

Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapının Önemi Ve Tasarım İlkeleri

N. Sevgi Yalçın

YTÜ, İnşaat Fak., İnş. Müh. Böl. Ulaştırma A.D., 34349, Beşiktaş, İstanbul,
Tel: (0212) 2597070 – 2703
E-Posta: nsyalcin@yildiz.edu.tr

Aydın Erel

YTÜ Emekli Öğr. Üyesi, İstanbul,
Tel: (0212) 2619253
E-Posta: erel@yildiz.edu.tr

Öz

Son 30 yıl içinde demiryollarında özellikle yolcu taşımacılığında 300 km/saat üzerindeki hızlara ulaşan artışlar, güvenli ve konforlu bir hizmet için demiryolu sisteminin yeniden gözden geçirilmesini ve değişik açılardan geliştirilmesini gerektirmiştir.

Bilindiği gibi demiryolu, diğer ulaşım sistemleri gibi, kendine özgü bir ağ, taşıt filosu ve işletme sisteminden oluşmaktadır. Ağın gar, istasyon vb. düğüm noktaları arasında taşıtların seyrettikleri güzergâhlar, yol geometrisi ve yapısı bakımından uygulanabilecek hızları kısıtlamaktadır. Taşıtların özelliklerine bağlı olarak, yüksek hızlı trenler için daha büyük yarıçaplı yatay ve düşey kurplara, daha düşük boyuna eğimlere, hata ve bozukluk sınırları çok küçük olan yollara gereksinim duyulmaktadır. Hız artışı ile birlikte, üst ve alt yapıya iletilen dinamik yükler de arttığından, yolda oluşan kalıcı yer ve şekil değiştirmeler, yolun yatay ve düşey geometrisinde bozulmalara, dolayısıyla yol ve taşıtlara gelen etkilerin daha da artarak, konfor ve güvenlik değerlerinin düşmesine yol açmaktadır.

Demiryolu altyapısı, olağanüstü durumlar dışında doğal zeminden, bazı yüksek ve çukur bölgelerin geçildiği yerlerde de, yine doğal zemin üzerine mesnetlenen köprü, viyadük ve tünel gibi sanat yapılarından oluşmaktadır. Dolayısıyla bu yapı bileşeninin, herhangi bir zarara uğramadan yukarıda belirtilen etkilere uzun süre dayanabilmesi oldukça güçtür. Bu nedenle yüksek hızlı demiryollarının yapılacağı kesimlerde gerekli altyapı özelliklerinin duyarlılıkla saptanması ve ekonomik olarak uzun süre hizmet verebilecek bir yapı oluşturulması gerekir.

Bu bildiriye yüksek hızlı demiryollarında oluşturulması gereken altyapının özellikleri tartışılacak ve bazı öneriler sunulacaktır. Ayrıca mevcut demiryollarında hız arttırılabilmesi için altyapıda yapılması gereken iyileştirme yöntemleri sunulacaktır. Bu konunun ülkemizde yapılması gündeme gelen yüksek hızlı demiryolları için de katkıda bulunması amaçlanmaktadır.

Anahtar sözcükler: Yüksek hızlı demiryolu, Altyapı

Giriş

1970 yıllarından bu yana, Japonya, Almanya, Fransa, İngiltere, İspanya vb. ülkelerde demiryolu ile yolcu taşımacılığında 200 ile 350 Km/saat hız yapabilen yüksek hızlı trenler çalıştırılmaktadır. Bu trenler 700 – 800 Km mesafelere kadar süre bakımından havayolu taşımacılığı ile rekabet edebilen bir düzeydedirler. Ancak bu tür demiryolu taşımacılığında hergün yeni sorunlarla karşılaşmakta, edinilen deneyimlerle daha güvenli, konforlu ve ekonomik çözümlerin araştırılması sürdürülmektedir.

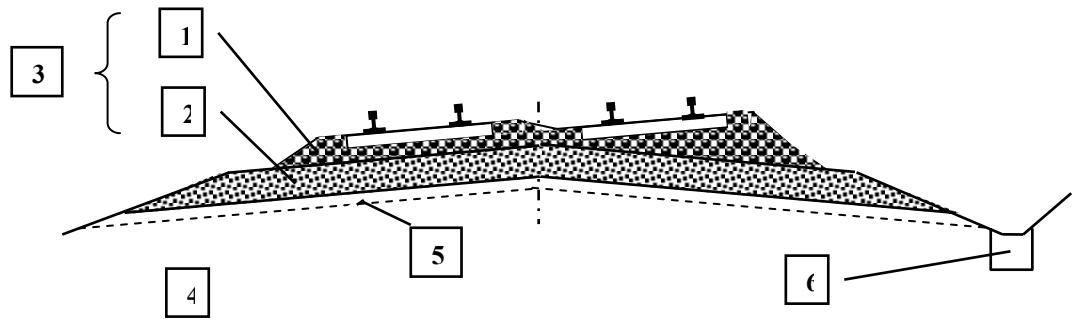
Son yıllarda Ülkemizde de yüksek hızlı demiryolu taşımacılığının gündeme gelmesi ve bu konuda yatırımlara başlanmış olması, proje, yapım ve işletme konularında 120 Km/saat proje hızları için bile çağdaş teknolojiyi henüz uygulayamayan demiryollarımız için önemli kaygılar oluşturmaktadır.

Bu bildiriye, düşük hızlı işletmecilik konusunda bile sorunlar yaşanmakta olan ülkemizde, demiryollarımızda –belki bilgi yetersizliğinden- en az ilgi ve çaba gösterilen altyapı konusunun incelenmesi ve yüksek hızlı demiryollarına yönelik bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

Demiryolu yapısı, yol yatağı ve altyapı

Genel

Klasik bir demiryolu hattı, rayların ve traverslerin oluşturdukları “yol çerçevesi” ile, bu çerçevenin altına döşenmiş balast, balast altı adı verilen kırma taş tabakaları ve bunların altındaki “altyapı” adı verilen değişik zemin tabakaları ya da köprü, viyadük, tünel vb. sanat yapılarından oluşur(Şekil 1). Yol çerçevesi ve balast tabakalarına da “üstyapı” adı verilmektedir.



1	BALAST (Ballast)	4	ALTYAPI (Subgrade)
2	BALAST ALTI (Blanket) TABAKASI	5	HAZIRLANMIŞ (Prepared) ALTYAPI
3	TOPRAK İŞLERİ (Earthworks)	6	BOYUNA DRENLER

Şekil 1. Klasik demiryolu yapısının enkesiti

Balast tabakaları ile altındaki zemin tabakalarına ya da sanat yapısına “Yol Yatağı Tabakaları (YYT)” adı da verilmektedir. Yol yatağı tabakaları, özellikleri ve kalınlıkları ile, yol mesnet rijitliği, yol geometrisinin ve drenaj sisteminin korunması açısından, yol performansı üzerinde önemli bir rol oynarlar.

YYT'nın tasarım kalınlıkları aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Altyapıyı oluşturan zeminlerin özgün karakteristikleri (doğal yapısı, taşıma kapasitesi, suya ve dona tepkisi, vb.),
- Bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik koşulları,
- Bölgenin iklim koşulları,
- Statik ve dinamik trafik etkileri (Brüt-ton, dingil yükleri, hızlar),
- Yol kompozisyonu (Ray kesiti, traverslerin tipi ve aralıkları, vb.).

Balast, kırılmış taşlardan oluşturulan ve 20 ile 60 mm boyutları arasındaki danelerle özel granülometrede hazırlanan tabakadır. Balast ve altyapı arasında oluşturulan balast altı tabakasının işlevleri şunlardır:

- Rijitliği ayarlayarak yolun taşıma kapasitesini arttırmak ve yukarıdan iletilen yüklerin altyapıya daha iyi dağılımını sağlamak,
- Yolun dinamik performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmak,
- Balast ve altyapı arasında bir filtre görevi yapmak,
- Yolu erozyona ve dona karşı korumak,
- Yüzeysel suları uzaklaştırmak.

Balast altı tabakası, bir ya da birkaç tabakadan oluşabilir (alt-balast tabakası, dondan koruma tabakası, filtre tabakası).

Demiryolu yapısal sistemi, trafik ve iklim etkilerine dayanacak şekilde, yolu ve altyapıyı gelen yüklere karşı korumak, demiryolu taşıtlarının işletme maliyetlerini, yolcuların güvenliğini ve konforunu kabul edilebilir limitlerde tutmak için tasarlanır. Daha hızlı trenler ve yüksek dingil yüklerinin bir arada kullanılması ile maliyetlerin düşürülmesi gereksinimi, sistemin daha iyi anlaşılması ve bunun altyapının davranışı üzerindeki etkisini anlama gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, modern demiryollarının tasarımında, iyi geoteknik ve ekonomik ilkeleri birleştiren akılcı yaklaşımlara gerek duyulmaktadır.

Bir akılcı yaklaşımla tasarımda birleştirilmesi gereken iki ana sürecin ilki, yol tabakalarında trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin analitik modeller kullanılarak tahmini, ikincisi de, amprik formüller kullanılarak izin verilebilecek gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin belirlenmesidir. Altyapıdaki gerilme/şekil değiştirme dağılımını bir yol sisteminin modelinde hesaplanabilir hale getirmek için, saptanan gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri oluşturan yükleme karakterize edilmelidir. İkinci aşamada yolun ve mesnet sisteminin zamanla bozulmasına yol açan mekanizmayı tanımlamak gerekmektedir.

Yolun durumu, işlevsel ve yapısal koşulları ile tanımlanabilir. İşlevsel durum, yolun demiryolu kullanıcılarına sağlayacağı seyir koşullarının düzeyi ile ilişkili, yapısal durum ise yolun yük taşıma yeteneği ve taban zeminini korunması ile ilişkilidir. Tekrarlanan yük altında, yol yanal ve düşey yönlerde hareket eder, bu hareketlerde

istenen yol geometrisinde bozulmalar oluşur. Bu bozulmalar genellikle düzensizdir, yol geometrisindeki bozulmaların artması ile seyir kalitesi azalır ve dinamik etkiler artar.

Yol yapısı, trafik ve sıcaklık değişimleri sonucunda ortaya çıkan tekrarlı düşey, yanal ve boyuna kuvvetleri sınırlandırmalıdır. Yol üstyapısı tarafından iletilen kuvvetler, altyapının taşıyabileceği dinamik yükleri belirler. Taşıt tekerlekleri ile raylar arasında dinamik etkileşim, yol ve tren karakteristiklerinin, işletme koşulları ve çevresel koşulların bir fonksiyonudur. Hareketli araçlar tarafından yola uygulanan kuvvetler, bir statik yük ile buna eklenen bir dinamik bileşenin kombinasyonudur.

Tasarım periyodu boyunca demiryoluna uygulanan yükler, büyüklük, frekans ve konfigürasyon bakımlarından farklılık gösterir. Sonuç olarak hattın performansında trafik yüklerinin toplam etkisinin ortaya konulması için, uygulanan yükleme biçiminin karakterize edilmesi gerekir. Birçok mevcut tasarım yöntemi trafiği karakterize etmez, bunun yerine daha basit bir yaklaşımı kabul ederek, tasarımın formülasyonunda statik maksimum dingil yükünü kullanır.

Ulaştırma yapılarında yükler ve hızlar arttıkça alt ve üstyapıda aşağıda sayılan önlemler alınmalıdır:

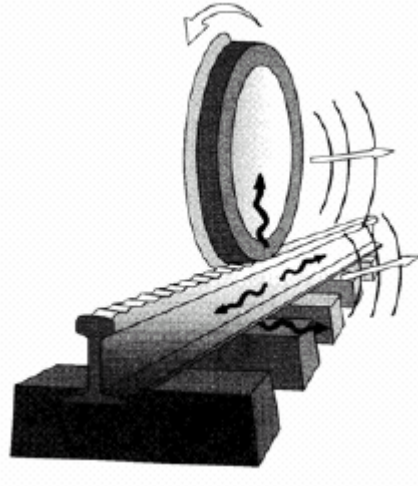
- Zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri, olası şekil değiştirme ve kırılma mekanizmaları dikkate alınarak yeterince tanımlanmalıdır,
- Projelendirme ve hesaplama esasları özellikle yüksek hızlardaki ve problemlili altyapılardaki (örn. yumuşak zeminler) projelendirmede, izin verilebilir şekil değiştirme, gerilme ve titreşimler saptanarak, iyileştirilmelidir,
- Mekansal, ekolojik ve ekonomik konularda, daha ekonomik, daha güvenli, daha yeni ve çevre dostu çözümler bulunmasına çalışılmalıdır,
- Geçilecek yerlerin ve mevcut tesislerin değerlendirilmesi için güvenilir gözetleme, izleme yöntemleri belirlenmelidir.
- Geçilecek arazide doğal afet olasılıkları ve riskleri önceden tahmin edilmeli ve belirlenmelidir.

Demiryolunda yüksek statik ve dinamik yükler zemine küçük bir alan tarafından iletilir. Taşıt geçtiğinde oluşan elastik çökmeler (mm) boyutundadırlar, hızlar arttığında bunlar da azalır. Buna karşın kalıcı şekil değiştirmeler birkaç desimetre değerlerindedir.

Engellenmesi gereken şekil değiştirme büyüklükleri yanında, bölgedeki zeminlerin don ve çözülme davranışları, mutlaka yeterli kalınlıkta bir üstyapıyı ve üstyapı ile altyapıda iyi bir sıkılamayı gerektirir.

Altyapı ve geçkiye, problemlili (yumuşak ve erozyona müsait zeminler) zeminlerin bulunduğu kesimlerde daha fazla özen gösterilmesi gerekir. Bu bölgelerin tanınması, zemin parametrelerinin belirlenmesi hesaplama yöntemleri ve yapım yöntemleri konularında gelişmiş çözüm yöntemlerine gereksinim duyulur.

Benzer sorunlarla, dingil yüklerinin ve hızlarının artmasında da karşılaşılır. Tüm üstyapı-altyapı sisteminin davranışındaki dinamik sorunlar ve aktarılan titreşimler yoğun araştırmaları gerektirir (Şekil 2). Kalite kontrolleri ve mevcut tesislerin davranışları, etkili deney yöntemlerini gerektirir.



Şekil 2. Bir geleneksel tren trafiğinde titreşim kaynakları

Sistemlerin dinamik etkileri ya da tepkileri, zaman ve frekans alanlarında tanımlanır. Zamana göre genliklerin büyüklükleri görülebilirken, frekansa göre zaman içindeki frekanslar hakkında önemli bilgiler edinilir. Titreşimlerle genelde titreşim hızları anlaşılır, bunların ölçüm teknikleri ile tanımlanmaları kullanıma çok uygundur. Bu büyüklükler insan ve yapı üzerindeki etkilerin değerlendirilmesinde temel veriler olarak kullanılır. Bu zamana bağlı hızlardan, basit bir şekilde zamana bağlı yol ve ivme büyüklükleri de elde edilebilir.

Yol yatağındaki çökmeler hızların, dingil yüklerinin, dolgu yüksekliklerinin, altyapı esnekliğinin ve altyapı sönümlemesinin bir fonksiyonudur.

Yumuşak zemin üzerindeki dolgularda tren yükleri öyle dağıtılmalıdır ki, yumuşak zeminin yol sistemini destekleyebilmesi için yeterli olanaklar sağlanmalıdır (statik taşıma gücü ve çökmeler, dolgu-altyapı sistemlerinin dinamik davranışları). Bu sağlanamazsa, özel yapılar geliştirilmelidir.

Altyapı (1)

Altyapı işleri ve altyapı türleri Tablo 1’de sıralanmıştır.

Tablo 1. Altyapı işleri ve altyapı türleri

ALTYAPI İŞİ	ALTYAPI TÜRÜ
Arazi düzeyini, zemini kazıp uzaklaştırarak düşürme	Yarma
Arazi düzeyini, üzerine zemin doldurma ve sıkıştırma ile yükseltme	Dolgu
Dolgu ve yarma şevlerinin korunması	Çimlendirme, ağaçlandırma, ankraj, kaplama, vb
Dolguda şev eteğinin, yarmada şev kretinin korunması	Blokaj, pere, istinat duvarı vb.
Yüzeysel ve yeraltı sularının uzaklaştırılması	Drenaj tesisleri
Yolun durgun sular ve akarsular üzerinden geçilmesi	Köprü
Küçük akarsuların dolgu altından geçirilmesi	Büzler ve Menfezler
Doğal zeminin delinerek, içinden yol geçirilmesi	Tünel
Yolun vadilerin üzerinden geçirilmesi	Viyadük
Yol yüzeyinin kardan korunması	Paranej
Doğal zeminin taşıma kapasitesinin artırılması	Hazırlanmış altyapı ve geosentetikler
Altyapı tesislerinin sürekli denetimi, bakımı, onarımı ve korunması.	

Görüldüğü gibi altyapı, özgün mühendislik yapıları (sanat yapıları), tesisleri ve işleri ile oluşturulmakta olup, ulaştırma yapısının hizmet ömrü boyunca sürekli olarak denetlenmesi, bakılması onarılması ve korunması gereken bir yapıdır. Altyapı yolun esas taşıyıcı kısmı olup, üstyapı tarafından iletilen yükleri herhangi bir kalıcı şekil değiştirmeye uğramadan güvenle karşılayarak, geniş bir yüzey boyunca doğal zemine iletmelidir.

Kısaca altyapı, bir ulaştırma yapısının konumunu oluşturan ve yolu dış etkilerden koruyan, ancak genelde yuvarlanma yüzeyinin altında kaldığı için “gözden ırak olan” bir yapıdır. Oysa bir yolun hizmet düzeyi ve kalitesi en az % 50 oranında altyapının kalitesine ve korunma koşullarına bağlıdır.

Yol altyapısının üst kısmı, özel oluşturulmuş bir altyapı tabakası olup, enine eğime sahiptir. Bu tabakanın işlevi, değişik demiryollarında farklı olarak tanımlanabilmektedir (örn. iyileştirilmiş ya da dışarıdan getirilmiş iyi kaliteli zemin tabakaları).

Bölgesel hidrolojik ve hidrojeolojik koşullar, su tabakasının durumuna göre belirlenir. Bu koşullar zayıf ise, altyapının taşıma kapasitesi ve dolayısıyla yolun stabilitesi bu durumdan etkilenebilir. Bu durum, yer altı su seviyesinin yol kenarı hendekleri ve derin drenaj sistemleri ile yolun altında belirli bir düzeye kadar indirilmesiyle iyileştirilebilir. Yüzeğe düşen ve altyapıya girmesi sözkonusu olan yağış suları hızlı bir şekilde uzaklaştırılmalıdır.

Geosentetikler, toprak işlerinde ve yol yatağı yapılarında kullanılan sentetik malzemeli yapı elemanlarıdır. Şu türleri vardır: geotekstiller, geomembranlar, geogridler ve geokompozitler. Geotekstiller, (dokunmuş ya da dokunmamış) geosentetikler olup, ayırma, filtreleme, drenaj, ve kuvvetlendirme amaçlarıyla kullanılabilir. Geomembranlar, sentetik ya da bitümlü tabakalar halinde olup, su geçirmezler ve duyarlı altyapıların yüzeysel suların girmesine karşı korunması ya da yer altı suyunun kirlenmesini önlemek amacıyla kullanılırlar. Geogridler, ince ya da kaba dokulu(ızgaralı, gözlü) olan bu geosentetikler, ayırma ve kuvvetlendirme amaçlarıyla kullanılırlar. Geokompozitler ise, en az iki geosentetik malzeme tabakasından oluşturulan bileşik yapılardır.

Altyapı zemininin taşıma kapasitesine göre sınıflandırılması için, altyapıyı oluşturan her bir zemin tipinin kalitesi ile, tüm altyapının (hazırlanmış altyapı ve taban zemini) taşıma kapasitesinin belirlenmesi gerekir. Bir zeminin kalitesi zeminin geoteknik özellikleri ile, yerel hidrojeolojik ve hidrolojik koşullara bağlıdır. Altyapının taşıma kapasitesi ise, dolgu ya da yarma tabanı zemininin kalite sınıfına, varsa, altyapının üzerindeki hazırlanmış (iyileştirilmiş) tabakanın kalınlığına bağlı olarak değişir.

Dona duyarlılık konusunda zeminler, duyarsız, duyarlı ve çok duyarlı olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Duyarlı olmayan zeminler, donduklarında ve çözüldüklerinde yol geometrisinde beklenmeyen bir bozukluğa neden olmazlar. Diğerlerinde ise, belirli sıcaklık koşullarında ve su içeriklerinde, yol geometrisinde istenmeyen bozukluklar oluşabilir. Belirli bir yolun dona duyarlılığı aynı zamanda, jeolojik koşullara, altyapıyı oluşturan zemin danelerinin doğal özelliklerine (mineral ve kimyasal kompozisyon, ince danelerin biçimleri) ve yol geometrisinden beklenen kaliteye bağlıdır.

Bir demiryolu hattının inşaatında, yol yatağı tabakalarının uygun mekanik karakteristiklere sahip ve yeterli kalınlıklarda olmaları çok önemlidir. Yol yatağı tabakalarının boyutlandırılmasında, istenen taşıma kapasitesi ve donmaya karşı korunma problemleri dikkate alınmalıdır. Yol yatağı tabaka kalınlığı (balast + balast altı) ise, altyapı zemininin taşıma kapasitesine, travers tipi ve travers aralığına ve trafiğin karakteristiklerine (tonaj, dingil basıncı ve hız) bağlıdır. Yol yatağı tabakaları için kullanılacak malzemeler dona duyarlı olmamalıdır. Toplam kalınlık öncelikle zeminin taşıma kapasitesine göre belirlenmelidir. Daha sonra dona duyarlı zeminlerde istenilen korumayı sağlamak için bu kalınlık artırılmalıdır.

Hızlı Demiryolunda Altyapı (2), (3)

350 Km/Saat'e kadar yüksek hızlı trafik için eğriliği fazla olmayan düz geçkilere gereksinim duyulur. Bu da problemlerli bölgelerdeki işlerin artmasına yol açar. Bu tür yolların planlanmasında, başlangıçta yalnızca 200 – 250 Km/saat hız ile ilgili deneyimlerin ekstrapolasyonu yeterli olmuştur. Ancak yüksek hızlı trafikte tamamiyle yeni problemler ortaya çıkmıştır. 250 Km/saat altındaki hızların yapıldığı yollardaki dinamik ölçümlerde saptanmış olmasına rağmen, dolgulardaki dinamik performansın değişimiyle ilgili belirtiler ciddiye alınmamıştır.

Hollandalı demiryolcuların yumuşak zeminler üzerindeki demiryolu yapısının davranışı konusundaki bulguları hala geçerlidir. Yük trenlerinde 217 Km/saat (60 m/s) ve yolcu

trenlerinde 270 Km/saat (75 m/s) üzerindeki kritik hızlar, statik yüklerinkine göre daha büyük çökmelere neden olan rezonans belirtilerini ortaya çıkarmıştır. Bu yüzden yetersiz dinamik projeler, yol yatağında çok büyük şekil değiştirmelere neden olmuştur. Dingil yükleri ile oluşan şekil değiştirmeler kuvvetli dinamik artışlara neden olmuştur. Komşu bölgelerde de kabul edilemeyecek titreşim değerleri saptanmıştır.

Yeni teorik araştırmalar, altyapıda kritik tren hızları yüzünden yol yatağında ve dolgularda kuvvetli titreşimler oluştuğunu göstermiştir. Dolayısıyla kritik tren hızlarının bilinmesinin önemi büyüktür. Aşağıda bu konu (2) ve (3) nolu kaynaklardan yararlanılarak kısaca özetlenecektir.

Yüksek hızlı trenin hızı, alttaki yumuşak zemin, yol yatağı / dolgu ve hareketli yükten oluşan dinamik sistemin karakteristik dalga hızına erişebilir ya da aşabilir. Tren hızı bir “kritik hız” a eriştiğinde büyük şekil değiştirmeler oluşabilir.

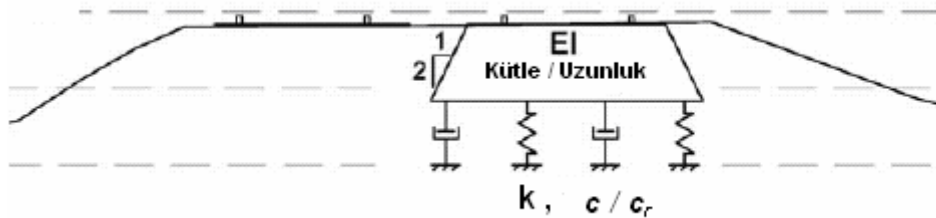
Bu hareketler tren ve yapının bütünlüğü için tehlikeli olabilir, yol bakım maliyetlerini yükseltir. Bu nedenle yoldaki şekil değiştirmeleri kabul edilebilir düzeylerde sınırlayacak dinamik bir rijitlik sağlayacak dolguların tasarımının yaşamsal önemi vardır.

Bu problem bazen “ondülasyon”, “yaylı dalga” ya da “kritik hız” etkisi olarak tanımlanır ve yen bir yüksek hızlı demiryolu tasarlandığında ya da mevcut demiryolunu yüksek işletme hızları için iyileştirme amacıyla geoteknik ölçütler belirlenirken önemlidir.

(V_{cr}) Kritik hız, Kenney (1954) tarafından şöyle formüle edilmiştir (Şekil 3):

$$V_{cr} = \sqrt[4]{\frac{4kEI}{\rho^2}}$$

k = kirişin birim uzunluğunun yay sabiti,
 E = kirişin elastiklik modülü,
 I = kirişin atalet momenti
 ρ = kirişin birim uzunluğunun kütlesi.



Şekil 3. Balast tabakasını içeren kiriş elemanı, visko-elastik temel olarak modellenen kötü kaliteli dolgu ve altyapı.

Kenney bu formülü, bir visko-elastik Winkler ortamı üzerindeki bir Euler –Bernoulli kirişi üstünde sabit hızla hareket eden bir noktasal yük için geliştirmiştir. Kenney’in analitik çözümünde, dolgu ve taban zemini, lineer yaylar üzerine mesnetilmiş tek bir

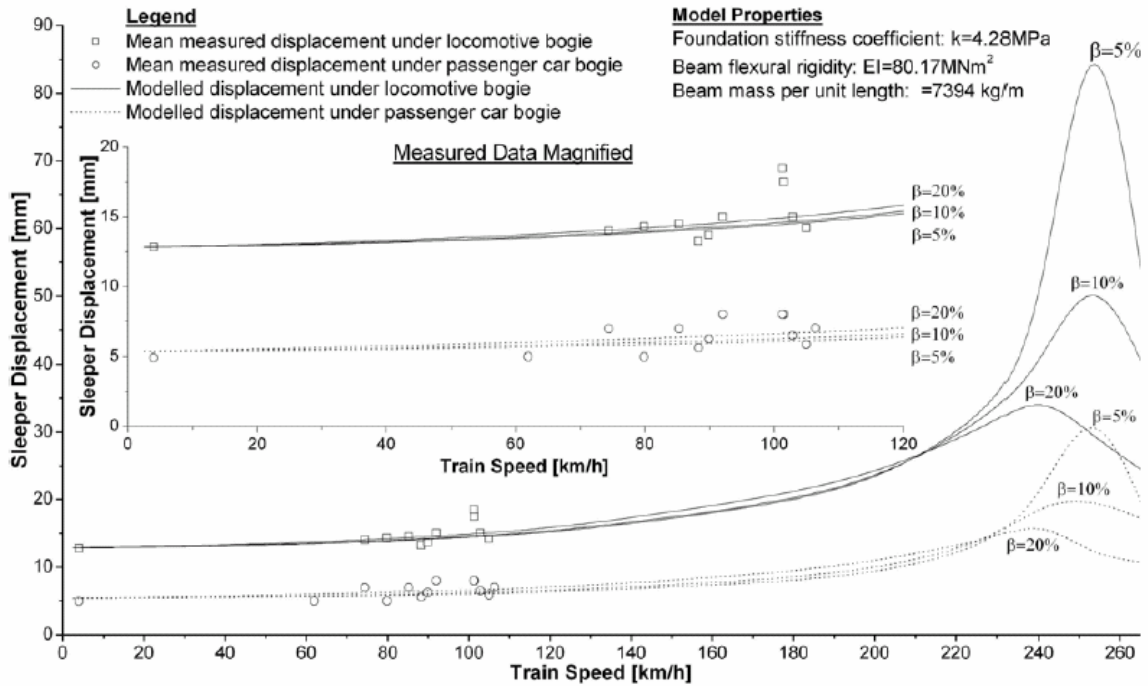
kiriş olarak basitleştirilmiştir. Diğer yöntemlerde, sistem lineer olmayabileceğinden, yük büyüklüğü ve dağılımındaki değişikliklerin de hesaba katılması gerekir.

(θ) Hız oranı tren hızının kritik hıza oranıdır. Benzer şekilde Kenny (1957) aynı zamanda (c_{cr}) kritik sönümlemeyi ve (β) sönümleme oranını da tanımlamıştır.

$$\theta = \frac{V}{V_{cr}} \quad c_{cr} = 2\sqrt{k\rho} \quad \beta = \frac{c}{c_r}$$

Bu kavramsal model kullanılarak hesaplanan özellikler: $EI = 80.17 \text{ MNm}^2$, $\rho = 7394 \text{ kg/m}$ (traversleri, yolu ve balastı içerir), verilerden alınan eğilme (çökme) değerlerinin korelasyonundan temel rijitliği (yatak katsayısı) için $k = 4.28 \text{ Mpa}$ elde edilebilir..

Şekil 4'te, modelden $\beta = 5\%$, 10% ve 20% sönümleme oranları için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Bu model için dikkate değer konu, $254,8 \text{ Km/saat}$ olarak hesaplanan kritik hız, gözlenen ve NIR trenlerinde uygulanabilecek tüm hızlardan çok büyük olmasıdır. Model aynı zamanda, sönümleme oranının NIR işletme hızlarında modellenen eğilme değerleri üzerinde küçük bir etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Tren hızına göre travers yer değiştirmesi (çökmesi) sonuçları.

Çökmeler, statik ve dinamik olmak üzere 2 bileşenden oluşmaktadır. Statik bileşen, duran bir tren altındaki altyapı çökmesi olup, kesinlikle uygulanan yükten, kiriş elemanın eğilme rijitliğinden ve visko-elastik temelin rijitlik (yatak) katsayısından etkilenmektedir. Dinamik bileşen ise, statik çökmedeki sabit hızla seyreden tren nedeniyle oluşan artıştır. Bu artış, kiriş elemanın oluşturulan modelde pA terimi ile ifade edilen ataleti (eylemsizliği) ile tahrik edilir ve sisteme uygulanan sönümleme miktarı ile sınırlanır. Kiriş elemanın eğilme rijitliği ve visko-elastik temel için rijitlik

(yatak) katsayısı, bu dinamik kuvvetlerin sonucu olan dinamik eğilmenin (çökmenin) miktarını belirler.

Duyarlılık analizinin tüm durumları için hesaplanan kritik hız yeterince yüksektir (>> 145 km/h). Çökmelerin dinamik bileşeni, 145 Km/saat hızda çökmenin yaklaşık % 30'una ulaşmaktadır. Çözümler, çökmenin statik bileşenini belirleyen parametrelerin (rijitlik katsayısı/elastiklik modülü ve dolgunun eğilme rijitliği) kuvvetlendirilmesine odaklanmalıdır.

Çökmelerin ölçümleri ve ilk modelleme, dolgu ve temeldeki mekanizmanın tanınmasını ve zayıflık kaynaklarını belirlemeyi sağlamıştır. Bu, dolgunun iyileştirilmesi ve çökme miktarının azaltılması için değerlendirilebilir bir çözüm konusundaki ilk adımdır. Modelde kullanılan parametrelerin onaylanması için zemin araştırması da önemli bir adım olacaktır.

Dolgu ve/veya taman zemininin iyileştirilmesi ya da sertleştirilmesi ve balast tabanına geotekstil izgara serilmesi ilk akla gelen önlemlerdir.

Yüksek hızlı trafikte önemli projelendirme görevlerinden birisi, yol yatağı- dolgu – altyapı sistemlerinin dinamik davranışlarının analizidir. Amaç, rastlanan titreşimler ve titreşimin altyapıya iletilmesini ve orada yayılmasını minimize etmektir. Bu konuda yol yatağı tabakaları (YYT) ve taban zeminin esneklikleri, geleneksel tanımı ile “yatak katsayısı” çok önemli rol oynar. Aşağıda (4) nolu kaynaktan yararlanılarak, bu konu özetlenmiştir.

Yapılan araştırma sonuçlarına göre, aşağıdaki çelişkili etkilere karşı yol için en uygun bir düşey rijitlik vardır:

- a) Yüksek düşey rijitliğe sahip yollarda ray üzerinde daha aşırı dinamik yükler oluşur,
- b) Aşırı esnek yollarda taşıt tarafından daha fazla enerji yapıya iletilerek boşa harcanır.

Balast çökmesi eşitliğindeki ikinci faktör olan balast tabakası içindeki ivmelenme hemen hemen analiz edilmiştir. Bununla birlikte yol altyapısında ve özellikle balast tabakasında trafik tarafından oluşturulan titreşimlerin düzeyine de önemlidir. Yapılan çalışmalara göre, balast içindeki titreşim hızı, bu malzemenin hızlı kötüleşmesini önlemek için, 15 – 18 mm/san.'yi aşmamalıdır. Ancak, 250 Km/saat seyir hızlarına kadar titreşim hızlarının 30 mm/san civarında olduğu ölçülmüştür. Prud'Homme, TGV hızlı treni tarafından farklı hızlarda balast tabakası içindeki ivmelenmelerin Tablo 2'deki gibi olduğunu belirtmiştir.

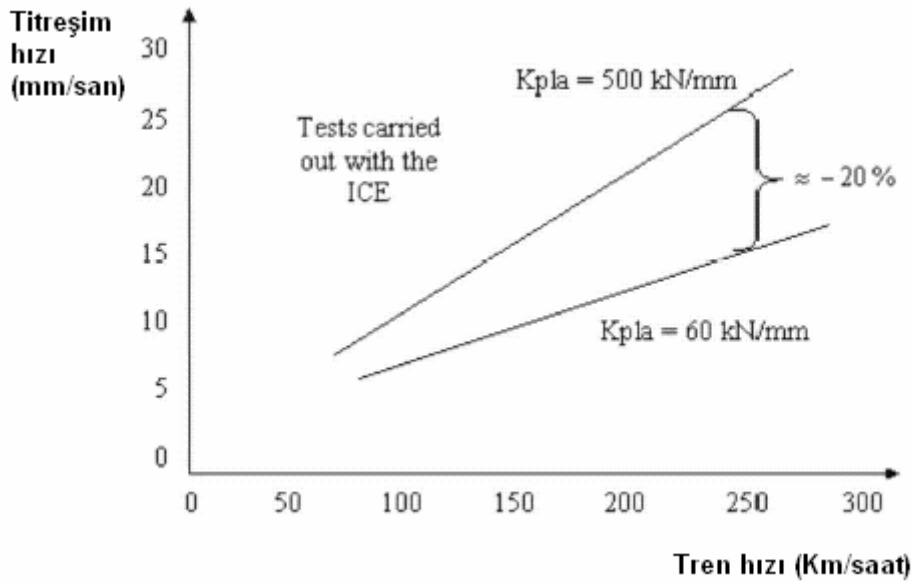
Amaç, yolun yapısal tasarımındaki iyileştirmelerin balast tabakası içinde oluşan ve özellikle yüksek hızlarda zararlı olan titreşimlerin düzeyinin azaltılması konusunda yardımcı olup olmayacağını ve yolun düşey rijitliğinin etkisinin belirlenmesidir. Bu kapsamda Almanya Demiryolları tarafından yükleme plakası ile yapılan düşey rijitlikte (normal yollardaki mesnet levhalarının rijitliğinin beşte birine) azaltma ölçümleri, balast tabakasında taşıtların oluşturduğu titreşim hızlarında farkedilir azalma olduğunu göstermiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi, (titreşim hızı / seyir hızı) oranında da küçük bir sapma oluşmaktadır. Kısaca, yolun düşey rijitliğinin azaltılmasının, yol geometrisindeki bozulmanın azaltılmasında önemli bir rol oynayacağını varsaymak mantıklıdır. Çünkü,

- a) Taşıtların askıya alınmamış (süspansedilmemiş) kütlelerinin yolda oluşturacakları düşey dinamik gerilmelerin sınırlandırılmasına yardımcı olur,
- b) Özellikle yüksek elastisiteye sahip mesnet levhaları ile, balast danelerinin titreşim hızlarının seyir hızına göre azaltılmasına yardımcı olur.

Bunun karşılığı olarak, yoldaki düşey rijitliğin daha az olması, yüksek hızlarda daha fazla enerji kaybına ve dolayısıyla daha yüksek işletme maliyetlerine yolaçar.

Tablo 2. TGV 001 ile balast tabakası içinde ölçülen ivmeler

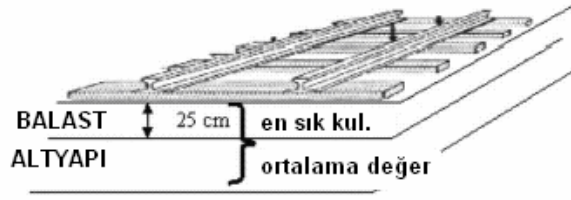
Hız (Km/saat)	Balast tabakası içindeki ivmelenme (g)
140	0,88
300	1,40



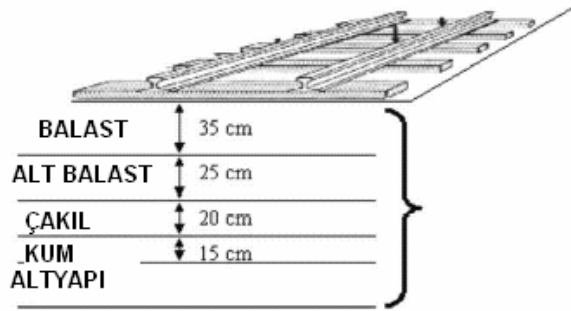
Şekil 4. Mesnet levhasının elastikliğinin, balastın titreşimine etkisi

Şekil 5’de grafik olarak geleneksel bir demiryolu ile yüksek hızlı bir demiryolu hattı, enkesitleri ile birlikte görülmektedir. Yüksek hızlı demiryollarında traverslerin altında çok sayıda malzeme bulunması, balast – platform sisteminin düşey rijitliğinin, geleneksel bir demiryolunun düşey rijitliğinden 2 – 3 kat daha büyük değerlere ulaşmasına neden olur. Bu şekiller, Fransız yüksek hızlı demiryolu hatlarının tasarım kriterine karşıt gelir. Almanya’daki ilk yüksek hızlı demiryolu hatlarının durumu ise Şekil 5’te görülmektedir.

a) GELENEKSEL YOLLARDA (35 kN /mm)



b) YÜKSEK HIZLI YOLLARDA (72 - 107 kN /mm)



Şekil 5. Balast-Altyapı sisteminin düşey rijitliklerinin karakteristik değerleri

Eisenmann and Rump'a göre yolun bu yapısal biçimi, Tablo 3'te görüldüğü gibi, yüksek balast katsayısına yolaçar (yolun düşey rijitliğinin indirekt ölçütü). Bu tablodaki sonuçlar, Almanya yüksek hızlı demiryollarından yerinde yapılan deneysel ölçümlere karşıt gelmektedir. Değerler, yeni Almanya yüksek hızlı demiryollarının geleneksel yollarınınkinin iki katından fazla balast katsayısına sahip olduğunu göstermektedir. Bu araştırmalara göre, bu gerçek yüksek hızlı demiryolunun geometrik kalitesinin erken bozulması anlamına gelmektedir.

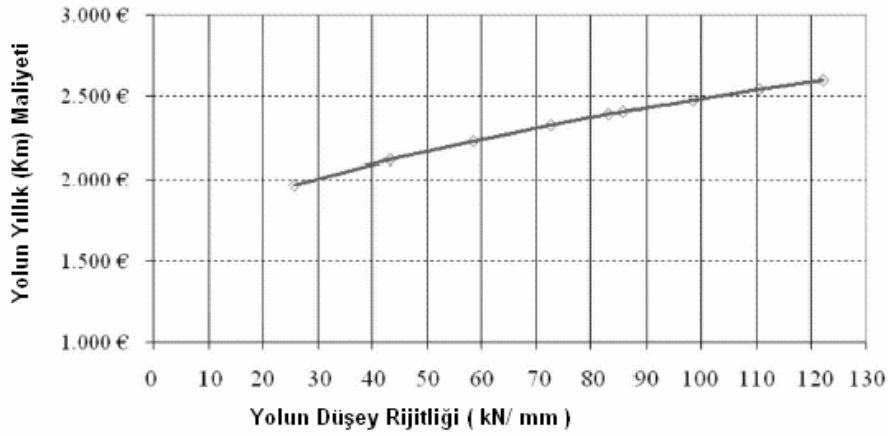
Tablo 3. Bazı Almanya demiryollarında balast katsayıları.

Yol Tipi	Yapı Tipi	Balast Katsayısı (N/mm ³)
Eski ve iyileştirilmiş	Az dayanım kapasitesi	0,05
	İyi kalite	0,15
Yeni yol Hannover – Würzburg Mannheim - Stuttgart	Doğal platform	0,30 – 0,40
	Köprüler ve tüneller	0,40 – 0,50

Bir Yüksek Hızlı Demiryolu İçin En Uygun Düşey Rijitlik Değeri (4)

Yolun düşey rijitliği için en uygun bir değer bulunması önerilir. Bu en uygun değer, iki farklı görüş açısına göre tartışılabilir; ilki, fazla esnek bir yolun neden olduğu yüksek enerji maliyetleri, ikincisi yüksek düşey rijitliğe sahip bir yolda geometrik kalitenin korunması için bakım maliyetlerinin artmasıdır.

Eğer yolun geometrik kalitesindeki bozulma düzeyi ile, bu bozulmanın oluşturacağı bakım maliyetleri arasındaki direkt ilişkinin varlığı makul geçerli kabul edilebilirse, bakım maliyetlerinin Şekil 6'daki gibi bir evrim yasasını izleyeceği kabul edilebilir.



Şekil 6. Bakım Maliyetlerinin Düşey Rijitlikle Değişimi

Bu evrimi ekonomik terimlerle ölçülendirmek için olası yaklaşımlardan birisi, bir yolun ilgili bakım maliyetlerini bilinen bir düşey rijitlikle ilişkilendirilmesine bağlıdır. Bu yöntemde, bakım maliyetlerinin diğer farklı düşey rijitlik değerleri için ekstrapolasyonu mümkün olabilir.

Bu konuda Paris ve Lyon arasındaki hızlı demiryolu hattından harika referanslar elde edilebilir. Aslında bu hatta yolun düşey rijitliği, Alias and Prud'Homme tarafından 80 kN/mm olarak belirtilmiştir. Yol geometrisi bakım maliyetleri ile ilişkili olarak, SNCF tarafından yayınlanan sonuçlar, yaklaşık ortalama yıllık maliyet, yolun Km'si başına 2400 Euro/km'dir. Şu konunun açıklanması önemlidir; bu ekonomik değer sadece, direkt olarak geometrik kalite bozulması ile ilişkili olan, buraj ve yol doğrultulması işlemleri ile ilişkilidir. Ray taşlanması, yol aygıtlarının iyileştirilmesi, yönetim personeli ve malzemelerin temini vb. bu değere katılmamıştır.

Yol üzerine dağılarak boşa harcanan enerjinin ekonomik etkisi, şöyle değerlendirilebilir. Sauvage and Fortin tarafından elde edilen sonuçlar esas alınarak, UIC 60 rayının kullanıldığı bir hızlı demiryolu hattında dağılan enerjinin miktarını değerlendirebilmek için, bu yazarlar tarafından yayınlanan sonuçlar Şekil 7'de görülmektedir. Bu yolla, 300 km/saat sabit hızla seyreden bir tren için, 8,15 ton'luk bir tekerlek tarafından kilometre başına basitleştirilmiş yaklaşık E_i enerji dağılımı değerlendirilebilir (TGV ve AVE trenleri için).

Aşağıda bu konuda bir örnek yapılmıştır:

1. Çok esnek (K = 26 kN/mm) bir yol için:

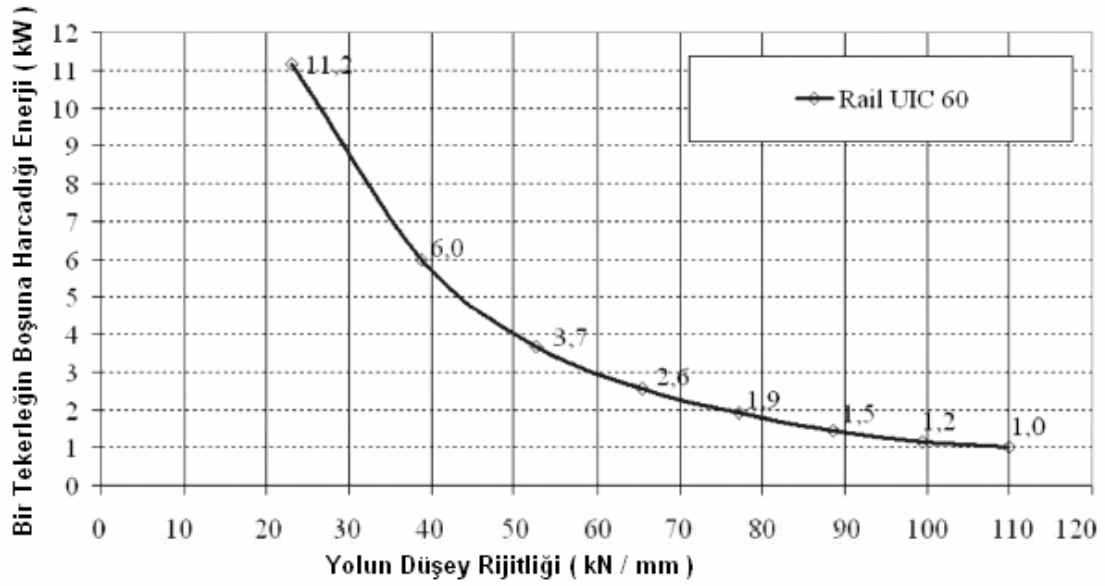
$$E_1 = P_1 \Delta t$$

$$= 11,2 \text{ kW} \frac{1 \text{ Km}}{300 \text{ Km / saat}}$$
$$= 0,0373 \text{ kWsaat}$$

2. Çok rijit (K = 122 kN/mm) bir yol için:

$$E_2 = P_2 \Delta t$$

$$= 1,0 \text{ kW} \frac{1 \text{ Km}}{300 \text{ Km / saat}}$$
$$= 0,0033 \text{ kWsaat}$$



Şekil 7. Yolun rijitliğinin, 300 Km/saat hızda, bir tekerlek tarafından boşuna harcanan enerji miktarına yaklaşık etkisi (UIC 60 rayı için)

Madrid – Seville arasındaki İspanya hızlı tren hattı için trafik 23 AVE treni / gün-yön 'dür. Bu trenlerin kütlesi 421,5 ton olup, senede bu yolda kilometre başına dağılan E_i enerjisi şöyle olacaktır:

1. Çok esnek (K = 26 kN/mm) bir yol için:

$$E_1' = 0,0373 \text{ kWsaat} \frac{421,5t}{8,15t} \frac{23\text{tren}}{\text{gün}} \frac{365\text{gün}}{\text{yu}}$$

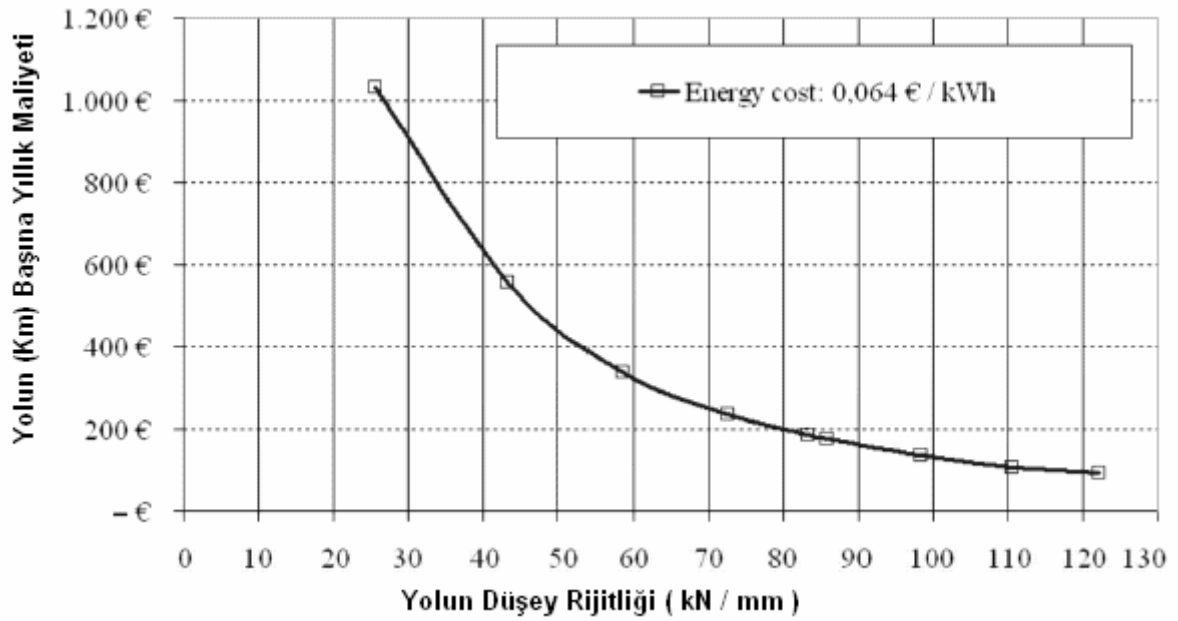
$$= 16137 \text{ kWsaat} / \text{Km.yu}$$

2. Çok rijit (K = 122 kN/mm) bir yol için:

$$E_2' = 0,0033 \text{ kWsaat} \frac{421,5t}{8,15t} \frac{23\text{tren}}{\text{gün}} \frac{365\text{gün}}{\text{yu}}$$

$$= 1447 \text{ kW.saat} / \text{Km.yu}$$

İspanya'da çekim maliyetinin 0,064 Euro / kWsaat olduğu hatırlanırsa, Şekil 8'deki grafiğin çizilmesi uygun olur.



Şekil 8. Yüksek Hızlı Demiryolunun (Km) Başına Boşa Harcanan Enerjinin Tahmini Yıllık Maliyetleri (Günde bir yönde 23 TGV yolcu treninin çalıştığı demiryolu için)

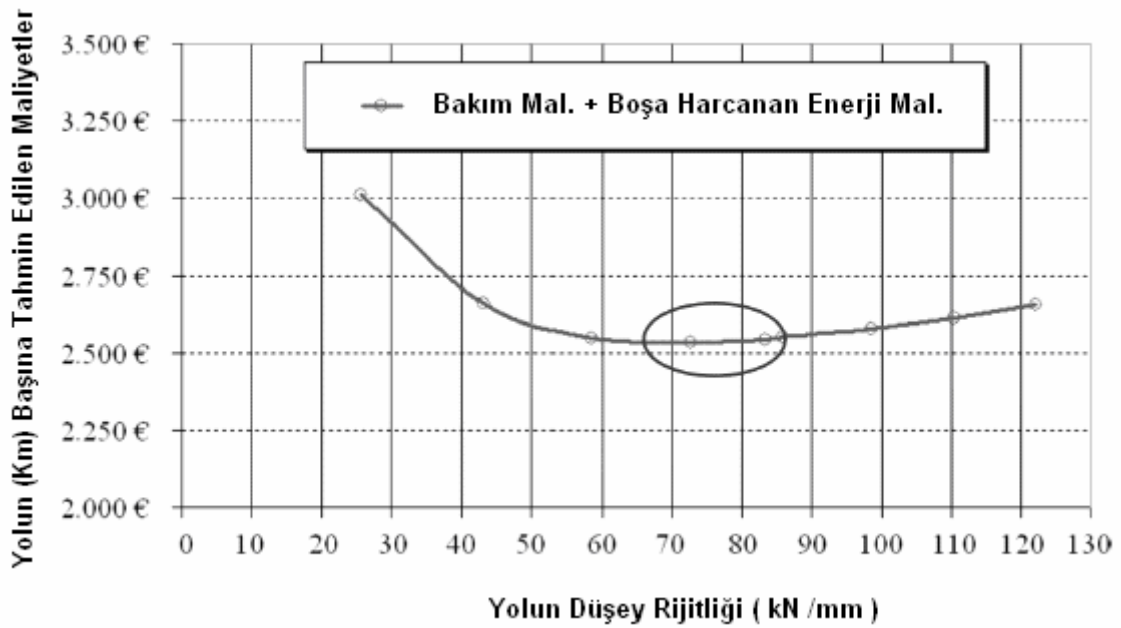
Hem yolun düşey rijitliğinin yolun geometrik bakım maliyetlerinin, hem de dağılarak boşa harcanan enerji maliyetlerinin etkileri ile ilgili öncelikli düşünceler temel alınarak, optimum (en uygun) düşey rijitlik için bir eşik tanımlamak mümkün olur.

Bu eşik, bu ikili perspektif açısından toplam minimum maliyete yönlendirir: geometrik kalitenin korunması maliyeti ve kaybedilen enerji maliyetleri.

Şekil 9'daki grafik, optimum düşey rijitlik eşiğinin 70 ile 80 kN/mm arasında olacağını gösterir. Açık ki, bu büyüklükler bunları elde etmek için kullanılan hipotezlere dayanır, özellikle şunlara:

- Kilowatt-saat başına kabul edilen maliyet;
- Referans olarak alınan düşey rijitlik;
- Dikkate alınan yol geometrisi bakım maliyeti

Bununla birlikte, sözü edilen büyüklüklerdeki makul değişimler esas alınarak gerçekleştirilen simülasyonlar, yukarıdaki aralıkta optimum düşey rijitlik için bulunan değerlerin uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca belirtilmesi gereken konu, yapılan araştırmanın kesin bir değer bulma amacı gütmemesi, yüksek hızlı demiryollarında yol düşey rijitliği için arzu edilen değerlerle ilgili yaklaşımın doğrulanmasını sağlamak amacını gütmesidir.



Şekil 9. Yol Rijitliği İle Toplam Maliyetler Arasındaki İlişki

Yüksek Hızlı Hatlarda Mesnet Levhalarının Düşey Rijitliği (4)

Yüksek hızlı demiryollarının yapımı, taşıtlar tarafından yola düşey olarak aktarılan dinamik etkileri azaltmak amacıyla, esnek yol yapıları için araştırmaları çoğaltmıştır. Bu konuda Fransız demiryolları, yeni Paris – Lyon hattında travers ile ray arasında bir mesnet levhası konulması yolunu tercih etmiştir. Bu levha maksimum hızın 200 Km/Saat olduğu hatlarda kullanılan 4,5 mm kalınlıktakinin 2 katı (9 mm) kalınlıktadır.

Rijitlik konusunda, yüksek hızlı hatlar için yeni levha için 90 kN/mm önerilir, bu değer geleneksel levhaninkinden (150 kN/mm) farklıdır.

Almanya demiryolları Hannover – Würzburg ve Mannheim – Stuttgart arasındaki ilk yüksek hızlı hatlarda UIC 60 B 70 W olarak bilinen ve düşey rijitliği 500 kN /mm olan ZW 687a mesnet levhası kullanılan üstyapı modelini kullanmıştır. Daha sonra düşey rijitliği 60 kN/mm olan mesnet levhasının kullanıldığı UIC 60 B 70 W 14 k 900 modeli uygulanmıştır. Bu Hannover – Berlin arasındaki yeni hızlı demiryolu hattının balastlı bir kesiminde kullanılmıştır. Bu arada 63 cm aralıklı B 75 travere Ioary - 300 tipi bağlantılarla bağlı ve 10 cm varan kalınlıklardaki 27 kN/mm düşey rijitlikteki mesnet levhaları üzerine döşenen 60 Kg/m raylardan oluşan yeni bir üstyapı tipi tasarlanmıştır. Bu model Hannover – Berlin yüksek hızlı hattında Stendal yakınlarında 14 Km yola döşenmiştir.

Madrid – Seville yüksek hızlı düşey rijitliği 400 – 500 kN/mm olan 6 mm kalınlıktaki EVA mesnet levhası kullanılmıştır. Madrid – Barcelona yeni hızlı hattında ortalama rijitliği 100 kN/mm olan 7 mm kalınlıktaki levha kullanılmıştır. Bu konudaki bilgiler Tablo 4’de verilmiştir. Bunların farklılıkları ray mesnetlenmesinde dikkate değer etkiler yapmaktadır.

Tablo 4. Mesnet Levhası Düşey Rijitliği

Yol Tipi	Mesnet Levhası Düşey Rijitliği K_{ml} (kN / mm)
<u>Geleneksel Demiryolları</u>	
Fransa Ulusal Demiryolları	150
Almanya Ulusal Demiryolları	500
<u>Yüksek Hızlı Demiryolları</u>	
Paris – Lyon Demiryolu	90
Hannover – Würzburg ve Mannheim – Stuttgart Demiryolu	500
Hannover – Berlin Demiryolu	60
Hannover – Berlin Demiryolu (Stendal civarı)	27

Önceki hipotezlere göre rayın altındaki toplam düşey rijitlik şu formülle tahmin edilir:

$$K_s = \frac{K_{ml}K_{bpl}}{K_{ml} + K_{bpl}} \quad (8)$$

K_s = Mesnet levhası ve balastlı platform sisteminin oluşturduğu ray mesnetlenmesi düşey rijitliği
 K_{ml} = Mesnet levhasının düşey rijitliği
 K_{bp} = Balastlı platform sisteminin düşey rijitliği

Fransa ve Almanya hatlarındaki mesnet levhalarının rijitlikleri arasındaki dikkati çeken farklılıklar, ray mesnetlenme rijitliği konusunda dikkati çeken farklılıklar oluşturur. Dolayısıyla, yüksek hızlı hatlardaki mesnet levhalarının düşey rijitliklerinin arzu edilen değerlerinin merak edilmesi akılcı görünmektedir. Yaklaşık yanıt şöyle olabilir:

Yüksek hızlı hatlarda balast-platform sisteminin düşey rijitliği yaklaşık 98 kN/mm'dir. Eğer yol için arzu edilen düşey rijitliğin 75 kN/mm olduğu (Şekil 9) varsayılırsa, mesnet levhalarının yaklaşık 30 – 50 kN/mm değerinde bir rijitliğe sahip olmaları gerektiği kolaylıkla ortaya çıkar. Mesnet levhasının esneklik etkisinin, balast içindeki titreşimlerin düzeyinin azaltılmasındaki yararlı etkiyi de unutmamak gerekir.

Deneyimler ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki, düşey rijitlikteki bir artış, taşıtların ray üzerinde oluşturacakları düşey gerilmeler üzerinde negatif bir etki yapmaktadır. Bununla birlikte, düşey rijitlikteki böyle bir değişim, yol içine gereksiz yere dağılan enerji miktarını da azaltır. Bu çelişki (ikilem), düşey rijitlik için, hem yol geometrisinin bakım maliyetleri ve hem de enerji maliyetleri ile ilgili ekonomik maliyetleri minimize edecek bir optimum değer bulmak için çaba harcanmasını önerilir duruma getirir.

Yapılan araştırma, yüksek hızlı hatlarda yolun düşey rijitliği için optimum değerlerin 70 – 80 kN/mm olacağını göstermiştir. Bu sonucun elde edilmesinde kullanılan hipotezler, hattan hata değişebilir, ancak bütünsel olarak bu hipotezlerin etkisi elde edilen sonuçları fazla değiştirmez. Bu çalışmada ayrıca, yüksek hızlı hatlarda kullanılan ve 90 ile 500 kN/mm arasında değişen mesnet levhaları düşey rijitlikleri için önerilebilecek değerler de incelenmiş, sonuç olarak 30 – 50 kN/mm bulunmuştur. Bu konudaki optimizasyon, hem taşıtların yola ilettikleri düşey gerilmeleri, hem de balast tabakası içindeki titreşimleri azaltmak konularında yararlı olacaktır.

Yüksek hızlı demiryolları için altyapıtasarım ilkeleri (5)

Yol modelleri, yol üstyapı ve altyapı bileşenlerini, trafik yüklerinin sistem içindeki gerilme ve şekil değiştirmeye etkilerinin belirlenmesindeki karmaşık etkileşimlerini uygun bir şekilde tanımlamak için kullanılırlar. Geleneksel olarak elastik tabana oturan kiriş modeli, demiryolu üstyapısının tanımlanmasında kullanılmaktadır. Bu modelde, herbir rayın elastik tabana oturmuş bir elastik kiriş gibi davrandığı varsayılır ve bir noktadaki şekil değiştirmenin yalnızca bu nokta üzerindeki yükten oluştuğu varsayılır. Bu modelde traverslerden balasta aktarılan basınç tahmin edilebilir ve alt tabakalara uygulanan düşey gerilmeler, Boussinesq'nin eşitliklerinin entegrasyonu ile hesaplanır. Bilgisayar teknolojilerinin ilerlemesi ile düşey tekerlek yükleri altında hat yapısının tasarımı için düşey yükler altındaki Katmanlı Elastik Teori veya Sonlu Elemanlar Yöntemleri benimsenmiştir. Bu yöntemler plastik, viskoz ve visko-elastik şekil değiştirmeleri lineer olmayan karakteristikleri ile dikkate alabilirler.

Analitik yöntemde, altyapının her katmanını karakterize etmek için elastik parametrelere gereksinim duyulur. Tipik olarak esneklik modülü ve poisson oranı

parametreleri kullanılır. Esneklik modülü ana gerilme doğrultusunda gerilmenin esnek şekil değiştirmeye oranı olarak, malzemelerle yapılan laboratuvar testleri ile, ya direkt olarak, ya da yerinde yapılan tepki ölçümlerinin analizi ile belirlenir. Poisson oran ise genellikle tahmin edilir.

Demiryolu altyapısı granüler, ince daneli ya da bunların karışımından oluşabilir. Granüler malzemelerin tekrarlı yükler altında davranışı lineer değildir ve gerilmelere bağlıdır. Başlangıçta her tekrarlanan yük için plastik şekil değiştirmeler oluşurken, tekrarlı yüklerin artması ile plastik şekil değiştirmenin büyüklüğü azalır. Sonunda eğer gerilmelerin derecesi hafiflerse, belirli yük tekrarından sonra esnek şekil değiştirme sabit hale gelir ve malzeme elastik davranır. Gerilme seviyesi esneklik modülünü etkileyen birincil faktördür. Esneklik modülü, içerilen gerilme ile önemli değerde artar ve kayma bozukluğuna ulaşıncaya kadar tekrarlanan gerilme ile az miktarda artar.

İnce daneli zeminlerde gerilmeler esneklik modülüne birincil etki etmektedir. Tüm diğer etkenler sabit tutulduğunda, artan gerilme ile, esneklik modülü doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. İnce daneli zeminler için kurulan modellerde öncelikle esneklik modülü ile saptırıcı gerilmeler arasındaki ilişkiler olarak ortaya konulmaktadır.

Granüler ve ince daneli tabakaların birbirleri ile olan etkileşimleri de tasarımda önemlidir. Örneğin balast tabakasının yumuşak taban zeminleri üzerine döşenmesi durumunda, çökmeler kısmen balastın yük dağıtım yeteneği (rijitliği) ile kontrol edilebilir. Bu taban zeminine iletilen gerilmelerin düzeyini kontrol eder. Bununla beraber, altyapının aktarılan gerilmeye tepkisi yayılan kuvvetin miktarını etkileyecektir. Yani tabaka etkileşimleri, gerilme dağılımını, her tabakada oluşan toplam elastik ve plastik şekil değiştirmeleri ve bu tabakaların bu gerilmelere karşı tepkilerini etkileyecektir. Bu nedenle olanaklar ölçüsünde gerçeğe yakın arazi koşullarını çoğaltacak koşullarda, ilgili ve anlamlı malzeme özellikleri belirlenmelidir.

Gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin trafik tarafından tekrarlanması yığılımlı etkisi, yol altyapısını artan bir şekilde zayıflatır. Balast yapısının oluşturulmasının nedeni, tasarım projesinin birincil amacını gerçekleştirmek, yani altyapıyı korumaktır. Taban zemininde trafik kaynaklı bozulmaların birincil türleri, balast tarafından altyapıda oluşturulan sürtünme yıpranmaları, ilerlemiş kesme göçükleri, masif kesme kopmaları ve plastik şekil değiştirmelerin yığılımları ile aşırı düzeylerde çökmelerdir. Bu bozulmalar daha çok ince daneli zeminlerle ilgilidir. Altyapı sürtünme yıpranmaları, balast ve altyapının arayüzündeki görelî hareketlerin bir sonucu olarak meydana gelir. Bunu önlemek için genelde uygulanan yöntem, arayüze bir kum tabakası döşenmesidir.

Yinelenen ve artan kesme bozulmaları, en fazla tekrarlanan gerilmelerin zemini kesmeye maruz bırakacak ve kalıbını değiştirecek yeterli yükseklikteki değerlere ulaştığı altyapının en üst kısmında oluşmaktadır. Bu tür bozulmalarda, aşırı gerilmeye maruz zemin, bir taşıma kapasitesi buzukluğu şekline yol açılacak şekilde, yolun altından yanlara ve yukarıya doğru sıkıştırılır. Bu durum daha yüksek iç sürtünmeye sahip iri daneli malzemeler için daha ufak bir problemdir. Çünkü uygulanan normal gerilmeye bağlı olarak kayma mukavemetindeki artış, oluşan kayma gerilmesindeki artıştan fazla olur. Plastik şekil değiştirme sonucu aşırı bir çökme oluşması sorunu, taban zemininin artan sıkışması nedeniyle kayma şekil değiştirmesinin düşey bileşeni bir "balast cebi" oluşmasına yolaçabilir. Bunları önlemek için bir koruyucu kum tabakası döşenmesi önerilir.

İnce daneli malzemelerde kalıcı şekil değiştirme, periyodik yüklerin sayısının bir fonksiyonu olarak gösterilir. Ek olarak, granüler malzemelerde, tekrarlanan kesme gerilmelerinin üzerinde bir değere çıktığında şekil değiştirmenin birikim oranının hızlı bir şekilde arttığı genel kabul görmektedir. Bu kritik gerilme derecesi eşik gerilme olarak bilinmektedir. Tekrarlı dinamik yüklemenin altında ince daneli zeminlerin kalıcı şekil değiştirmelerinin tahmini için birkaç model ileri sürülmüştür. Genelde kullanılan, en güçlü formlardan biri şudur:

$$\varepsilon_p = AN^b$$

Burada ε_p , toplam plastik şekil değiştirme yüzdesi, N tekrarlı yükleme uygulamalarının sayısı olup, A ve b gerilme durumları ve malzeme özellikleri ile ilişkili parametrelerdir. Li ve Selig (1996), aşağıdaki versiyonu önermişlerdir:

$$\varepsilon_p = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b$$

Burada, a, m ve b malzeme parametreleri, σ_d etkili gerilme ve σ_s zeminin statik mukavemetidir

Altyapıyı korumak ve geliştirmek için gereksinimler, başlangıçtan beri sürmektedir. Altyapının korunması ve geliştirilmesi gereksinimi, demiryollarının kullanılmasından bu yana süregelmiştir. Probleme yaklaşım şöyleydi:

- altyapı malzemesinin kendisinin değiştirilmesi ya da onun kuvvetli malzemelerle kuvvetlendirilmesi, ya da
- altyapıyı korumak ve yapısını bir koruma tabakasıyla kuvvetlendirmek.

Bugün her iki yöntem uygulanıyor olsa da, doğru olarak boyutlandırılmış ve sıkıştırılmış çakıl ve kum karışımı özel bir karışımdan oluşturulan örtünün uygulanmasının, en dayanıklı yapıyı oluşturacağı anlaşılmıştır.

Taşıma kapasitesini ölçmek için, Plaka Yükleme Deneyi ile belirlenen ve birimi MN/m² olan E_{v1} ve E_{v2} şekil değiştirme modülleri kullanılır. 30 cm yarıçapındaki bir dairesel plak $\sigma_{max} = 0,5$ MN/m² değerindeki gerilmeye erişilene dek, kademeli olarak yüklenir. Birinci yükleme sonucunun değeri E_{v1} ve ikinci yükleme sonucu E_{v2} değerlerini verir.

$$E_{v2} = \frac{1,5 * \Delta\sigma * r}{\Delta s_2}$$

E_{v2} : Şekil değiştirme modülü (MN/m²)

C : 0,3 σ_{max} ile 0,7 σ_{max} (MN/m²) arasındaki fark

R : Yükleme plağının yarıçapı (mm)

Δs : $0,3 \sigma_{\max}$ ile $0,7 \sigma_{\max}$ arasındaki sıkışma (mm)

Şekil değiştirme modülünün değerleri şöyle olmalıdır:

$$V \leq 160 \text{ Km/saat için } \geq 50 \text{ MN/m}^2$$

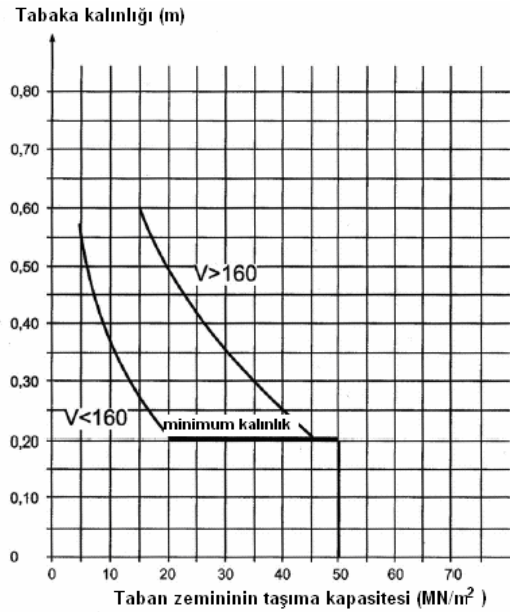
$$V > 160 \text{ Km/saat için } \geq 80 \text{ MN/m}^2$$

Bu deney çok zaman gerektiriyorsa, dinamik yükleme deneyi sonucu elde edilen E_{vd} değerleri kullanılabilir. E_{v2} değerleri ile CBR (California Bearing Test) arasında iyi bir korelasyon vardır. Almanya Demiryolları ortalama olarak $1\% \text{ CBR} = 13 \text{ MN/m}^2$ ve $10\% \text{ CBR} = 40 \text{ MN/m}^2$ olarak almaktadır.

Altyapıyı koruma amacıyla oluşturulacak tabakanın kalınlığı 2 ölçütle belirlenir:

1. Dondan Koruma ; kalınlık, kış aylarındaki sıcaklığa -uzun süreli kayıtlar bir referans olarak alınır- ve altyapı zemininin kompozisyonuna bağlıdır.
2. Taşıma Kapasitesi ; kalınlık, altyapının taşıma kapasitesine ve koruma tabakası üzerinde olması istenen taşıma kapasitesine bağlıdır, Şekil 10'da bu parametreler arasındaki ilişki gösterilmiştir.

İki hesabın sonuçları farklı değerler verirse, bunlardan büyük olanı alınmalıdır. Don olayının olmadığı bölgelerde sadece 2. kriter dikkate alınır. Minimum kalınlık ise 20 cm'dir.



ŞEKİL 10. Dondan koruma tabakası kalınlığı için diyagram.

Kaynaklar

- (1) Erel Aydın (2006), Trakya demiryolu hattı iyileştirilmesi için standartlar, TCDD Genel Müdürlüğü için Yüksel Proje A.Ş. adına hazırlanmıştır.
- (2) Woldringh R.F., New B.M. (1999), Embankment design for high speed trains on soft soils, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Barends et al. (eds) Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 047 7.
- (3) Hendry M., Hughes D., Barbour L., Atkinson M. (1996), Measurement and modelling the train induced dynamic response of a railway track and embankment constructed over a soft peat foundation, Departments of Civil Engineering in University of Saskatchewan, Canada, Queen's University Belfast, Ireland, UK, and Northern Ireland Railways, Belfast, Northern Ireland, UK.
- (4) Pita A. L., Teixeira P.F. Robuste F. (2004), Center for Innovation in Transport (CENIT), Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, High speed and track deterioration: the role of vertical stiffness of the track, Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part F: J. Rail and Rapid Transit
- (5) Burrow M., Ghataora G., Stirling A. (2004), Rail research UK, department of civil engineering, University of Birmingham, A rational approach to railway track substructure design, Birmingham, UK.