demiryolu hattında meydana gelen bozulmaların zaman içinde gözlenmesi ve saptanması esasına dayanır. Şekil 1’de gösterilen kalın siyah eğrisel çizgi, herhangi bir bakım yapılmayan hatta ait kuramsal bozulmayı göstermektedir. Aynı zamanda bu eğri üzerinde hattın üç yaş dönemi tespit edilebilir. “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 (Şekil 1’de a ile işaretli kesim). Bu dönemin tahmin edilmesi zor olduğu gibi bir hat kesiminden diğerine önemli derecede farklılık gösterir. Bu sebeple bu dönemin modellendirilmesi oldukça güçtür. Şans eseri bu dönemin çok kısa olması, ihmal edilen sonuçların da az olmasını sağlar.

“Orta” yaş döneminde yeterince dengeye ulaşan demiryolu hattı doğrusal bir bozulma gösterir. Demiryolu hatlarının ekonomik ömürleri süresince sıkça görülen bu dönemde modeller kurularak analizler yapılabilir (Şekil 1’de b ile işaretli bölge). “Yaşlı” dönem ise demiryolu hatlarının ömürlerinin en son bölümünde görülür ve çok hızlı bir bozulmayla karakterize edilir. Bu dönemde bozulma ekponensiyel bir şekil gösterir (Şekil 1’de c ile işaretli bölge). Trafik güvenliğini etkileyebileceğinden üçüncü bölümün gerçekleşmesine izin verilmez. Zamanından önce yapılan BY faaliyetleri maliyetleri arttırdığından dolayı kaçınılır. Bu sebeple BY faaliyetlerinin başlayacağı bir eşik değeri belirlenir (Şekil 1’de yatay siyah çizgi). Demiryolu hattında meydana gelen bozulma değeri bu eşik değere ulaştığında BY faaliyetleri başlar. Demiryolu hattında BY faaliyetleri ile ilgili bir model kurulacağı zaman, demiryolu hattının bozulmasının doğrusal olduğu dönem içindeki ölçülen veriler analiz edilir. Demiryolu hattının bozulma derecesini gösteren bu ölçülmüş değerlerin analiz edilmesiyle bunların dağılımına uygun hesap yöntemleri ve enterpolasyonlarla, demiryolu hattının



Şekil 1. Demiryolu hattının teorik bozulması ve alınan önlemler (Guler ve Jovanovic, 2003)

bozulma davranışı belirlenmeye çalışılır (Guler ve Jovanovic, 2003). Demiryolu hattında BY faaliyetleri ile ilgili eşığın belirlenmesinden sonra (Şekil 1'deki yatay siyah çizgi), hattın bozulmasını gösteren doğrunun BY eşığına varacağı zaman (veya tonaj) hesaplanır. Hattın bozulmasını gösteren doğrunun eşik değerine ulaştığı kesime uygun BY faaliyeti (örneğin sıkıştırma) yapılarak o kesimin kalite artışı gerçekleştirilir.

Uygun BY faaliyetleriyle hattın kalitesi artırıldıktan sonra, hattın bozulma süreci tekrar başlar. Demiryolu hattının yaşlanmasıyla birlikte, zamanla bazı durumlar da değişecektir. Değişenlerden birisi demiryolu hattına yapılan BY faaliyetlerinin verimidir. Yani Şekil 1'de görüldüğü gibi siyah çizgi ile gösterilen düşey yöndeki düşüşlerin derecesi her BY faaliyetinden sonra değişir. Şekil 1'deki kesikli siyah çizgi BY faaliyetlerindeki verimin zamanla olan değişimini daha açık bir şekilde göstermektedir. Demiryolu hattının yaşlanmasıyla ilgili değişen durumlardan diğeri ise bozulma oranıdır. Şekil 1'de  $\alpha$  açısı değeri ile gösterilen bozulma oranları zamanla değişir. Gittikçe BY faaliyetlerinin tekrarlanma süresi kısaltılmaya başlar. Sonunda BY faaliyetlerinin frekansı çok fazla olur. BY faali-

yetlerine devam etmek ekonomik ve teknik yönden mantıklı olmaz. Bu sebeple demiryolu hattının yeniden yapılması gerekir. (Guler vd., 2004).

#### Hat geometrisi bozulmasının modellenmesi

TCDD birinci bölgede bulunan çalışma güzergahı Arifiye-Eskişehir arasındaki 183.2 km uzunluğundaki demiryolu hattı kesimi, BY modelinin oluşturulması düşüncesiyle homojen kesimlere (analiz kesimlerine) bölünmüştür. Bu bölme işlemi yapılırken demiryolu hattının aşağıda sıralanan özellikleri dikkate alınmıştır (Rapor D161, 1987):

Boyuna eğim (%), Kurp durumu ve yarıçapı (m), Dever durumu ve miktarı (mm), Hızlar (km/sa), Yaş (yıl), Ray tipi (kg/m), Ray uzunluğu (m), Travers tipi.

Yukarıda sıralanan özelliklere uygun olarak, Arifiye-Eskişehir arasında 820 tane homojen kesim elde edilmiştir. Analiz kesimleri belirlendikten sonra; heyelan durumu, sel durumu, taş düşme ve kar tutma gibi çevresel koşullar, bozulmaya olan etkilerinin belirlenmesi için analizlere dahil edilmiştir. Demiryolu kontrol amacıyla yapılan toplam 14 dönemlik hat geometrisi

ölçümlerinin veri tabanı oluşturularak aşağıdaki  $[B_i]_{820 \times 14}$  bozulma matrisi elde edilmiştir. Burada  $B_i$ 'ler milimetre cinsinden bozulma değerlerine karşılık gelmektedir (Guler ve Jovanovic, 2004).

$$[B_i]_{820 \times 14} = \begin{bmatrix} B_{i11} & B_{i12} & B_{i13} & \dots & B_{i114} \\ B_{i21} & B_{i22} & B_{i23} & \dots & B_{i214} \\ B_{i31} & B_{i32} & B_{i33} & \dots & B_{i314} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{i8201} & B_{i8202} & B_{i8203} & \dots & B_{i82014} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Altı aylık bozulma değerleri analiz kesimlerinin bozulma oranlarının tespit edilmesinde yetersiz kalmışlardır. Çünkü demiryolu hattına yapılan BY çalışmalarından dolayı hatta iyileşmeler meydana gelmiştir. Demiryolu kontrol aracının ölçüm sonuçlarının hattın bozulma oranı ve derecesi hakkında bir fikir verememesinden dolayı, incelenen dönemlerde demiryolu hattına yapılan BY çalışmaları tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu Arifiye-Eskişehir arasındaki hat kesimine 1995-2001 yılları arasında gerçekleştirilen toplam 84 aylık BY çalışmaları tespit edilmiştir. Demiryolu hattına yapılan BY çalışmaları birimleriyle birlikte Tablo 1'de gösterilmiştir (TCDD Yıllık Bakım-Yenileme Raporları, 2000).

Tablo 1. Demiryolu hattına yapılan BY çalışmaları

No	BY Çalışmaları	Birimi
1	Terfi Tazim Buraj (elle)	m
2	Makineli Buraj	m
3	Küçük Malzeme Bakımı	adet
4	Küçük Malzeme Değişirme	adet
5	Travers Değişirme	adet
6	Ray Değişirme	adet
7	Ray Kaynağı ve UKR Çalışması	adet
8	Ray Göbek Dolgu Kaynağı	adet
9	Plastik Dübel Değişirme	adet
10	Plastik Selet ve Yüksük Tebdili	adet
11	Eski Balastın Elenmesi ve Platform Tazimi	m
12	Makineli Yol Elemesi	m

Bilindiği gibi demiryolu hattı geometrisi başlıca düşey ve yatay geometriden oluşmaktadır. Demiryolu hattının düşey geometrisini burulma,

nivelman ve dever parametreleri belirlemektedir. Hattın yatay geometrisini ise hattın eksen durumu ve hat genişliği belirlemektedir. Demiryolu hattı geometrisinde meydana gelen bozulmaların her bir parametre için ayrı ayrı modellerinin oluşturulması için her bir parametreyi iyileştiren BY çalışmasının belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 1'deki BY çalışmaları dikkate alındığında, 1,2,11 ve 12 numaralı BY çalışmalarının düşey geometri üzerinde yani burulma, dever ve nivelman üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Yine Tablo 1 dikkate alındığında, 3, 4, 5, 6, 9 ve 10 numaralı BY çalışmalarının yatay geometri üzerinde yani hattın eksen durumu ve hat genişliği üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Aşağıdaki Tablo 2'de hat geometrisi bozulmaları ve bunlar üzerinde etkili olan BY çalışmaları gösterilmiştir (TCDD Yıllık Bakım-Yenileme Raporları, 2000).

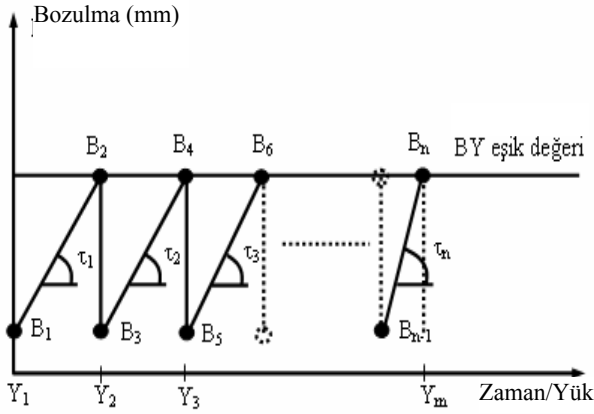
Tablo 2. Hat geometrisi bozulmaları ve bunlar üzerinde etkin olan BY çalışmaları

No	Bozulma Tipi	Etkili BY
1	Burulma	1,2,11,12
2	Hat Genişliği	3,4,5,6,9,10
3	Eksenden sapma	3,4,5,6,9,10
4	Dever	1,2,11,12
5	Nivelman	1,2,11,12

Demiryolu hattına yapılan BY çalışmalarını da dikkate alan bir model geliştirilmesi aşamasında, her bir hat geometri parametresinin ilgili BY çalışması yapıldığı zamanda bozuk olduğu kabul edilmiştir. BY eşik tablosu esas alınarak, her bir hat geometri parametresinin bozuk olduğunun kabul edildiği yani BY çalışmalarının olduğu döneme, bozulma değerleri bir program yazılarak atanmıştır. Yazılan program kullanılarak, altı aylık dönemlerde demiryolu kontrol aracıyla elde edilen toplam 14 dönemlik hat geometrisi ölçümlerinden ve 84 aylık dönemde BY çalışmalarından elde edilen bozulma değerlerinden bir veri tabanı oluşturularak aşağıdaki  $[B_i]_{820 \times 84}$  bozulma matrisi elde edilmiştir. Burada  $B_i$ 'ler milimetre cinsinden bozulma değerlerine karşılık gelmektedir.

$$[B_i]_{820 \times 84} = \begin{bmatrix} B_{i11} & B_{i12} & B_{i13} & \dots & B_{i184} \\ B_{i21} & B_{i22} & B_{i23} & \dots & B_{i284} \\ B_{i31} & B_{i32} & B_{i33} & \dots & B_{i384} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ B_{i8201} & B_{i8202} & B_{i8203} & \dots & B_{i82084} \end{bmatrix} \quad 2) \quad [\bar{\tau}_i]_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \tau_{i1} \\ \tau_{i2} \\ \tau_{i3} \\ \vdots \\ \tau_{in} \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (5)$$

Her bir hat geometrisi parametresi için bozulma değerleri belirlendikten sonra bozulma oranlarının tespit edilmesi aşamasına geçilmiştir. Bozulma oranlarının belirlenmesi için çalışma güzergahından geçen trafiğin yığışımlı yükleri 2001 yılına kadar tespit edilmiştir. Analiz kesimlerine ait her bir hat geometrisi parametreleri için Şekil 2’de görüldüğü gibi bozulma doğrularının eğiminden bozulma oranları tespit edilmiştir ( $\tau_{ij}$ ).



Şekil 2. Bozulma oranlarının tespit edilmesi

$$\tau_{ij} = \frac{B_j - B_i}{Y_j - Y_i} \quad (3)$$

Bozulma oranları belirlendikten sonra, analiz kesimlerinin her bir hat geometri parametresi için 1995-2001 yılları arasında toplam 84 aylık ortalama bozulma oranları tespit edilmiştir.

$$\bar{\tau}_i = \frac{\sum_{ij} \tau_{ij}}{N} \quad (4)$$

Sonuç olarak analiz kesimlerinin her bir parametresi için  $[\bar{\tau}_i]_{820 \times 1}$  bozulma oranı matrisi elde edilmiştir.

Bu çalışmada bağımlı değişkeni etkileyen birden çok bağımsız değişken söz konusudur. Bu durumda, çoklu regresyon çözümlemesi gündeme gelmektedir. Çoklu regresyon çözümlemesi yardımıyla; bir bağımlı değişken ile birden çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiler matematiksel modellerle incelenebilir ve bağıntılar kurulabilir (Reha, 2003; Montgomery vd., 2001).

Bu çalışmada demiryolu hat geometrisinin bozulma modelinin belirlenmesinde kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Bağımlı değişken: ( $\tau$ ) Bozulma oranı (mm/ton)
- 2) Bağımsız değişkenler: ( $x_1$ ) Yığışımlı yük (milyon ton), ( $x_2$ ) Hız (km/sa), ( $x_3$ ) Eğrilik (1000/R), ( $x_4$ ) Boyuna eğim (%o), ( $x_5$ ) Dever miktarı (mm), ( $x_6$ ) Travers tipi (Betonarme, ahşap), ( $x_7$ ) Ray tipi (49,050 kg/m, 49,430 kg/m), ( $x_8$ ) Ray uzunluğu (UKR(uzun kaynaklı ray), diğer uzunluklar), ( $x_9$ ) Taş düşme, ( $x_{10}$ ) Heyelan, ( $x_{11}$ ) Kar, ( $x_{12}$ ) Sel.

Regresyon çözümlemesinde, bağımsız değişkenler sürekli ve kesikli sayısal veri tipinde olabildiği gibi sıralı (ordinal) ya da nitelik (nominal) tipinde de olabilmektedirler. Bu gibi nitelik tipteki bağımsız değişkenleri göstermelik değişken (dummy variable) şekline dönüştürerek modele katmak olanaklıdır. Bu çalışmada kullanılan travers tipi (Betonarme, ahşap), ray tipi (49,050 kg/m, 49,430 kg/m), sel baskını, taş düşme, heyelan durumu ve kar tutan bölgeler gibi nitel veriler aşağıda gösterildiği gibi göstermelik değişkenlere dönüştürülmüştür.

- ( $x_6$ ) Travers tipi (“0” = Betonarme, “1” = ahşap), ( $x_7$ ) Ray tipi (“0” = 49,050 kg/m, “1” = 49,430 kg/m), ( $x_8$ ) Ray uzunluğu (“0” = Diğer, “1” = UKR), ( $x_9$ ) Taş düşme (“0” = Yok, “1” = Var), ( $x_{10}$ ) Heyelan (“0” = Yok, “1” = Var),

( $x_{11}$ ) Kar (“0” = Yok, “1” = Var), ( $x_{12}$ ) Sel bas-kını (“0” = Yok, “1” = Var).

Bu çalışmada, merkezi Şikago’da bulunan ve 1967 yılında kurulmuş olan SPSS şirketi tara-fından geliştirilmiş SPSS 12.0 versiyonlu istatistik programı kullanılmıştır. SPSS istatistik prog-ramı kullanılarak yapılan istatistik analizler aşağıda özetlenmiştir:

- 1) Korelasyon matrislerinin incelenmesi
- 2) İlk çoklu regresyon analizi
- 3) Saçılım grafiklerinin incelenmesi
- 4) İlk adımsal çoklu regresyon analizi
- 5) Etkili ve etkisiz gözlemlerin belirlenmesi için gözlem istatistikleri ve gözlem analizlerinin yapılması
- 6) Çoklu bağıntının belirlenmesi
- 7) Sonuç adımsal çoklu regresyon analizi

Değişkenler arasındaki korelasyon matrisleri ince-lendiğinde, eğrilik ve dever arasında 0.879 gibi çok yüksek bir korelasyonun olduğu tespit edil-miştir. Bu yüksek korelasyon, her iki bağımsız değişkenin aynı anda analizlerde yer almasının anlamlı olmadığını ifade etmektedir. Tüm bağımsız değişkenler analize dahil edilerek ilk çoklu regresyon analizi yapılmış ve elde edilen regres-yon modeli bazı hipotez testleriyle kontrol edil-miştir. Varyans analizi yapılarak, bağımlı ve ba-ğımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişkinin olup olmadığı test edilmiştir. Bu amaç için F testi kullanılmış ve anlamlı sonuçlar bulunmuştur. Elde edilen regresyon modellerindeki bağımsız de-ğişkenlerin anlamlılık düzeyleri Student test ile kontrol edilmiş (anlamlılık düzeyi  $p < 0.05$  alınmıştır) ve parametrelerin çoğu anlamlı bulunmuştur. Ba-ğımlı değişken ve her bir bağımsız değişken ara-sındaki saçılım grafikleri teker teker çizilmiştir. Aynı zamanda bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki saçılım grafikleri matris formda da çizilmiştir. Saçılım grafikleri incelenerek bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki-nin olduğuna karar verilmiştir.

En iyi regresyon denklemini elde etmek için ilk adımsal çoklu regresyon analizi gerçekleştiril-miştir. İlk adımsal çoklu regresyon analizinde varyans analizi sonuçları anlamlı bulunmuştur.

Bağımsız değişkenlerin regresyon modelinde an-lamlılıkları kontrol edilmiş ve tümü anlamlı bu-lunmuştur (Draper ve Smith, 1998).

İlk adımsal çoklu regresyon analizi gerçekleştiril-dikten sonra, etkili ve etkisiz gözlemlerin belir-lenmesi için gözlem istatistikleri ve analizleri ya-pılmıştır. Standardize edilmiş artıklar, Student türü artıklar ve Mahalanobis uzaklığı aykırı (etkisiz) gözlemlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Etkisiz gözlemler belirlendikten sonra bu gözlemlerin ba-zı değişkenler üzerinde etkili gözlemler olup ol-madıkları DFBETA, Cook uzaklığı, DFFITs ve Kovaryans Oranları testleriyle kontrol edilmiştir (Reha, 2003).

İlk adımsal çoklu regresyon analizi, gözlem ista-tistikleri ve gözlem analizlerinden sonra bağımsız değişkenler arasında çoklu bağıntının olup olma-dığı araştırılmıştır. Öncelikli olarak değişkenler arasında korelasyon matrisleri incelenmiş ve dever ile eğrilik arasında yüksek bir korelasyonun olduğu tespit edilmiştir. Dever değişkeninin bağımlı de-ğişkenle yapmış olduğu korelasyonun eğriliğe göre daha düşük olmasından dolayı analizlere dahil edilmemesine karar verilmiştir. Daha sonra varyans şişme faktörleri ( $VIF_i$ ) incelenmiş ve 5’in altında bir değer tespit edilmemiştir. Üçüncü olarak her bir değişken için durum indeksleri incelenmiş ve 30’u aşan değer bulunamamıştır. Son olarak varyans ayrışım oranları incelenmiş ve tümünün 0.9’un altında olduğu belirlenmiştir (Reha, 2003). Yukarıda sıralanan analizler gerçekleştirildikten sonra sonuç adımsal çoklu regresyon analizi ya-pılmıştır. Tablo 4 ve 5’te sonuç adımsal çoklu reg-resyon analizine ait model özetleri görülmektedir.

Çoklu belirtme katsayıları ( $R^2$ ); burulma, hat ge-nişliği, eksenden sapma, dever ve nivelman için sırasıyla 0.624, 0.718, 0.694, 0.775, 0.684 olarak bulunmuştur. Tablo 4 ve 5’te görüldüğü gibi çev-resel faktörlerden heyelan ve karın hiçbir geometri parametresinin bozulma oranı üzerine etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ancak sel ve taş düş-menin etkisinin olduğu belirlenmiş ve işaretleri pozitif bulunmuştur. Yani bozulma oranını artırıcı etkileri vardır. Sel ve taş düşmesinin bozulma oranlarıyla olan korelasyon matrisi incelendiğinde ilişkinin pozitif olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Sonuç adimsal çoklu regresyon analizi model özeti (Burulma ve hat genişliği)

Değişkenler	Burulma			Hat genişliği		
	b <sub>j</sub>	t	p	b <sub>j</sub>	t	p
X <sub>1</sub> (Yığışımli yük)	-0.049	-15.969	0.000	-0.076	-6.528	0.000
X <sub>2</sub> (Hız)	-0.078	-14.612	0.000	-0.258	-16.054	0.000
X <sub>3</sub> (Eğrilik)	0.25	3.889	0.000	0.958	5.094	0.000
X <sub>4</sub> (Boyuna eğim)	0.096	7.073	0.000	0.305	7.572	0.000
X <sub>5</sub> (Dever)	-	-	-	-	-	-
X <sub>6</sub> (Travers tipi)	-1.704	-4.098	0.000	3.454	2.520	0.012
X <sub>7</sub> (Ray tipi)	-	-	-	5.478	5.775	0.000
X <sub>8</sub> (Ray uzunluğu)	-3.456	-11.445	0.000	-6.029	-6.081	0.000
X <sub>9</sub> (Taş düşme)	1.284	4.85	0.000	3.161	4.097	0.000
X <sub>10</sub> (Heyelan)	-	-	-	-	-	-
X <sub>11</sub> (Kar)	-	-	-	-	-	-
X <sub>12</sub> (Sel)	1.534	8.788	0.000	4.624	9.042	0.000
Sabit	22.866	31.494	0.000	53.565	20.404	0.000

Tablo 5. Sonuç adimsal çoklu regresyon analizi model özeti (Eksenden sapma, dever ve nivelman)

Değişkenler	Eksenden sapma			Dever			Nivelman		
	b <sub>j</sub>	t	p	b <sub>j</sub>	t	p	b <sub>j</sub>	t	p
X <sub>1</sub> (Yığışımli yük)	-0.043	-4.836	0.000	-0.056	-9.734	0.000	-0.105	-16.47	0.000
X <sub>2</sub> (Hız)	-0.17	-14.00	0.000	-0.153	-13.34	0.000	-0.22	-19.91	0.000
X <sub>3</sub> (Eğrilik)	0.901	6.318	0.000	1.298	6.763	0.000	0.507	3.806	0.000
X <sub>4</sub> (Boyuna eğim)	0.226	7.417	0.000	0.084	3.651	0.000	0.201	7.135	0.000
X <sub>5</sub> (Dever)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X <sub>6</sub> (Travers tipi)	2.335	2.269	0.020	-3.772	-4.828	0.000	-2.734	-3.163	0.002
X <sub>7</sub> (Ray tipi)	4.751	6.646	0.000	-	-	-	-	-	-
X <sub>8</sub> (Ray uzunluğu)	-4.914	-6.585	0.000	-5.879	-9.406	0.000	-6.196	-9.926	0.000
X <sub>9</sub> (Taş düşme)	2.019	3.476	0.000	1.67	4.001	0.000	2.856	5.214	0.000
X <sub>10</sub> (Heyelan)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X <sub>11</sub> (Kar)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X <sub>12</sub> (Sel)	3.208	8.353	0.000	1.91	6.2	0.000	3.238	8.947	0.000
Sabit	37.92	19.136	0.000	31.67	19.222	0.000	51.55	34.302	0.000

Eğrilik ve boyuna eğimin tüm hat geometrisi parametrelerinin bozulma oranı üzerine etkisi olduğu tespit edilmiş ve işaretleri pozitif bulunmuştur. Her iki bağımsız değişkenin de bozulma oranını artırıcı etkileri vardır. Eğrilik ve boyuna eğimin bozulma oranlarıyla olan korelasyon matrisleri ve saçılım grafikleri incelendiğinde ilişkinin pozitif olduğu tespit edilmiştir.

Dever miktarının hattın düşey geometri parametrelerinin bozulma oranları üzerinde bir etkisi vardır ve işareti negatiftir. Oysa korelasyon matrisi incelendiğinde deverin bozulma oranıyla zayıfta olsa pozitif bir ilişkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca eğrilikle dever arasında 0.879 gibi çok yüksek bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple analizlere deveri katmak anlamlı değildir. Burulma ve nivelman bozulmalarında deverin etkin görülmesine karşılık, adimsal regresyonda deverin olmadığı ve en yüksek belirtme katsayısına sahip model tercih edilmiştir.

Travers tipinin bozulma oranına etkisinin olduğu ancak bazı parametrelerde pozitif bazılarında ise negatif işarete sahip olduğu tespit edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, "0" betonarme traversi, "1" ise ahşap traversi temsil etmektedir. Tablo 4 ve 5'te görüldüğü gibi hattın düşey geometri parametrelerinde yani burulma, dever ve nivelman üzerinde ahşap traversin bozulma oranlarını azaltıcı bir etkisi görülmektedir. Yatay geometri parametreleri yani hat genişliği ve eksenden sapma üzerinde ahşap traversin bozulma oranlarını artırıcı etkisi görülmektedir. Bu durumda ahşap traverslerin düşey yük altında iyi esneme yaptığı ancak yatay kuvvetlere karşı iyi direnç sağlamadığı söylenebilir. Ray tipinin yatay geometri parametreleri üzerine bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. İncelenen hat kesiminde kullanılan ray tipi daha önce belirtildiği gibi iki tanedir. 49.050 kg/m ray yerine 49.430 kg/m ray tipi kullanılması durumunda yatay geometri parametrelerinin bozulma oranları artmaktadır. Ray uzunluğunun tüm hat geometrisi parametreleri üzerinde bir etkisi olduğu tespit edilmiştir ve işareti negatiftir. UKR ray kullanılması durumunda bozulma oranı azalmaktadır. Tablo 4 ve Tablo 5'te görüldüğü gibi yığılımlı yük ve hız bağımsız değişkenlerinin bozulma

oranları üzerinde bir etkisi vardır ancak beklenmedik şekilde negatif değere sahiptirler. Yığılımlı yükün katsayısının negatif olması yükün artmasıyla birlikte bozulma oranının azaldığı anlamına gelmektedir. Bu negatif değerın açıklanabilmesi için incelenen demiryolu hattı kesimine yapılan BY çalışmalarının dikkate alınması gerekmektedir. İncelenen hat kesimine 1995-2001 yılları arasında yapılan tüm BY çalışma sayıları hattın yaş durumuna göre belirlenmiştir. İncelenen hat kesiminde yenileme sayısının arttığı ancak bakım sayısının azaldığı görülmüştür. Bu sebeple demiryolu hattının bozulma oranı yenilemelerin etkisiyle azalmaktadır. Bulunan bozulma modeli aynı zamanda TCDD'nin bir bakıma BY politikasını da göstermektedir. Bulunan modelde yine aynı şekilde hız bağımsız değişkeninin katsayısı da beklenilmediği gibi negatif bir değere sahiptir. İncelenen hat kesimde yolun düz giden kesimlerinde ya da büyük yarıçaplı kurplarda hızlar yüksektir. Dolayısıyla hızın yüksek olduğu bu kesimlerde hatta çok büyük yatay ve düşey yükler etkimemektedir. Bu sebeple hızın işaretinin negatif olması bozulmanın az olduğu düz kesimleri göstermektedir. Bir başka değişle, bu analizlerde yer alan hız değişkeni, bilinen anlamda hız olarak değil de yolun hizmet düzeyini gösteren bir değer olarak analizlerde yer almıştır. Burada hız değişkeni demiryolu hattında bulunan köprü, menfez, makas, kesişim, istasyon, altyapı, üst yapı ve çevresel koşullar gibi durumları da yansıtmaktadır çünkü, bir demiryolu hattında işletim hızı belirlenirken yukarıda sıralanan tüm parametreler dikkate alınır. Hızın etkisinin bozulma oranı üzerine olan etkisinin belirlenebilmesi için aynı kesim üzerinde farklı hızlarda ( $\Delta V$ ) tespit edilen bozulmaların incelenmesi gerekir.

**Hattın bakım ve yenileme çalışmalarında coğrafi bilgi sistemlerinin (CBS) kullanılması**  
Demiryollarında BY çalışmalarında etkinliğin ve verimliliğin sağlanması için uygun yönetim sistemlerine ihtiyaç vardır. BY çalışmalarında bilgi sistemlerini kullanarak çalışmalardan beklenen etkinlik sağlanabilir. Şayet kullanılan bilgi sistemi hem grafik hem de grafik olmayan verileri kapsıyorsa sistemden elde edilecek fayda daha da büyük olacaktır. Konumsal bir bilgi sis-



temi olan Coğrafi Bilgi Sistemlerini demiryolu hattı BY çalışmalarında bir karar destek sistemi olarak kullanmak mümkündür. CBS kullanılarak; demiryoluna geçmişte yapılan BY çalışmalarını sorgulamak, kesimleri altyapı ve üstyapı verileriyle değerlendirmek ve kullanılan CBS programının gücüne bağlı olarak ilgili yazılımlar geliştirerek amaç doğrultusunda analizler yapmak mümkündür (Ripple, 1989; Thill, 2000). Bu çalışmada, TCDD tarafından hazırlanmış olan demiryolu ağını ve istasyonlarını gösteren harita, sayısal ortama önce bir resim (raster) olarak aktarılmıştır. Ölçeği 1/1,000,000 olan ED 50 UTM 36 koordinatlı ve sayısal ortamda bulunan Türkiye haritasına; TCCD ağıнын raster görüntüsü rektifiye edilerek, görüntü üzerinden demiryolu ağıнын vektörel haritası elde edilmiştir. Demiryolları çizgi (polyline), istasyonlar ise nokta (point) olarak tanımlanmıştır. Vektörel haritası elde edilen TCCD ağı, CBS ortamına aktarılarak mekansal bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Bu çalışmada MapInfo Professional coğrafi bilgi sistemler programı kullanılmıştır. MapInfo Professional; harita ve coğrafi analizlerin gerekli olduğu ticari uygulamalar, bilimsel çalışmalar gibi pek çok alanda daha iyi sunumlar ve analizler yapmak için kullanılabilir. Program Windows işletim sistemleri ile çalışabilir. Sunumu geliştirmek amacıyla detaylı haritalar üretilebilir, geniş çaplı analizler yapılabilir, varlıkların coğrafik olarak yönetimi, lojistik planlar ve acil durumlara hazırlık gibi çalışmalar yapılabilir (Daniel vd., 2001).

Çalışma güzergahının CBS ortamında bir BY bilgi sisteminin oluşturulması için, Arifiye-Eskişehir arasındaki demiryolu hattını temsil eden kırıklı çizgi (Polyline), MapBasic'de hazırlanmış bir program kullanılarak 820 adet analiz kesimine bölünmüştür. Analiz kesimlerini temsil eden her bir kırıklı çizgiye veri transferinde kolaylık sağlaması için bir ID numarası verilmiştir. Excel ortamında daha önceden hazırlanmış olan analiz kesimlerine ait verilerin coğrafi bilgi sistemlerine transferi ID numaraları esas alınarak yapılmıştır. Benzer şekilde Arifiye-Eskişehir arasındaki demiryolu hattı kesimine

1995-2001 yılları arasında yapılan toplam 84 aylık BY çalışmaları da CBS ortamına aktarılarak bir BY bilgi sistemi oluşturulmuştur.

MapBasic dilinde yazılan ve MapInfo'da çalışan programlar kullanılarak, TCDD Arifiye-Eskişehir arasındaki demiryolu hattı kesiminin trafik yükü altında gelecekte nasıl bozulacağıнын tahmin edilmesi ve BY kararlarının alınmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır. CBS'de hazırlanan program dinamik olarak tasarlanmıştır. Bozulma tespit edilen kesime bir BY çalışması yapıldığı ve bu çalışma CBS'ye yazıldığı zaman program kendini güncellemekte ve gelecek analiz çalışmasında yeni bozulma modelini kullanmaktadır.

## **Sonuçlar**

Demiryolunda meydana gelen bozulmalar, hattı oluşturan elemanların ve üzerinde hareket eden araçların bozulmasına, yüklerin zarar görmesine, konforsuz yolculuğa ve kazalara sebep olmaktadır. Bakım ve yenilemenin yetersizliğinden, düzenli iş programlarının olmayışından kaynaklanan kazalar yol güvenliğini azaltmakta ve önemli maddi hasarlara sebep olmaktadır. Demiryolu hattında maliyeti yüksek olan BY maliyetlerinin etkin iş programları ile en aza indirilmesi mümkündür. Demiryolu hattında meydana gelen bozulmaların sebep olduğu bu olumsuz durumların en aza indirilmesi için, karar süreçlerinde hattın bozulmasıyla ilgili ölçülmüş değerlerin en iyi şekilde değerlendirilmesi gerekir. Bu bozulma değerleri üzerinde yapılan dikkatli çalışmalar meydana gelebilecek zararları en aza indirecektir.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) hattında meydana gelen hat geometrisi bozulmasının istatistik yöntemler kullanılarak, bilgi sistemler destekli modellenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Elde edilen bozulma modeli kullanılarak demiryolu hattında kısa ve uzun dönemlerde yapılacak bakım ve yenileme (BY) programlarının hazırlanması mümkündür. Bozulma modelinin belirlenmesi öncelikli olarak demiryollarında yapılması gereken bazı önemli çalışmalara bağlıdır. Bu çalışmalar aşağıda sıralanmıştır;

- a) Demiryolu hattının bozulma mekanizmasının belirlenmesi
- b) Uygun yönetim sistemlerinin belirlenmesi
- c) Demiryolu hattında meydana gelen bozulmaları tespit etmede kullanılan modern yöntemlerin kullanılması
- d) Demiryolu hattına yapılan BY çalışmalarının belirlenmesi
- e) Bilgi sistemlerinin kullanılması
- g) Hat bozulma modelinin oluşturulması, çalıştırılması ve uygun BY programlarının hazırlanması

Demiryollarında BY çalışmalarında etkinliğin ve verimliliğin sağlanması için uygun yönetim sistemlerine ihtiyaç vardır. BY çalışmalarında bilgi sistemlerini kullanarak çalışmalardan beklenen etkinlik sağlanabilir. Şayet kullanılan bilgi sistemi hem grafik hem de grafik olmayan verileri kapsıyorsa sistemden elde edilecek fayda daha da büyük olacaktır. Konumsal analizler yapan bir bilgi sistemi kullanılarak BY çalışmaları yapılan demiryolu hattı kesimleri görsel ortamda değerlendirilebilir ve hazırlanan grafik raporlarla her bilgi düzeyindeki insanlara kolay bir şekilde ulaşılabilir. Konumsal bir bilgi sistemi olan Coğrafi Bilgi Sistemleri'ni demiryolu hattı BY çalışmalarında bir karar destek sistemi olarak kullanmak mümkündür. CBS kullanılarak; demiryoluna geçmişte yapılan BY çalışmalarını sorgulamak, kesimleri altyapı ve üstyapı verileriyle değerlendirmek ve kullanılan CBS programının gücüne bağlı olarak ilgili yazılımlar geliştirerek amaç doğrultusunda analizler yapmak mümkündür.

## Kaynaklar

- Daniel, L., Loree, P., and Whitener, A., (2001). *Inside MapInfo Professional*, 100-150, Onword Press, Albany, NY.
- Draper, N.R., and Smith, H., (1998). *Applied Regression Analysis*, 35-100, Wiley, John & Sons, Incorporated, New York, NY.
- Esveld C., (2001). *Modern Railway Track*, 250-450, MRT Productions, The Netherlands.
- Guler, H., Evren, G., Jovanovic, S., (2004). Application of geographic information systems for railway track maintenance and renewal management, *10<sup>th</sup> World Conference on Transport Research*, Istanbul, Turkey.
- Guler, H., Jovanovic, S., (2003). Getting more efficient railway track by using ECOTRACK system, *Technical Congress of Kucukcekmece and Its Periphery*, 547-560, Küçükçekmece Belediyesi, Istanbul.
- Guler, H., Jovanovic, S., (2004). The application of modern GIS technology in the development of railway asset management systems, *International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE-SMC)*, 4153-4158, The Hague, The Netherlands.
- Jovanovic, S., Korpanec, I., (2000). Three years of experience with ECOTRACK Implementation and Use, *International Railway Journal (IRJ)*, 55-47.
- Montgomery D.C., E. A. Peck E.A., Vining G.G., (2001). *Introduction to Linear Regression Analysis*, 25-85, Wiley-Interscience, New York.
- Reha A., (2003). *Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemler Giriş 1*, 45-90, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Report D161, No. 1, (1987). *Dynamic Vehicle/Track Interaction Phenomena from The Point of View of Track Maintenance*, Office for Research and Experiments of The International Union of Railways, 17-47, Utrecht.
- Ripple, J.W., (1989). *Fundamentals of Geographic Information Systems: A compendium*, American Congress Press, 15-105, Bethesda, Md, USA.
- TCDD Yıllık Bakım-Yenileme Raporları (2000). *TCDD Yol Dairesi Başkanlığı*, Ankara.
- Thill, J.C., (2000). Geographic Information Systems for transportation in perspective, *Transportation Research Part C*, 8, 3-12.
- Wittwer, E., Bittner J., Switzer, A., (2002). The Fourth National Transportation Asset Management Workshop, *International Journal of Transport Management*, 1, 87-99.