

Deprem Riskine Karşı Raylı Sistem Altyapılarının CBS ile Analizi: Türkiye Örneği

^{*1}Hakan Kocaman, ²Adahi Şahin, ¹Yavuz Halimergün, ²Abdulkadir Özden
^{*1}Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye
²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye

Özet

Bu çalışma, Türkiye'deki raylı sistem altyapılarının aktif fay hatları ile olan kesişim noktalarını inceleyerek deprem riski altındaki bölgelerde kırılabilirlik değerlendirmesi yapmaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak, raylı sistem bileşenlerinin 500 metre ve 1000 metre mesafedeki aktif fay hatlarıyla olan ilişkisi detaylandırılmış, toplamda 859 ve 1404 kesişim noktası belirlenerek kritik risk altında olabileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca, köprü ve tünellerin zemin sıvılaşması ve yer değiştirme gibi risk faktörlerine karşı savunmasız olabileceği ve kesişim sayıları ile yüksek hızlı tren hatları, köprüler ve tünellerin sismik tehlikelere karşı önlem alınması gerekli raylı sistem altyapıları olduğu vurgulanmıştır. Araştırma, afet yönetimi kapsamında bu kritik altyapıların risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesini önermekte, gelecek çalışmalar için CBS ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) entegrasyonu ve yapay zekâ tabanlı risk değerlendirme modellerinin ulaşım sürekliliği ve toplumsal güvenliği sağlamak adına ileriye dönük çözüm önerilerinin daha geniş ve detaylı bilgiler sunacağını belirtmiştir.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistemler, deprem, afet yönetimi, coğrafi bilgi sistemleri, risk değerlendirme

1. Giriş

Türkiye, sismik açıdan aktif bir bölgede yer alması nedeniyle deprem ve olası etkileri konusundaki çalışmalar önem taşımaktadır. Özellikle 1999 Marmara Depremi sonrasında, Türkiye'de afet yönetiminde hazırlık, müdahale ve iyileştirme stratejilerini içeren kapsamlı bir yaklaşım benimsenmiştir [1]. Son yıllarda, özellikle deprem riski yüksek kentsel alanlarda risk azaltma stratejileri hayata geçirilmiş, yönetmelik ve ilgili politikalardaki düzenlemelerin yanı sıra kentsel dönüşüm ile mevcut yapı stokunun yenilenmesi üzerine çalışmalar yürütülmüştür.

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) de bu çabaların merkezinde yer almakta, risk alanlarının görselleştirilmesi ve müdahale koordinasyonu için kritik veriler sağlayarak etkin bir afet yönetimini desteklemektedir [2]. Afet yönetimi politikaları, geçmiş depremlerden alınan derslerle geliştirilmiş, risklerin mekânsal dağılımı analiz edilerek kaynakların daha verimli kullanımı sağlanmıştır [3].

Fay hatlarına yakın raylı sistem altyapılarının deprem riski açısından değerlendirilmesi, afet yönetiminde ulaşım planlamasının yanında ekonomik istikrar için kritik bir konu olarak değerlendirilmektedir. Raylı sistemlerin, deprem gibi doğal afetler karşısında dayanıklı olması, afet sonrası ulaşımın kesintiye uğramaması ve afetin orta ve uzun vadeli etkilerinin azaltılmasında

dirençlilik göstermesi açısından hayati öneme sahiptir. CBS ise bu bağlamda farklı veri türlerini entegre ederek jeolojik, altyapısal ve sosyo-ekonomik faktörleri bir arada değerlendirip, olası deprem risklerini etkili bir şekilde görselleştirmeyi ve değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

CBS'nin olası deprem riski analizindeki uygulamaları, raylı sistemler içindeki zayıf bölgelerin tanımlanmasına ve bu bölgelerin önceliklendirilmesine imkân vermektedir. Rúa ve arkadaşları [4], altyapıdaki risk bölgelerinin belirlenmesi için RAMS (Güvenilirlik, Kullanılabilirlik, Bakım Kolaylığı ve Güvenlik) kriterlerini kullanan çok ölçekli bir yaklaşımı vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle fay hatları yakınındaki raylı sistemler için kritik bir analiz sunarak sismik tehlikelerin ulaşım altyapıları ile nasıl etkileşimde bulunduğunu sistematik olarak değerlendirir ve risk azaltma stratejileri geliştirilmesine olanak tanır. Uralinis ve Shohet [5] bakım/onarım gereksinimlerinin sismik kırılma riski değerlendirmeleri ile birleştirilmesinde stratejik bir yöntem önerisini vurgulamaktadır.

Doğrudan raylı sistem altyapıları incelendiğinde, raylı sistem altyapısındaki köprü ve tünellerin sismik hareketlerden etkilenme riskinin oldukça kritik bir önem taşıdığı ve tasarımların bu riskler doğrultusunda yapılması gerektiği literatürde sıklıkla vurgulanmıştır. Yu ve arkadaşları [6], fay zonlarına yakın inşa edilen yüksek hızlı demiryolu sistemlerinin, darbe tipi depremler sırasında önemli ray-köprü etkileşimleri yaşayabileceğini vurgulamış, Xing ve arkadaşları ise [7] ray-köprü sistemlerindeki orta açıklık konumlarının sismik uyarılmalara karşı en hassas alanlar olduğunu ifade etmiştir. Xhaferaj ve arkadaşlarının araştırmaları köprüler gibi ulaşım altyapılarının sismik olarak aktif bölgelerde özellikle savunmasız olduğunu ifade ederken ve CBS'nin bu yapıların kırılma risklerinin değerlendirilmesinde etkin kullanımının altını çizmiştir [8]. Wei [9] ve arkadaşları sismik hareketler sebebi ile demiryolu köprülerinde tetiklenen arıza dizileri üzerine incelemelerde bulunmuş, He ve Huang [10] tarafından yürütülen ampirik çalışmalarda ise gerçek deprem verilerine dayalı raylı sistem köprü hasar analizleri ve bu yapıların uygulamadaki performansına dair bilgiler sunulmuştur.

Ulaşım altyapılarındaki tünellerin deprem riski değerlendirmesindeki temel kaygılardan biri, tünel yapılarının depremler sırasında gösterdiği dinamik davranıştır. Xu ve arkadaşları [11] fay zonlarına yakın dağ tünellerinin, Japonya ve Tayvan'da yaşanan büyük sismik olaylardan elde edilen tarihi verilere göre, depremler sırasında ciddi hasar görebileceğini vurgulamıştır. Jeolojik parametrelerin değerlendirilmesi, katman kalınlığı analizleri ve zemin sıvılaşma riski üzerine yapılan çalışmaların [12], [13] yanı sıra gelişmiş izleme teknolojilerinin ve veri madenciliği tekniklerinin entegrasyonu [14] ve sismik izolasyon tekniklerinin incelenmesi [15] gibi yenilikçi bakış açıları ile deprem eğilimli bölgelerde raylı tünellerin güvenliğini önemli ölçüde artırabilir.

Afet yönetimi perspektifinden kritik ulaşım altyapılarının belirlenmesi, ulaşım sistemlerinin afetler sırasında ve sonrasında dayanıklılığını ve işlevselliğini sağlamak için hayati öneme sahiptir. Etkin bir değerlendirme ve afet yönetimi planlaması, operasyonel sürekliliğin korunmasının yanı sıra kamu güvenliğini sağlamak ve etkili acil durum müdahalesine olanak tanımak açısından temel bir adım olarak değerlendirilmelidir. Farklı mühendislik alanlarının yanı sıra yönetim, sosyal ve ekonomik yönlere sahip disiplinler arası bir bakış açısını gerektiren risk değerlendirme ve planlama çalışmaları [16] raylı sistemler gibi ulaşım altyapılarının işlevselliğinin korunması, gerekli hareketlilik ihtiyacının sağlanması ve afet durumlarında halk sağlığı ve güvenliği üzerindeki

olumsuz etkilerin oluşmasını önlemek için önemlidir [17]. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu, kritik demiryolu altyapısının değerlendirilmesini konusunda önemli katkılar sunmaktadır [16].

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki aktif fay hatları ile mevcut raylı sistem altyapısı, köprü ve tünellerin kesişim noktalarını tespit ederek afet risk planlamasına katkı sağlamaktır. Bu bağlamda, sismik olarak aktif bölgelerde yer alan raylı sistem bileşenlerinin fay hatlarına olan yakınlıkları değerlendirilerek, afet durumlarında bu altyapıların kırılabilirlikleri ve risk değerlendirmeleri ortaya konulacaktır. Çalışma, özellikle kritik bölgelerde risk taşıyan raylı sistem altyapı noktalarını belirleyerek, bu noktaların risk planlamasında dikkate alınmasına ve altyapının dayanıklılığını artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda elde edilen bulguların, afet yönetimi perspektifinde etkin bir karar destek aracı olarak kullanılabilecek veriler sunması hedeflenmektedir.

2. Yöntem

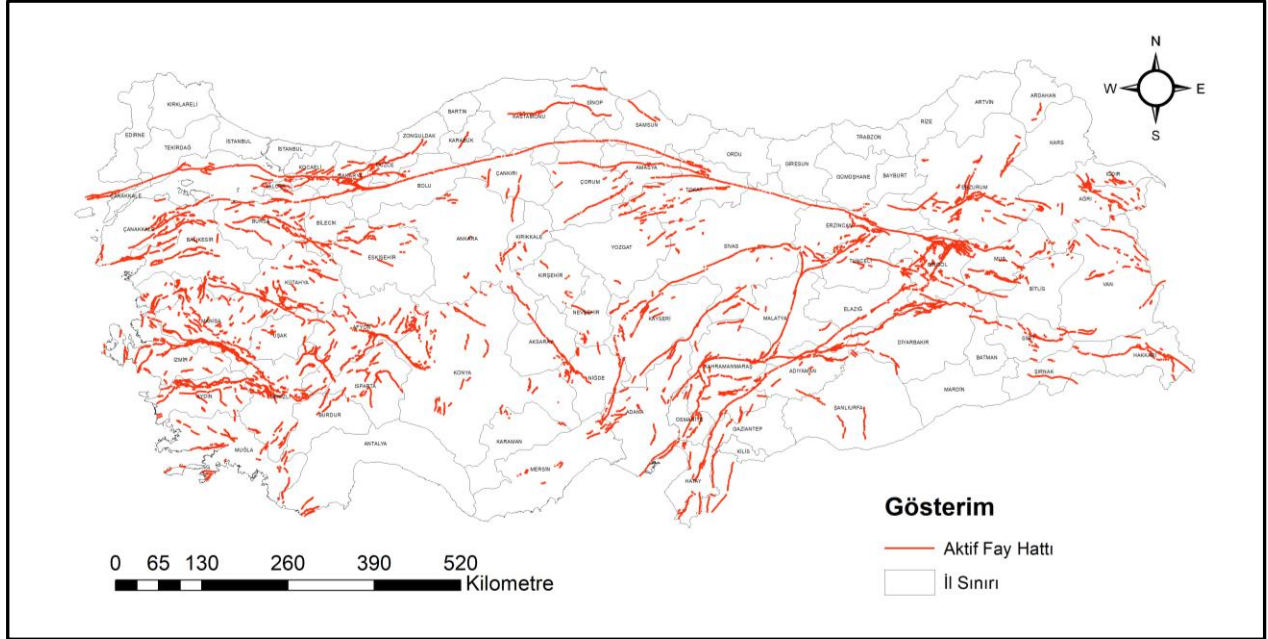
Bu çalışmada, Türkiye'deki aktif fay hatları ile mevcut raylı sistem altyapısının kesişim noktalarını tespit ederek afet risk planlamasına katkı sağlamak amacıyla CBS tabanlı bir analiz yöntemi uygulanmıştır. İlk aşamada, Türkiye'nin diri fay haritası ile raylı sistem altyapısına ilişkin veriler Maden Tetkik Arama (MTA), T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) ve OpenStreetMap (OSM) kaynaklarından temin edilmiş ve CBS tabanlı ArcGIS yazılımı kullanılarak analiz için uygun hale getirilmiştir.

CBS altyapısında fay hatlarının ve raylı sistem altyapılarının öz nitelik bilgileri detaylıca incelenerek köprü, tünel, kent içi ve kent dışı raylı sistem bileşenlerinin sınıflandırmaları, en uzun en kısa ve toplam kesişme noktası olacak şekilde yapılmıştır. Aktif fay hatlarındaki deprem riski ve olası deprem büyüklükleri farklılık göstermekte, bu bilgi ise mevcut veri tabanında sadece son 100 yıllık süreçte deprem kaydedilmiş faylarda bulunmakta olduğundan raylı sistem risk bölgelerinin tespitinde ampirik bir değerlendirme ile ve fay genişlikleri dikkate alınarak 500 metre ve 1000 metre yakınlıklar kritik yakınlıklar olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, CBS ile risk haritaları şeklinde görselleştirilerek Türkiye genelinde sismik risk taşıyan raylı sistem altyapıları belirlenmiş ve görselleştirilmiştir.

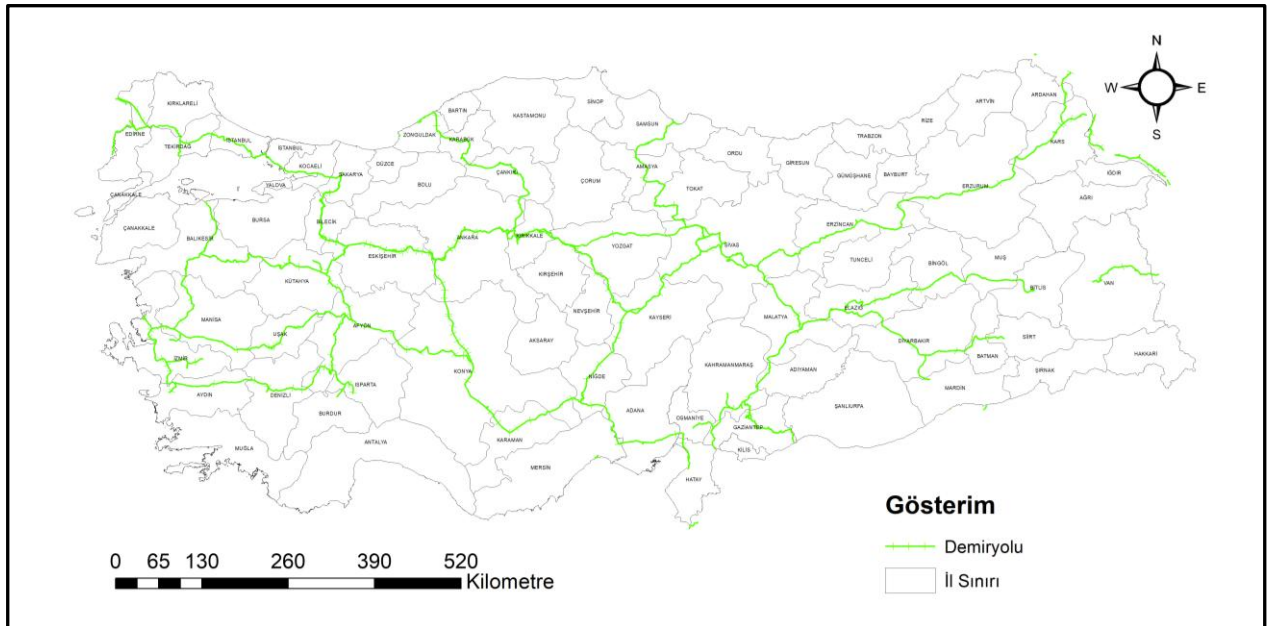
3. Sonuçlar

Türkiye'deki aktif fay hatlarının ülke genelinde geniş bir alana yayılması, özellikle ulaşım altyapılarının deprem riskine açık olduğunu göstermektedir. Şekil 1'de yer alan Türkiye'nin aktif fay hatları haritası, bu sismik bölgelerin detaylı bir görüntüsünü sunmaktadır. Bu fay hatlarının raylı sistem altyapısı ile olan ilişkisi ise, afet yönetimi açısından kritik bir inceleme alanıdır. Şekil 2'de sunulan raylı sistem altyapısı haritasında, konvansiyonel, yüksek hızlı ve kent içi raylı sistemlerin tüm ülke genelindeki dağılımı görülmektedir. CBS ile yapılan incelemelerde ülkemiz kent içi raylı sistem altyapıları (metro, tramvay, bölgesel hatlar, vb.) yanında bağlantı yolları ve

istasyon genişlemeleri ile yaklaşık 15 bin kilometreye yakın bir uzunluğa sahiptir. Bu uzunluk, kent içi raylı sistem altyapısı çıkarıldığında, konvansiyonel ve yüksek hızlı tren altyapı uzunluğunun 13.238 kilometreye ulaştığı görülmektedir. Bu dağılım, fay hatlarına yakın olan raylı sistem bileşenlerinin ülkenin birçok bölgesinde bulunduğunu ve bu durumun özellikle afet anlarında ulaşımın kesintisiz sağlanabilmesi için önemli bir tehdit oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 1. Türkiye’deki aktif fayların dağılımı

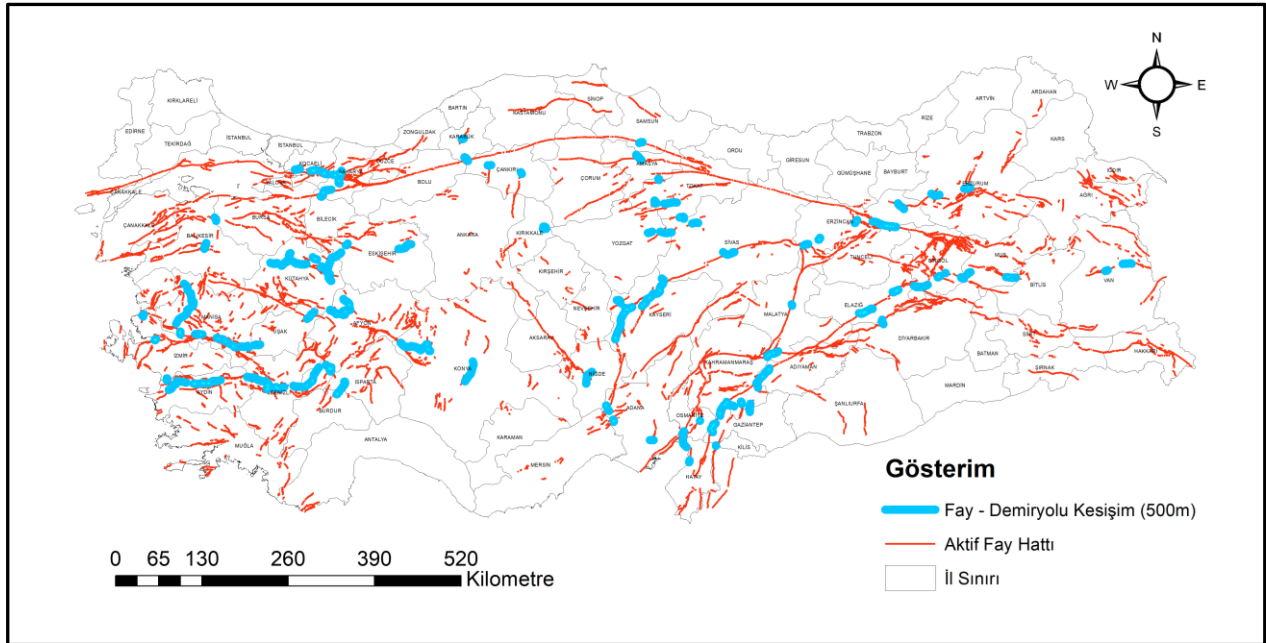


Şekil 2. Türkiye’deki raylı sistem altyapısı

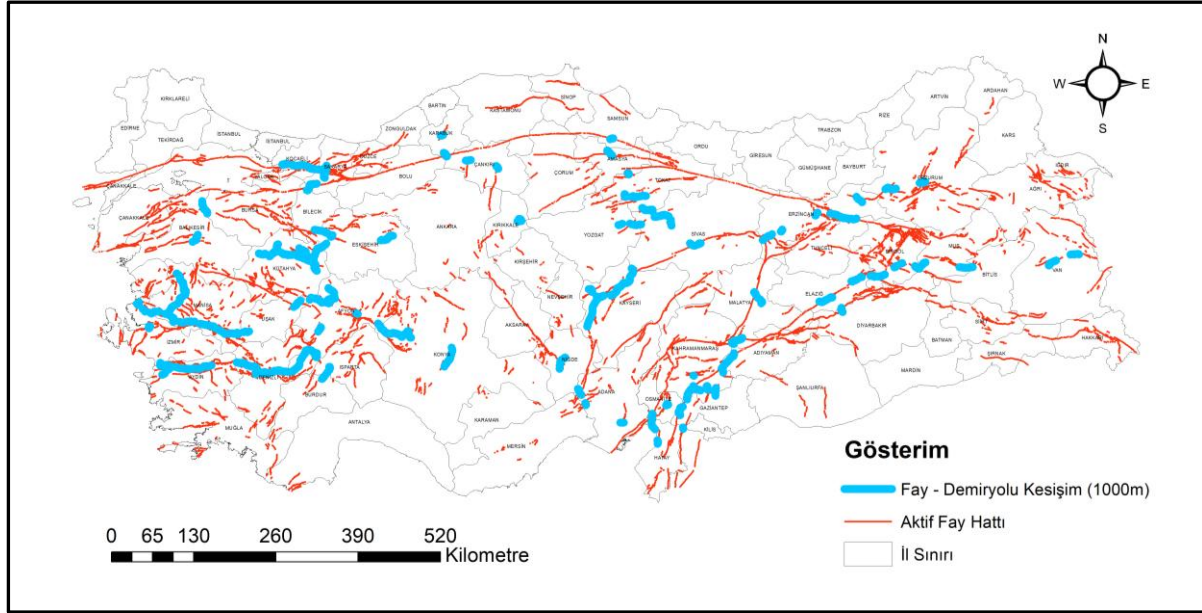
CBS tabanlı analizler sonucunda, mevcut raylı sistem altyapısının aktif fay hatlarına yakınlığı değerlendirilmiş, 500 ve 1000 metre mesafede olan kesişim bölgesi tespit edilmiştir. Bu mesafeler, afet durumlarında bu raylı sistem altyapılarının ciddi bir sismik risk altında olduğunu ortaya koymaktadır. Yalnızca konvansiyonel ve yüksek hızlı tren hatlarına odaklanıldığında, fay hatlarına 500 metre mesafede 859 adet ve 1000 metre mesafede 1404 adet kritik kesişim noktası belirlenmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). Bu kesişim noktalarının 298'i 50 m'den daha az uzunluğa sahip bağlantı ve yan yolları oluşturmaktadır. Toplam 1108 adet kesişimde raylı sistem altyapı uzunluklarının 50 metre ile 49 kilometre arasında değiştiği ve ortalama uzunluğun ise 1782 metre olduğu görülmektedir.

Bu bulgular, raylı sistem hatlarının deprem riski altında olan bölgelerle önemli ölçüde örtüştüğünü göstermektedir. Özellikle yüksek hızlı tren hatlarının fay hatlarına yakınlığı, olası bir deprem sırasında bu hatların ciddi operasyonel kesintilere ve yapısal hasarlara maruz kalma potansiyelini artırmaktadır. Yüksek hızlı tren hatlarının 1999 Adapazarı ve Düzce depremleri sonrasında yapılması ve stratejik öneme sahip olması, bu hatlarla ilgili deprem risklerinin yapısal hesaplamalarda dikkate alındığını ve riski en aza indirecek şekilde planlandığını vurgulamaktadır.

Yapılan incelemelerde raylı sistem altyapısı ile fay hatları kesişimlerinin Ege Bölgesi'nde, Kahramanmaraş-Adana hattı üzerinde ve 6 Şubat depremlerinin hasar bölgelerinde ve Kuzey Anadolu fay hattının Doğu Anadolu fay hattı ile kesiştiği Elâzığ-Bingöl bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun yanında, 1999 depremlerinin yaşandığı etkisini yoğunlukla hissettirdiği Adapazarı bölgesinde mevcut konvansiyonel ve yüksek hızlı raylı sistem altyapılarının olduğu bölgelerde de mevcut altyapının fay hatları ile yakın seyrettiği bilinmektedir.

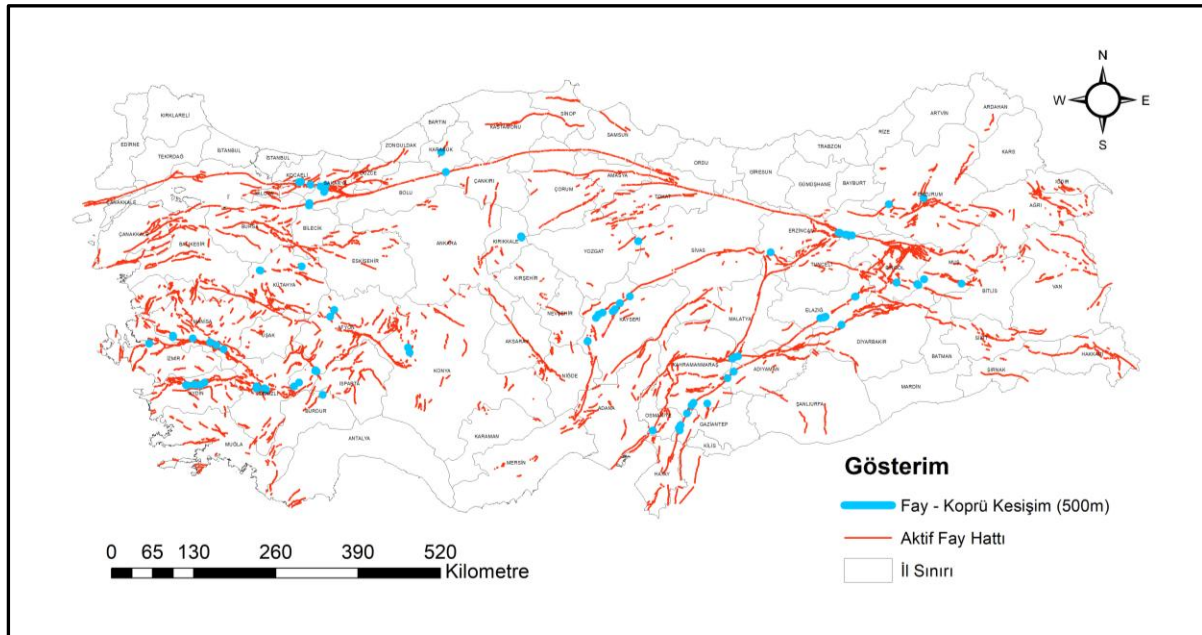


Şekil 3. Fay hatlarının 500 metre yakınında bulunan raylı sistem altyapı kesişim noktası

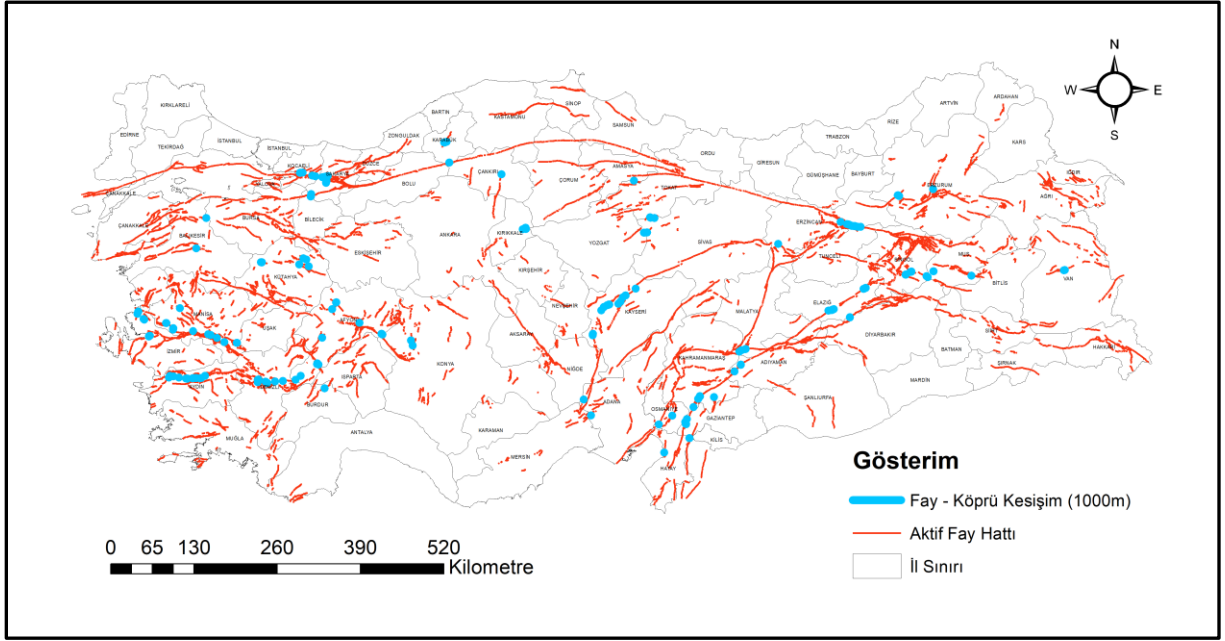


Şekil 4. Fay hatlarının 1000 metre yakınında bulunan raylı sistem altyapı kesişim noktası

Köprü ve tüneller gibi raylı sistem altyapılarının sismik riske karşı savunmasızlığı, ayrı bir değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır. Fay hatlarına 500 metre mesafedeki köprü sayısı 73 adet olarak belirlenmiş, bu sayı 1000 metre mesafeye çıkıldığında ise 113'e yükselmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6). Bu köprüler, sismik aktiviteye maruz kaldıklarında özellikle orta açıklıklarında yüksek yer değiştirme riskine sahip olmaları nedeniyle, hem yapısal bütünlük açısından hem de afet sonrası ulaşım sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir [7]. Özellikle deprem sırasında köprülerin zemin hareketlerine karşı dayanıklılığı, raylı sistemlerin genel güvenliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

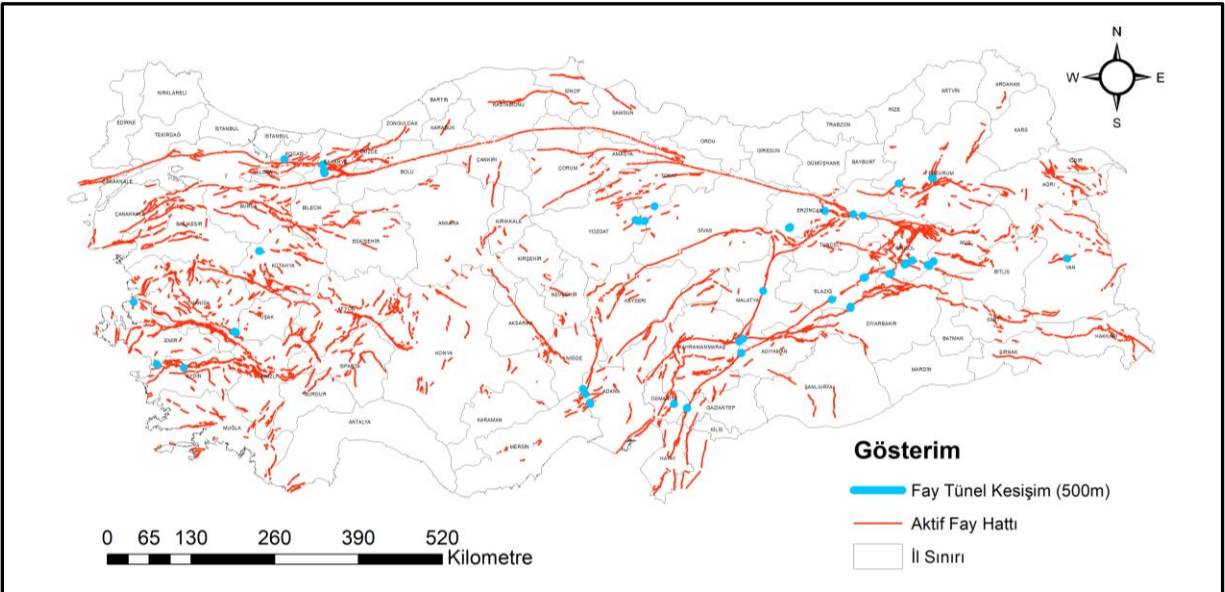


Şekil 5. Fay hatlarının 500 metre yakınında bulunan raylı sistem köprülerin dağılımı

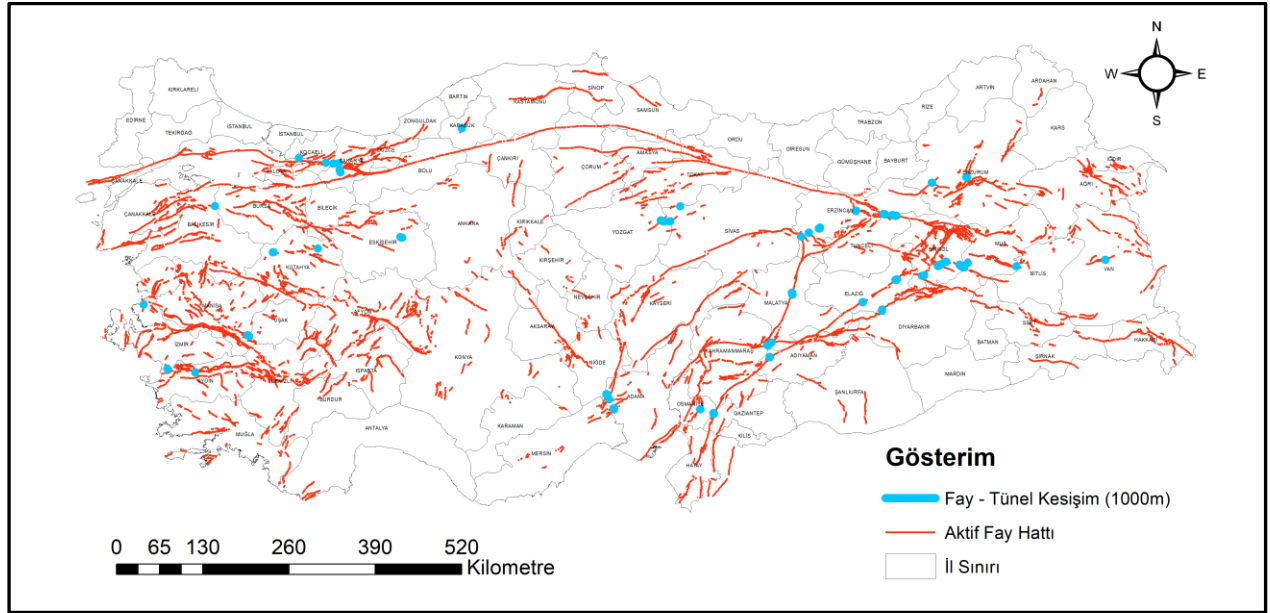


Şekil 6. Fay hatlarının 1000 metre yakınında bulunan raylı sistem köprülerin dağılımı

Tünellerin deprem riski altındaki durumu da benzer şekilde kritik bir değerlendirme gerektirmektedir. Fay hatlarına 500 metre mesafede 130 adet, 1000 metre mesafede ise 217 raylı sistem tüneli belirlenmiştir (Şekil 7 ve Şekil 8). Tüneller, özellikle jeolojik parametrelerin değişkenliği ve zemin sıvılaşması gibi faktörler nedeniyle, depremler sırasında ciddi yapısal hasar görebilmektedirler [12]. Bu tür yer altı yapılarında, zemin sıvılaşmasının etkisi ve diğer yer altı sismik dalgalarının hareketleri, tünelin yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir. Bu durum, tünel yapılarının dayanıklılığını sağlamak için güçlendirme ve sismik izolasyon gibi tekniklerin uygulanmasını gerekli kılmaktadır.



Şekil 7. Fay hatlarının 500 metre yakınında bulunan raylı sistem tünel dağılımı



Şekil 8. Fay hatlarının 1000 metre yakınında bulunan raylı sistem tünel dağılımı

Ayrıca, bu değerlendirmelere bağlı olarak elde edilen raylı sistem, köprü ve tünel kesişim istatistikleri Tablo 1’de özet olarak sunulmuştur. Toplam kesişim sayılarının, tüm demiryolu altyapısında, tünellerde ve köprülerde riskli noktaları belirlemek adına Türkiye örneğinin çıkarılmasının yanı sıra uzunluklarının da verilmiş olması bu bölgelerde oluşabilecek risklere karşı önlem ve gerekli ise iyileştirme yapılması gerekliliğini göstermektedir.

Tablo 1. Aktif fay hatları ile raylı sistem altyapı bileşenlerinin dağılımı

	0- 500 m yakınlık	0- 1000 m yakınlık
Tünel kesişim sayısı	73	113
Köprü kesişim sayısı	130	217
Toplam raylı sistem kesişim sayısı	859	1404
Risk bölgesindeki en uzun tünel uzunluğu	5292.43m	5292.43m
Risk bölgesindeki en kısa tünel uzunluğu	17.48m	17.48m
Risk bölgesindeki en uzun köprü uzunluğu	2233.25m	2233.25m
Risk bölgesindeki en kısa köprü uzunluğu	6.16m	5.53m

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışma, Türkiye’deki raylı sistem altyapısının aktif fay hatlarıyla kesişim noktalarını analiz ederek deprem riskine karşı mevcut kırılganlıklarını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak yürütülen analizler sonucunda, ülke genelindeki raylı sistem bileşenlerinin sismik risk altındaki alanlarla olan ilişkisi kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular, özellikle yüksek hızlı tren hatlarının ve kritik köprü ile tünel yapılarının, aktif fay hatlarına yakın bölgelerde deprem riski altında olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmada aktif fay hatlarına 500 metre ve 1000 metre yakınlıktaki kritik kesişim noktaları belirlenmiş ve bu mesafelerde bulunan raylı sistem bileşenlerinin sayısal dağılımları detaylandırılmıştır. Bulgular, Türkiye genelinde sismik açıdan aktif alanlarla yakın kesişim bölgelerinde yer alan raylı sistem bileşenlerinin potansiyel sismik tehlikelerle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu bölgelerdeki köprü ve tünellerin yer değiştirme riski ve zemin sıvılaşması gibi faktörlere karşı savunmasız olduğu tespit edilmiştir. Özellikle yüksek hızlı tren hatlarının ve stratejik öneme sahip köprülerin depreme karşı dayanıklılıkları, ülkenin genel ulaşım altyapısının kesintisiz çalışmasını sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu altyapıların tasarım ve uygulama aşamalarında bölgenin depremselliği dikkate alınarak tasarlandığı bilinmekle birlikte afet yönetimi ve müdahale planlaması bakımından olası bir deprem esnasında hasar alma riski ve deprem sonrasında gerekli kontrollerin yapılarak kullanılması önem arz etmektedir. Bu çalışma, aktif fay hatları ile yakınlığın dikkate alınarak olası riskli bölgelerin belirlenmesinde destek olacağı düşünülmektedir. Mevcut bulgular, afet yönetimi ve ulaşım planlaması açısından dikkate alınması gereken önemli bilgiler sunmaktadır. Kritik kesişim noktalarında yer alan köprü ve tünel gibi yapıların depreme karşı dayanıklılığının artırılması, afet sonrası ulaşım sürekliliğinin sağlanması ve afetin toplumsal ve ekonomik etkilerinin en aza indirgenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, sismik risk altında olan raylı sistem bileşenlerinin yapısal güçlendirme stratejileriyle desteklenmesi gerekmektedir. Ayrıca, sismik izolasyon teknolojilerinin köprü ve tünel yapılarında kullanımı, olası deprem senaryolarına hazırlıklı olunması adına önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışma, Türkiye'nin raylı sistem altyapısının deprem riski altında olan bölgelerdeki durumunu genel hatlarıyla ele alırken, gelecekte yapılacak çalışmalar için çeşitli potansiyel araştırma alanları sunmaktadır. Bu çalışma ile gelecekte yapılması planlanan çalışmalar şu şekildedir:

- **CBS ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) Entegrasyonu:** Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) sistemlerinin entegrasyonunun sağlanması, deprem riskine karşı dayanıklı ulaşım altyapılarının planlanması ve yönetilmesi açısından önemli bir katkı sağlayacaktır. Bu entegrasyon, Türkiye geneli raylı sistem bileşenlerinin sismik dayanıklılığını artırmak için detaylı verilerin elde edilmesini ve bu verilerin afet yönetimi süreçlerinde daha etkili kullanılmasını mümkün kılabilir.
- **Yapay Zekâ Tabanlı Risk Değerlendirme Modelleri:** Yapay zekâ algoritmalarının deprem riski analizinde kullanılması, daha isabetli tahmin modelleri geliştirilmesine olanak tanıyabilir. Bu doğrultuda, yapay zekâ tabanlı modeller geliştirilerek, Türkiye geneli raylı sistem altyapılarının farklı deprem senaryoları karşısındaki tepkilerinin analiz edilebilmesi ve bu analizler sonucunda risk azaltma stratejileri belirlenmesi hedeflenmektedir.
- **Sismik Risk Haritalarının Geliştirilmesi:** Türkiye genelindeki raylı sistem bileşenlerinin deprem riski altında olan bölgelerde daha ayrıntılı sismik risk haritalarının oluşturulması, afet yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu haritaların geliştirilmesi, yerel yönetimlerin afet durumlarında daha etkin müdahale stratejileri geliştirmesine olanak tanıyabilir. Bu kapsamda, raylı sistem bileşenlerinin zemin sıvılaşması ve zemin yer

değiştirme riskleri gibi faktörler de dikkate alınarak daha hassas risk haritaları oluşturulması hedeflenmektedir.

- **Uluslararası Karşılaştırmalı Çalışmalar:** Türkiye’deki raylı sistem bileşenlerinin deprem riski altında olan bölgelerdeki durumunu diğer ülkelerle karşılaştıran uluslararası çalışmalar, farklı yaklaşımların karşılaştırılması ve daha etkili afet yönetimi stratejilerinin belirlenmesi açısından önemli bilgiler sunabilir. Bu tür karşılaştırmalar, Türkiye’deki mevcut uygulamaların iyileştirilmesine katkı sunacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma Türkiye’deki raylı sistem altyapılarının sismik risk altında olan bölgelerdeki durumunu kapsamlı bir şekilde ele almış olup, elde edilen bulgular afet yönetimi ve ulaşım planlaması süreçlerinde dikkate alınması gereken kritik bilgiler sunmaktadır. Bu bulgular ışığında, gelecekte yapılması planlanan araştırmaların yukarıda önerilen alanlarda yoğunlaşması hedeflenmekte, Türkiye’nin deprem güvenliği açısından daha dayanıklı ulaşım altyapılarına sahip olmasına katkıda bulunulacaktır.

Kaynaklar

- [1] İskender H. Establishment of modern disaster management in Turkey: Operational improvements. *Karadeniz Uluslararası Bilimsel Dergi* 2021; 1(52): 243–255. doi: 10.17498/kdeniz.1019340.
- [2] Gerdan S. GIS-based decision-support system applications in disaster management. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 2018;25(3):961–979. doi: 10.18657/yonveek.306383.
- [3] Öcal A. Disaster management in Turkey: A spatial approach. *International Journal of Disaster Risk Management*, 2021;3(1):15–22. doi: 10.18485/ijdrm.2021.3.1.2.
- [4] Rúa E, Comesaña-Cebral L, Arias P, Martínez-Sánchez J. A top-down approach for a multi-scale identification of risk areas in infrastructures: particularization in a case study on road safety. *Eur. Transp. Res. Rev.*, 2022;14(1):39. doi: 10.1186/s12544-022-00563-0.
- [5] Urlainis A, Shohet IM. A comprehensive approach to earthquake-resilient infrastructure: integrating maintenance with seismic fragility curves. *Buildings*, 2023;13(9):2265. doi: 10.3390/buildings13092265.
- [6] Yu X, Jiang B, Jing H. Analysis of rail–bridge interaction of a high-speed railway suspension bridge under near-fault pulse-type earthquakes. *Transportation Safety and Environment*, 2024;6(3):tdad032. doi: 10.1093/tse/tdad032.
- [7] Xing H, Liu Y, Sun X. Exceeding probability analysis for rail of high-speed railway under seismic excitations. *RS*, 2023;2(4):413–430. doi: 10.1108/RS-08-2023-0027.

- [8] Xhaferaj I, Lako A, Shkodrani N. Seismic risk assessment of simply supported girders bridges. *Civil and Environmental Engineering*, 2023; 19(1):30–38. doi: 10.2478/cee-2023-0003.
- [9] Wei B, Li C, Wang P, Jiang L, Wang T. The seismically induced failure sequence of multiple components of high-speed railway bridges under different earthquake intensities. *J. vibroeng.*, 2020; 22(7):1629–1647. doi: 10.21595/jve.2020.21280.
- [10] He J, Huang Y. Empirical vulnerability analysis of railway bridge seismic damage based on 2022 Menyuan earthquake. *CEJ*, 2023;33(3):370–382. doi: 10.14311/CEJ.2023.03.0028.
- [11] Xu H, Xu J, Sun R, Pu H, Cheng Y. Rapid assessment and classification for seismic damage of mountain tunnel based on concentric circle method. *Shock and Vibration*, 2021;2021(1): 9944797. doi: 10.1155/2021/9944797.
- [12] Kwon SY, Yoo M. A Study on the dynamic behavior of a vertical tunnel shaft embedded in liquefiable ground during earthquakes. *Applied Sciences*, 2021;11(4):1560. doi: 10.3390/app11041560.
- [13] Dong Z, Kuo C, Yin J, Wen S, Liu G, Gou Y. Examination of longitudinal seismic vulnerability of shield tunnels utilizing incremental dynamic analysis. *Front. Earth Sci.*, 2021;9:779879. doi: 10.3389/feart.2021.779879.
- [14] Chen J. Research on railway tunnel risk control method based on data minings. in *Sixth International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers, and Software Engineering (AEMCSE 2023)*, L. Yang and W. Tan, Eds, Shenyang, China: SPIE, Aug. 2023, p. 93. doi: 10.1117/12.3004917.
- [15] Li C, Chen W, Zhao W, Suzuki T, Shishikura Y. A Study on seismic isolation of shield tunnel using quasi-static finite element method. *Shock and Vibration*, 2019;2019(1):6209409. doi: 10.1155/2019/6209409.
- [16] Cao Y, Lan H, Li L. Disaster risk assessment for railways: Challenges and a sustainable promising solution based on BIM+GIS. *Sustainability*, 2023;15(24):16697. doi: 10.3390/su152416697.
- [17] Krutphonk K, Tang J, Leelawat N. Development of a disaster risk profile in the public healthcare system during flood situation: A case study of Nakhon Sawan City Municipality, Nakhon Sawan Province, Thailand', presented at the DISASTER MANAGEMENT 2021, Rome, Italy, Dec. 2021, pp. 191–201. doi: 10.2495/DMAN210151.