

Çelik Şekillendirme Yöntemlerinden Soğuk Haddelme İşleminin Sonlu Elemanlar Analizlerinin Değişik Parametrelere Göre Araştırılması

Özbek YELİN^{1,*}, Mehmet Seha TATLIER²

¹ Enerjisa Üretim, Kuzey Havza Bakım Müdürü, ARTVİN

² Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 80100, Osmaniye

YAYIN BİLGİSİ

Tarihçe:

Alınış: Ekim 2019
Kabul: Aralık 2019
Online Yayınlanma: Aralık 2019

Anahtar Kelimeler:

Soğuk Haddelme
Yassı Çelik
Meneviş Hadde
Metal Şekillendirme

ÖZET

Entegre demir çelik tesisleri demir cevherinden başlayarak, yassı çeliğe kadar devam eden tüm üretim süreçlerini bünyesinde barındırırlar. Bu tip tesisler çok büyük ve özel yerleşim alanlarına ihtiyaç duymalarının yanında, uzun yapım süresi ve büyük sermaye yatırımı gerektirirler. Bu dezavantaj duruma karşı çelik üreticileri ya da yarı mamul kullanıcıları daha küçük alanlara kısa sürede ve küçük sermayeler ile küçük çaplı meneviş haddelme (skin pass) işlemi gibi soğuk hadde uygulamalarını devreye almışlardır. Bu çalışmada, sayısal benzetimler ve veri analizleri yolu ile meneviş haddesi işleminde değişken olan hat hızı parametresinin etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Meneviş hadde işlemi süreci boyunca meydana gelen kuvvetler, oluşan gerilme ve gerilmeler farklı hat hızlarında incelenmiştir.

Investigation Of The Finite Element Analysis Of Cold Rolling Process From Metal Methods According To Different Parameters

ARTICLE INFO

History:

Received: October 2019
Accept: December 2019
Available online: December 2019

Keywords:

Cold Rolling
Flat Steel
Skin Pass
Metal Forming

ABSTRACT

The integrated iron and steel mills are equipped with all production processes starting from iron ore to flat steel. In addition to the need for large and private settlements, such facilities require long construction time and large capital investment. In response to this disadvantage, steel mills or semi-finished steel users have adopted cold rolling applications and small diameters skin pass processes in smaller areas in the short term. In this study, it is aimed to investigate the parameters which are effective in skin pass process through numerical simulations and data analysis. The forces acting on the material during the skin pass process, stresses and strains are investigated by changing various parameters.

1.Giriş

Metal işlenmesi alanlarında haddelme işlemi, metallerin kalınlığının azaltılması ve düzgün haline getirilmesi için bir ya da daha fazla hadde çiftlerinden geçirilmek suretiyle gerçekleştirilen şekillendirme işlemidir. Haddelme işlemi, haddelenmiş metallerin sıcaklandırılmalarına göre sınıflandırılmaktadır. Metallerin sıcaklandırılması yeniden kristalleşme sıcaklığının üstüdeyse, işlem sıcak haddelme olarak bilinmektedir.

Metal sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaysa, yapılan işlem soğuk haddelme olarak bilinmektedir. İki ya da daha fazla silindir arasındaki sıcak veya soğuk metal işleme, sanayi devriminden önce var olmuştur. Avrupa'daki haddehanenin çizimleri Leonardo da Vinci'ye atfedilirken, ham biçimdeki ilk haddehaneler aynı temel ilkeler ile Orta Doğu ve Güney Asya'da M.Ö. 600 yıllarında bulunmuştur [1,2].

Haddehanelerde kullanılan haddeleme tezgâhları standart değildir. Bu tezgahlar, son ürünün ya da işlemin başarılması için tasarlanmış olup siparişe göre inşa edilmektedir. Haddeleme tezgâhları birçok işlevi gerçekleştirme özelliğine sahiptir. Bu nedenle malzemelerin kalınlıklarını oldukça azaltmak ya da malzemeleri bir şablona göre eşit yoğunluğa getirmek için sıkıştırmak, bir veya iki tarafına yüzey kazandırma işlemi için kullanılabilir. Kısacası, haddeleme tezgâhları malzemelerin genişliklerini azaltmak ve metal sertliklerini arttırmak için kullanılırlar [3].

Haddeleme işlemi, gelişen teknolojiyle beraber, kalitenin artırılması yöntemlerinin kullanılmasıyla kaliteli malzeme elde edilmesi için çelik endüstrisinde bir süreç olarak yerini almaktadır. Haddelemiş çeliklerin daha küçük kalınlıkta, pürüzsüz yüzeyde ve yüksek dayanıklılıkta olması için aşınmaya karşı direnç, yüksek mukavemet, tokluk gibi mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gereklidir. Bu şartlar göz önüne alındığında malzeme ve istenilen son ürüne göre sıcak haddeleme ve soğuk haddeleme olarak farklı haddeleme yöntemleri uygulanır. Sıcak haddeleme ile daha esnek bir yapı ve parlamayan bir yüzey oluşturulur. Soğuk haddeleme ise yüksek yoğunlukta yürütülmekte olup, daha parlak bir yüzeye ve daha sert özelliğe sahip bitmiş ürün sunar [4,5].

Çelik endüstrisindeki üretim ve kapasitesi 2000’li yılların başından itibaren hızlı bir şekilde büyüme eğilimi göstermiştir. Dünya genelindeki ekonomik kriz etkilerinin büyük oranda hissedildiği 2008 ve 2009 yıllarında çelik endüstrisinde gerileme söz konusu olsa da 2010 yılı sonrasında üretim ve kapasite büyümesi yeniden ivmelenmiştir. Çelik endüstrisinin üretim artışıysa kriz dönemleri de dahil olmak üzere artarak devam etmiştir. Küresel çelik kullanımının yarıdan fazlası inşaat endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu endüstriyi otomotiv, makine ve teçhizatları ve petrol-doğalgaz teçhizatları takip etmektedir. İnşaat endüstrisinde genellikle uzun ürünler ile inşaat demiri kullanılırken, otomotiv endüstrisinde soğuk ya da sıcak haddelemiş yassı ürünler ve galvaniz ürünleri kullanılmaktadır [6].

Soğuk haddeleme işleminde plastik akma mekanizmasının geniş çaplı ilk incelenme işlemi Johnson ve ark. [7] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada merdane bükülmeleri ve iş parçası dışında kalan bölgelerde meydana gelen temas düşünülmemiştir. Bu çalışmanın ardından meneviş hadde işlemi üzerinde farklı modelleme

çalışmaları yapılarak işlem üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır [7].

Roberts [8] tarafından basit kiriş modeli ile yapılan çalışmada merdane kuvveti iş parçasını deforme etmek için gerekli en küçük kuvvet olarak hesaba katılmıştır. Bu çalışmanın matematiksel modelinde düzleştirme işlemi başarısız olmuştur. Ancak bu çalışma sonucunda meneviş haddelemede sıcaklığın plastik deformasyon üzerindeki etkisi net olarak görülmüştür. Fleck ve ark. [9] tarafından yapılan çalışmada iş merdanesinin deformasyonu ve sürtünme sadece iş parçası ile temas edilen yüzeylerde dikkate alınmıştır. Ayrıca merdane merkezine paralel yönde olan deformasyonlarda göz ardı edilmiştir. Onno ve ark. [10] ile sonlu elemanlar yönteminin meneviş hadde işleminde kullanarak analizler yapmışlardır. Bu çalışmada iki farklı kalınlıktaki iş parçasına uygulanan kuvvetlerin etkisi ile çalışma merdanesindeki elastik deformasyonlar incelenmiştir. Doksanlı yıllarda Wiklund [11-13], Domonti [14], Sutcliffe ve ark. [15] plastik şekillendirme üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda, Fleck ve ark. [9] yaptığı çalışmanın sonuçlarına yakın değerler elde etmişlerdir. Domonti ve ark. [14] yapmış olduğu modellemede paralel olmayan merdanelemede, hız ve gerilme değerlerini hesaplayan yaklaşık bir model geliştirmiştir. Fuchhumer ve ark. [16] ince çelik şeridin soğuk haddeleme ve tavlama haddeleme işlemi önce ve sonrası çekme gerilmelerin hesaplamalarında etki fonksiyonu yöntemi kullanarak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Liu ve ark. [17] tarafından yapılan çalışmada Domonti [14] gibi iş merdanesinin şekline odaklanmıştır. Merdanedeki yapı değişikliği ile hadde kuvvetlerindeki değişimi ve iş parçasındaki deformasyonlar incelenmiştir. Alınan sonuçlar geçmiş çalışmalar ile örtüşürken, merdane düzlüğünün hadde kuvvetini arttırdığı tespit edilmiştir. Chandra ve ark. [18] rijit plastik sonlu elemanlar yöntemini kullanarak meneviş ve soğuk haddeleme işleminin benzetimlerini gerçekleştirmişlerdir. [18-24].

Endüstrilerde kullanılan çelik ürünlerinin en düşük maliyetler ile elde edilmesi için yatırımcılar büyük tümleşik tesisleri yerine işlevsel ve basit yatırımlara yönelmişlerdir. Yassı çelik mamulü üreticilerinin müşterisi olan orta ölçekli çelik servis merkezleri soğuk hadde yönteminden olan “Meneviş Hadde (Skin Pass)” hattını kurmaktadır. Bunun nedeni ise nihai ürünü kullanan müşterilerin özel ürün isteklerine karşılık verebilmektir.

Meneviş hadde işlemi genellikle son işlem olarak geçmektedir. Sıcak haddeme ile haddelenmiş çeliklerin kalınlıkları %3'ten %1'e kadar düşürülebilmektedir. Bu işlemdeki amaç yüzey sertleşmesinin uygun düzeyde artırılması ve istenilmeyen iç gerilmelerin yok edilmesi, pürüzsüz ve düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlamasıdır. Beyaz eşya ve otomotiv endüstrisi gibi özellikle lazer kesim işleminin gerçekleştirildiği imalat hatlarında plazma veya lazer ile yüksek hızda kesim esnasında kesme kafasına zarar vermemek ve herhangi bir biçimde çarpılma veya şablonun haricine çıkılması durumu istenilmemektedir. Bu özellikleri içeren bir sıcak haddelenmiş çelik yalnızca meneviş hadde işlemi sonrasında sağlanabilir [25].

Her teknolojik araç bir gereksinimin karşılığı olarak ortaya çıkar. Gereksinimin kendisi araç biçimlenmesini yönlendiren tek unsurdur. Bu unsurun temelinde ise insan yatar. Bu çalışmada çok büyük maliyetler gerektiren yatırımlara alternatif olarak kurulan Türkiye'de ilk defa bir boy kesme makinesi üzerine yerleştirilen meneviş hadde hattının incelemesini yapıp, kurulan bu sistem üzerindeki insan faktörünün etkisini görmek amaçlanmıştır.

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada haddeme yöntemi ve soğuk haddenin aşamalarıyla meneviş hadde işleminin sanayideki yeri ele alınmıştır. İkinci aşamada ise meneviş hadde işleminin sonrasında sıcak haddelenmiş çeliklerin mekanik özelliklerindeki değişimler ve bu değişimleri etkileyen parametreleri sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenmiştir. Bilgisayar kontrollü üretim tezgâhlarında herhangi bir yassı çelik ürününe düzgün bir yüzey ve istenilen uzama miktarının verilmesi için yapılan uygulamaların doğruluğu kuramsal benzetimler ile gösterilmiştir.

2. Sonlu Elemanlar Analizi ile Uygulama

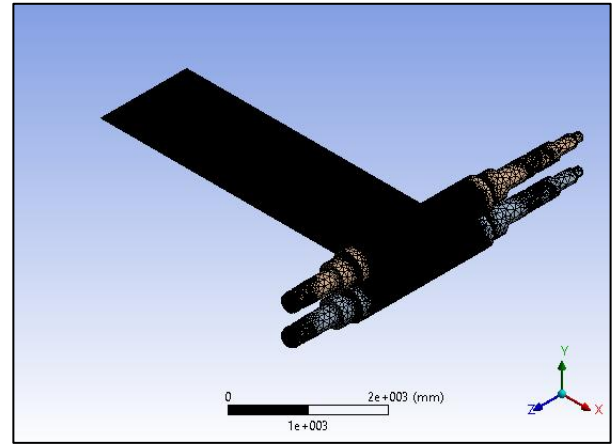
Yapılan deneysel çalışmada merdane eksenleri çakışık ve klasikleşmiş hadde düzeniyle ve merdane eksenlerinin arası mesafeli olacak şekilde konumlandırılmıştır. Ayrıca çalışmada sayısal benzetimler ve veri analizleri yoluyla meneviş hadde işleminde değişken olan hat hızı parametresinin etkisinin araştırılması gerçekleştirilmiştir. Meneviş hadde işlemi süreci esnasında oluşan kuvvetler, meydana gelen gerilme ve gerilmeler incelenmiştir. İncelenen gerilmeler S235JR kalitede karbon çeliği plakasının 10 mm kalınlıktan 9,8 mm kalınlığa getirilmesi üzerine ve üç farklı hat hızında (30-35

ve 40 m/dak) olmuştur. Analiz belirlenen hızlarda iki merdane arasından bir metrelik bir iş parçasının geçişi öngörülerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 30 m/dak kesme hızında çalışacak olan merdaneye bombe verilerek (350 mm) karşılaştırma yapılmıştır. Analiz işlemleri gerçekleştirilmeden önce malzemeden alınan numuneye endüstriyel denetim firması bünyesinde bulunan laboratuvarında çekme testleri uygulanmıştır. Tablo 1 de düşük alaşımli karbon çeliğine ait malzeme bilgileri verilmiştir. Analizde kullanılan geometri endüstride aktif çalışmakta olan bir meneviş hadde hattının birebir CAD programında çizilerek sonlu elemanlar analiz paket programına aktarılacak sureti ile gerçekleştirilmiştir.

2.1. Merdane Sisteminin Ağ Yapısının Oluşturulması

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak olan analiz işlemlerinin gerçekleştirilmesinden önce analiz yapılması istenilen merdane sisteminin ağ yapısının meydana getirilmesi gerekmektedir. Şekil 1'de verilen merdane sistemin ağ yapısındaki toplam düğüm ve eleman sayısı da aşağıda verilmiştir.

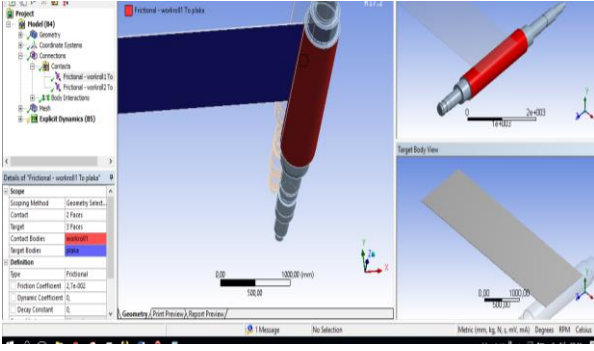
- Düğüm sayısı: 1922657
- Eleman sayısı: 6602122



Şekil 1. Merdane Sisteminin Ağ Yapısı

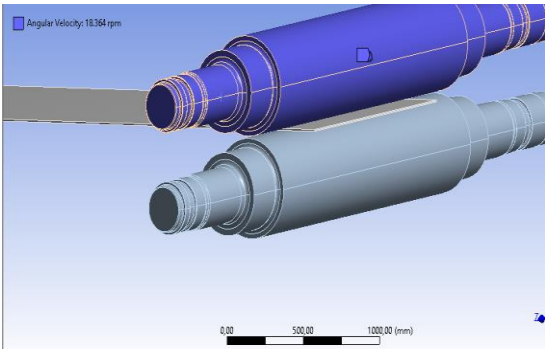
2.2. Merdane Sistemindeki Bağlantıların ve Uygulanacak İşlemlerin Tanımlanması

Merdane sisteminde kullanılan bağlantı elemanlarının ve hareket mekanizması arasında yapılan bağlantıların doğru bir şekilde tanımlanması analizin sorunsuz olarak gerçekleştirilebilmesi için önemlidir. Merdane ile plakanın temas ettiği bağlantı yüzeylerinde 0,027 katsayı ile sürtünmeli bağlantı verilmiştir (Şekil 2).



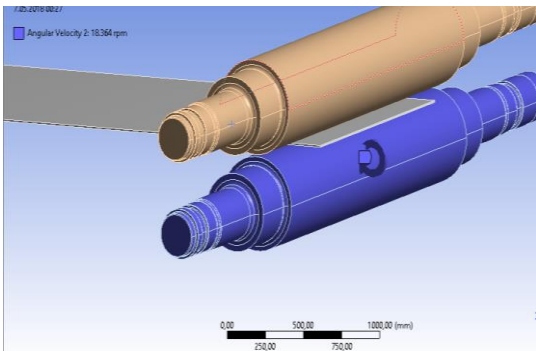
Şekil 2. Merdane ve Plaka Arasındaki Bağlantı

Merdanelerin dönme hareketi açısal hız olarak RPM cinsinden 18,364, 21,424 ve 24,485 olarak verilmiştir. Bunun nedeni hat hızlarının 30-35 ve 40 m/dak olarak kabul edilerek merdane yarı çapının 260 mm olmasından dolayı sayısal hesaplamaya göre merdanelerin 18,364, 21,424 ve 24,485 rpm ile dönmesi gerekliliğindedir (Şekil 3 ve Şekil 4). Verilen şekiller devrin sisteme uygulanışını göstermektedir.

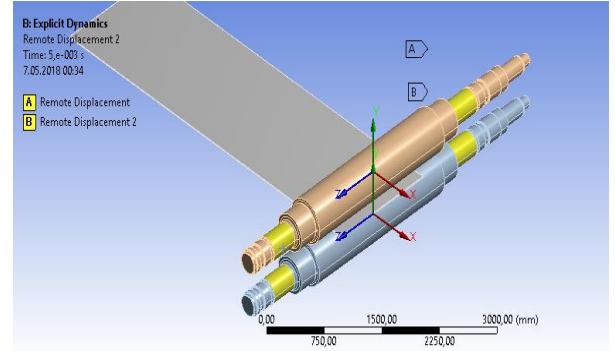


Şekil 3. Üst kısımdaki merdaneye verilen açısal hızın görünümü.

Merdanelerin rulmanlar ile yatakladığı yüzeylere X, Y ve Z eksenlerinde doğrusal hareket, X ve Y eksenlerinde ise dönme hareketi sıfır olarak tanımlanıp sadece Z ekseninde dönme kabiliyeti verilerek mesnetlenmesi sağlanmıştır (Şekil 5).

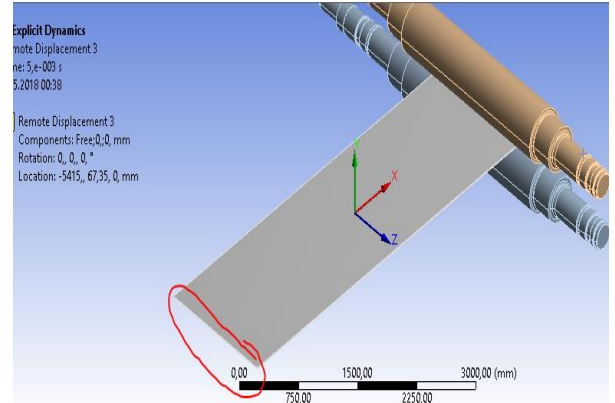


Şekil 4. Alt kısımdaki merdaneye verilen açısal hızın görünümü.



Şekil 5. Merdane rulmanlarının mesnetlenmesi

Plaka ise kırmızı ile işaretlenen yüzeyden Y ve Z eksenleri doğrultusunda doğrusal hareketleri ve X, Y ve Z eksenlerinin etrafında dönme hareketleri 0 olacak şekilde tanımlanarak hareketinin kısıtlanmasına karşın X ekseninde doğrusal hareketi serbest olarak kısıtlama olarak tanımlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Üst kısımdaki merdaneye verilen açısal hızın görünümü.

3. Analiz Sonuçları

Bu çalışmada sonlu elemanlar modeli kullanılarak benzer çalışmalardan farklı olarak merdanelere bombe şekli eklenerek haddeleme işlemindeki gerilmelere etkileri incelenmiştir. Bu işlem sonucunda elde edilen verilerin sadece malzeme üzerindeki etkisi değil merdanelerde meydana gelen parametre değişimleri de incelenmiştir. Çalışma kapsamında merdane sistemi sonlu elemanlar paket programında eksplisit (açık) çözümleme kullanan analizlerle merdanelerin ve plakaların üzerinde oluşturduğu gerilmeler ve deformasyonlar incelenmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan iş parçasına ait hadde öncesi ve sonrası çekme testi verileri Tablo. 1'de yer almaktadır.

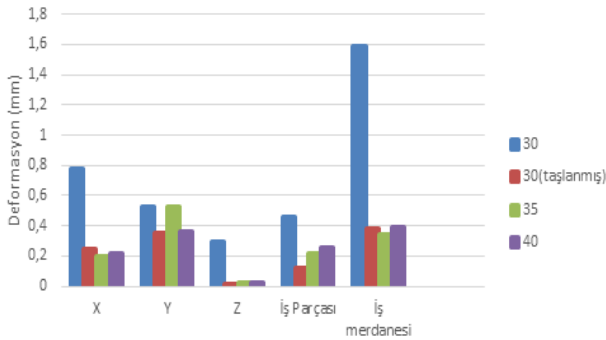
Tablo 1. Çekme testi yapılan malzemenin sonuçları

Hadde Öncesi Akma Dayanımı (MPa)	Hadde Sonrası Akma Dayanımı (MPa)	Hadde Öncesi Çekme Dayanımı (MPa)	Hadde Sonrası Çekme Dayanımı (MPa)	Hadde Öncesi (%)Uzama	Hadde Sonrası (%)Uzama
328,03	297,91	414,9	395,6	26,7	26,7

Yapılan analiz sonucunda iş parçası ve iş merdanesinde meydana gelen deformasyon verileri Tablo 2 de ve bu parametrelere ait grafik Şekil 7 de verilmiştir. İş merdanesi üzerindeki gerilmeler ise Tablo 3 de ve grafiksel gösterimi ise Şekil 8 de verilmiştir.

Tablo 2. Deformasyon Verileri.

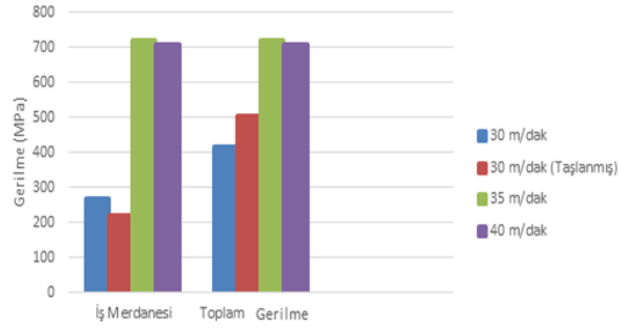
Deformasyon (mm)						
Dönme Hızı (m/dak)	X	Y	Z	İş Parçası	İş Merdanesi	
30	0,78	0,53	0,30	0,46	1,59	
30 (Bombeli Merdane)	0,25	0,35	0,014	0,12	0,38	
35	0,20	0,53	0,025	0,22	0,34	
40	0,22	0,36	0,027	0,26	0,39	



Şekil 7. Deformasyon Verileri

Tablo 3. Gerilme Verileri.

Gerilmeler (MPa)		
Dönme Hızı (m/dak)	İş Merdanesi	Toplam
30	268,77	417,08
30 (Bombeli Merdane)	221,71	503,79
35	722,37	722,37
40	709,01	709,01



Şekil 8. Gerilme Verileri

4. Sonuç

Yassı metal ürününün üretilmesi ve istenilen kalınlığa getirilmesi için gerçek koşullarda sıralı haddelme sistemleri kullanılarak, metal blokları düzenli bir şekilde bir hadde üzerinden diğer bir hadde üzerine çekilmektedir. Yani metal hadde merdaneleri tarafından gerilmelere maruz bırakılarak yapılmaktadır. Ayrıca metal bloğun merdanelere sevk edilmesi döner miller ile yapılmaktadır. Yapılan analiz değerlendirmelerinde hammaddeyi ileten döner milli masaların gerilmesi ve sevk etmesi analizlere etki etmeyeceğinden dolayı dikkate alınmamıştır. Analizler hadde merdanelerinin yatay konumlandırılması yapılarak, yatay ve düşey yükler etkisi altında farklı hat hızlarında yapılmıştır. Deformasyon ve gerilme değerleri incelendiğinde hat hızının 30 m/dak olduğu analizde iş parçasındaki en yüksek deformasyonun gerçekleştiği görülmektedir. Bu veriler ile tam ters orantılı olarak hat hızı 35m/dak ve 40 m/dak olacak şekilde artırıldığında deformasyonda bir düşüş görülürken, iş merdanesinde meydana gelen gerilmelerde artış buna paralel olarak da emniyet faktöründe düşüş görülmektedir. Veriler bombeli merdane ile yapılan çalışmada incelendiğinde hat hızının düşük olması merdane meydana gelen deformasyonlarda ters orantılı olarak bir düşüş eğilimindedir. Aynı zamanda iş merdanesinde meydana gelen gerilmenin merdaneye bombe verildiğinde en düşük değerde olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak hat hızında meydana gelen anlık değişimler iş parçasındaki deformasyon değerlerini ve merdaneler üzerindeki gerilmeleri direk etkilemektedir. Merdanelerde meydana gelen anlık gerilim farklarının sürekliliği merdane yüzeylerinde atmalar, yüzeysel çatlaklar gibi merdane kusurlarına neden olabilmektedir. Bu tip durumlar merdanenin yüzey taşlanması ya da değişimine kadar giden maliyetleri doğurmaktadır. Günümüzde kullanılan son teknoloji sistemlerde

bile hat üzerindeki malzeme işleme hızı ve buna benzer değişken parametrelerin kontrolleri operatörler tarafından ayarlanmaktadır. Bu çalışmada görüldüğü gibi parametre değişiklikleri tüm sistemdeki düzeni etkilemektedir. Bu durum ile ortaya çıkan muhtemel sistem kusurları insan faktörünün göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu proje Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından OKÜBAP-2017-PT3-034 proje numarası ile desteklenmiştir

Kaynakça

- [1] "American Steel" Erişim adresi: <https://americansteel.com/what-is-a-rolling-mill/> (Erişim Tarihi: 10.02.2018).
- [2] "American Steel" Erişim adresi: <https://americansteel.com/rolling-mill-history/> (Erişim Tarihi: 10.02.2018).
- [3] Çelik, B., Yassı mamul üreten entegre demir çelik tesislerinde minimill uygulamaları, Demir-Çelik sektöründe üretim teknolojileri ve uygulamaları, Zonguldak, 2001.
- [4] Topbaş, C., Yassı çelik haddelemede kullanılan sıcak şerit haddeleme hadde merdanelerinin aşınma parametrelerinin optimizasyonu ile servis ömürlerinin uzatılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2015.
- [5] Schindler, I., Rusz, S., Kubina, T., Rolling, Academic materials for the metallurgical engineering study programme at the faculty of metallurgy and materials engineering, Technical University of Ostrava, Ostrava, 2015.
- [6] Çevik, B., Demir çelik sektörü, Türkiye İş Bankası, 2017.
- [7] Johnson, K. L., & Bentall, R. H. The onset of yield in the cold rolling of thin strip. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1969; 17(4):253-264.
- [8] William L. Roberts, Cold Rolling of Steel, Marcel Deccer INC 1978
- [9] Fleck, N. A., & Johnson, K. L. Towards a new theory of cold rolling thin foil. *International journal of mechanical sciences* 1987; 29(7):507-524.
- [10] Onno, F., Gratacos, P. Modèles élastoplastiques de laminage à froid, application au skin-pass. *Revue de Métallurgie* 1994; 91(6):931-936.
- [11] Wiklund, O. Proceedings of 5 th International Conference "Steel Strip '96" ed. Boruta, Kisa, Kure, Pastmak, Zamarsky, Zela, (Spolecnost OCELOVE PASY, Opava, Czech Republic), 1996.
- [12] Wiklund O. Proceedings of 2 nd International conference on 'Modelling of metal rolling processes ', ed. Beynon J.H., Ingham P., Teichert H., Waterson, K. (The Institute of Materials, London), 1996.
- [13] Wiklund, O. 1999. Proceedings of international conference 'Modelling of metal Rolling processes 3" ed. Beynon J.H., Clark, M.T., Kem, P., Ingham P., Waterson, K. (The Institute of Materials, London), 1999.
- [14] Model of cold rolling of thin metal sheets between nonparallel rolls. Domanti, D.L.S. McElwain, R.H. Middleton
- [15] Sutcliffe, M. P. F., & Rayner, P. J. Experimental measurements of load and strip profile in thin strip rolling. *International journal of mechanical sciences* 1998; 40(9): 887-899.
- [16] Fuchshumer, S., Schlacher, K.; Kugi, A. Mathematical modelling of a temper rolling mill. 8th International Conference on Metal Forming, 2000.
- [17] Liu, Y., & Lee, W. H. Mathematical model for the thin strip cold rolling and temper rolling process with the influence function method. *ISIJ international* 2005; 45(8): 1173-1178.
- [18] Chandra, S., Dixit, U. S. A rigid-plastic finite element analysis of temper rolling process. *Journal of Materials Processing Technology* 2004; 152(1): 9-16.
- [19] Lenard, J., Primer on flat Rolling. 2nd ed. Elsevier; 2014.
- [20] Grassino, J., Vedani, M., Vimercati, G., Zanella, G. Effects of skin pass rolling parameters on mechanical properties of steels. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2012; 13(11): 2017-2026.

- [21] Escribano, R., Lostado, R., Martínez-de-Pisón, F. J., Pernía, A., & Vergara, E. Modelling a skin-pass rolling process by means of data mining techniques and finite element method. *Journal of iron and steel research, international* 2012; 19(5): 43-49.
- [22] Yoshida, F., Kaneda, Y., Yamamoto, S., A Plasticity model describing yield-point phenomena of steels and its application to FE simulation of temper rolling. Elsevier; 2008.
- [23] Larkiola, J., Nylander, J., Kähkönen, V., & Judin, M. Prediction of Rolling Force during Temper Rolling. In *Materials Science Forum* 2008; 575: 584-588.
- [24] Liu, Y., Lee, W. H. Mathematical model for the thin strip cold rolling and temper rolling process with the influence function method. *ISIJ international* 2005; 45(8): 1173-1178.
- [25] Weyand, G., Habitzki, K., Heisterkamp, P., New backup roll grade for skinn pass mills. 53 rd Rolling, Rio de Janeiro, 2016.