

BİR OCAK LOKOMOTİFİNİN SANAL PROTOTİP MODELİ

Nihal EKMEKÇİ, Nuri Ali AKÇIN
Zonguldak Karaelmas Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü
67100 İncivez/Zonguldak.
Tel: (372) 257 40 10-(1238), Fax (372) 257 40 23,
email: nihalekmekci@hotmail.com

Alınış: 03 Ocak 2011
Kabul Ediliş: 28 Şubat 2011

Özet; Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK), taşkömürü üretiminde, ağırlıklı olarak 17 tonluk EIMCO akülü ocak lokomotiflerini kullanmakta ve üretim aşamasında sıklıkla mil yenilmesi sorunları ile karşılaşmaktadır. Sorunun kaynağının belirlenmesi amacı ile yeraltında, yer ve hacim darlığı, yeni şartları ve güvenlik gibi nedenlerle lokomotif üzerinde çeşitli test ve analizlerin yapılması, yeni düzenlemelerin yapılarak test edilmesi, oldukça güç kimi zaman imkansız bir noktaya gelmektedir. Bu durumda ocak lokomotif ve vagonları için, bir sanal prototipinin hazırlanması, çeşitli işletme koşulları altında denemeler yapılabilmesine ve ortaya çıkan sonuçların değerlendirilmesine imkan vermektedir. Bu çalışmada, Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS) dinamik simülasyon yazılımı ile birlikte demiryolları taşıtları için özel olarak hazırlanmış ADAMS/Rail modülü kullanılarak, EIMCO akülü ocak lokomotifleri ve çektiği vagonlar için bir sanal prototip modeli oluşturulmuştur. Sanal modelden elde edilen verilerin doğruluğunun sınanması amacı ile, lokomotif mil yatakları üzerinde oluşan kuvvetler, belirlenen çalışma şartları için ölçülmüş ve modelden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel veriler ile uyumluluk görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Raylı Taşıtların Dinamik Simülasyonu, Ocak lokomotifleri, Sanal Prototip

A Virtual Prototype of One Mine Locomotive

Abstract; Turkish Hard Coal Enterprise (TTK), uses 17 tones Eimco battery locomotives in production of coal and exposes the fatigue failures in driving shafts during operation. It is difficult and sometimes impossible to make analysis and testes on mine locomotives, tested by new arrangement to determine the cause of problem due to lack of field and volume, underground condition and security. So, it is possible to make testes for some operating condition and evaluation of results by developing a virtual prototype of locomotive and wagons.

In this study, a virtual prototype of Eimco battery locomotive and wagons is developed by using Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS) with ADAMS Rail module for railway vehicles. Bearing loads are evaluated for certain operating condition and compare with models data to examine. Results come to an agreement with experimental data.

Key words: Dynamic Simulation of Railway Vehicles, Mine locomotives, Virtual Prototype

Giriş

Bir raylı taşıt sisteminin dinamik davranışı; taşıta, üzerinde hareket ettiği demiryoluna ve demir yolunun yapıldığı zemin özelliklerine bağlıdır. Bu bakımdan, bir lokomotifin hareketi sırasında, oluşan dinamik kuvvetlerin belirlenebilmesi oldukça karmaşık dinamik denklem takımlarının eşzamanlı çözümlenmelerinin yapılmasını gerektirir. Raylı taşıtlardaki, özellikle lokomotif ve vagonlardaki herhangi bir makine elemanının yorulması, yenilmesi ve kırılmasını içeren ve daha çok deneylerle saptanabilen çalışmalar, bilgisayarların gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla yerini sayısal model ve simülasyonlara bırakmıştır.

Çok uzuvlu sistemlerin dinamiğinin sayısal simülasyonu günümüzde raylı taşıtların tasarımı için yoğun şekilde kullanılmaktadır (Meli ve Ark.,2008). Raylı taşıtların kinematik analizi ile taşıtı oluşturan bileşenlerin birbirlerine göre bağıl hareketleri hesaplanabilmektedir (Ambrosio, 2010). Klasik teori genelde raylı taşıta odaklanmış ve demiryolu hattının dinamik etkilerini ele almamıştır. Gerçekte demiryolu hattı ve altyapısı sönümleyici elastik bir yapı olarak düşünülebilir (Zhai ve Ark., 2009). Buradan hareketle, raylı taşıtların güvenilir ve etkili biçimde modellerinin hazırlanabilmesi için ray ile taşıt tekerleklerinin temas noktalarının ve kuvvetlerinin hesaplanması gerekir (Auciello ve Ark., 2009). Buna ek olarak, hat geometrik kalitesinin ve kısıtlarının doğru biçimde tanımlanması, taşıtın çalışma karakteristiğinin belirlenebilmesi için gereklidir (Luber ve Ark, 2010). Raylı taşıtların sanal prototipleri genelde standart yolcu/yük lokomotif ve vagonları için yapılmıştır (Wang ve Li, 2010) ve (Kovalev ve Ark, 2009). Bu çalışmalarda özellikle ray, tekerlek temas kuvvetleri irdelenmiş ve hangi koşullar altında raydan çıkmanın gerçekleştiği incelenmiştir (Eom ve Lee, 2010). Özellikle raydan çıkmadan önce taşıtın gösterdiği anormal dinamik tepkilerin belirlenebilmesi taşıt güvenliğinin artırılabilmesi için önem taşımaktadır (Hung ve Ark., 2010). Taşıt güvenliği ile birlikte ergonomik gereksinimler değerlendirildiğinde, süspansiyon sistemlerinin dinamik davranışının modellenmesi (Facchinetti ve Ark., 2010), alternatif süspansiyon sistemlerinin (Pacchioni ve Ark., 2010) ve titreşim sönümleyicilerinin geliştirilebilmesi (Tomioka ve Takigami, 2010) araştırma alanları içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle deprem gibi doğal afetler esnasında demir yolu sisteminin dinamik davranışlarının belirlenmesi ve bu etkilere karşı sistemin en az hasar ve kayıpla kontrol edilebilmesi, ilgi çekici çalışmalar arasında sayılabilir (Nishimura ve Ark., 2009).

Özellikle hızlı tren lokomotifleri ve vagonlarının tasarımı için oluşturulan prototip modeller, taşıtı oluşturan makine elemanlarının ömür ve aşınma karakteristiklerinin belirlenmesi için önemli fırsatlar sunmaktadır. Raylı taşıt sistemlerinde taşıt, yol ve zemin koşullarına bağlı olarak, taşıtı oluşturan parçalar üzerinde oluşan kuvvetler, farklı işletme koşulları için hesaplanabilir. Örneğin demiryolu hattı üzerinde düzensizlikler tanımlanarak, taşıtın bu düzensizliklere karşı tepkisi incelenebilir (Zakeri ve Ark., 2009) ve standartlar üzerinde etkileyen kuvvetler bulunarak parça yenilmesine ve aşınmasına yol açan şartlar belirlenebilir (Pombo ve Ark., 2010). Periyodik dinamik kuvvetlerin yorulmaya ve endüstriyel açıdan önemli kayıplara sebep olduğu bilinmektedir. Bu durumda, sanal prototip modeller kullanılarak taşıtı oluşturan parçaların yorulma ömrü tahmin edilebilir (Yoon ve Ark., 2010). Sonuç olarak, sanal bir prototipin oluşturulması ve onun üzerinde çeşitli işletme koşulları için denemelerin yapılabilmesi, işletme sırasında karşılaşılan problemlerin tespitinde ve çözümünde önemli ekonomiklik ve zaman kazanımı sağlar.

Tüm iş kollarında olduğu gibi yeraltında da iyi organize edilmiş taşıma sistemi şarttır. Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) kömür üretiminde ağırlıklı olarak lokomotif taşımacılığı yapmaktadır. Kurum bünyesinde 5 müessesede trolley, akülü, dizel ve geniş hat lokomotifleri kullanılmaktadır. TTK'da, (TTK, 2007) çalışır durumda 53 adet dizel, 107 adet akülü, 7 adet trolley ve 4 adet geniş hat lokomotifi bulunmaktadır.

Bir işletme metodunda, yerüstü şartları ihtiyaç dahilinde birtakım değişiklikler yapmaya imkan tanırken; yeraltında yer ve hacim darlığı nedeniyle değişen şartlara göre düzenlemeler ve denemeler yapmak oldukça zordur. Taşıma işinde, dolayısıyla lokomotiflerde meydana gelebilecek bir problem tüm sistemi etkileyecektir. Lokomotiflerde; kurbalar, eğimler, ray- travers bağlantılarındaki esnemeler, yollardaki düzensizlikler, makine elemanlarındaki aşınmalar, aşırı yükleme ve bakımın aksaması gibi nedenlerden meydana gelen makine elemanlarının yenilmesi, kırılması büyük ölçüde maddi kayıplara neden olmakta, iş ahengi ve hevesini bozmaktadır. Yeraltındaki işletme koşullarında problemin nedeninin araştırılması, yer ve hacim darlığı, yer altı koşulları ve güvenlik gibi sebeplerden dolayı oldukça zor olmaktadır. Standart yada hızlı lokomotif ve vagonları ile yük/yolcu taşımacılığı için literatürde birçok çalışma mevcut olmasına karşın ocak lokomotifleri ve bunların dinamik karakteristiği gibi özel uygulama alanlarında bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, TTK bünyesinde kullanılan EIMCO akülü ocak lokomotifleri ve çektiği vagonlar kısaca tanıtılmıştır. Ardından, Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS) dinamik simülasyon yazılımı ile birlikte demiryolları taşıtları için özel olarak hazırlanmış ADAMS/Rail modülü kullanılarak oluşturulan sanal prototip model, oluşturma aşamaları ile birlikte gösterilmiştir. Daha sonra, model, düz bir hat üzerinde, beş vagon ile birlikte lokomotifin sabit bir hıza erişinceye kadar olan hareketi incelenmiştir. Son olarak, sanal modelden elde edilen verilerin doğruluğunun sınanması amacı ile, lokomotif mil yatakları üzerinde oluşan kuvvetler, belirlenen çalışma şartları için ölçülmüş ve sanal modelden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

Sanal Prototip Modelinin Oluşturulması

TTK'da kullanılan 17 tonluk akülü Eimco ocak lokomotifi (Şekil 1) 17 ton ağırlığında ve 2x51.8 HP gücündedirler. Bataryaları 128 volttur ve 64 elemandan oluşmuştur. Ortalama hızları ise 12 km/h civarındadır. TTK'da Armutçuk Müessesesi dışındaki tüm müesseselerde kullanılmaktadır ve millerinde sıklıkla yenilmeler

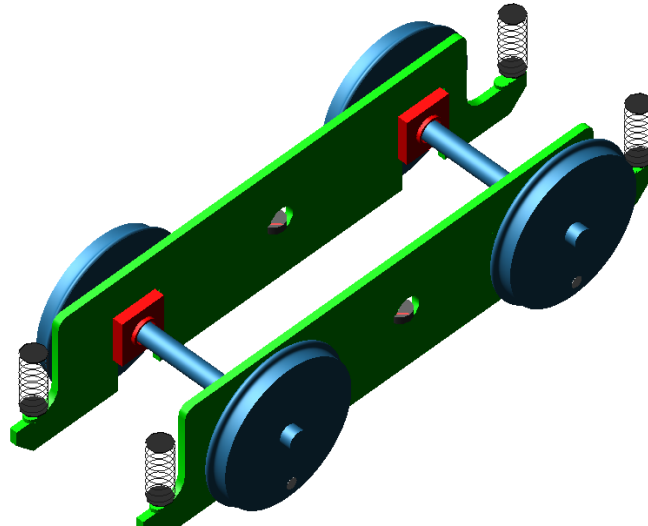
meydana gelmektedir. Lokomotif bandajı ise; tekerlekler, dişli, petegresler (mil yatağı) ve milden oluşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 1 TTK'da kullanılan 17 tonluk akülü Eimco ocak lokomotif

Şekil 2 TTK'da kullanılan 17 tonluk Eimco lokomotif bandajı

Lokomotif; işletme koşulları altında, olası raydan çıkmayı engelleme ve titreşimlerin daha iyi söndürülebilmesi amacı ile, bir şase ve şasenin her iki tarafında bulunan monitör levhalar şeklinde bir konstrüksiyona sahiptir. Monitör levhalar, şase yanıl merkezleri üzerinde açılmış kanallar üzerinde düşey yönde hareket edebilen döner mafisallar aracılığı ile şaseye bağlanmıştır. Süspansiyon; şase ile monitör levhalar arasında, ön ve araka bölümlerde bulunan yaylar vasıtası ile sağlanmıştır (Şekil 3). Lokomotifte ön ve arkada şaseye söndürme elemanları ile bağlı iki elektrik motoru bulunmakta ve bu motorlara bağlı dişli kutuları aracılığı ile miller tahrik edilmektedir. Ocak lokomotifinin çektiği vagonlar da ise süspansiyon şase ve bandajlar arasında bulunan dört adet yaprak yay ile sağlanmaktadır.



Şekil 3 Montajı yapılmış monitör levhalar, bandaj ve helisel yaylar

Lokomotif ve çektiği vagonların oluşturduğu bir katarın dinamik sisteminde (Şekil4) yer alan elemanların özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Ekmekci, 2009). Özellikle lokomotif ve vagonların dinamik sistemi içerisinde yer alan mafsallar, yaylar, sönümleme elemanları, taşıyıcı ve tahrik sistemleri, raylar ve zeminin fiziksel özelliklerinin doğru tanımlanabilmesi, sanal prototipten gerçekliğe yakın verilerin elde edilebilmesi için anahtar rolü oynamaktadır. ADAMS/Rail modülünde dinamik sistemi oluşturan her bir eleman için bir özellik dosyası hazırlanmaktadır. Bu dosyalarda ilgili elemanın özellikleri teorik matematiksel modellerden yararlanarak tanımlanabildiği gibi, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile de oluşturulabilir. Bu çalışmada, halen kullanılmakta olan bir ocak lokomotifi ele alındığından, özellikler büyük oranda deneysel olarak saptanmıştır.



Şekil 4 Lokomotif ve 8 adet vagonun oluşan katar

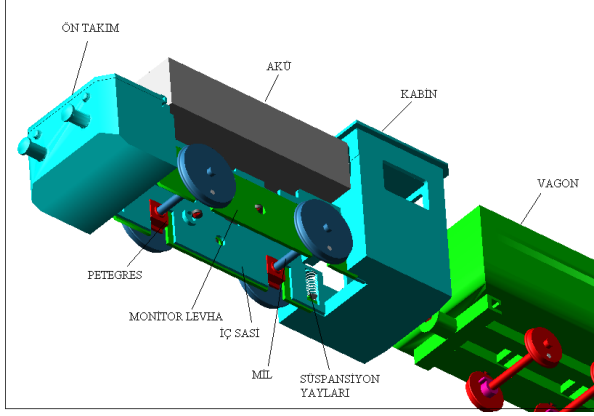
Gerçek bir raylı taşıt sisteminin eşdeğerinin sanal prototipler ile elde edilebilmesi oldukça güçtür. Bu güçlük genellikle dinamik sistem içerisinde yer alan elemanların dinamik özelliklerinin deneysel veriler yada matematiksel modeller ile tam olarak belirlenememesi yada özelliklerin sanal prototip modelin çözülmesinde ortaya çıkan hesapsal güçlüklerden ileri gelir. Bu bakımdan, çalışmanın hedefleri gözetilerek aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- (1) Tahrik sistemi ideal güç iletim elemanlarından oluşturulmuştur. Dişliler ideal diş profillerine sahiptir.
- (2) Sönümleme, titreşim elemanları, rulman yatakları dışında kalan makine elemanları rijit kabul edilmiştir.
- (3) Raylar lineer elastik kabul edilmiştir. Ray tekerler arasındaki sürtünme kuru yol şartları göz önüne alınarak belirlenmiştir.

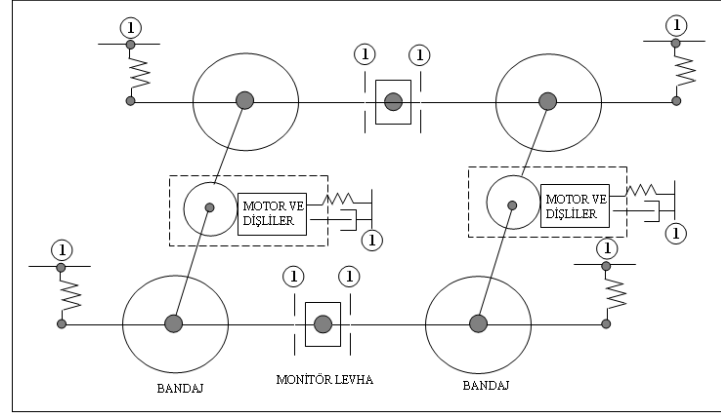
Öncelikle, lokomotif ve vagonları oluşturan temel parçalarının katı modelleri oluşturulmuştur. Bu katı modellerler kullanılarak parçaların kütleli atalet momentleri hesaplanmıştır. ADAM/Rail modülünde, karmaşık sistemlerin modellenmesi için, ilk olarak şablonlar oluşturulmaktadır. Şablonlarda dinamik sistemi oluşturan mekanizmanın uzuv ve kısıtları tanımlanmaktadır. Şablonlar temel alınarak alt sistemler oluşturulmaktadır. Alt sistemlerde, uzuvlar ve mafsalların ağırlık, atalet, serbestlik derecesi gibi özellikleri belirlenmekte ve istenildiği takdirde değiştirilebilmektedir. Alt sistemler bir araya getirilerek, montaj grupları yada istenirse tüm araç modeli oluşturulmaktadır. Tüm araç modeli, son olarak demiryolu alt sistemi ile birleştirilerek çözümleme işlemine tabi tutulmaktadır. Alt sistemler ve montaj grupları arasında iletişim nesneleri kullanılarak birbirleri arasındaki etkileşimleri de modellenmektedir. Böylelikle, lokomotif ve istenilen sayıda vagonlar ile katarlar oluşturulabilmektedir.

İncelenen ocak lokomotif ve vagonları standart raylı taşıt mekanizmalarına göre farklılıklar içerdiğinden, lokomotif ve vagonları için yeni şablonlar oluşturulmuş, bu şablonlar ile alt sistemler ve bu alt sistemlere bağlı montaj grupları modellenmiştir. Alt sistemler arasında ilişkiyi sağlayan bağlar mümkün olduğunca TTK'da kullanılan ocak lokomotiflerinin çalışma şartları dikkate alınarak oluşturulmuştur (Şekil 5). Böylelikle gerçekçi katar prototipleri hazırlanmıştır (Şekil 6). Demiryolu sisteminde ray ile tekerlek arasındaki temas kuvvetlerinin bulunabilmesi için, lineer ray tekerlek modeli temel alınmıştır. İstenilen demiryolu hattında (düz, kurbalar, eğimler) ve hat üzerinde belirlenen çeşitli geometrik düzensizliklerle (ray başlarında açıklık, paralellik, yanal yada dikey dalgalanma vb.)

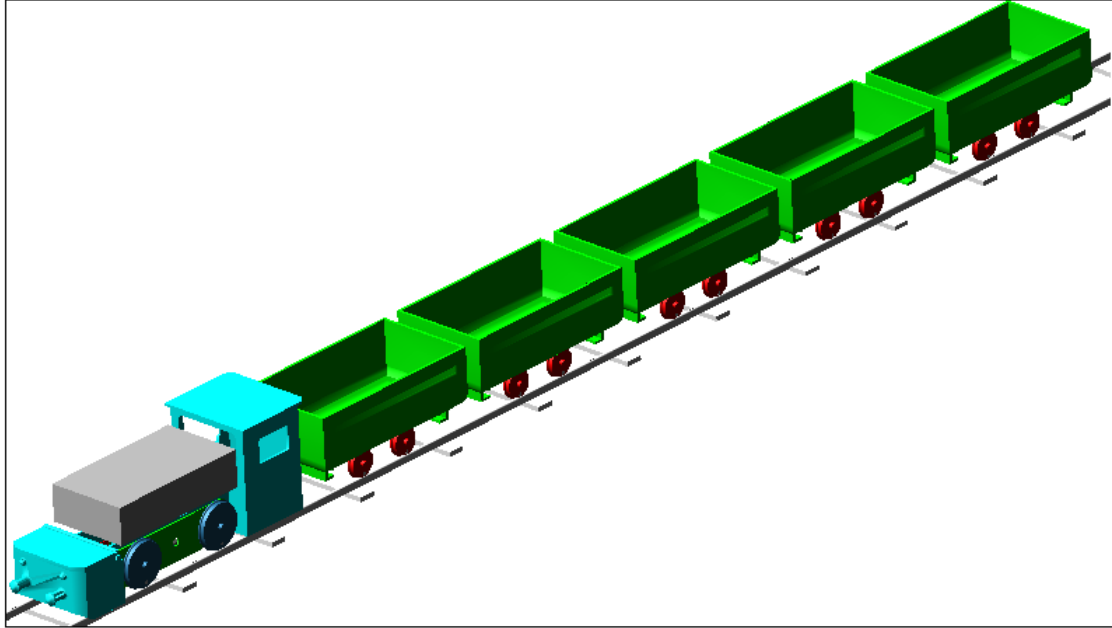
istenilen işletme koşulları (yük durumu, ağırlıkları, boyutları vb.) belirlenebilmekte, istenilen veriler (makine elemanları üzerine düşen yükler, burulma momentleri, hızlar vb.) bulunabilmektedir.



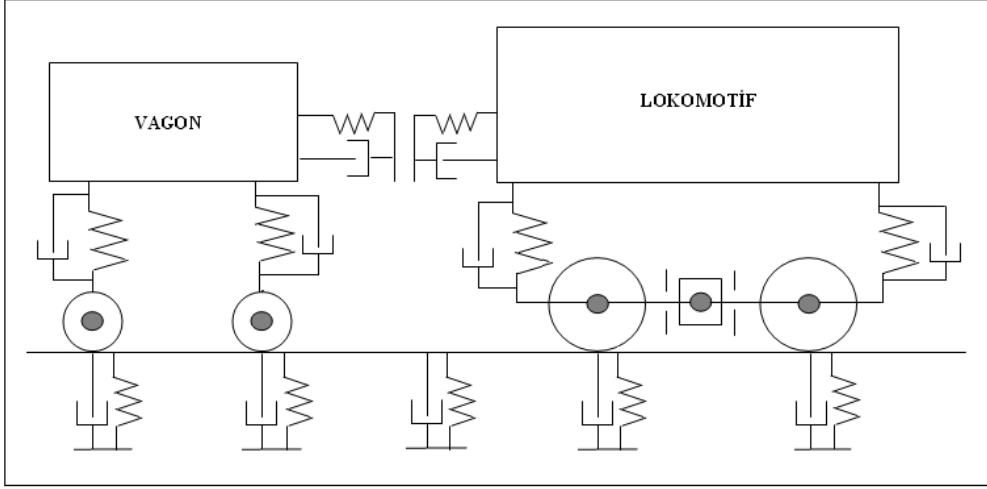
Şekil 5 a) Modelenmiş Eimco lokomotifin ana kısımları



Şekil 5 b) Lokomotif modelinin şematik gösterimi



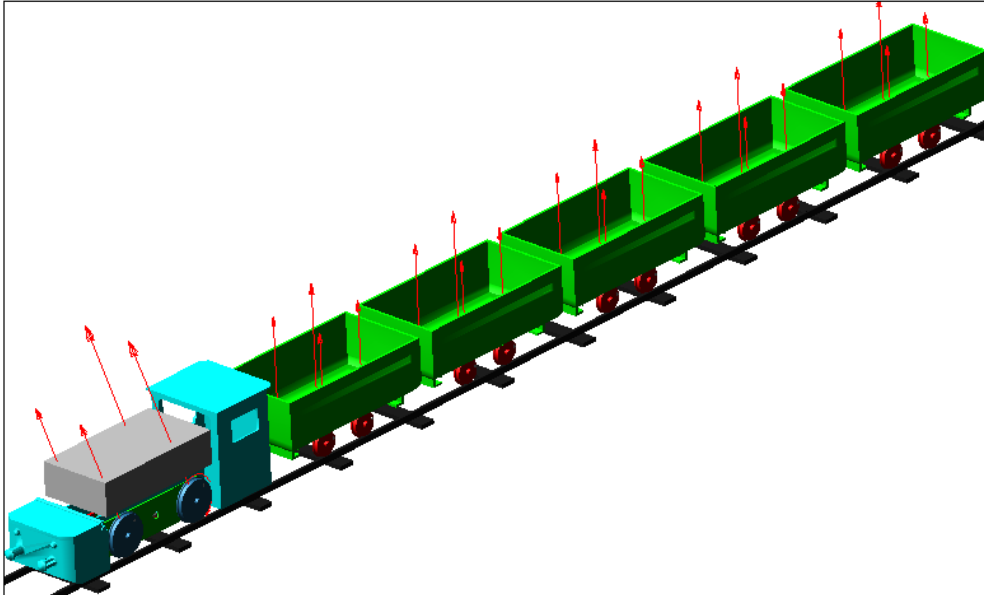
Şekil 6 a) Raylar üzerinde montajı tamamlanmış lokomotif ve 5 vagonun oluşan katar



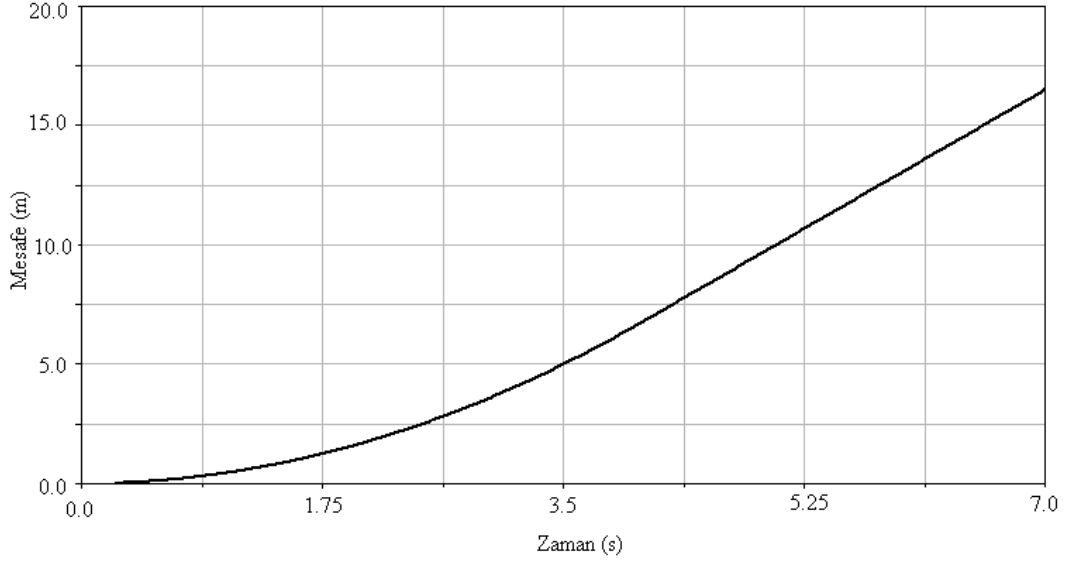
Şekil 6 b) Lokomotif ve vagon modelinin şematik gösterimi

Düz Bir Hatta Katar Hareketi ve Düzensizlikler

Bu simülasyon çalışmasında, 17 tonluk lokomotif ve 5 taş dolu vagonun oluşan katar (Şekil 7) düz bir hatta hareket ettirilmiştir. Yol üzerinde herhangi bir düzensizlik tanımlanmamıştır. Bu durumda her bir vagon ve yükü toplam 12 ton civarında olmaktadır. Katar durağan halden hareketine başlatılmış ve 7 saniyelik bir süre için simülasyonu hazırlanmıştır. Tahrik sistemi aracılığı ile mile sabit açısal hızda hareket verilmiştir. 7 s'lik süre zarfında katarın kat ettiği yol yaklaşık 16 m'dir (Şekil 8). Başlangıçta, raylar ve tekerlekler arasında oluşan sürtünme yeterli olmadığından tekerlekler ray üzerinde kısa süreli kaymakta ardından yuvarlanma gerçekleşmektedir.

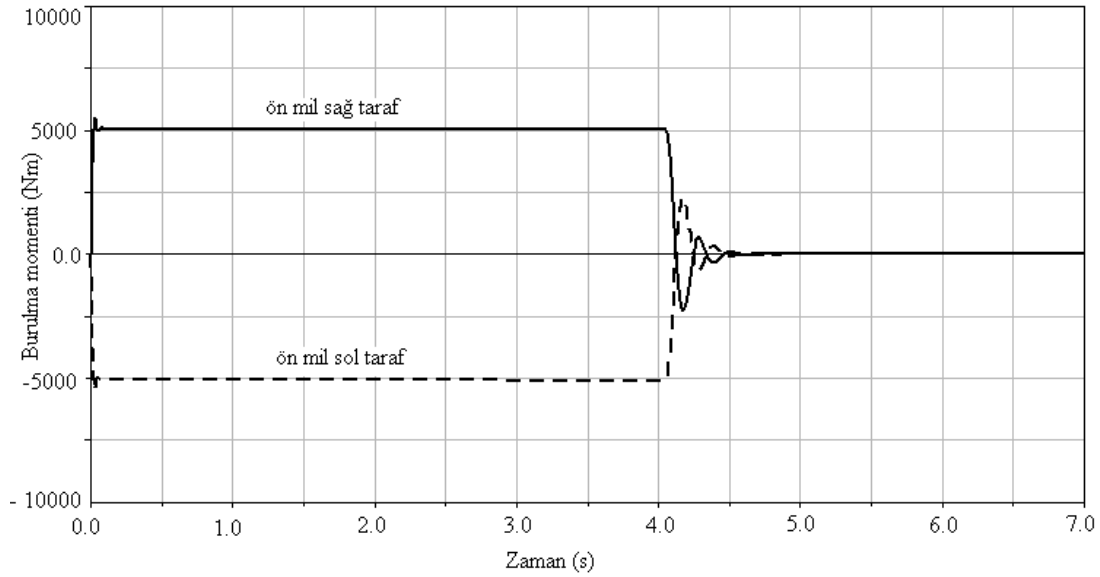


Şekil 7 Lokomotifin harekete başladıktan 1 saniye sonraki durumu



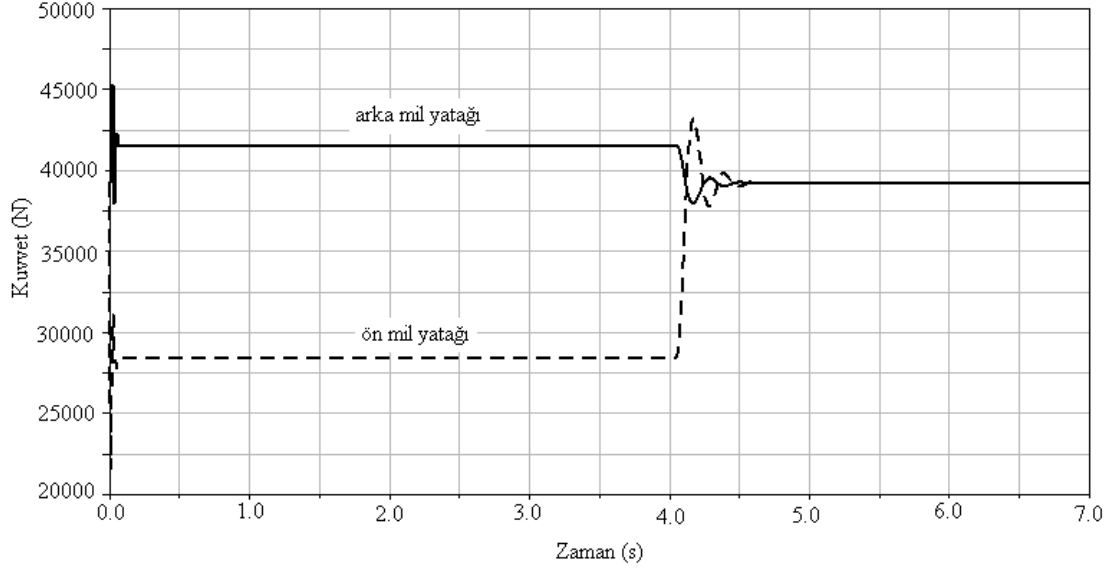
Şekil 8 Lokomotifin zaman karşı almış olduğu yol

Bu durumda mil üzerinde oluşan burulma momentleri çok kısa bir süre için salınmakta, ardından yuvarlanmanın başlaması ile 5000 Nm sabit bir değere ulaşmaktadır (Şekil 9). Lokomotif katarı çekmek için 4 saniye sonunda sabit 12 km/saat hıza ulaşmakta ve tahrik sonlanmaktadır. Bu noktada mil üzerindeki burulma momentleri hızla düşmekte ve yaklaşık 0.3 s'lik bir salınım sonunda sifira inmektedir. Katar 4 s sonunda sabit bir hıza ulaşmaktadır.



Şekil 9 Lokomotifin ön milinde sağ ve sol tarafta oluşan burulma momentleri

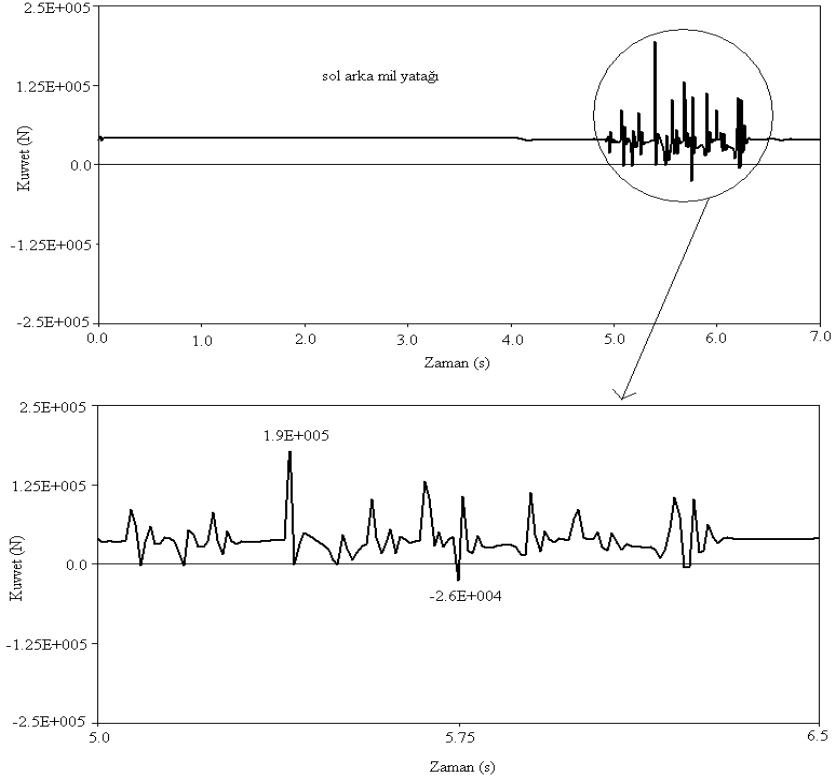
Mil yatakları üzerine düşey yönde etkiyen kuvvetler hareket başlangıcında önemli oranda salınmaktadır. Bu salınımın hareket başlangıcında oluşan ray tekerlek arasındaki kaymadan dolayı oluşmakta, yuvarlanma başlangıcı ile 4 s'lik süreler arasında yüksek bir değer almakta, katar hızının sabit bir değere ulaşması ile birlikte, statik denge durumunda yataklar üzerinde beklenen $3.92E+004$ (N) değerine düşmektedir (Şekil 10).



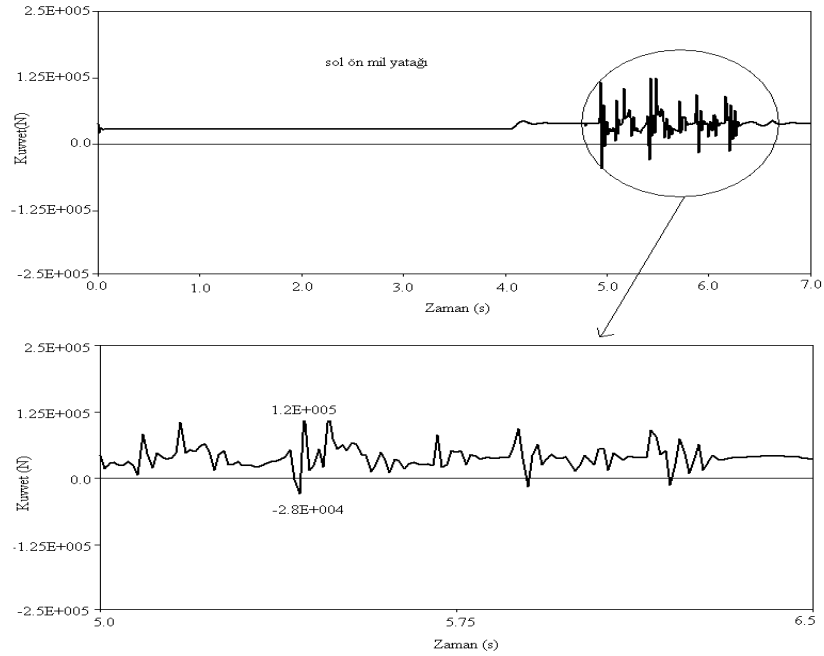
Şekil 10 Lokomotif ön ve arka mil yatakları üzerine düşen kuvvetlerin zamana göre değişimi

Elde edilen veriler, ideal yol koşulları düşünüldüğünde beklenen değerleri vermektedir. Lokomotif düz bir hatta değil de eğimlerin değiştiği ya da yol düzensizliklerinin (ray-travers bağlantılarının esnemeleri, yeterince balast kullanılmaması vb.) bulunduğu bir hatta hareket ettiğinde mil yataklarına düşen kuvvetler düzensizleşmekte ve artmaktadır.

Ray hattı üzerinde geometrik düzensizliğe örnek olarak, katar düz ve ideal bir hat üzerinde hareket ettirilmiş ardından 7 m yol aldıktan sonraki tek taraflı olarak sol ray üzerinde düşey yönde ardı ardına gelen 3 sinüs dalgası şeklinde bir düzensizlik verilmiştir. Bu dalgaların boyu 1m ve genliği ise 5 mm'dir. Bu durumda, ön ve arka mil yataklarında meydana gelen düşey kuvvetler incelendiğinde (Şekil 11,12) yaklaşık 4 s'lik süre için mil yatakları üzerinde etkiyen düşey yöndeki kuvvetler için benzer sonuçların elde edildiği, 5-6.5. saniyeler arasında ise önemli kuvvet değişimlerinin meydana geldiği görülmektedir. Bu aralık düzensizliğin tanımlandığı aralıktır. Düzensizlik sol tarafta verildiğinden bu sol mil yatakları incelenmiştir.



Şekil 11 Lokomotif sol arka mil yatağı üzerine düşen kuvvetlerin zamana göre değişimi



Şekil 12 Lokomotif sol ön mil yatağı üzerine düşen kuvvetlerin zamana göre değişimi

Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, Zonguldak'ta TTK Kozlu Müessesesi'nde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle lokomotif, bandajlarından (tekerlekler, mil ve mil yataklarının tümü) ayrılması için askıya alınmıştır. Bu kapsamda, petegres (mil yatağı) ve iç şasi üzerine gerinimleri ölçmek için gerinim-ölçerler yapıştırılmıştır (Şekil 13,14). Her yatak üzerinde üç gerinim ölçer kullanılarak, denemeler sırasında oluşabilecek veri kayıplarının önlenmesi ve olası hataların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Lokomotif üzerinde uygun kablolar ile gerinim ölçerlerden alınan sinyaller mikro işlemci kontrollü bir veri toplama sistemine bağlanmıştır. İşletme sırasında oluşan ani kuvvet değişimlerinin saptanabilmesi amacı ile veriler her kanalda 500 Hz hızında örneklenmiştir. Veriler, oluşturulan kablolu ağ yardımı ile, belirlenen noktalarda, veri toplama sisteminden bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 13 İç şasi üzerine yapıştırılan gerinim-ölçerlerin üstten görünüşü.



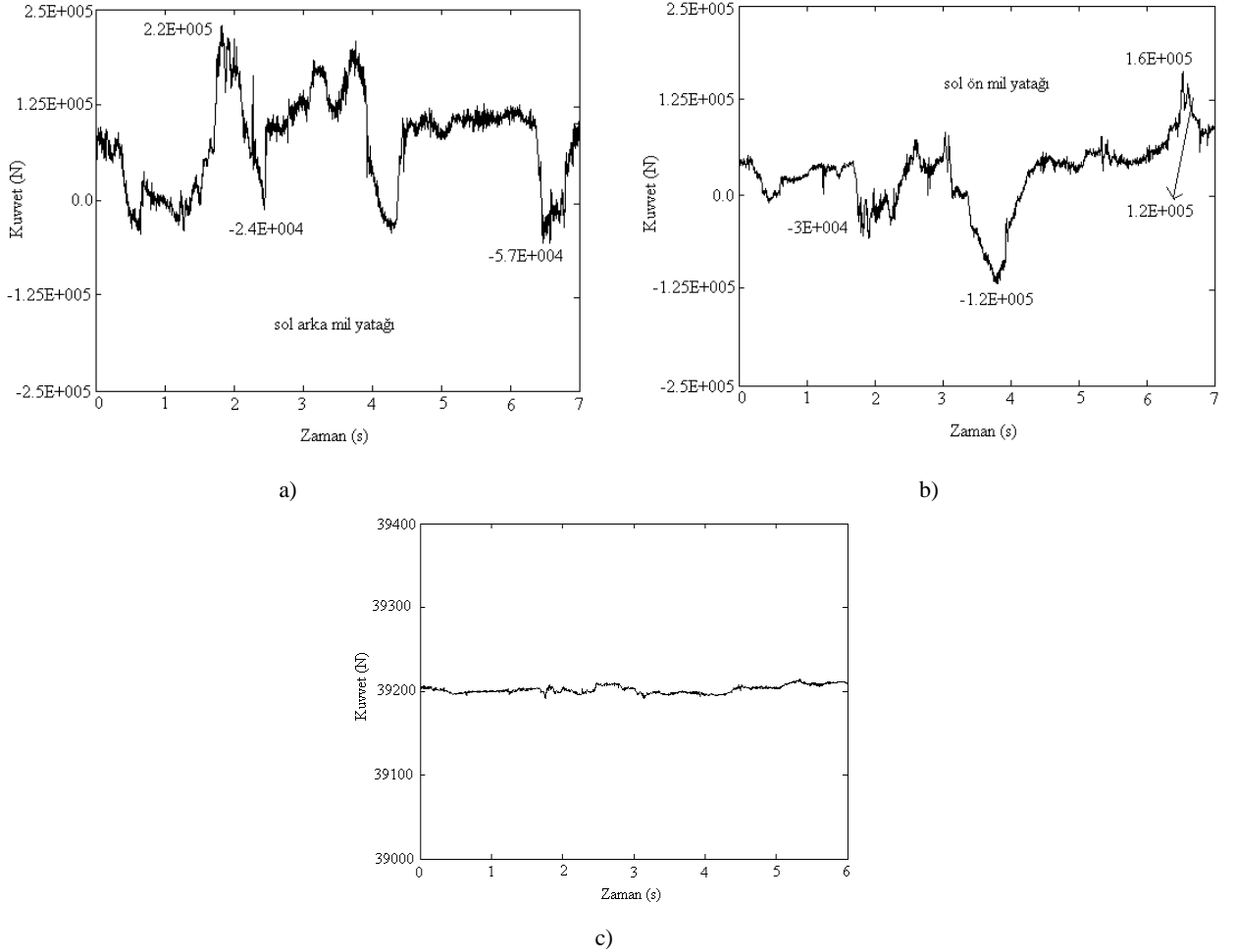
Şekil 14 Lokomotifin test için hazırlanma aşaması.

Gerinim-ölçerler; lokomotifin üzerine akü bataryası konulmadan yapıştırılmıştır. Bu konumda hassas kalibrasyon dirençleri kullanarak gerinim ölçerler kalibre edilmiştir. Ölçülen gerinim ve yatak kuvvetleri arasındaki lineer ilişkiyi bulmak amacı ile, daha önce elektronik tartı ile ağırlığı saptanan akü bataryası lokomotifte yüklenmiştir. Sonuç olarak, yataklardaki kuvvet ve gerinim arasındaki eğim katsayısı bulunmuştur.

Denemeler Müessesesinin yer üstünde bulunan hatlar üzerinde bulunan bir düz hat kesitinde yapılmıştır. 5 adet taş yüklü vagon ile bir katar oluşturulmuş ve hat üzerinde denenmiştir. Bunun için lokomotif belirlenen hatta 3 tur gidiş ve 3 tur dönüş (lokomotif vagonları iterken) 6 tur hareket ettirilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırılarak verilerin tekrarlanabilirliği sınanmıştır. Yapılan incelemeler verilerin aynı şartlarda tekrarlandığını göstermiştir.

Sanal model üzerinde oluşturulan düz hat senaryosuna da, ideal hat koşulları oluşturulabilmektedir. Ancak gerçek hatların bu denli düzenli olması beklenemez. Katarın 2. tur gidişindeki ve düz hat üzerinden geçerken (0 noktası lokomotifin hareketine ilk başladığı anı değil, bu düz hatta girişi ifade etmektedir) alınan veriler mil yataklarında ölçülen kuvvetlerin genliğinin, sabit hızda ilerleme durumunda arka sol mil yatağında yaklaşık 138 kN luk bir değerde değiştiğini göstermektedir (Şekil 15a). Burada gösterilen 220 kN üst değer ve -24 kN'lık alt değer simülasyon değerleri ile uyusmaktadır. Fakat belirtildiği gibi gerçek hatlarda düzensizliklerin çok daha fazla olabilmesinden dolayı simülasyon değerlerini aşan tepe ve dip noktalar da mevcuttur. Yine aynı şekilde sol ön mil yatağına bakıldığında kuvvet genliğinin 140 kN'a kadar ulaşabildiği görülmektedir (Şekil 15b). Burada 120 kN üst değer ve 30 kN alt değer simülasyondan elde edilen değerlerle uyusmaktadır. Elde edilen tepe ve dip noktaları, ray

başlarının bulunduğu noktaya karşılık gelmekte ve hat üzerindeki düzensizliklerin etkisini açıkça göstermektedir. Dört mil yatağı üzerine düşen kuvvetlerin ortalaması alındığında ise beklenildiği gibi 39.2 kN etrafında olduğu görülmüştür (Şekil 15c).



Şekil 15 Düz bir hatta hareket eden lokomotif mil yataklarında düşey yönde ölçülen kuvvetler.

a-) sol arka mil yatağı

b-) sol ön mil yatağı şeklinde olmalı.

c) dört mil yatağına düşen ortalama kuvvet

Sonuçlar

Yer altı maden işletmeciliğinde kullanılan makinelerde işletme şartlarında meydana gelebilecek problemlerin incelenmesi, gözlemlenmesi ve akabinde çözüm yollarının araştırılması işletme koşullarından dolayı oldukça güç olmaktadır. Bu durumda, ele alınan makineler için, gerçekliğe yakın sanal prototip modellerinin hazırlanması, işletme sırasında karşılaşılan problemlerin analizi ve çözümü için önemli olanaklar sunmaktadır. Bu çalışmada, ele alınan ocak lokomotifinde sıklıkla mil yenilmesi sorunları ile karşılaşılmaktadır. Bu durumda, mil üzerine düşen yüklerin, farklı işletme ve yol koşullarında zamana bağlı değişimlerinin doğru şekilde belirlenebilmesi, problemin çözümü için kritik verilerin elde edilebilmesini sağlayacaktır. Bu amaç ile, akülü ocak lokomotifleri ve çektiği vagonlar için bir sanal prototip modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan sanal prototip modeli ile düzensizliklerin bulunmadığı düz bir hat için tahrik sistemine etkiyen burulma momenti ve mil yataklarına etkiyen kuvvetler

hesaplanmıştır. Ardından, üzerinde bir düzensizliğin bulunduğu bir yol tanımlanmış ve elde edilen veriler saha ölçümlerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, mil yataklarına uygulanan kuvvetlerin genlik ve ortalama değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen veriler; hazırlanan sanal prototip modelinde, gerçek yükleme koşullarının, istenilen hassasiyette, doğru biçimde hesapladığını göstermektedir. Böylelikle, farklı yükleme ve yol koşullarında mil yükleri sanal ortamda belirlenebilir. Bu aşamadan sonra, maden yataklarında ocakların kullanıldığı hatların yol düzensizlikleri, eğimleri gibi özellikleri belirlenerek, sanal prototip yardımı ile mil üzerine etkiyen kuvvetler işletme koşulları altında belirlenerek, milin üzerindeki periyodik gerilmeler ve çevrim ömrü hesaplanacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasında, Bilimsel Araştırma Projesindeki katkılarından dolayı ZKÜ Rektörlüğüne, İstatistiksel bilgilerin toplanması ve ölçümlerin yapılmasına olanak sağlayan, TTK Genel Müdürlüğü'ne, Kozlu ve Üzülmüş Müesseseleri yetkililerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Ambrosio, J, Train kinematics for the design of railway vehicle components, *Mechanism and Machine Theory*, 45 (8) 1035-1049 (2010).
2. Auciello, J; Meli, E; Falomi, S; Malvezzi, M, Dynamic simulation of railway vehicles: wheel/rail contact analysis, *Vehicle System Dynamics*, 47(7): 867-899 (2009).
3. Ekmekci, N; Ocak lokomotiflerinde tahrik mili yenilme nedenlerinin incelenmesi, Doktora tezi (yayımlanmış), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 117s, (2009)
4. Eom, BG; Lee, HS, Assessment of Running Safety of Railway Vehicles using Multibody Dynamics, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11 (2), 315-320 (2010).
5. Facchinetti, A; Mazzola, L; Alfi, S; Bruni, S, Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort, *Vehicle System Dynamics*, 48 (Suppl.1) 429-449 (2010).
6. Hung, C; Suda, Y; Aki, M; Tsuji, T; Morikawa, M; Yamashita, T; Kawanabe T; Kunimi T, Study on detection of the early signs of derailment for railway vehicles, *Vehicle System Dynamics*, 48 (Suppl.1) 451-466 (2010).
7. Kovalev, R; Lysikov, N; Mikheev, G; Pogorelov, D; Simonov, V; Yazykov, V; Zakharov S; Zharov I; Goryacheva I; Soshenkov S; Torskaya E, Freight car models and their computer-aided dynamic analysis, *Multibody System Dynamics*, 22 (4) 399-423 (2009).
8. Luber, B; Haigermoser, A; Grabner, G, Track geometry evaluation method based on vehicle response prediction, *Vehicle System Dynamics* 48 (Suppl.1) 157-173 (2010).
9. Meli E, Malvezzi M, Papini S, Pugi L; Rinchi M; Rindi A, A railway vehicle multibody model for real-time applications, *Vehicle System Dynamics* 46(12) 1083-1105 (2008).
10. Nishimura, K; Terumichi, Y; Morimura, T; Sogabe K, Development of Vehicle Dynamics Simulation for Safety Analyses of Rail Vehicles on Excited Tracks, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 4 (1) No. 011001 (2009).
11. Pacchioni, A; Goodall, RM; Bruni, S, Active suspension for a two-axle railway vehicle, *Vehicle System Dynamics*, 48 (Suppl.1) 105-120 (2010).

12. Pombo, J; Ambrosio, J; Pereira, M; Lewis, R; Dwyer-Joyce, R; Ariaudo, C; Kuka, N, A study on wear evaluation of railway wheels based on multibody dynamics and wear computation, *Multibody System Dynamics*, 24 (3): 347-366 (2010).
13. Tomioka, T; Takigami, T, Reduction of bending vibration in railway vehicle carbody using carbody-bogie dynamic interaction, *Vehicle System Dynamics*, 48 (Suppl.1) 467-486 (2010).
14. TTK (2007), TTK'da Kullanılan Lokomotifler, TTK APK Başkanlığı
15. Wang, W; Li, GX, Development of a simulation model of a high-speed vehicle for a derailment mechanism, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit*, 224 (F2): 103-113 (2010).
16. Yoon, JW; Jung, SP; Park, TW; Park, JK, Fatigue analysis of the main frame of over head transportation vehicles using flexible multibody dynamics, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(3) 721-730 (2010).
17. Zakeri, JA; Xia, H; Fan, JJ, Dynamic responses of train-track system to single rail irregularity, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 6(2) 89-104 (2009).
18. Zhai, WM; Wang, KY; Cai, CB, Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 47(11) 1349-1376 (2009).