



# Farklı Mikroyapısal Değişkenlerin Yüksek Manganlı Fe-%33 Mn Çeliğinin Pekleşme Davranışına Etkilerinin Araştırılması

**Program Kodu: 1002**

**Proje No: 118M448**

Proje Yürütücüsü:  
**Dr. Öğr. Üyesi Burak BAL**

Araştırmacı(lar):

-

Danışman(lar):

-

Bursiyer(ler):

Ferdi Caner BAYRAM

AĞUSTOS 2019  
KAYSERİ



## ÖNSÖZ

Günümüzde ülkelerin ve toplumların gelişmesinde, dünya arenasında söz sahibi olmasındaki en önemli kriterler sahip oldukları teknolojik güç ve gerçekleştirdikleri bilimsel çalışmalardır. Günümüz dünyasındaki gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelere bakacak olursak, sahip olmuş oldukları toprak büyüklüğü ile değil de kullandıkları ve geliştirdikleri teknoloji ile ön plana çıkmaktadırlar. Bu nedenle yapılan bilimsel çalışmaların, araştırma ve geliştirmenin önemi yıllar geçtikçe daha da çok artmaktadır. Ülkelerin en önem verdiği konulardan birisi savunma sanayidir ve her yıl milyarlarca dolar bu alan için harcanmaktadır. Savunma sanayisinde malzemenin kalitesi her zaman ilk plandadır ve maliyet bu alanda kaliteye göre ikinci planda kalır. Bu nedenle savunma sanayisinde kaliteli mâl temin edebilmek için üst düzey araştırma ve geliştirme şart olmuştur.

Bu projede farklı mikroyapısal değişkenlerin kimyasal kompozisyonunda %33 oranında mangan içeren Fe-33Mn östenitik çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Her bir mikroyapısal değişkenin pekleşme davranışına etkisi ayrı ayrı ortaya konulmuştur ve farklı karbon konsantrasyonları da çalışmaya dâhil edilerek mikroyapısal değişkenlerin etkisi incelenmiştir ve çalışmanın içeriği zenginleştirilmiştir. Yüksek manganlı çeliğin tercih edilmesinin sebebi göstermiş olduğu yüksek deformasyon pekleşme davranışı, yüksek süneklik değerleri ve yüksek mukavemettir. Bu yönüyle otomotiv, uzay-havacılık ve savunma sanayi gibi kritik ve önem arz eden uygulamalarda hali hazırda kullanılmaktadır ve öyle görünmektedir ki kullanımı gelecek yıllarda hızla artacaktır.

TÜBİTAK tarafından 118M448 kodlu ve “Farklı Mikroyapısal Değişkenlerin Yüksek Manganlı Fe-%33 Mn Çeliğinin Pektleşme Davranışına Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu projede ortaya konulan çalışmanın ve elde edilen çıktılarının günümüzde devam eden çalışmalara yardımcı olacağına ve ayrıca gelecekte yapılacak olan çalışmalara da fayda sağlayacağına inanılmaktadır. Bu çalışmanın gerçekleşmesi için gerekli maddi desteği sağlayan TÜBİTAK’a ve araştırmada emeği geçen herkese teşekkürü borç biliriz.



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLO LİSTESİ .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÖZET .....	vi
ABSTRACT .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	9
4. BULGULAR.....	13
4.1. Yüksek Manganlı Fe-%33Mn Çeliğinin Farklı Karbon Konsantrasyonlarındaki Kristal Plastisite Modellemesi .....	13
4.2. PEKLEŞME SABİTLERİ .....	17
4.2.1. Malzeme Dokusu.....	17
4.2.2. Etkileşim Tensörü.....	21
4.2.3. Gerinim Artışı .....	24
4.2.4. Hız Gradyanı .....	27
5. TARTIŞMA VE GENEL SONUÇLAR.....	31
KAYNAKLAR.....	32

## TABLO LİSTESİ

Tablo 1. VPSC simülasyonlarında her bir karbon konsantrasyonu için kullanılan voce pekleşme parametreleri (<110> (110) KAYMA) .....	13
Tablo 2. VPSC simülasyonlarında her bir karbon konsantrasyonu için kullanılan voce pekleşme parametreleri (<110> (112) İKİZLENME) .....	13
Tablo 3. VPSC simülasyonları sırasında kullanılan 6 farklı hız gradyanı .....	28

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Hadfield çeliğinin farklı gerinim hızlarındaki pekleşme davranışları .....	3
Şekil 2. Aykırı yerleşim duvarlarının Hadfield çeliğinin pekleşme davranışına etkisi .....	4
Şekil 3. Dinamik germe yaşlandırmasının Hadfield çeliğinin pekleşme davranışına etkisi .....	5
Şekil 4. TWIP çeliğinin karmaşık mikroyapısı. a) Kristolografik analizler için detektör analizi, b) Geçirmeli elektron mikroskobu analizi, c) Tane sınır açılarının dağılımı, d) Yerinde taramalı elektron mikroskobu analizi .....	6
Şekil 5. a) İki tane arasındaki açı, b) kayma düzlemi normali ile mekanik ikizlenme düzlemi normali arasındaki açı .....	7
Şekil 6. Farklı deformasyon mekanizmalarının TWIP çeliğinin pekleşme davranışına etkileri .....	8
Şekil 7. Fe-33Mn çeliğinin farklı C konsantrasyonlarında oda sıcaklığında çekme yükü altında $10^{-4}$ 1/s gerinim hızında deformasyon davranışı .....	9
Şekil 8. Projenin Özet Akış Şeması .....	12
Şekil 9. Yüksek manganlı %1.2C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında VPSC Simülasyonları .....	14
Şekil 10. Yüksek manganlı %0.9C- Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında VPSC simülasyonları .....	14
Şekil 11. Yüksek manganlı %0.6C- Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında VPSC simülasyonları .....	15
Şekil 12. Yüksek manganlı %0.3C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında VPSC simülasyonları .....	15
Şekil 13. Yüksek manganlı %0C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında VPSC simülasyonları .....	16
Şekil 14. Yüksek manganlı %1.2C- Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları .....	17
Şekil 15. Yüksek manganlı %0.9C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları .....	18
Şekil 16. Yüksek manganlı %0.6C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları .....	18
Şekil 17. Yüksek manganlı %0.3C- Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları .....	19

Şekil 18. Yüksek manganlı %0C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları .....	19
Şekil 19. Yüksek manganlı %1.2C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları .....	21
Şekil 20. Yüksek manganlı %0.9C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları .....	21
Şekil 21. Yüksek manganlı %0.6C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları .....	22
Şekil 22. Yüksek manganlı %0.3C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları .....	22
Şekil 23. Yüksek manganlı %0C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları .....	23
Şekil 24. Yüksek manganlı %1.2C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları .....	24
Şekil 25. Yüksek manganlı %0.9C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları .....	25
Şekil 26. Yüksek manganlı %0.6C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları .....	25
Şekil 27. Yüksek manganlı %0.3C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları .....	26
Şekil 28. Yüksek manganlı %0C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları .....	26
Şekil 29. Yüksek manganlı %1.2C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları .....	28
Şekil 30. Yüksek manganlı %0.9C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları .....	29
Şekil 31. Yüksek manganlı %0.6C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları .....	29
Şekil 32. Yüksek manganlı %0.3C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları .....	30
Şekil 33. Yüksek manganlı %0C-Fe-%33Mn çeliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları .....	30



## ÖZET

İleri yüksek mukavemetli çelikler sahip olmuş oldukları yüksek mukavemet, yüksek süneklik ve yüksek pekleşme kabiliyeti gibi üstün özellikler sayesinde otomotiv, demiryolu, savunma sanayi uygulamalarında ve yapı endüstrisi gibi pek çok farklı alanda tercih edilmektedir. Bu projede yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler sınıfından olan yüksek manganlı çeliklerin pekleşme davranışına etki eden farklı mikroyapısal değişkenlerin etkisi kristal plastisite modellemesi yoluyla araştırılmıştır. Öncelikle östenitik Fe-33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızındaki malzeme davranışının, tane sayısı gibi faktörleri girdi olarak kullanarak kristal plastisite modellemesi yapılmıştır ve pekleşme sabitleri bulunmuştur. Daha sonra bulunan pekleşme sabitleri sabit tutularak, malzeme dokusu, hız gradyanı, gerinim artışı ve etkileşim tensörü cinsi gibi tek bir mikroyapısal girdi değiştirilerek bu girdilerin malzemenin toplam pekleşme davranışına etkisi açığa çıkarılmıştır. Spesifik olarak, proje önerisinin üzerine konularak farklı karbon konsantrasyonlarının pekleşme sabitlerine olan etkisi de hesaplanmıştır. Bahsi geçen çeliğin oda sıcaklığında ve düşük gerinim hızındaki malzeme davranışı proje yürütücüsünün daha önceki çalışmalarında çekme testi yardımı ile makro ölçekte gözlemlenmiştir. Fe-33Mn çeliğinin seçilme nedeni, yüksek manganlı östenitik çeliklerinin sahip olduğu çok yüksek pekleşme kapasitesi ile birlikte yüksek süneklik değerleri ve aşınma direnci sayesinde uzay-havacılık, otomotiv, savunma sanayi gibi öncül sektörlerde yer alması ve önümüzdeki yıllarda çok daha fazla miktarda yer alacağına inanılmasıdır. Bu konunun seçilme nedeni ise, bugüne kadar yapılan kristal plastisite çalışmalarında deneysel davranışı modelleyebilmek için genelde tek tip malzeme dokusu, hız gradyanı, gerinim artışı ve etkileşim tensörü kullanılmıştır. Bu doğru bir yaklaşım olmasına rağmen bu girdilerin toplam malzeme pekleşme davranışına etkisi bilinmemektedir. Bu kapsamda kristal plastisite modellemeleri Visco-Plastic Self-Consistent (VPSC) algoritması yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Fe-33Mn çeliğinin düşük gerinim hızındaki tek eksenli deformasyon davranışı voce tipi pekleşme teorisi ile modellenmiştir ve bulunan Voce parametreleri bütün simülasyonlarda aynı kalmıştır. Böylelikle değişik mikroyapısal değişkenlerin Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına etkileri aynı pekleşme teorisi ile açığa çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek mukavemetli çelikler, Mikroyapı, Kristal Plastisite, Pekleşme, Modelleme



## ABSTRACT

High strength steels are preferred in many different fields such as automotive and railway applications and construction industry thanks to their superior properties including high strength, high ductility and high deformation hardening. In this project, the effect of different microstructural variables on the hardening behavior of high manganese Fe-33Mn steels was investigated by crystal plasticity modeling. Firstly, the crystal plasticity modeling of the iron-balanced austenitic steel with 33 manganese (Fe-33Mn) in its chemical composition was carried out with experimental inputs such as grain size and corresponding voce hardening parameters were found. Afterwards, a single microstructural input such as material texture, velocity gradient, strain increase or interaction tensor type was changed and the effect of these inputs on the strain hardening behavior of the Fe-33Mn steel was identified. Specifically, different carbon concentrations were also included in the crystal plasticity modeling simulations in order to observe the effect of different chemical compositions on the hardening response. The aforementioned material which is high manganese Fe-33Mn austenitic steel was selected in this project owing to the superior material properties. The reason for choosing this topic is that even though crystal plasticity computations are carried out under certain conditions such as, specific initial texture, velocity gradient, strain increment and type of interaction tensör in which it is the right approach, the individual roles of these variables have not known yet. Within this scope, crystal plasticity computations were performed by the help of Visco-Plastic Self-Consistent (VPSC) algorithms. The uniaxial strain hardening response of Fe-33Mn steel at room temperature was modeled using voce-type hardening model and corresponding Voce hardening parameters was used rest of the simulations. Thus, the effects of different microstructural variables on the strain hardening response of Fe-33Mn steel was clarified using same hardening model.

Keywords: High strength steels, Microstructure, Crystal plasticity, Hardening, Modeling

## 1. GİRİŞ

İleri yüksek mukavemetli çelikler kategorisinde yer alan yüksek manganlı östenitik çelikler (%12-33 Mn) yüksek mukavemet, yüksek tokluk, yüksek aşınma direnci ve ağır darbe yüküne karşı direnç gibi üstün özellikleri bünyesinde sergilerler (Bouaziz, Allain, Scott, Cugy, & Barbier, 2011; Frommeyer, Brüh, & Neumann, 2003). Sahip oldukları bu mekanik davranışlardan dolayı otomotiv, savunma sanayi, uzay-havacılık gibi kritik sektörlerde aranılan ve istenilen malzeme olmuşlardır (Bal, Gumus, Gerstein, Canadinc, & Maier, 2015; Bayraktar, Khalid, & Levallant, 2004; Dastur & Leslie, 1981). Spesifik olarak, ileri yüksek mukavemetli çeliklerin farklı türleri olan çift fazlı çeliklerin gerinim değerleri %5 ile %10, çekme gerilimleri 600 MPa ile 1000 MPa arasında, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin gerinim değerleri %15 ile %30, çekme gerilimleri 200 MPa ile 600 MPa arasında, ekstra yumuşak çeliklerin gerinim değerleri %30 ile %50, çekme gerilimleri 200 MPa ile 350 MPa arasında değişiklik gösterirken, yüksek manganlı östenitik çeliklerin gerinim değerleri %30 ile %90 arasında ve çekme gerilimleri ise 800 MPa ile 1600 MPa arasında değişmektedir (Kim vd., 2018; Staalman, Steel, Calculation, & Staalman, 2015). Bu tip çeliklerin aynı anda hem yüksek pekleşme davranışı hem de yüksek süneklik değerleri göstermesinin temel sebebi mikroyapısında meydana gelen kayma, mekanik ikizlenme ve faz değişiklikleri gibi deformasyon mekanizmalarıdır (Gutierrez-Urrutia & Raabe, 2012; Idrissi, Renard, Ryelandt, Schryvers, & Jacques, 2010; Ueji, Tsuchida, Terada, Tsuji, & Tanaka, 2008). Bu mekanizmaların uygulanan kuvvet ile birlikte açığa çıkması ve birbirleri ile olan etkileşimi bu değerlerin oluşmasındaki temel sebeptir. Birincil plastik deformasyon mekanizmalarının yanı sıra malzemelerin mekanik davranışlarını daha üst seviyelere taşıyan; istif bozukluğu (Song, Cai, Liu, Feng, & Pei, 2017), dinamik germe yaşlandırması (Koyama, Sawaguchi, & Tsuzaki, 2018) ve alaşım elemanları (Park, 2013) gibi diğer mikroyapısal unsurlarda bulunmaktadır. Tüm bu mekanizmaların ve mikroyapısal özelliklerin malzemenin mekanik performansına katkı sağlayıp yüksek değerlere ulaştırmasının sebebi dislokasyon hareketini engellenemeye müsait olduğu içindir. İstif hata enerjisi genellikle sıcaklığa ve kimyasal kompozisyona bağlı olan ve bahsi geçen deformasyon mekanizmalarının aktive olmasını belirleyen en önemli faktörlerden bir tanesidir (Allain, Chateau, Bouaziz, Migot, & Guelton, 2004; Curtze & Kuokkala, 2010). İstif hata enerjisi kısaca tanımını yaparsak hatasız istif dizilişi ile (ABCABC) hatalı istif dizilişi (ABABAB) arasındaki enerjidir ve sıcaklık değeri artış gösterdikçe deformasyon için gerekli olan Gibbs free enerjisi de yükselir ve bu yüzden yüksek istif hata enerjisi değerleri ortaya çıkmaktadır. İstif hata enerjisi üzerinde farklı alaşım elemanları farklı etkiler göstermektedirler. Örneğin, yüksek

manganlı malzemelere silisyum (Si) ilave edildiğinde istif hata enerjisi düşerken, alüminyum (Al) ilavesi istif hata enerjisini arttırmaktadır. Yüksek manganlı östenitik çeliklerinde istif hata enerjisi değeri  $35 \text{ mJ/m}^2$  den düşük olduğunda deformasyon modu olarak genellikle mekanik ikizlenmeyi görmekteyiz. Bunun sebebi ise ani mikroyapısal değişimler için gereken enerji seviyelerini aşmak daha kolay olduğundandır.

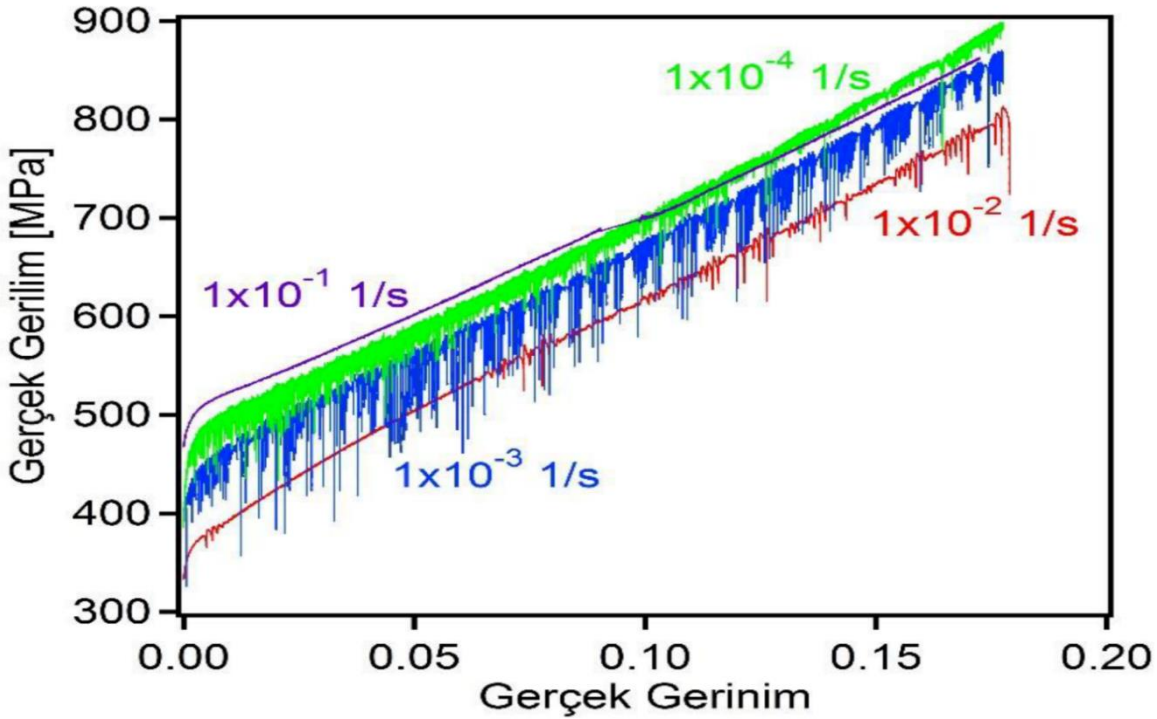
## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Sir Robert Hadfield 1888 yılında yüksek manganlı östenitik çelikler ile ilgili çalışmayla birlikte bu alana öncülük etmeye başlamıştır ve bu tarihten itibaren günümüze kadar bu çelikler ile ilgili literatüre birçok çalışma kazandırılmıştır (Karaman, Sehitoglu, Gall, & Chumlyakov, 1998; Suzuki vd., 2011). Hadfield çeliğindeki Karbon (C) ve Manganez (Mn) oranı 1:10 şeklindedir. Hadfield çeliğine  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde ısı işlem uygulanıp daha sonrasında uygulanan soğutma işlemlerinin ardından mikroyapısının tamamen östenitik olduğu gözlemlenmiştir (Klueh, Maziasz, & Lee, 1988). Denklem 1'de verilen teori C ve Mn oranının tamamen östenitik olan yapıyı stabilize edebilmesi için şart koşulmuştur.

$$\%ağ. \text{ Mn} + \%13ağ. \text{ C} > 17 \quad (1)$$

Yüksek manganlı östenitik çelikler oda sıcaklığında yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahiptir (Ueji vd., 2008) ve sıcaklık artışı ile birlikte kristal yapısında değişimler gözlemlenmektedir. Hem kayma hem de ikizlenme deformasyon mekanizmaları bu çeliklerde malzemenin deformasyonu sırasında birlikte görülebilmektedir ve ayrıca bu iki mekanizmanın birbirleri ile olan etkileşimleri de malzemenin pekleşme davranışına ayrıca katkı sağlamaktadır (Gumus vd., 2015). Öte yandan yüksek manganlı östenitik çeliğinin içermiş olduğu karbon oranı da malzemenin pekleşme davranışına etki etmektedir çünkü deformasyon sırasında karbon atomları dislokasyonların hareketlerini kısıtlarlar. Hadfield çeliğinin pekleşme davranışına etki eden bir diğer faktör ise deformasyon sırasında karbon (C) atomlarının dislokasyonların hareket kabiliyetini kısıtlaması ve dislokasyon çekirdeklerindeki C-Mangan (Mn) çiftlerinde C üyelerinin tekrarlanan yerleşmeleri sonucunda oluşan dinamik germe yaşlandırmasıdır. Bu durum sonucunda Hadfield çeliğinde ters gerinim hızı duyarlılığı oluşmaktadır. Normalde gerinim hızı arttıkça, dislokasyon aktive hızı daha yüksek seviyelere çıkarak aynı gerinim değerlerinde daha yüksek gerilim değerleri gözlenir. Düşük gerinim hızlarında karbon atomları ile dislokasyonların

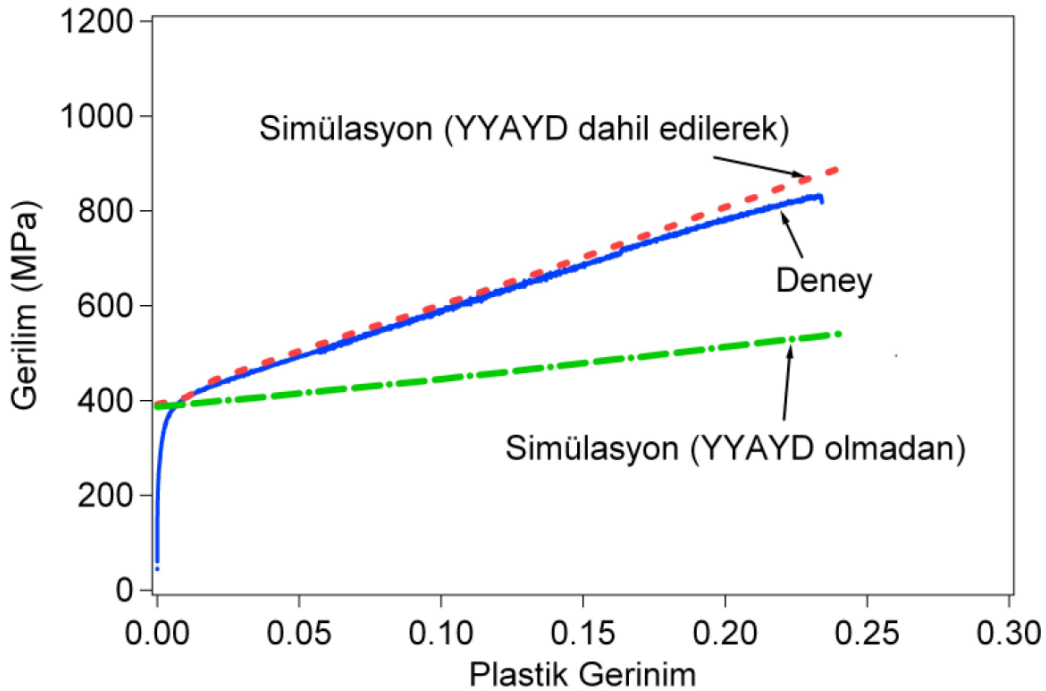
etkileşimleri için daha çok zaman olduğu için dinamik germe yaşlandırması pekleşme davranışını çok fazla domine etmektedir. Fakat yüksek gerinim hızlarında dinamik germe yaşlandırmasının genel malzeme davranışına katkısı aşırı dislokasyon sonucu oluşan pekleşmenin genel malzeme davranışına katkısından daha azdır. Düşük gerinim hızlarında ters gerinim hızı duyarlılığı ortaya çıkmasının sebebi budur ve gerinim hızı arttıkça malzemenin pekleşme davranışı da normale dönmektedir. Kısaca özetlemek gerekirse düşük gerinim hızında ters gerinim hızı duyarlılığı görülürken, gerinim hızı arttıkça bu durum normale dönmektedir ve Şekil 1'de bu durum açıkça görülmektedir.  $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızından  $10^{-2}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızına doğru gidildikçe ters gerinim hızı duyarlılığı açıkça görülürken,  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızında bu durum ortadan kaybolmuştur ve akma gerilimi 500 MPa seviyelerine çıkmıştır. Bu çalışmanın amacı yukarıda bahsi geçen mikroyapısal değişkenlerin yüksek manganlı östenitik çelikler sınıfında bulunun Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisini açığa çıkarmaktır. Bu amaçla yola çıkarak kristal plastisite modellemesi sayesinde gerekli simülasyonlar yapıлып ortaya konulmuştur ve ne tür etkilerinin olduğu belirtirmiştir.



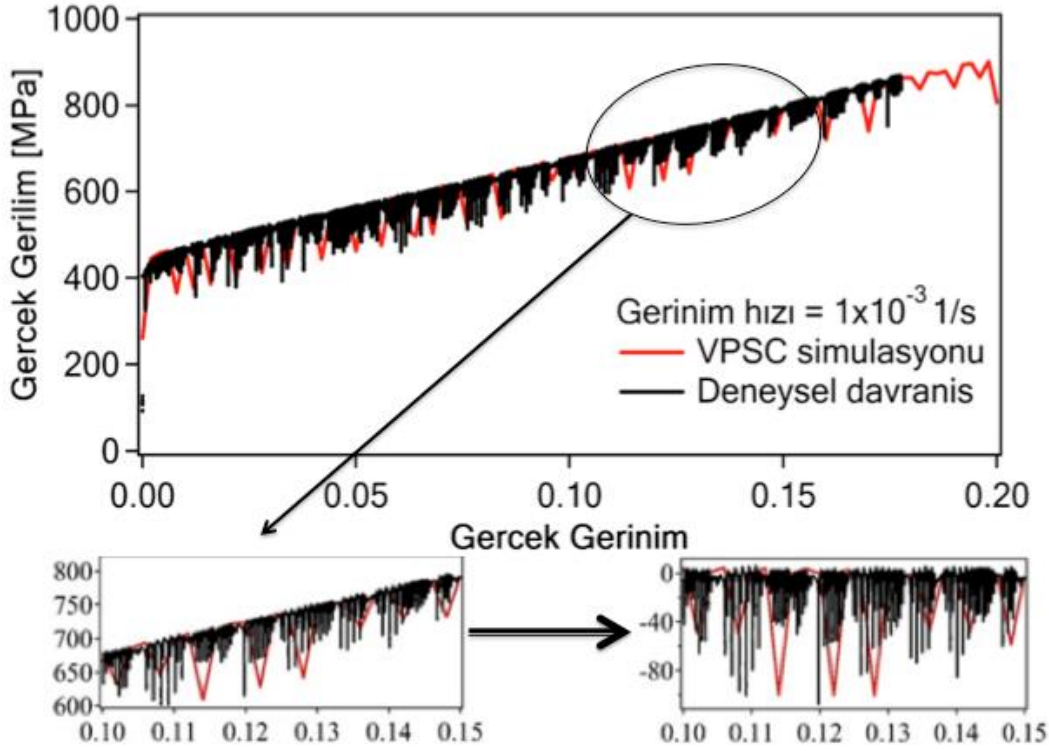
Şekil 1. Hadfield çeliğinin farklı gerinim hızlarındaki pekleşme davranışları (Bal, Gumus, & Canadinc, 2017)

Farklı deformasyon mekanizmalarının genel malzeme davranışındaki etkisini anlamak için bu zamana kadar literatüre farklı deneysel çalışmalar kazandırılmıştır. Dijital görüntü korelasyonu

analizi, tarayıcı lazer extensometresi tekniği, akustik ışımaya tekniği gibi birbirinden farklı teknikler bu çalışmalar sırasında kullanılmıştır. Fakat bu çalışmalar sırasında yaşanan ışımaya kaynağından kaynaklanan problemler, yüzey hazırlanmasına çok bağımlı olan dijital görüntü korelasyon sonuçları, lazer extensometresi ile tek yönelimli sonuç alamama gibi problemler yüzünden tam olarak istenilen başarıya ulaşılamamıştır. Bu sebepten ötürü Hadfield çeliğinin modelleme çalışmaları atomik ölçekten mezo ölçeğe kadar karmaşık mikroyapısını gözlemlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme çalışmaları sırasında Şekil 2 de görüleceği üzere yüksek yoğunluklu aykırı yerleşim duvarlarının Hadfield çeliğinin pekleşme davranışına etkileri (Canadinc, Sehitoglu, & Maier, 2007), tane sınırı oryantasyon bozukluğu açısından etkileri proje yürütücüsü Burak BAL'ın doktora danışmanı olan Doç. Dr. Demircan Canadinc tarafından ortaya konulmuştur. Ayrıca Şekil 3'de dinamik germe yaşlandırmasının Hadfield çeliğinin pekleşme davranışına etkisinin modelleme çalışma sonuçları gösterilmiştir.



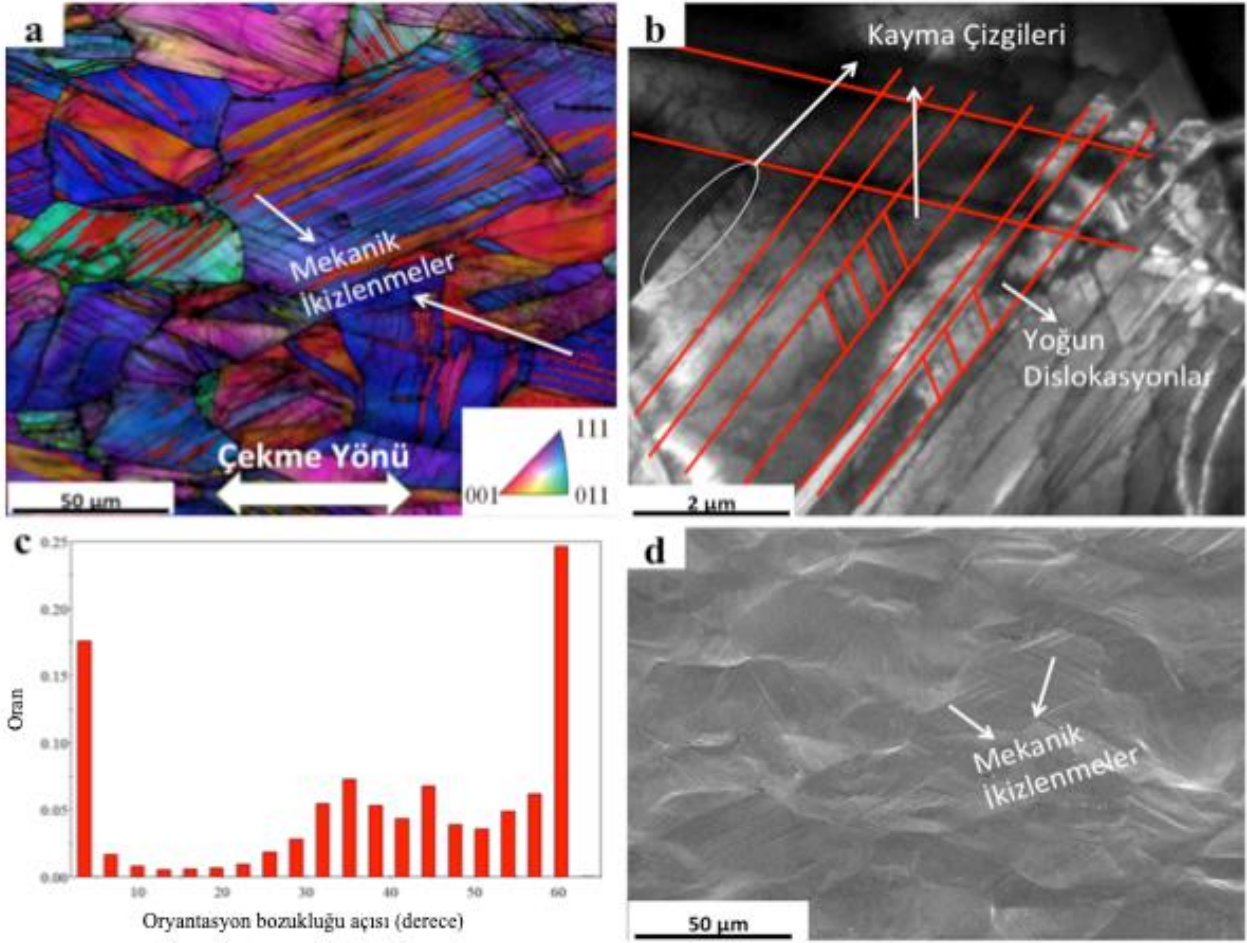
Şekil 2. Aykırı yerleşim duvarlarının Hadfield çeliğinin pekleşme davranışına etkisi (Canadinc vd., 2007)



Şekil 3. Dinamik germe yaşlandırmanın Hadfield çeliğinin pekleşme davranışına etkisi (Bal vd., 2017)

Literatüre bakıldığında İkizlenmeyle Plastikliği Arttırılmış Çelik (TWIP) hakkında ortaya konan bilimsel çalışma sayısı son yıllarda oldukça artmıştır. Bir başka deyişle bilim insanlarının Hadfield çeliklerine olan ilgisi son yıllarda TWIP çeliklerine kaymıştır. Bunun nedeni TWIP çeliğinin göstermiş olduğu 1500 MPa'lara kadar ulaşabilen yüksek mukavemet ve %90 oranına kadar ulaşabilen gerinim değerleridir. Bunların yanı sıra TWIP çeliklerinin yoğunluk seviyeleri  $7.3 \text{ g/cm}^3$  iken enerji soğurum kapasitesi  $0.5 \text{ J/mm}^3$ 'dür (Haase vd., 2016; Pierce, Bentley, Jiménez, & Wittig, 2012). Yüksek manganlı çeliklerin mekanik davranışları bu zamana kadar literatürde çekme (Barbier, Gey, Allain, Bozzolo, & Humbert, 2009; Bouaziz & Guelton, 2001), basma (De Cooman, Estrin, & Kim, 2018; Grässel, Krüger, Frommeyer, & Meyer, 2000), darbe (Brüx, Frommeyer, Grässel, Meyer, & Weise, 2002; Li vd., 2010) ve split-hopkinson (Hokka, Kuokkala, Curtze, Vuoristo, & Apostol, 2006) gibi yüklemeler altında çalışılmıştır ve bu çalışmalarda farklı deformasyon mekanizmalarının deformasyon sırasındaki aktiviteleri gözlemlenmiştir. Bunların yanında TWIP çeliklerinin çevrimsel yük altında da çok iyi mekanik özellikler sergiledikleri gözlemlenmiştir (Niendorf, Lotze, Canadinc, Frehn, & Maier, 2009; Saleh vd., 2013). TWIP çelikleri yüksek mukavemetli çelikler sınıfına girdiği için yoğun bir şekilde hidrojen

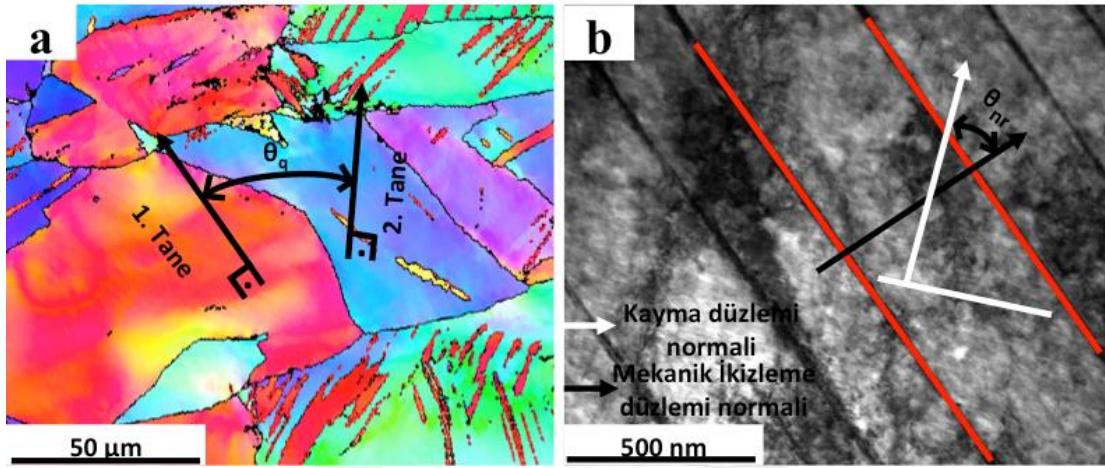
gevrekleşmesine de maruz kalmaktadır (Koyama, Akiyama, & Tsuzaki, 2012; Zan, Ding, Guo, Tang, & Bleck, 2015). Düşük gerinim hızlarında hidrojen gevrekleşmesinin TWIP çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisi proje yürütücüsünün önceki çalışmasında kanıtlanmıştır (Bal, Koyama, Gerstein, Maier, & Tsuzaki, 2016). TWIP çeliğinin karmaşık mikroyapısı Şekil 4'te açık bir şekilde görülmektedir. Proje yürütücüsünün gerçekleştirmiş olduğu bu çalışmadaki TWIP çeliği kimyasal kompozisyonunda %ağ. 22 Mn ve %ağ. 0.6 C içermektedir.



Şekil 4. TWIP çeliğinin karmaşık mikroyapısı. a) Kristalografik analizler için detektör analizi, b) Geçirmeli elektron mikroskobu analizi, c) Tane sınır açılarının dağılımı, d) Yerinde taramalı elektron mikroskobu analizi (Bal vd., 2018)

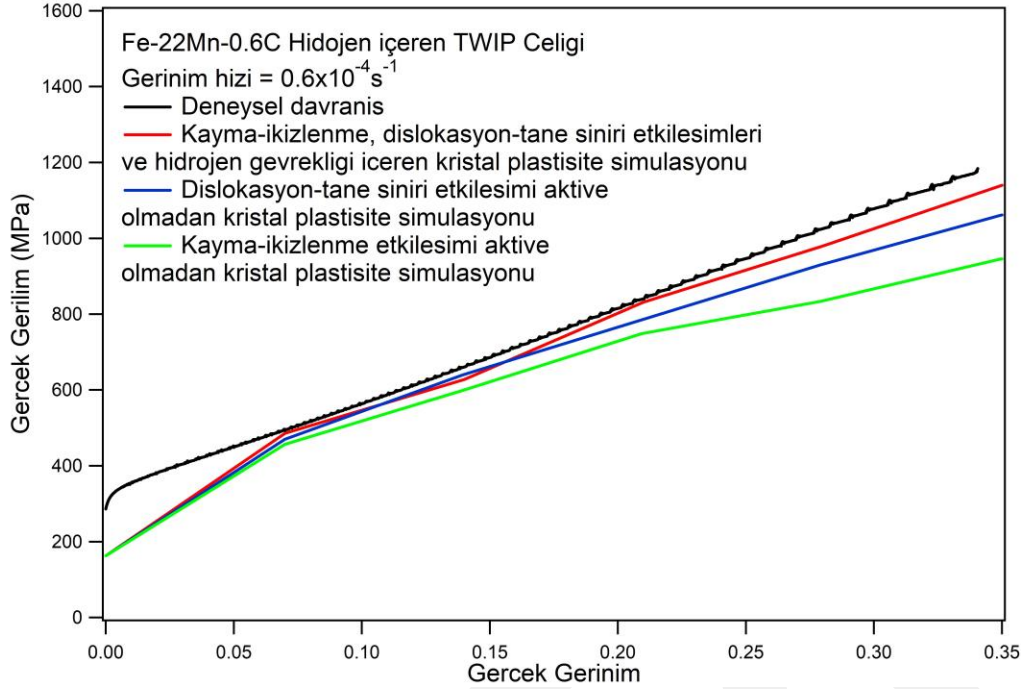
$$\dot{\epsilon} = \sum_n \left[ \left\{ \theta_0 \left( \frac{\tau_s - \tau}{\tau_s - \tau_0} \right) \right\} + \frac{K \alpha^2 \mu^2 b}{4t(\tau - \tau_0)} \frac{f}{1-f} \sum_r \cos \theta_{nr} + \frac{K \alpha^2 \mu^2 b}{2d(\tau - \tau_0)} \sum_q (1 + \sin \theta_q) \right] |\dot{\gamma}^n| \quad (2)$$

TWIP çeliğindeki karmaşık mikroyapıyı çözebilmek için proje yürütücüsünün önceki yayınlarının bir tanesinde Denklem 2 ile belirtilen teori önerilmiştir. Bu denklemde mikro ölçekteki kesme geriliminin her bir tane için ve farklı kayma düzlemlerinde nasıl geliştiğini göstermektedir. Etki eden birinci etki klasik Voce türü pekleşme etkisi, 2.etki tane sınır açısı etkisi, 3.etki ise kayma-mekanik ikizlenme etkisidir. Denklemde  $\mu$  kesme modulüsünü,  $b$  burger vektörü,  $t$  mekanik ikiz kalınlığını,  $f$  mekanik ikiz oranını,  $d$  ortalama tane boyutunu göstermektedir.  $\theta_q$  ise iki tane arasındaki açığı,  $\theta_{nr}$  ise kayma düzlemi normali ile mekanik ikizlenme düzlemi normali arasındaki açığı simgelenmektedir ve Şekil 5'de gösterilmiştir.



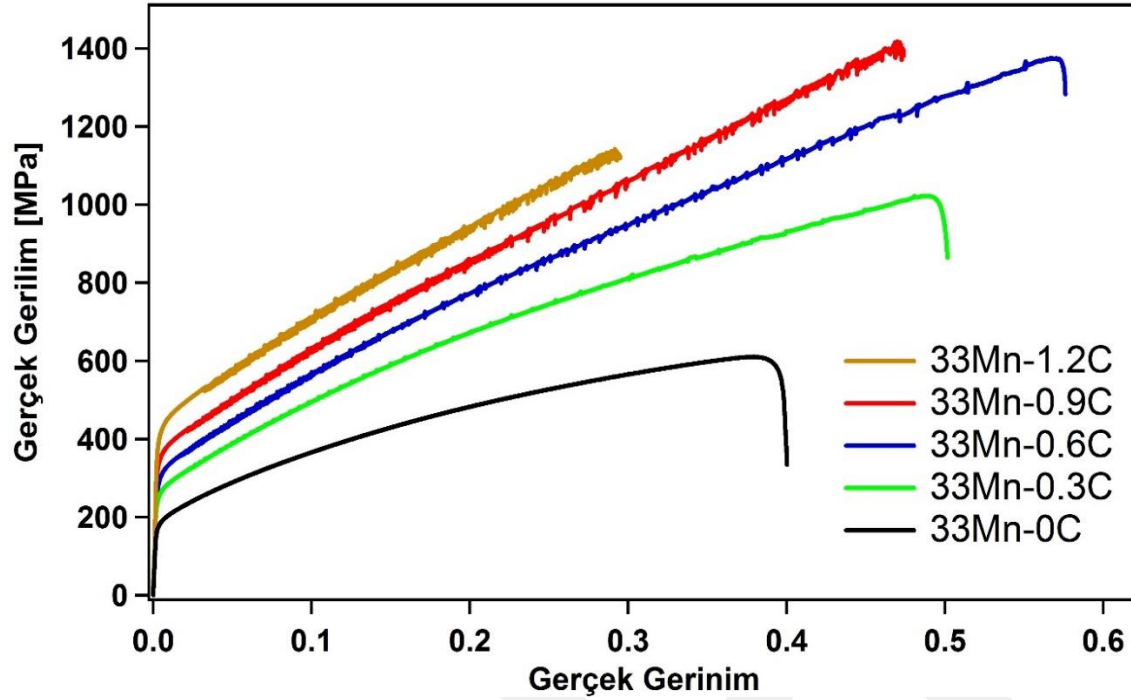
Şekil 5. a) İki tane arasındaki açı, b) kayma düzlemi normali ile mekanik ikizlenme düzlemi normali arasındaki açı (Bal vd., 2018)

Şekil 6'da 2 numaralı teori yardımıyla TWIP çeliğinin karmaşık mikroyapısına etki eden farklı deformasyon davranışlarının rolü gösterilmiştir. Pekleşme davranışının modelleme yolu ile belirlenmesi son derece önemlidir çünkü Şekil 6'da da görüleceği gibi kayma-mekanik ikizlenme etkileşiminin TWIP çeliğinin mekanik davranışındaki etkileri ileri gerinim değerlerinde 200 MPa'ı geçmektedir ve diğer mikro-deformasyon mekanizmalarının etkileri de hiç gözle görünür seviyededir.



Şekil 6. Farklı deformasyon mekanizmalarının ikizlenmeyle plastikliği artırılmış çeliğin pekleşme davranışına etkileri (Bal vd., 2018)

Literatürde henüz özel bir adı olmayan ve kimyasal yapısında %ağ. 33 Mn bulunan Fe-%33Mn malzemesi üzerine proje yürütücüsünün ve ekibinin çalışmaları devam etmektedir. Proje yürütücüsü Burak BAL bu proje başlamadan önce bu çeliğin kimyasal yapısına değişik oranlarda C elementi katılarak mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel çalışmalarla gözlemlemiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda Fe-33Mn malzemesinin kimyasal kompozisyonuna %ağ. 0C, 0.3C, 0.6C, 0.9C ve 1.2C katılıp farklı gerinim hızlarında çekme yükleri uygulayarak deformasyon davranışı incelenmiştir. Ayrıca kesinliği sağlamak amacıyla çekme testleri 1 kere değil 3 kere tekrar edilmiştir. Şekil 7 farklı karbon içeriklerindeki Fe-33Mn çeliğinin malzeme davranışını göstermektedir. Şekil 7'den görüldüğü üzere malzemenin mekanik davranışında karbon atomundan kaynaklı dinamik germe yaşlandırması oluşmuştur ve kararsızlık malzemedeki karbon oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Son olarak bu projede son derece özgün ve yeni bir konu olan mikroyapısal değişkenlerin malzemelerin pekleşme davranışına etkilerinin araştırılması yapılmıştır. Spesifik olarak, malzeme dokusu, hız gradyanı, gerinim artışı ve etkileşim tensörü cinsi gibi farklı mikroyapısal değişkenlerin Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına etkileri bu proje kapsamında araştırılmıştır ve bulunan sonuçlar bundan sonra gerçekleştirilecek olan bütün kristal plastisite modellemeleri için bir ışık olacaktır.



Şekil 7. Fe-33Mn çeliğinin farklı C konsantrasyonlarında oda sıcaklığında çekme yükü altında  $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızında deformasyon davranışı.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

Farklı mikroyapısal değişkenlerin Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisini anlayabilmek için planlama dâhilinde bazı yöntemler kullanılmıştır. İlk olarak, mikroyapısal değişkenlerin pekleşme davranışına olan etkisini anlayabilmek için pekleşme sabitleri kristal plastisite modellemesi sayesinde bulunmuştur ve bulunan değerler Tablo 1 ve Tablo 2'de açık bir şekilde verilmiştir. Kristal plastisite modellemeleri proje çalışmasının çalışmalarını yürütebilecek kadar hâkim olduğu Visco-Plastic Self-Consistent (VPSC) algoritması tarafından yapılmıştır. Daha önceden proje yürütücüsü Burak BAL'ın kendi çalışmasında oda sıcaklığında ve düşük gerinim hızlarında gözlemlemiş olduğu makro ölçekteki malzeme davranışı, bu çalışmalarda farklı mikro yapısal değişkenler kullanılarak mikroyapıda modellenmiştir. Bu farklı mikroyapı girdileri malzeme dokusu, sınır şartları, tane şekli, tane yapısı, kristal yapı, hız gradyanı, gerinim artış değeri, etkileşim tensörü gibi değerlerdir. Kristal plastisite simülasyonları sırasında yüzey merkezli kübik yapılar için 12 adet kayma ve 12 adet ikizlenme sistemleri aktive edilmiştir ve bütün gerinimlerde aktive olan kayma sistemleri gözlemlenmiştir. Kristal plastisite modellemeleri sayesinde 3. denklemden voce türü pekleşme sabitleri belirlenmiştir.

$$\tau^s = \tau_0 + (\tau_1 + \theta_1 \gamma)(1 - \exp(-\frac{\theta_0 \gamma}{\tau_1})) \quad (3)$$

$\tau_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\theta_0$  ve  $\theta_1$  voce türü pekleşme sabitleridir ve  $\tau_0$  mikro seviyedeki dislokasyon hareketliliğinin başladığı gerilimi göstermektedir ve akma geriliminin taylor faktör = 3.08'e ola oranı ile bulunmuştur. Geriye kalan diğer üç farklı voce pekleşme parametreleri de kristal plastisite modellemesi aracılığı ile bulunmuştur. Bu işlemler tamamlanıp gerekli dört farklı voce parametresi bulunduktan sonra malzeme dokusunun Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Tüm bulunan voce pekleşme sabitleri ve malzeme dokusu hariç diğer mikroyapısal girdiler sabit tutularak malzeme dokusunun yüksek manganlı östenitik çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisi ortaya konulmuştur. Malzeme dokusu değiştirilmesi, malzemenin tekrardan imal edilerek dokusunun belirlenmesi olarak anlaşılmalıdır. VPSC modellemesindeki malzeme doku girdisi sadece tanelerin yönelim açıları olan eular açılarıdır. Bu sebeple, yapılması gereken eular açıları değişik farklı malzeme dokusunu kristal plastisite girdisi olarak kullanmak yeterli olmuştur. Proje yürütücüsünün elinde proje başlamadan önce daha önceki çalışmalardan elde ettiği farklı malzeme dokuları mevcuttu. Modellemeler sırasında 5 farklı malzeme dokusu kullanılmıştır ve bu malzeme dokuları değerleri 3.01, 3.03, 3.06, 3.09 ve 3.12 olarak belirlenmiştir ve her bir karbon konsantrasyonunda sadece malzeme dokusu değiştirilerek etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar raporun sonuç bölümünde açıkça belirtilmiştir. Bu aşamada Taylor faktör değişmesine rağmen  $\tau_0$  değerinin değişmediği varsayılmıştır. Projenin ana amaçlarından bir tanesi malzeme dokusu girdisinin malzemenin pekleşme davranışına etkisini açığa çıkarmak olduğu için yapılan varsayım son derece yerinde bir varsayımdır. Farklı malzeme dokuları (farklı eular açıları) farklı Taylor faktörler açığa çıkarır ve genellikle kristal plastisite modellemelerinde kullanılan seçkisiz malzeme dokusu (random texture)'a karşılık gelen Taylor faktör 3.06'dır. Kritik kayma gerilmesi ise makroskopik akma geriliminin bu değere bölünmesi ile bulunmuştur.

Öte yandan, yine voce pekleşme sabitleri ve diğer mikroyapısal girdiler sabit tutularak hız gradyanının Fe-33Mn malzemesinin pekleşme davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Hız gradyanı makro ölçekte her bir eksene karşı gelen deformasyon miktarı ya da mikro ölçekte aktive olan aktif kayma sistemlerindeki bütün kayma hızlarının toplamı olarak tanımlanabilir. Hız gradyanını kısaca tanımlamak gerekirse mikro ölçekte aktif kayma sistemlerindeki bütün kayma hızlarının toplamıdır ve genel gösterimi 4. denklemde gösterilmiştir.

$$L_{ij} = \begin{matrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} \end{matrix} \quad (4) \quad L_{11} + (L_{22} + L_{33}) = 0 \quad (5)$$

4. denklemdeki simetrik elemanların toplamı 0 olacak şekilde ayarlanmıştır çünkü yapmış olduğumuz kristal modelleme proje yürütücüsünün yapmış olduğu tek eksenli makroskopik malzeme modeline aittir. Bu kapsamda düşünüldüğünde 5. denklem ortaya çıkmıştır.  $L_{11}$  için sabit olarak 1 değeri belirlenmiştir ve  $L_{22}$  değeri -0.05'ten başlanarak ve -0.025 azaltılarak seçilmiştir. -0.50 değeri de ayrıca simülasyonlar sırasında denenmiştir. 6 farklı hız gradyanı VPSC simülasyonlarında denemiştir ve hız gradyanlarının her bir değeri Tablo 3'te detaylı bir şekilde verilmiştir. Bir diğer mikroyapısal değişkenlerden birisi olan gerinim artışının da Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına etkisi incelenmiştir. Bu aşamada da daha önceki simülasyonlarda bulunan voce pekleşme parametreleri sabit tutularak gerinim artışının malzemenin genel pekleşme davranışına etkisi gözlemlenmiştir. Gerinim artışı, adım sayısı ve son gerinim değeri arasındaki ilişki 6. denklemde verilmiştir.

$$\varepsilon_f = N * \varepsilon_{inc} \quad (6)$$

Bu formülde  $\varepsilon_f$  son gerinim değerini, N adım sayısını ve son olarak  $\varepsilon_{inc}$  'te gerinim artış değerini vermektedir. Örneğin son gerinim değeri 0.3 olan bir numunenin VPSC simülasyonlarında 100 adımda yapılması gerekmekte ise gerinim artış değeri 0.003 olmalıdır ve unutulmamalıdır ki adım sayısı arttıkça modellemenin süresi de doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Kristal plastisite modellemesi 5 farklı gerinim artışı değeri ile gerçekleştirilmiştir ve malzemenin pekleşme davranışına etkisi bulgular ve sonuç kısmında gösterilmiştir. Proje kapsamında belirlenen son mikroyapısal girdi olan etkileşim tensörü girdisi içinde diğer mikroyapısal değişkenlerde olduğu gibi aynı yol izlenmiştir. Öncelikle voce pekleşme parametreleri düzgün bir şekilde bulunduktan sonra bu parametreler ve diğer mikroyapısal girdiler sabit tutulup etkileşim tensörünün malzemenin pekleşme davranışına olan etkisi ortaya konulmuştur. Kristal plastisite hesaplamalar sırasında kristallerdeki toplam gerinim hızını bütün aktif kayma sistemlerinde oluşan etkilerin toplamı 7. denklemdeki gibi vermektedir.

$$\dot{\varepsilon}_i = M_{ij}^c \sigma_j \quad (7)$$

Bu denklemden  $M_{ij}^c$  etkileşim tensörü cinsini ve  $\sigma$  gerilimi simgelemektedir. Bu denkleme göre etkileşim tensörünün malzemenin genel pekleşme davranışına etkisinin önemli olduğu aşikârdır. Farklı etkileşim tensörü türleri ile kristal plastisite modellemesi gerçekleştirilmiştir ve bu etkileşim tensörleri; Secant etkileşimi, tanjant etkileşimi,  $n^{eff}=10$  etkileşimi, Taylor modeli ve göreceli yönelimli uygunlu kriteri (Relative directional Compliance Criterion) olarak seçilmiştir. VPSC simülasyonlarında her bir tensör girdi olarak kullanılıp elde edilen çıktılar bulgular ve sonuç kısmında ortaya konulmuştur. Bu etkileşimlerin denklemleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

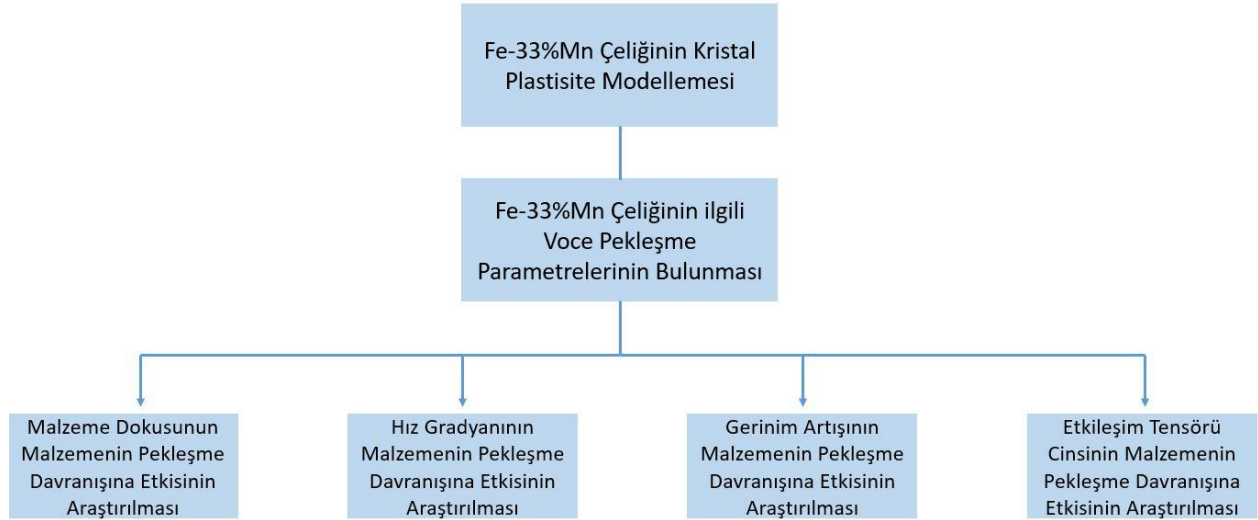
$$M_{ijkl}^{(sec)} = \dot{\gamma}_l \sum_1^s \left[ \frac{m_i^s m_j^s}{\tau_0^s} \left( \frac{m_k^s \sigma_k}{\tau_0^s} \right)^{n-1} \right] \quad (8)$$

$$M^{(tan)} = n M^{(sec)} \quad (9)$$

$$M^c = n^{eff} (I - S)^{-1} : S : M^{sec} \quad (10)$$

8. denklemin sekant etkileşimine, 9. denklemin tanjant etkileşimine ve son olarak 10. denklemin  $n^{eff}=10$  etkileşimine aittir. Bu denklemlerde  $s$  aktif kayma sistemini  $m_i^s$  Schmid tensörünü ve  $\gamma$  kesme gerilimini,  $S$  visko-plastik Eshelby tensörünü simgelemektedir. 10. denkleminde  $n^{eff} = 0$  olduğu zaman Taylor modeli  $n^{eff} = 1 < n^c < n$  durumunda ise göreceli yönelimli uygunluk kriteri aktif olmaktadır.

Projeyi özetleyen akış şeması Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Projenin Özet Akış Şeması

## 4. BULGULAR

### 4.1. Yüksek Manganlı Fe-%33Mn Çeliğinin Farklı Karbon Konsantrasyonlarındaki Kristal Plastisite Modellemesi

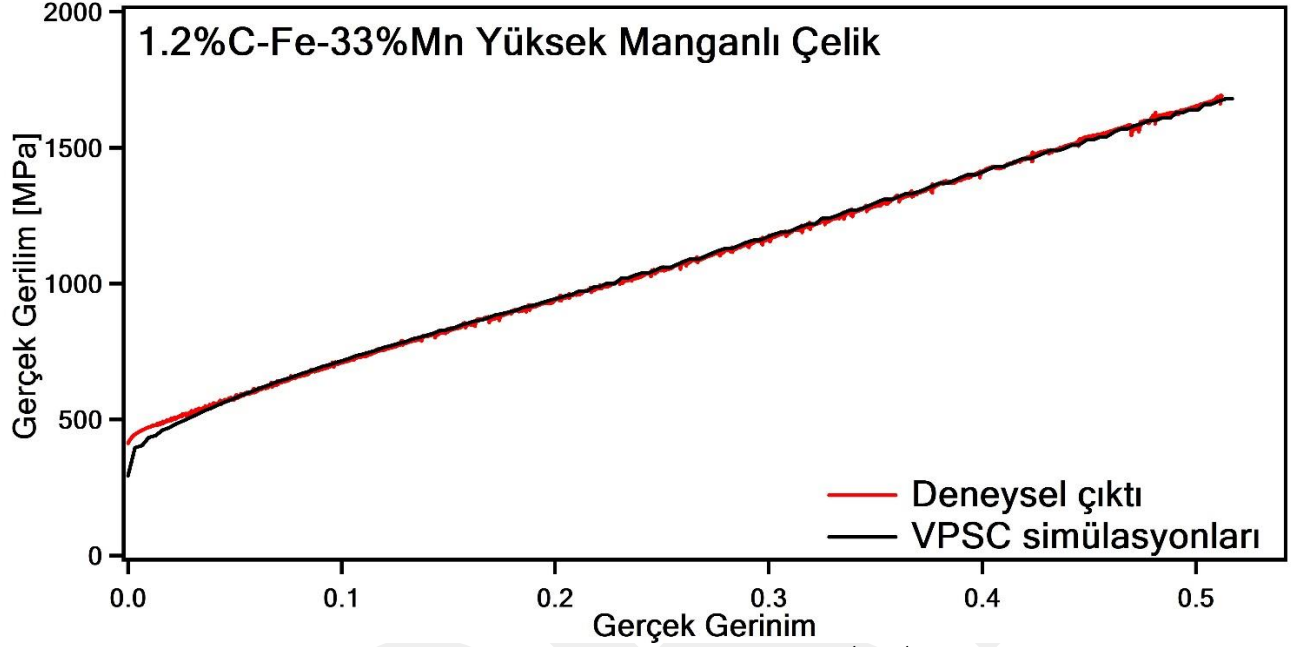
Farklı mikroyapısal değişkenlerin kimyasal kompozisyonun % 33 oranında mangan içeren demir dengeli Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisini araştırmadan önce her bir karbon konsantrasyonu için ilgili voce pekleşme parametreleri bulundu. Bu ilgili parametrelerin bulunması son derece önem arz etmektedir çünkü bulunan bu parametreler daha sonrasında sabit tutularak diğer mikroyapısal değişkenlerin etkisi açığa çıkarılmıştır. Kristal plastisite hesaplamalarında ilgili voce pekleşme parametrelerini bulabilmek için 12 adet kayma ve 12 adet ikizlenme sistemleri aktive edildi ve parametreler VPSC simülasyonları sayesinde başarılı bir şekilde bulundu. Bulunan bu voce pekleşme parametreleri Tablo 1 ve Tablo 2’de açık bir şekilde verilmiştir. Ayrıca deneysel çıktı sonuçları ve simülasyon sonuçlarının modellemesi şekil 9-10-11-12-13’te de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. VPSC simülasyonlarında her bir karbon konsantrasyonu için kullanılan voce pekleşme parametreleri (<110> (110) KAYMA)

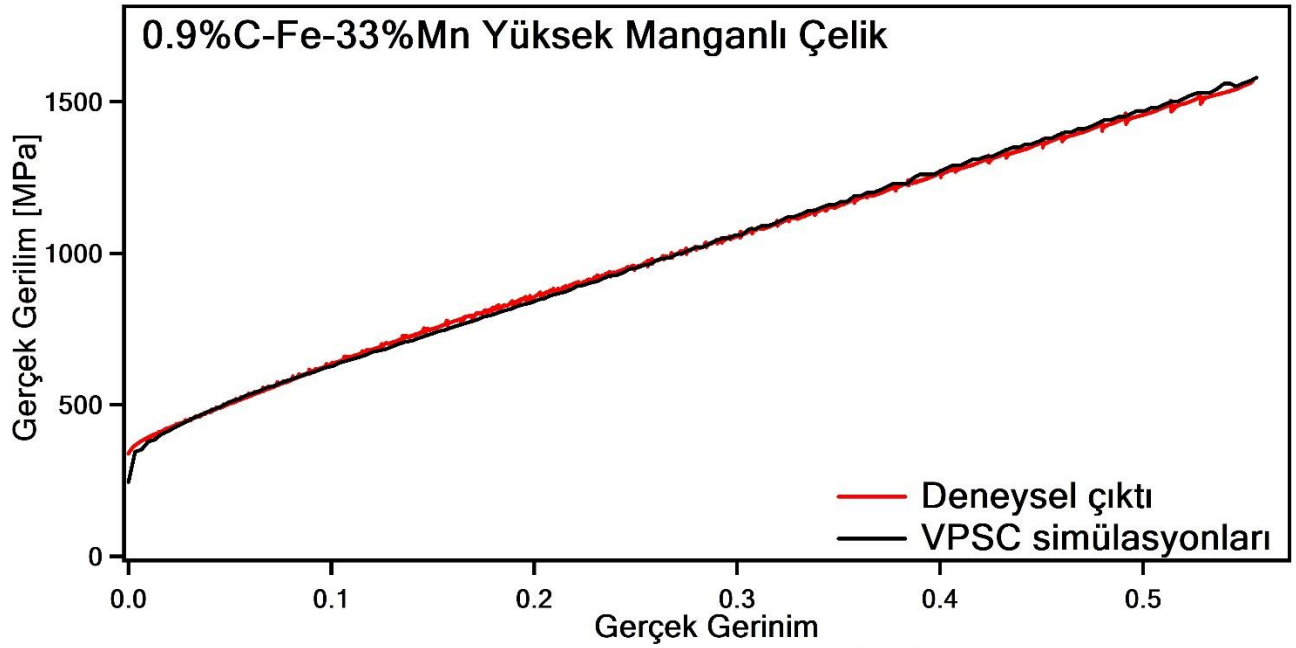
Karbon Konsantrasyonu(%ağ.)	$\tau_0$ (MPa)	$\tau_1$ (MPa)	$\theta_0$ (MPa)	$\theta_1$ (MPa)
1.2C	133.67	930	2250	6.14
0.9C	111.66	917	2390	5.66
0.6C	98	887	2390	4.98
0.3C	76.60	800	2240	4.60
0C	59.97	795	2840	4.60

Tablo 2. VPSC simülasyonlarında her bir karbon konsantrasyonu için kullanılan voce pekleşme parametreleri (<110> (112) İKİZLENME)

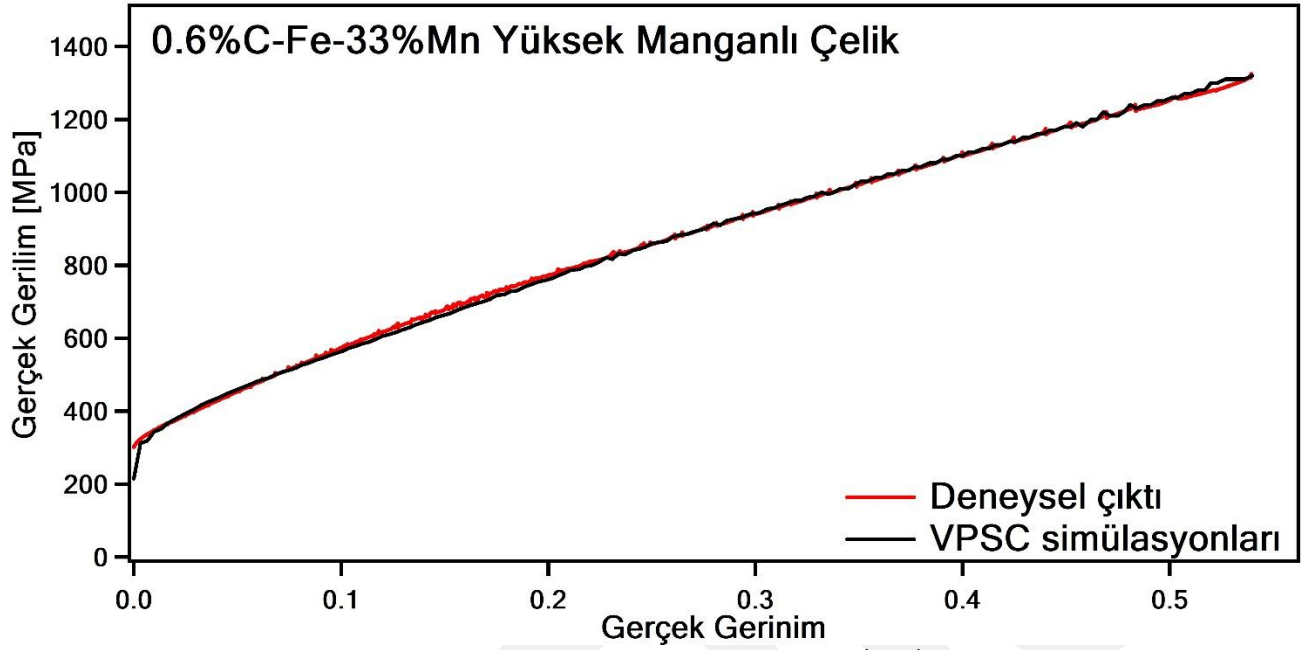
Karbon Konsantrasyonu(%ağ.)	$\tau_0$ (MPa)	$\tau_1$ (MPa)	$\theta_0$ (MPa)	$\theta_1$ (MPa)
1.2C	133.67	420	1740	6.14
0.9C	111.66	420	1740	5.66
0.6C	98	420	1740	4.98
0.3C	76.60	390	1940	4.60



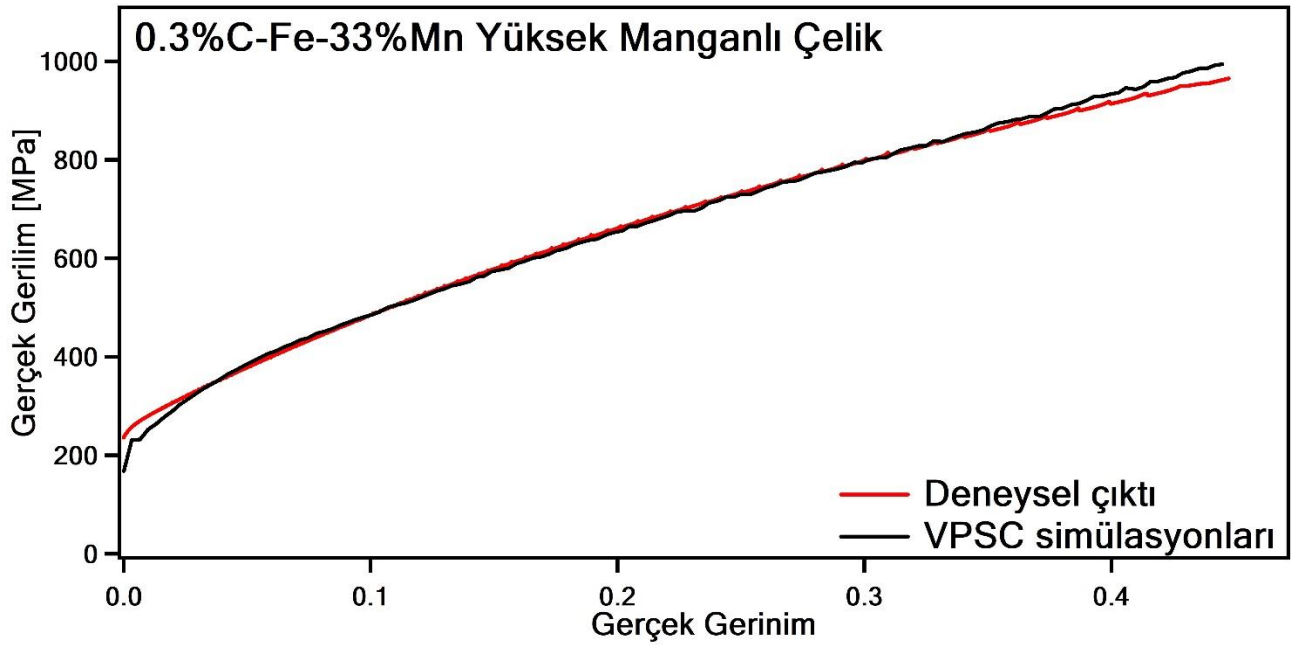
Şekil 9. Yüksek manganlı %1.2C-Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında VPSC simülasyonu



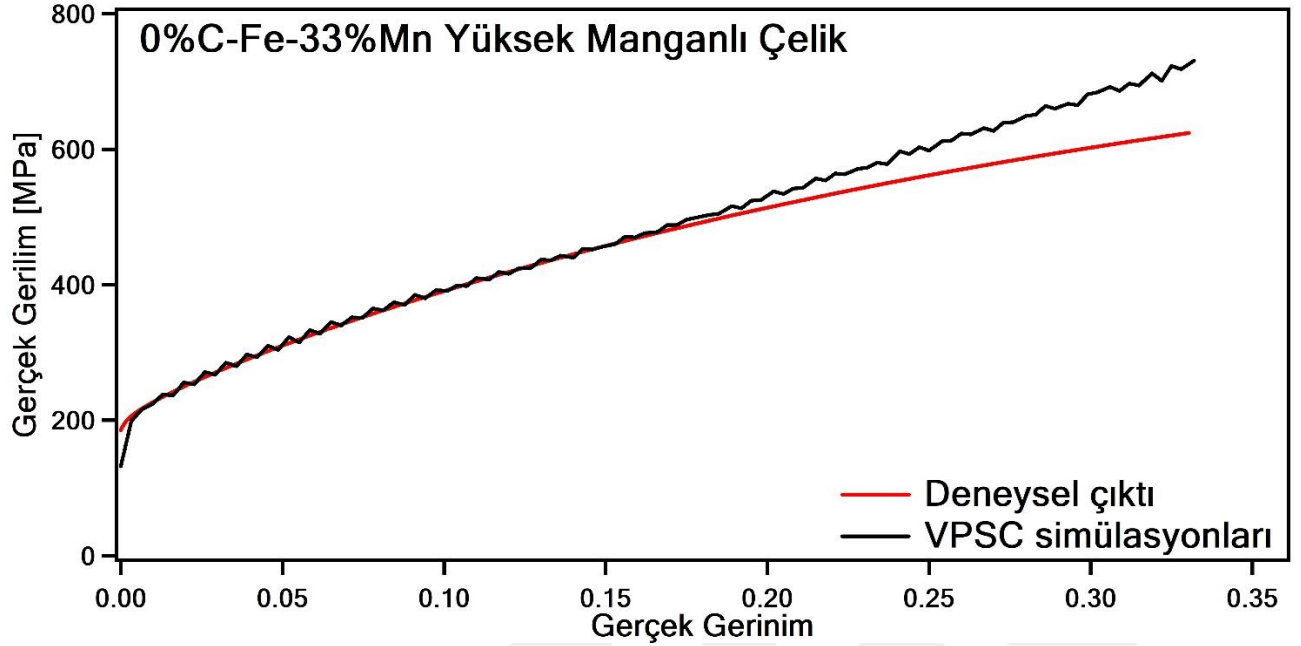
Şekil 10. Yüksek manganlı %0.9C-Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında VPSC simülasyonu



Şekil 11. Yüksek manganlı %0.6C-Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında VPSC simülasyonu



Şekil 12. Yüksek manganlı %0.3C-Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında VPSC simülasyonu



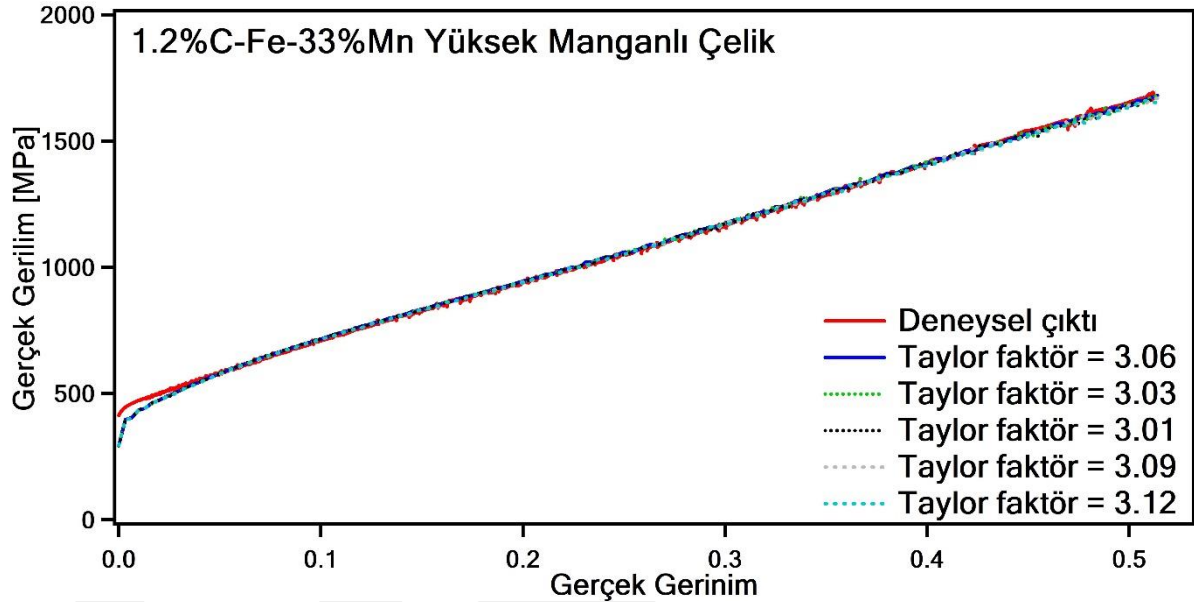
Şekil 13. Yüksek manganlı %0C-Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında VPSC simülasyonu

Proje raporunun giriş bölümünde de bahsedildiği gibi Fe-%33Mn östenitik çeliğinin yüksek süneklik ve yüksek pekleşme davranışı göstermesinin temel sebebi deformasyon sırasında kayma, ikizlenme ve faz değişiklikleri gibi farklı mekanizmaların açığa çıkmasıdır. Ayrıca bu mekanizmaların birbiri ile etkileşimi de ayrıca üstün mekanik özellikler göstermesine yardımcı olmaktadır. VPSC simülasyonları aracılığı ile kayma, ikizlenme, dinamik germe yaşlandırması, dislokasyon-tane sınırı etkileşimi gibi gerinim sertleşmesi mekanizmaları daha önceden kayma düzlemi ölçeğinde başarıyla modellenmiştir. Bu çalışmada ise kayma düzlemi ölçeğinde yapılan simülasyonlarda istenilen başarıda modelleme yapılamadığı için ikizlenme sistemi de VPSC simülasyonlarında aktif hale getirilmiştir. Aktif hale getirildikten sonra yapısında %0 karbon içeren Fe-%33Mn çeliği dışında tüm modellemeler hemen hemen başarıya ulaşmıştır. Fakat %0 karbonlu çeliğinin ilerin gerçek gerinim seviyelerinde bu başarı elde edilememiştir ve bunun temel sebebi Fe-Mn-C östenitik çeliğinde karbon oranı düşükçe ikizlenme yapılarının mikroyapıdan kaybolmaya başlamasıdır (Ghasri-Khouzani & McDermid, 2015; Seol, Jung, Jang, & Park, 2013). Bu yüzden kayma ve ikizlenme sistemlerinin modellemede aktif hale getirilmesi tam uyumlu modelleme için yeterli olmamıştır. Aynı şekilde diğer modellemelerinin tam anlamıyla başarılı olmasının sebebi ise ikizlenme sisteminin aktif olmasıdır. Spesifik olarak, artan karbon oranı ile birlikte dislokasyon karbon etkileşimi de artış göstermektedir. Mn-C topağının dislokasyon merkezindeki tekrar oryantasyonu ile dinamik germe yaşlandırmasının da

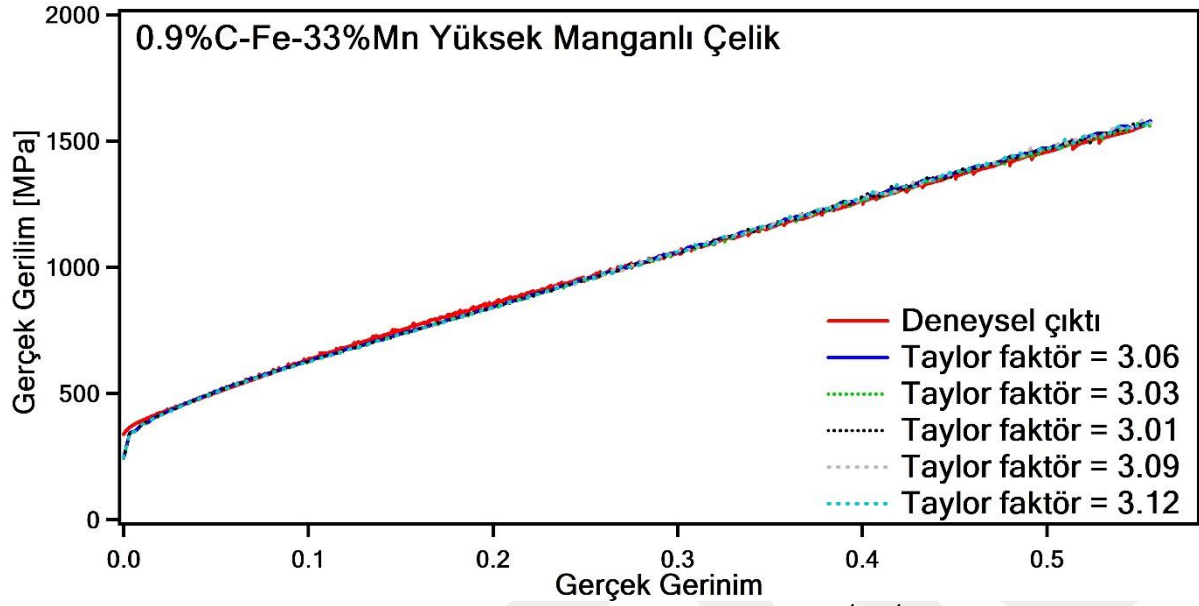
genel malzeme davranışına olan etkisi artmaktadır. Aslında, çeliklerin genellikle mikroyapısında karbon elementi bulunmaktadır ve çeliğin mukavemeti bu element sayesinde artmaktadır. Kimyasal kompozisyonunda karbon içermeye yüksek manganlı çelik aslında biraz da aykırı bir durum olduğu için kristal plastisite modellemesinin ileri gerinim değerlerinde de kayma ve ikizlenme kullanılarak kimyasal kompozisyonunda karbon elementi bulunan çeliklerdeki başarı elde edilememiştir. Ayrıca karbon oranı arttıkça malzemenin akma mukavemeti de artmıştır çünkü karbon atomları çekme yükü altında hareketliliği artan dislokasyonlara karşı bariyer olup dislokasyonların hareketlerini zorlaştırmıştır.

## 4.2. PEKLEŞME SABİTLERİ

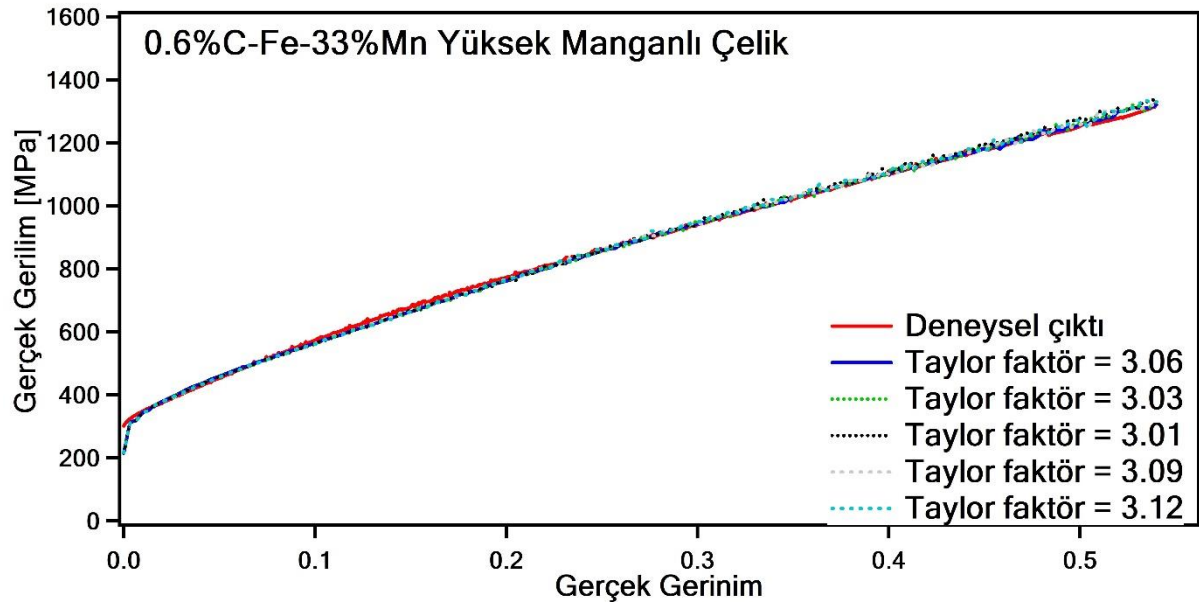
### 4.2.1. Malzeme Dokusu



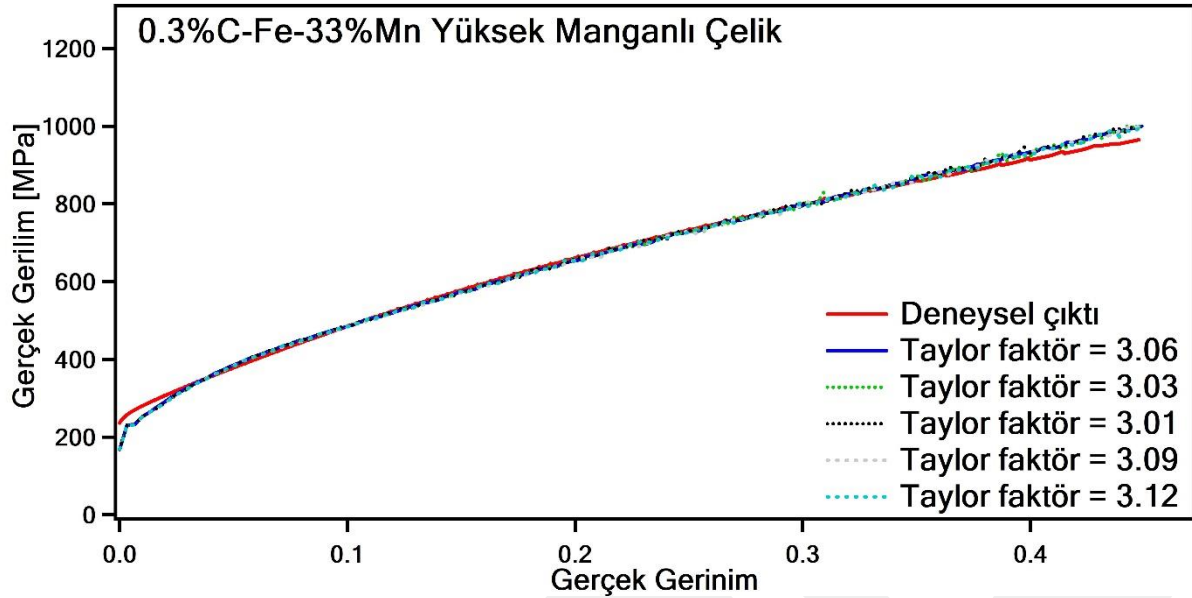
Şekil 14. Yüksek manganlı %1.2C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları



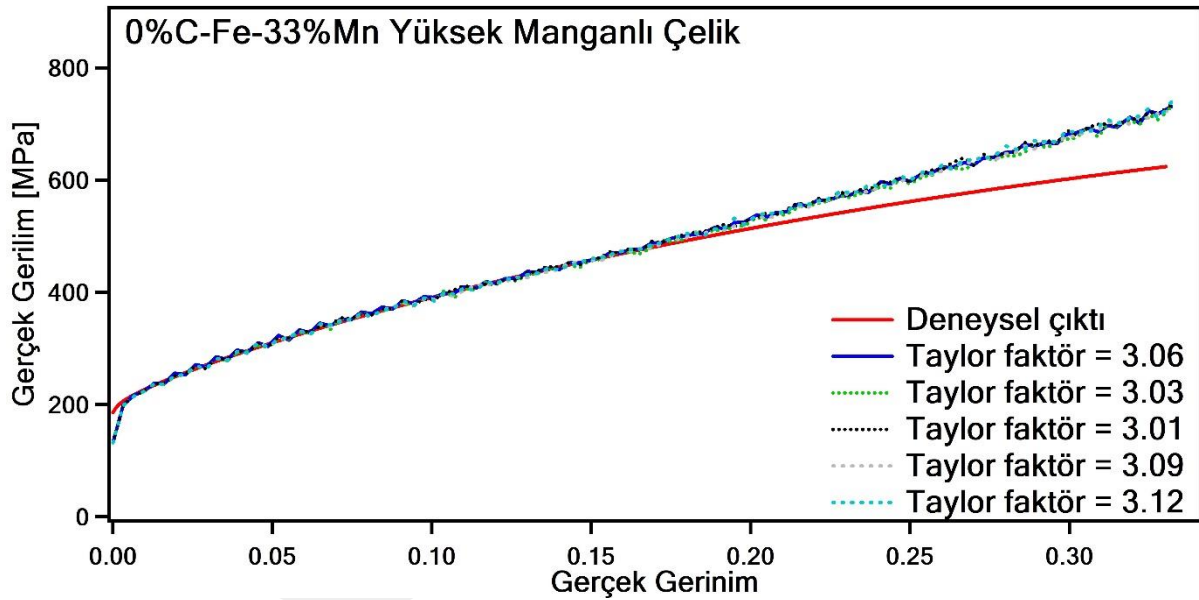
Şekil 15. Yüksek manganlı %0.9C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları



Şekil 16. Yüksek manganlı %0.6C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları



Şekil 17. Yüksek manganlı %0.3C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları

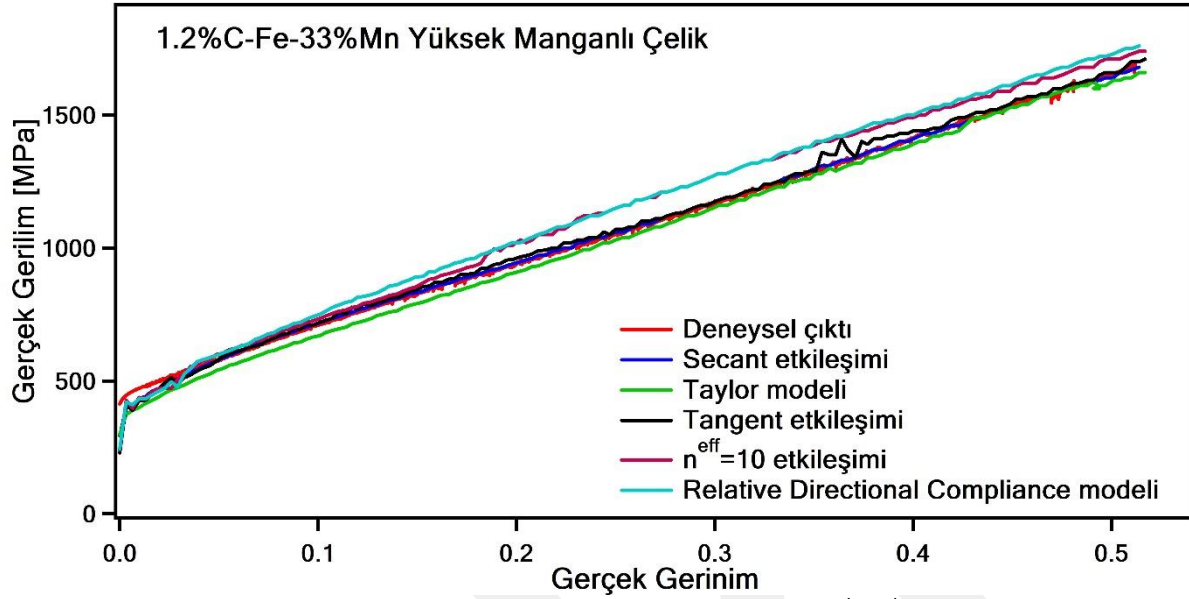


Şekil 18. Yüksek manganlı %0C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı malzeme dokuları ile VPSC simülasyonları

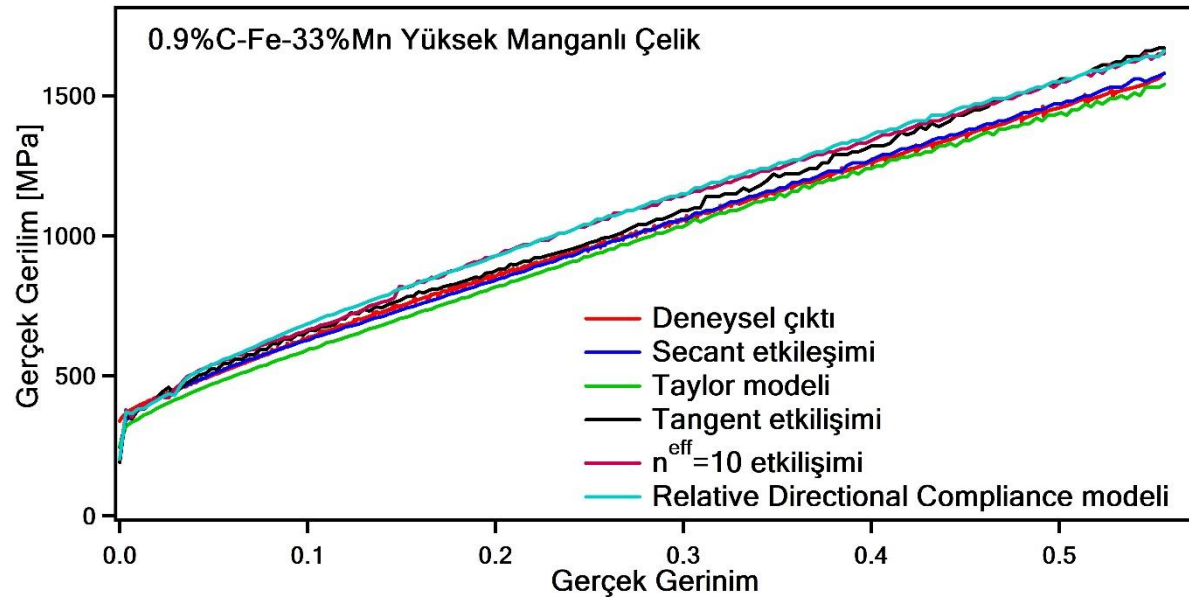
VPSC simülasyonları sırasında mikroyapısal değişkenlerden biri olarak kullanılan malzeme dokusunun farklı karbon konsantrasyonlarındaki yüksek manganlı Fe-%33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisi Şekil 14-15-16-17-18'de gösterilmektedir. Farklı karbon

konsantrasyonlarındaki (%1.2C, %0.9C, %0.6C, %0.3C, %0C) Yüksek manganlı Fe-%33Mn çeliğinin kristal plastisite modellemesi için taylor faktör = 3.06 kullanılmıştır. Taneciklerde kaymanın başlamışı için gerekli olan kritik kesme gerilimi bileşeni Taylor yasası yoluyla bir Taylor faktörü temel alınarak hesaplanır ve VPSC simülasyonları, taylor faktör değerleri sırasıyla 3.01, 3.04, 3.06, 3.09 ve 3.12 olan farklı malzeme dokuları ile gerçekleştirilmiştir. Seçilen Taylor faktörü değerlerinin her biri akma malzemenin akma mukavemeti değerine bölünerek  $\tau_0$  değeri bulunur ve Tablo 1'de de açıkça görüldüğü gibi her bir  $\tau_0$  değeri her bir karbon oranı için farklıdır (Tablo 1'deki  $\tau_0$  değeri ilk malzeme dokusu olan taylor faktör 3,08 kullanılarak hesaplanmıştır). Simülasyon sonuçları açıkça göstermektedir ki malzeme dokusunu değiştirmek yüksek manganlı Fe-%33Mn çeliğinin herhangi bir karbon konsantrasyonundaki pekleşme davranışına dikkate değer bir etkisi olmamaktadır. Her bir karbon konsantrasyonu için pekleşme sabitlerini bulurken taylor faktör = 3.06 kullanıldı fakat pekleşme davranışına hemen hemen hiçbir etkisi olmayan diğer malzeme dokularını VPSC simülasyonlarında aynı işlem için kullanıldığında, hesaplama zamanından büyük bir kazanç elde edildiği gözlemlenmektedir. Bir başka deyişle, taylor faktörü 3,06 olarak aldığımızda hesaplama süresi fazlayken diğer taylor faktörleri kullandığımızda bu süre oldukça kısalmaktadır. Şekillerde de görüldüğü gibi malzeme dokusu mikroyapı değişkeni pekleşme davranışına etkisi görülmemektedir. Farklı malzeme dokuları ile gerçekleştirilen modellemeler göstermektedir ki bu mikroyapısal girdinin malzemenin içerisindeki karbon oranından tamamen bağımsızdır ve ayrıca şekiller dikkatle incelendiğinde malzeme dokusunu değiştirdiğimiz zaman deneysel girdi eğrisi üzerinde değil de VPSC simülasyon eğrisi üzerinde diğer eğriler toplanmıştır. Sonuç olarak malzeme dokusunun karbon içeriğine bağlı olmaksızın malzemenin pekleşme davranışına dikkate değer bir etkisi yoktur.

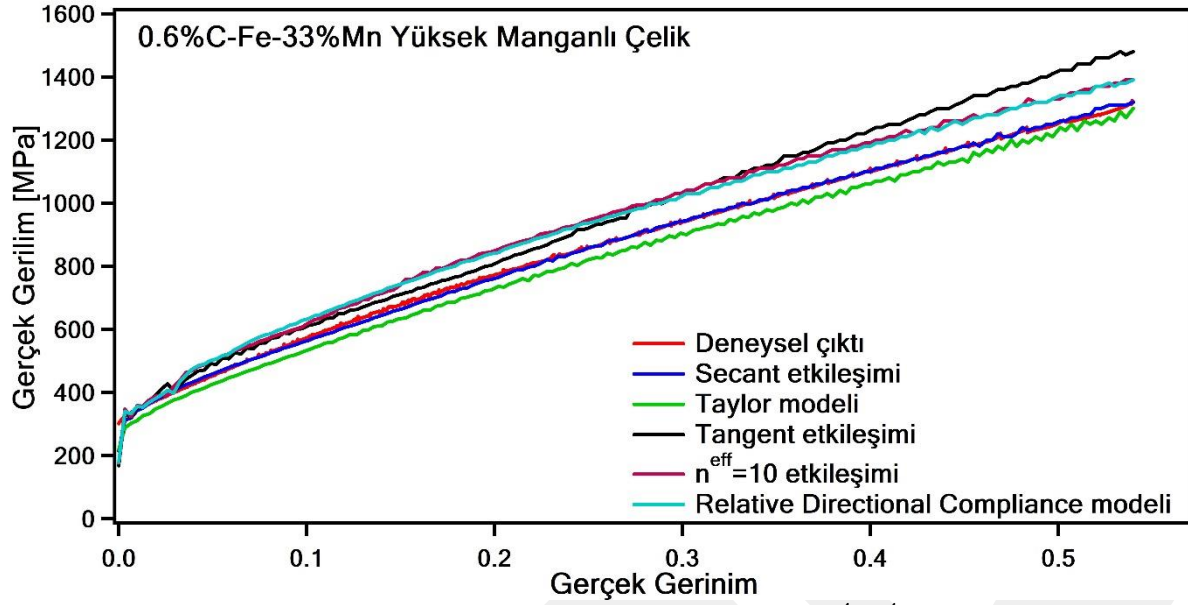
#### 4.2.2. Etkileşim Tensörü



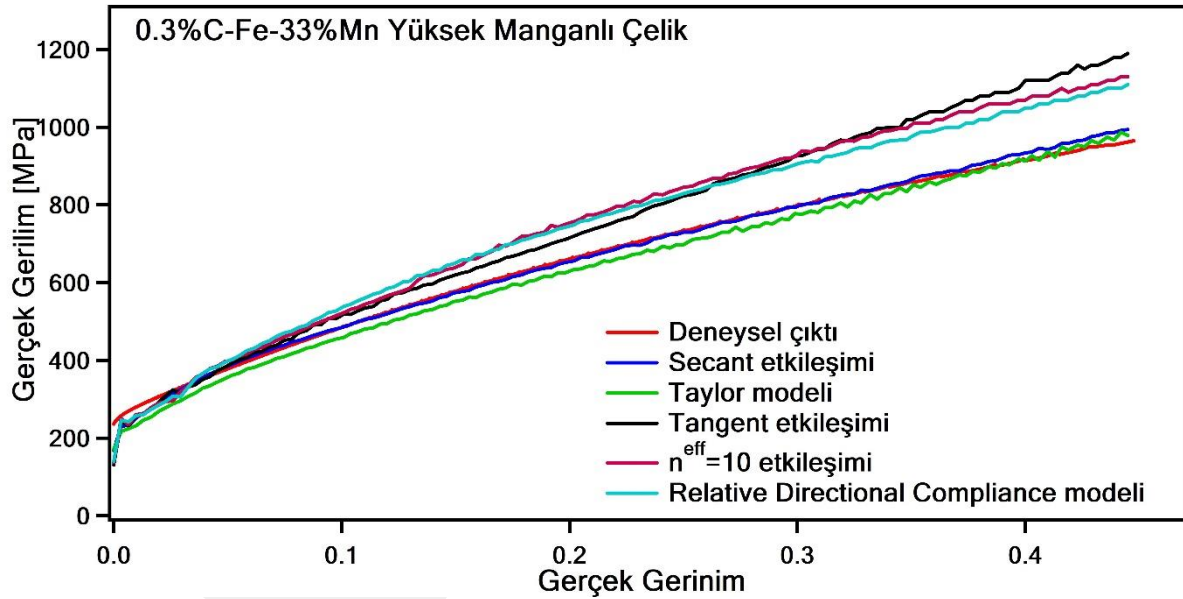
Şekil 19. Yüksek manganlı %1.2C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları



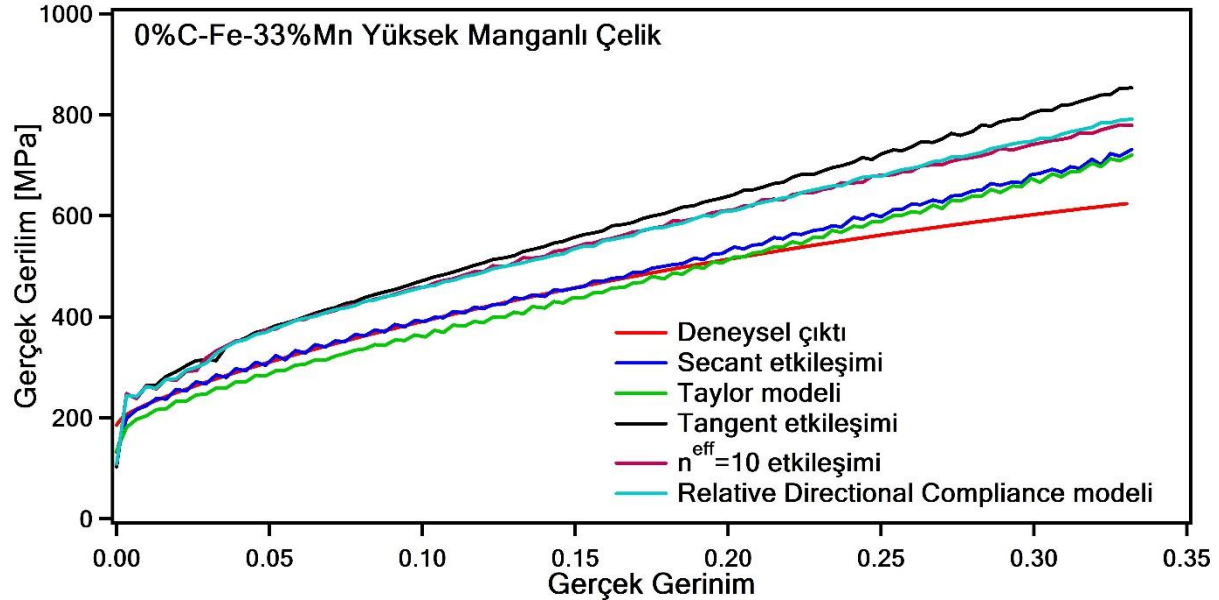
Şekil 20. Yüksek manganlı %0.9C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları



Şekil 21. Yüksek manganlı %0.6C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları



Şekil 22. Yüksek manganlı %0.3C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları

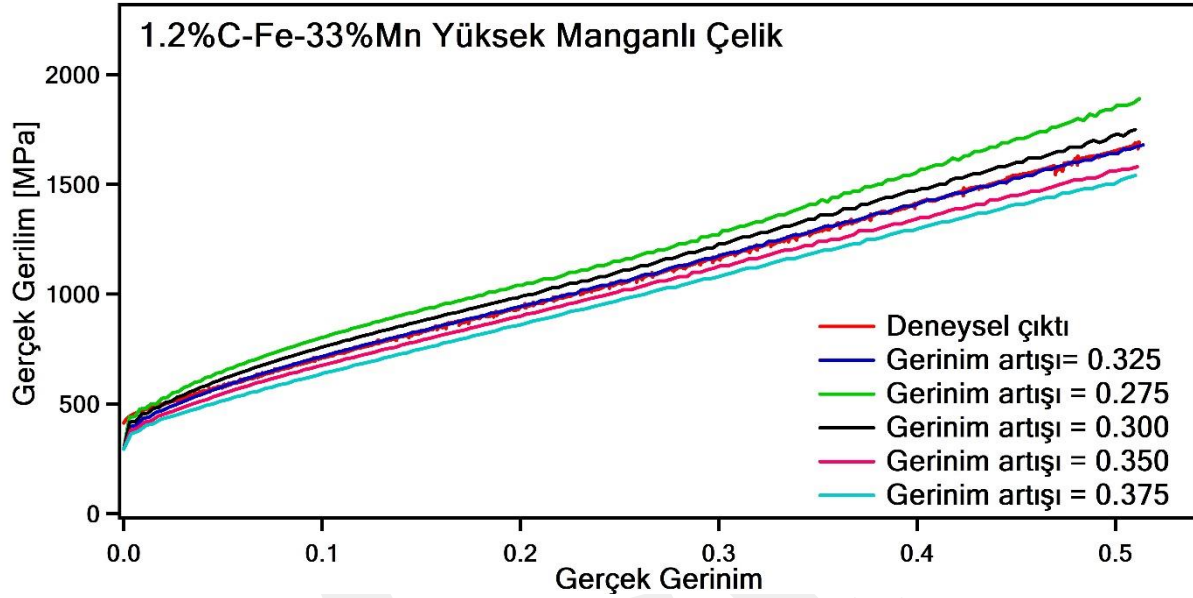


Şekil 23. Yüksek manganlı %0C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı etkileşim tensörleri ile VPSC simülasyonları

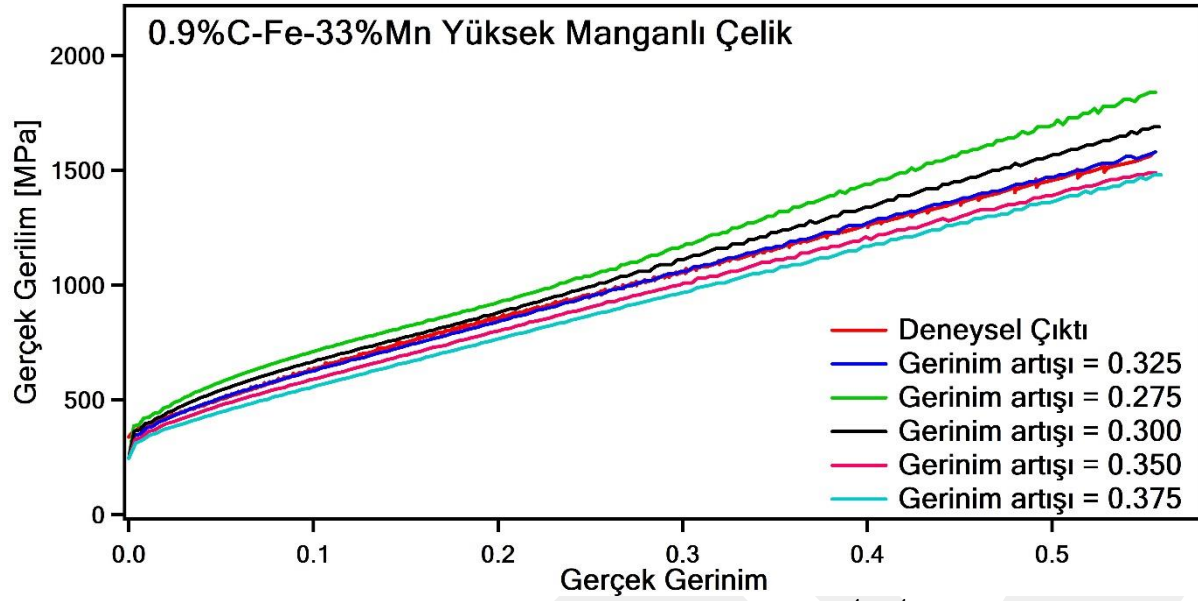
VPSC simülasyonları sırasında mikroyapısal değişkenlerden biri olarak kullanılan etkileşim tensörünün farklı karbon konsantrasyonlarındaki yüksek manganlı Fe-%33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisi Şekil 19-20-21-22-23'de gösterilmektedir. Yüksek manganlı Fe-33Mn çeliği secant etkileşimi kullanılarak her bir karbon konsantrasyonu için ayrı ayrı başarılı bir şekilde modellenmiştir. Kullanılan her bir etkileşim tensörü farklı karbon konsantrasyonunda az veya çok gözle görülür bir dalgalanmaya sebep olmuştur fakat simülasyonları modellerken kullanılan secant etkileşimi diğerlerine göre nispeten daha kararlı bir davranış göstermiştir. VPSC simülasyonları tanjant,  $n^{\text{eff}}=10$  ve RDC etkileşim tensörleri ile gerçekleştirildiği zaman özellikle secant etkileşimi ile kıyasladığımızda gerilimi dikkate değer bir şekilde arttırmaktadır. Öte yandan etkileşim tensörünü tanjant tensöründen Taylor tensörüne değiştirdiğimiz zaman her bir karbon konsantrasyonu için gerilim değerinde düşüşe sebep olmaktadır. Bunlara ek olarak, karbon konsantrasyonu %1.2C'dan %0C'a doğru azaldıkça şekillerde okunan maksimum gerilim ve gerinim değerlerinde gözle görünür bir azalma söz konusudur. Modelleme sonuçları açık bir şekilde göstermektedir ki tanjant ve  $n^{\text{eff}}=10$  etkileşim tensörleri kullanıldığında dalgalanmalar gözle görünür bir şekilde artmaktadır. Son olarak, etkileşim tensörü Taylor modeli seçildiği zaman malzemenin sahip olduğu akma değeri diğerlerine göre daha düşüktür ve RDC etkileşim tensörünün akma gerilim değeri de diğerlerine göre nispeten daha yüksektir. Yapılan modellemeler açıkça göstermektedir ki farklı mikroyapısal girdiler VPSC simülasyon eğrilerine etki etmektedir. Değiştirilen her bir değişken eğriyi belirli bir kapsamda aşağı veya yukarıya

kaydırırken aynı zaman pek bir etkisi de olmayabilir. Bu kapsamda tanjant etkileşimi tensörü dışında diğer tüm tensörler VPSC model eğrisinin konumu dikkate alındığında her bir karbon oranında değişiklik göstermemiştir. Örneğin, Taylor modeli etkileşim tensörü, diğer tensörler ve VPSC simülasyonu baz alındığında hep en altta yer almıştır ve diğer tensörlere de benzer ilişkilendirmeler kurulabilir. Fakat tanjant tensörü karbon oranı düştükçe diğer eğrilere göre daha yukarıda yer almaya başlamıştır.

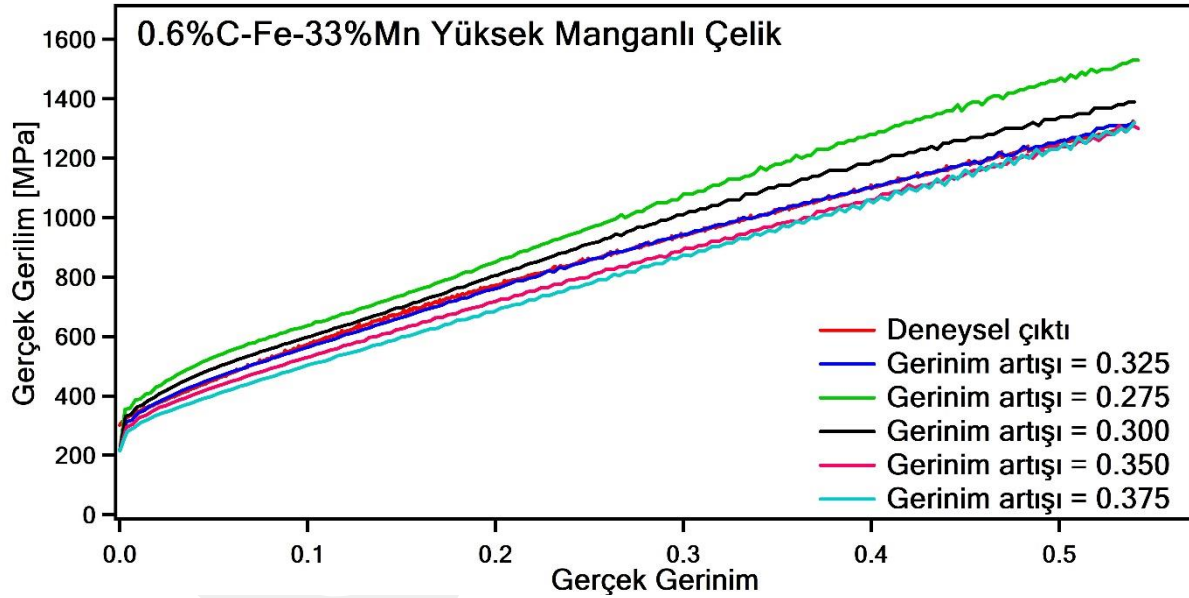
#### 4.2.3. Gerinim Artışı



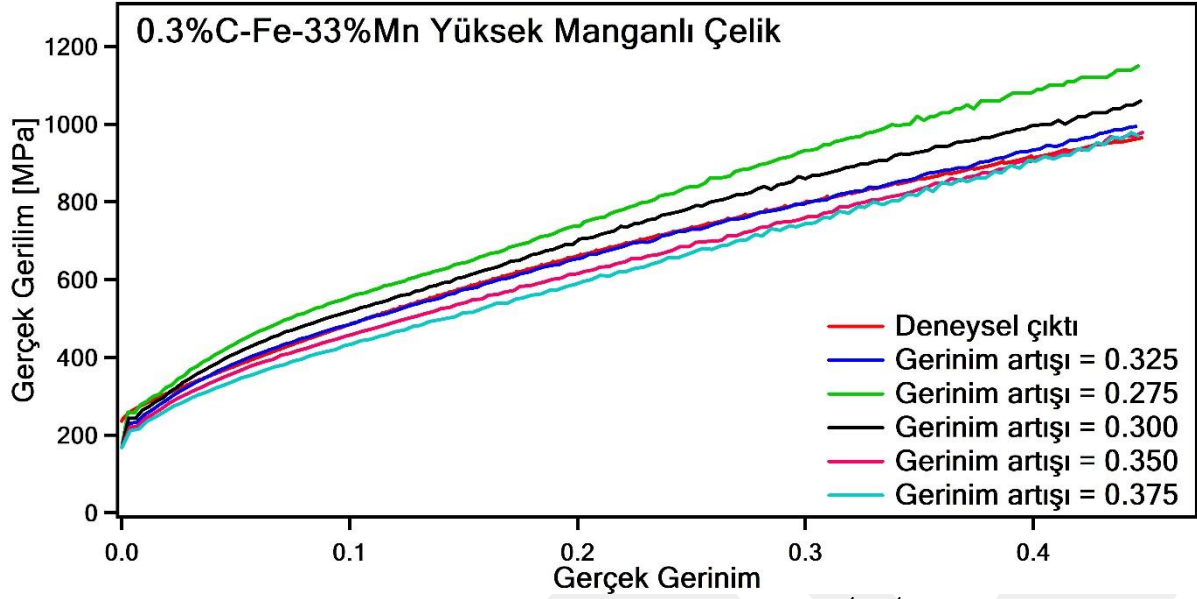
Şekil 24. Yüksek manganlı %1.2C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları



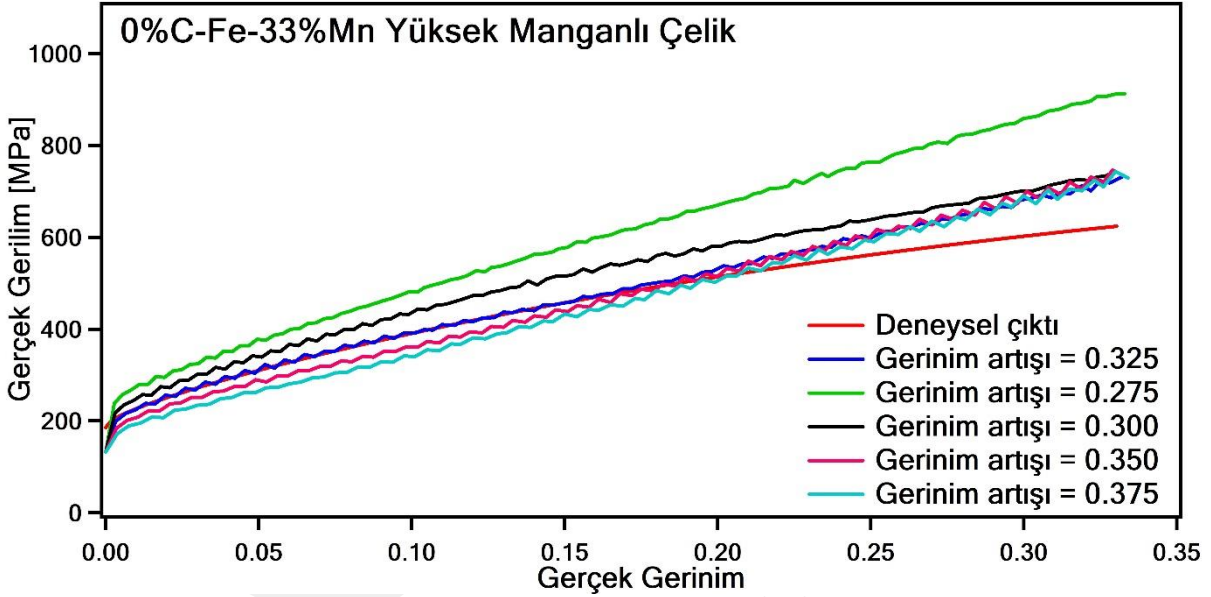
Şekil 25. Yüksek manganlı %0.9C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları



Şekil 26. Yüksek manganlı %0.6C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları



Şekil 27. Yüksek manganlı %0.3C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları



Şekil 28. Yüksek manganlı %0C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı gerinim artışları ile VPSC simülasyonları

VPSC simülasyonları sırasında mikroyapısal değişkelerden biri olarak kullanılan gerinim artışının farklı karbon konsantrasyonlarındaki yüksek manganlı Fe-%33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan etkisi Şekil 24-25-26-27-28'de gösterilmektedir. Tüm kristal plastisite modellerinde, gerinim artımı ve adım sayısı simülasyondaki nihai gerinim değerini belirler.

Çünkü gerinim artışı ile adım sayısı çarpıldığı zaman nihai gerinim elde edilir. Bu nedenden dolayı gerinim artışının hesaplama zamanına etkisi oldukça büyüktür. Gerinim artışının değeri yükseldikçe kristal plastisite hesaplamalarının süresi azalmaktadır. Ayrıca Şekil 24-25-26-27-28 açıkça göstermektedir ki gerinim artışı malzemenin pekleşme davranışına gözle görünür bir şekilde etki etmektedir. Gerinim artışının değeri arttıkça gerilim değeri şekillerde de görülebileceği gibi gittikçe azalmaktadır. Buradan çıkarabileceğimiz sonuç gerinim oranı ile gerilim değeri arasında ters bir orantı vardır. En yüksek akma gerilim değeri en düşük gerinim artışında elde edilmiştir ve en düşüğü ise gerinim artık değeri en yüksek iken elde edilmiştir. Gerinim artışı değerinin yükselmesi kristal plastisite modellemeleri sırasındaki hesaplama zamanını düşürürken öte yandan da simülasyon sonuçlarının doğruluğunu da düşürmektedir. Kısacası hesaplama süresini düşürmek için yüksek gerinim artış değerini seçmek sonuçların güvenilirliğine olumsuz yönde etki edebilir. Örneğin diğer bir mikroyapısal girdi olan malzeme dokusunda herhangi bir türü seçildiği zaman simülasyon sonuçlarını değiştirmemiştir ve ayrıca bazı kullanılan malzeme dokuları hesaplama süresini oldukça düşürmektedir. Aynı prosedürü sonuçlar değiştiği için burada uygulayamayız. Gerinim oranı arttıkça gerilim değeri düşmektedir. Bunlara ek olarak, farklı gerinim artışları ile elde edilen şekillerden görebileceğimiz gibi farklı gerinim değerleri modelleme üzerinde dikkate değer bir dalgalanmaya sebep olmamıştır. Her bir gerinim artışına bağlı olarak eğrilerin değişmesinin temel sebebi simülasyonun toplam süresinin ve doğrulunun değişmesidir. Örneğin, gerinim oranı arttıkça simülasyonlar daha az adım sayısı ile tamamlanır fakat bu hem hesaplama süresinin azalmasına neden olur hem de sonucun doğruluğuna etki eder. Buradaki önemli olan durum hem hesaplama süresinin düşürmek fakat aynı zamanda da simülasyonunun başarısından ödün vermemektir. Şekilden de görülebildiği gibi gerinim hızı arttıkça eğrilerdeki dalgalanmalarda artmaktadır ve düşük gerinim hızlarında bu dalgalanma oranı oldukça azdır. Buradan gerinim oranının artması malzeme gerinim sertleşmesi tepkisinin bozulmasına yol açmıştır. Her bir karbon oranında bu durum aynıdır. Sonuç olarak, farklı gerinim artış değerleri, o gerinim aralığına daha çok yoğunlaşılmasını sağlamaktadır ve bu yoğunlaşma farkı da sonuçları etkilemektedir.

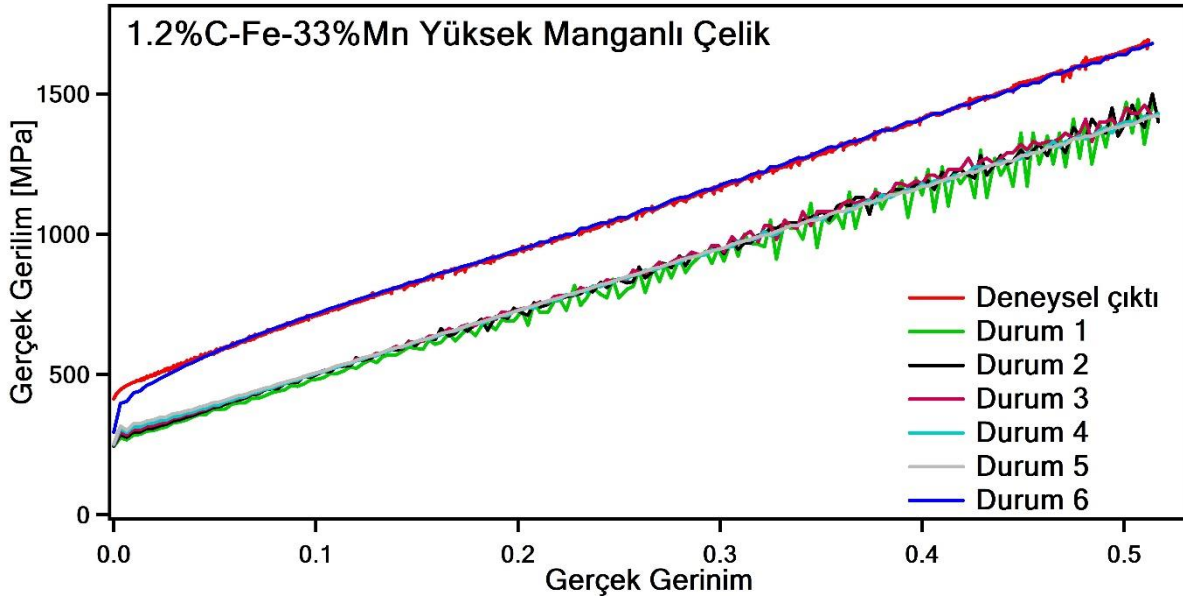
#### **4.2.4. Hız Gradyanı**

Kristal plastisite modellemeleri sırasında hız gradyanı mikroyapısal değişkeninin malzemenin pekleşme davranışına olan etkisini açığa çıkarmak için kullanılan 6 farklı hız gradyanı Tablo 3'te verilmiştir.

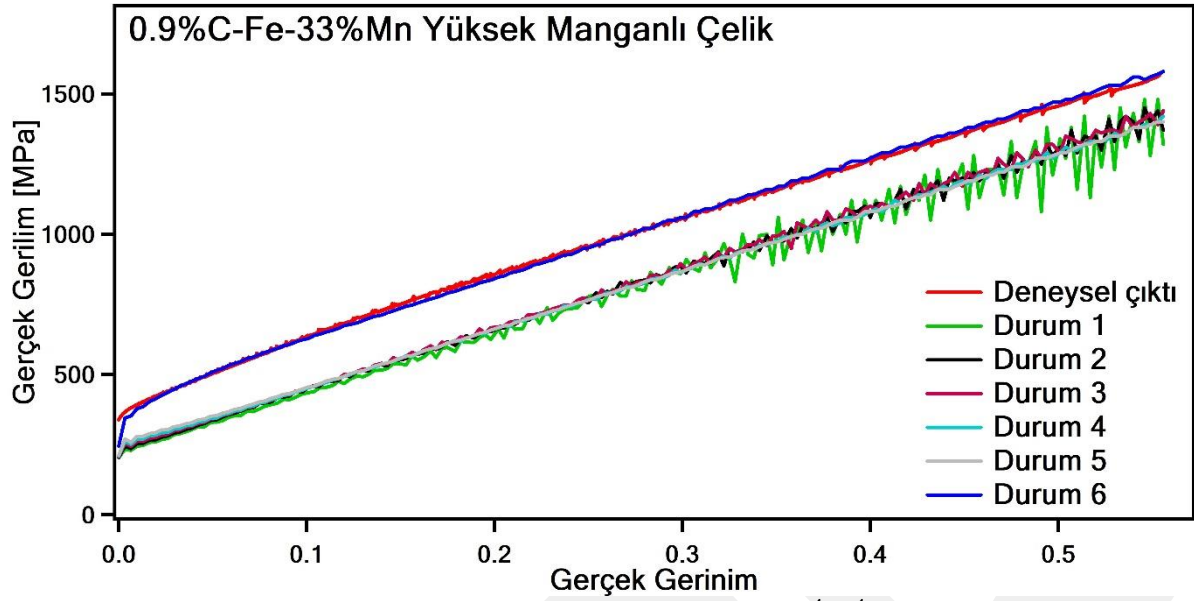
Tablo 3. VPSC simülasyonlarında kullanılan 6 farklı hız gradyanı

	$L_{11}$	$L_{22}$	$L_{33}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{21}$	$L_{23}$	$L_{31}$	$L_{32}$
<b>Durum 1</b>	1	-0.05	-0.95	0	0	0	0	0	0
<b>Durum 2</b>	1	-0.075	-0.925	0	0	0	0	0	0
<b>Durum 3</b>	1	-0.1	-0.90	0	0	0	0	0	0
<b>Durum 4</b>	1	-0.125	-0.875	0	0	0	0	0	0
<b>Durum 5</b>	1	-0.15	-0.85	0	0	0	0	0	0
<b>Durum 6</b>	1	-0.50	-0.50	0	0	0	0	0	0

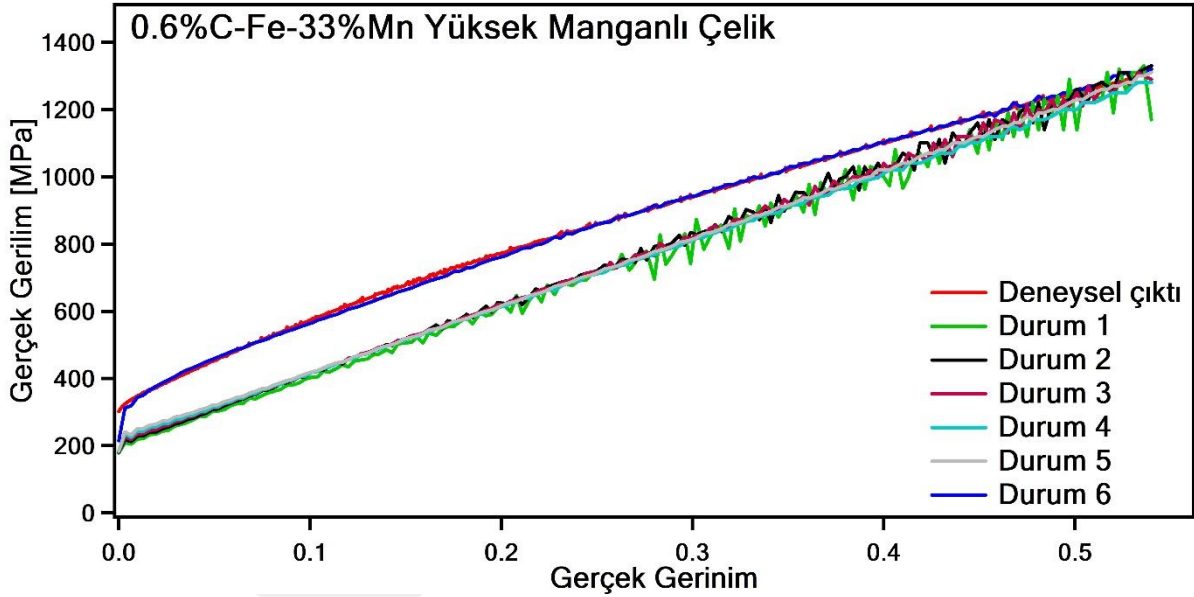
VPSC simülasyonları sırasında kullanılan bu hız gradyanlarının neden bu değerler seçildiği ve bu değerlerin nasıl bulunduğu projenin gereç ve yöntem kısmında açık bir şekilde anlatılmıştır. Tek eksenli yükleme simülasyonları sırasında bir sınır koşulu olarak verildiğinden, hız gradyan tensörlerinin simetrik bileşenleri sıfıra ayarlanmıştır.



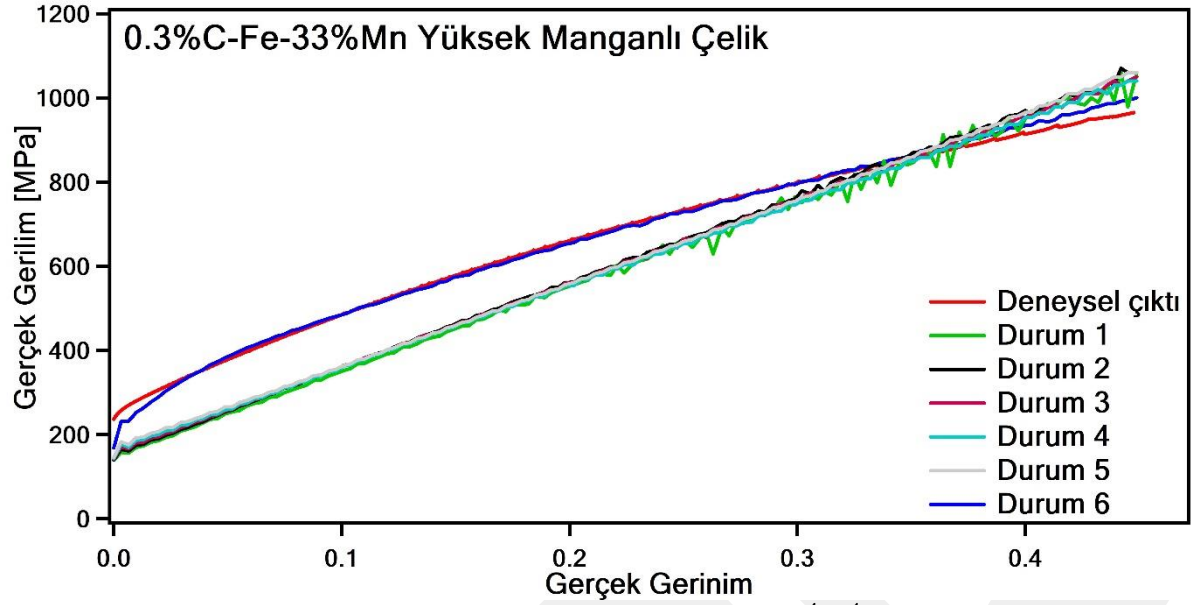
Şekil 29. Yüksek manganlı %1.2C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerilim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları



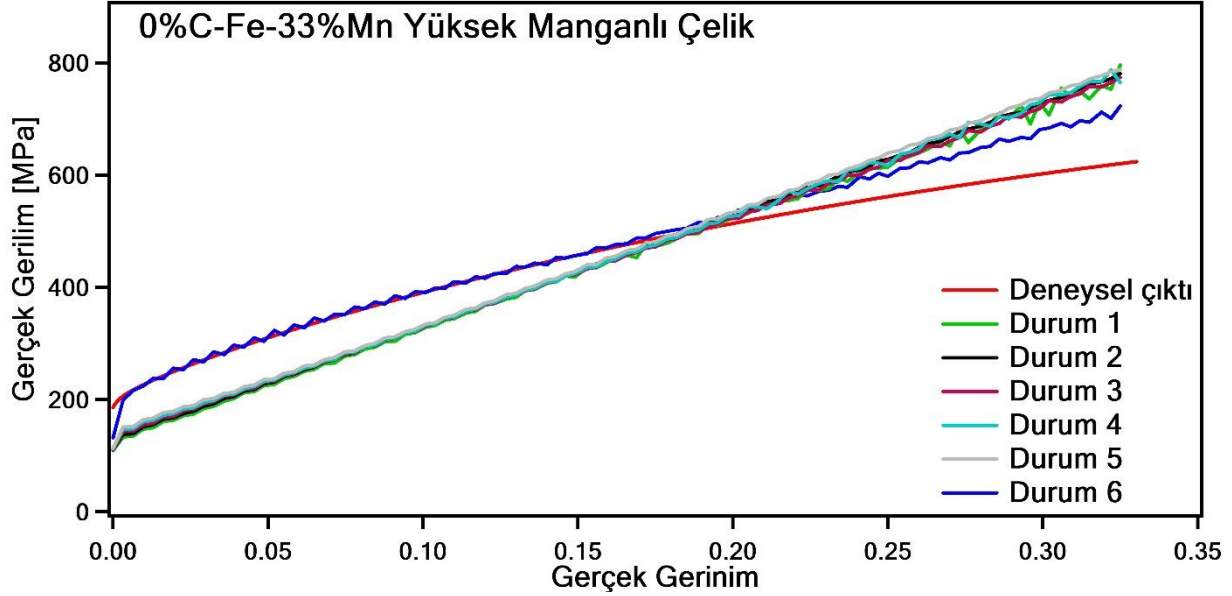
Şekil 30. Yüksek manganlı %0.9C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları



Şekil 31. Yüksek manganlı %0.6C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları



Şekil 32. Yüksek manganlı %0.3C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları



Şekil 33. Yüksek manganlı %0.6C- Fe-%33Mn çeliğinin  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında ve farklı hız gradyanları ile VPSC simülasyonları

VPSC simülasyonlarında mikroyapısal değişkenlerden biri olarak kullanılan hız gradyanının farklı karbon konsantrasyonlarındaki yüksek manganlı Fe-%33Mn çeliğinin pekleşme davranışına olan

etkisi Şekil 29-30-31-32-33'te gösterilmektedir. Hız gradyanı aktif kayma dizgelerindeki tüm kristalografik kayma oranlarının toplamıdır. Mevcut çalışmada kullanılan her bir durum için hız gradyan tensör bileşenleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Hız gradyan tensörünün diyagonal bileşenlerinin toplamı, kristal plastisite hesaplamaları için sıfır olarak seçilmiştir. Hız gradyanı tensörlerindeki tüm simetrik bileşenler tek eksenli yükleme sınır şartı olarak verildiği için 0 olarak alınmıştır. Kristal plastisite hesaplamalarından elde edilen gerilim değerlerinin  $L_{22}$  ile doğrusal orantıda olduğu şekillerde açıkça görülmektedir. 1. Durumdan 6.duruma doğru gidildikçe şekillerde okunan gerilim değerleri her bir karbon konsantrasyonundaki yüksek manganlı Fe-%33Mn çeliği için artış göstermektedir. Buna ek olarak  $L_{22}$  ve  $L_{33}$ 'ün değerleri birbirinden uzaklaştıkça VPSC simülasyonlarında gözle görülür dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Kristal plastisite modellerindeki gözle görülür en büyük dalgalanmalar  $L_{22}=-0.05$  iken görülmektedir.  $L_{22}$  ve  $L_{33}$  değerleri birbirine yaklaştıkça daha homojen sonuçlar elde edilmektedir. Sonuçların farklılığının en büyük sebebi, hız gradyanındaki değişimin deformasyonun homojenitesini değiştirmesi olarak özetlenebilir. Bu değişim bir nevi gerilim hızındaki değişim olarak düşünülebilir.

## 5. TARTIŞMA VE GENEL SONUÇLAR

Bu projede malzeme dokusu, etkileşim tensörü, hız gradyanı ve gerilim artışı gibi farklı mikroyapısal değişkenlerin yüksek oranda mangan içeren demir dengeli Fe-%33Mn östenitik çeliğinin pekleşme davranışına etkisi kristal plastisite yoluyla araştırılmıştır. İlk olarak projede bahsi geçen östenitik çeliklerin farklı karbon konsantrasyonlarında, makro ölçekte ve  $10^{-4}$  1/s gerilim hızında çekme testleri yapılmıştır. Daha sonra çekme testi sonuçlarından farklı karbon konsantrasyonlarında elde edilen gerçek gerilim ve gerçek gerilim eğrileri VPSC simülasyonlarında ilgili Voce pekleşme sabitlerinin bulunması için kullanılmıştır. Pekileşme sabitleri bulmak için kayma ve ikizlenme sistemleri simülasyonlar sırasında aktif hale getirilmiştir ve deneysel çıktı eğrisi ve simülasyon ile elde ettiğimiz eğri birbiri ile uyumla hale gelecek şekilde modeller geliştirilmiştir. Daha sonrasında her bir karbon konsantrasyonu için bulunun Voce pekleşme parametreleri simülasyonlar sırasında sabit tutularak farklı mikroyapısal değişkenler parametre olarak kullanılmıştır. Dört farklı mikroyapısal değişkenin sadece bir tanesi değiştirilip diğer üç tanesi sabit tutulmuştur. Böylelikle her bir değişkenin pekleşme davranışına etkisi ayrı ayrı anlaşılmıştır. Bazı değişkenler pekleşme davranışına gözle görülür hiçbir etkisi olmazken, bazı mikroyapısal değişkenlerin ise büyük etkisi olmuştur. Örneğin, farklı malzeme

dokularının malzemenin pekleşme davranışına hiçbir etkisi olmazken, gerinim artışındaki en ufak yükseliş veya düşüş simülasyon eğrilerinin konumunu değiştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda literatürde kendisi hakkında çok az bilgi olan ve ileride uzay, havacılık, savunma sanayi ve otomotiv gibi önemli uygulamalarda kullanım potansiyeli oluşturan Fe-%33Mn çeliğinin kristal plastisite modelleme çalışması yapılmıştır ve literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca ilk kez farklı mikroyapısal girdilerin bahsi geçen çeliğin pekleşme davranışına etkileri açığa çıkarılmıştır. Bugüne kadar VPSC algoritması ile yapılan çalışmalar genellikle belirli bir malzeme dokusu, hız gradyanı, gerinim artışı ve etkileşim tensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fakat bu çalışmanın asıl amacı bir adım daha ileri gidilerek bu tür farklı mikroyapısal girdilerin mikro ölçekte malzemenin pekleşme davranışına olan etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Proje sonucunda yapılacak en önemli öneri, kristal plastisite simülasyonlarında mikroyapısal girdilerin çok dikkatli seçilmesi olup, simülasyonların bu tür girdilerin etkilerine göre değişimleri ve sonuçlarının yorumlanması bilimsel bir yaklaşım ile yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Allain, S., Chateau, J., Bouaziz, O., Migot, S., & Guelton, N. (2004). Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe – Mn – C alloys, 389, 158–162. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.059>
- Bal, B., Gumus, B., & Canadinc, D. (2017). Incorporation of Dynamic Strain Aging Into a Viscoplastic Self-Consistent Model for Predicting the Negative Strain Rate Sensitivity of, 138(July 2016), 1–8. <https://doi.org/10.1115/1.4033072>
- Bal, B., Gumus, B., Gerstein, G., Canadinc, D., & Maier, H. J. (2015). On the micro-deformation mechanisms active in high-manganese austenitic steels under impact loading. *Materials Science and Engineering A*, 632, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.054>
- Bal, B., Koyama, M., Canadinc, D., Gerstein, G., Maier, H. J., & Tsuzaki, K. (2018). On the Utility of Crystal Plasticity Modeling to Uncover the Individual Roles of Microdeformation Mechanisms on the Work Hardening Response of Fe-23Mn-0.5C TWIP Steel in the Presence of Hydrogen. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 140(3), 1–13. <https://doi.org/10.1115/1.4038801>
- Bal, B., Koyama, M., Gerstein, G., Maier, H. J., & Tsuzaki, K. (2016). Effect of strain rate on hydrogen embrittlement susceptibility of twinning-induced plasticity steel pre-charged with high-pressure hydrogen gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(34), 15362–15372. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.259>
- Barbier, D., Gey, N., Allain, S., Bozzolo, N., & Humbert, M. (2009). Analysis of the tensile behavior of a TWIP steel based on the texture and microstructure evolutions. *Materials Science and Engineering A*, 500(1–2), 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.031>
- Bayraktar, E., Khalid, F. A., & Levallant, C. (2004). Deformation and fracture behaviour

- of high manganese austenitic steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 147(2), 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.007>
- Bouaziz, O., Allain, S., Scott, C. P., Cugy, P., & Barbier, D. (2011). High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 15(4), 141–168. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.002>
- Bouaziz, O., & Guelton, N. (2001). Modelling of TWIP effect on work-hardening. *Materials Science and Engineering A*, 319–321, 246–249. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)02019-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)02019-0)
- Brüx, U., Frommeyer, G., Grässel, O., Meyer, L. W., & Weise, A. (2002). Development and characterization of high strength impact resistant Fe-Mn-(Al-,Si) TRIP/TWIP steels. *Steel Research*, 73(6–7), 294–298. <https://doi.org/10.1002/srin.200200211>
- Canadinc, D., Sehitoglu, H., & Maier, H. J. (2007). The role of dense dislocation walls on the deformation response of aluminum alloyed hadfield steel polycrystals. *Materials Science and Engineering A*, 454–455, 662–666. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.122>
- Curtze, S., & Kuokkala, V. T. (2010). Dependence of tensile deformation behavior of TWIP steels on stacking fault energy, temperature and strain rate. *Acta Materialia*, 58(15), 5129–5141. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.05.049>
- Dastur, Y. N., & Leslie, W. C. (1981). Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel. *Metallurgical Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 12 A(5), 749–759. <https://doi.org/10.1007/BF02648339>
- De Cooman, B. C., Estrin, Y., & Kim, S. K. (2018). Twinning-induced plasticity (TWIP) steels. *Acta Materialia*, 142, 283–362. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.046>
- Frommeyer, G., Brüx, U., & Neumann, P. (2003). 2003\_Georg\_TRIP-TWIP\_γ-twin\_barrier. *ISIJ International*, 43(3), 438–446.
- Ghasri-Khouzani, M., & McDermid, J. R. (2015). Effect of carbon content on the mechanical properties and microstructural evolution of Fe-22Mn-C steels. *Materials Science and Engineering A*, 621, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.042>
- Grässel, O., Krüger, L., Frommeyer, G., & Meyer, L. W. (2000). High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development - properties - application. *International Journal of Plasticity*, 16(10), 1391–1409. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(00)00015-2)
- Gumus, B., Bal, B., Gerstein, G., Canadinc, D., Maier, H. J., Guner, F., & Elmadagli, M. (2015). Twinning activities in high-Mn austenitic steels under high-velocity compressive loading. *Materials Science and Engineering A*, 648, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.045>
- Gutierrez-Urrutia, I., & Raabe, D. (2012). Study of deformation twinning and planar slip in a TWIP steel by electron channeling contrast imaging in a SEM. *Materials Science Forum*, 702–703, 523–529. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.702-703.523>
- Haase, C., Ingendahl, T., Güvenç, O., Bambach, M., Bleck, W., Molodov, D. A., & Barrales-Mora, L. A. (2016). On the applicability of recovery-annealed Twinning-Induced Plasticity steels: Potential and limitations. *Materials Science and Engineering A*, 649, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.096>
- Hokka, M., Kuokkala, V. T., Curtze, S., Vuoristo, T., & Apostol, M. (2006).

- Characterization of strain rate and temperature dependent mechanical behavior of TWIP steels. *Journal De Physique. IV: JP, 134*, 1301–1306. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006134197>
- Idrissi, H., Renard, K., Ryelandt, L., Schryvers, D., & Jacques, P. J. (2010). On the mechanism of twin formation in Fe-Mn-C TWIP steels. *Acta Materialia*, *58*(7), 2464–2476. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.12.032>
- Karaman, I., Sehitoglu, H., Gall, K., & Chumlyakov, Y. I. (1998). On the deformation mechanisms in single crystal hadfield manganese steels. *Scripta Materialia*, *38*(6), 1009–1015. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(97\)00581-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00581-2)
- Kim, J. G., Baek, S. M., Lee, H. H., Chin, K. G., Lee, S., & Kim, H. S. (2018). Suppressed deformation instability in the twinning-induced plasticity steel-cored three-layer steel sheet. *Acta Materialia*, *147*, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.01.042>
- Klueh, R. L., Maziasz, P. J., & Lee, E. H. (1988). Manganese as an austenite stabilizer in FeCrMnC steels. *Materials Science and Engineering*, *102*(1), 115–124. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90539-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90539-3)
- Koyama, M., Akiyama, E., & Tsuzaki, K. (2012). Hydrogen embrittlement in a Fe-Mn-C ternary twinning-induced plasticity steel. *Corrosion Science*, *54*(1), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.09.022>
- Koyama, M., Sawaguchi, T., & Tsuzaki, K. (2018). Overview of Dynamic Strain Aging and Associated Phenomena in Fe – Mn – C Austenitic Steels, *58*(8), 1383–1395.
- Li, D. zhao, Wei, Y. hui, Liu, C. yue, Hou, L. feng, Liu, D. feng, & Jin, X. zhe. (2010). Effects of High Strain Rate on Properties and Microstructure Evolution of TWIP Steel Subjected to Impact Loading. *Journal of Iron and Steel Research International*, *17*(6), 67–73. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60116-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60116-1)
- Niendorf, T., Lotze, C., Canadinc, D., Frehn, A., & Maier, H. J. (2009). The role of monotonic pre-deformation on the fatigue performance of a high-manganese austenitic TWIP steel. *Materials Science and Engineering A*, *499*(1–2), 518–524. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.033>
- Park, K. T. (2013). Tensile deformation of low-density Fe-Mn-Al-C austenitic steels at ambient temperature. *Scripta Materialia*, *68*(6), 375–379. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.09.031>
- Pierce, D. T., Bentley, J., Jiménez, J. A., & Wittig, J. E. (2012). Stacking fault energy measurements of Fe-Mn-Al-Si austenitic twinning-induced plasticity steels. *Scripta Materialia*, *66*(10), 753–756. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.050>
- Saleh, A. A., Pereloma, E. V., Clausen, B., Brown, D. W., Tomé, C. N., & Gazder, A. A. (2013). On the evolution and modelling of lattice strains during the cyclic loading of TWIP steel. *Acta Materialia*, *61*(14), 5247–5262. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.05.017>
- Seol, J. B., Jung, J. E., Jang, Y. W., & Park, C. G. (2013). Influence of carbon content on the microstructure, martensitic transformation and mechanical properties in austenite/-martensite dual-phase Fe-Mn-C steels. *Acta Materialia*, *61*(2), 558–578. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.078>
- Song, R., Cai, C., Liu, S., Feng, Y., & Pei, Z. (2017). ScienceDirect Stacking fault energy and compression deformation behavior of ultra-high manganese steel. *Procedia Engineering*, *207*, 1809–1814. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.943>

- Staalman, D. F. J., Steel, T., Calculation, O. S. T., & Staalman, D. F. J. (2015). The funnel model for accurate slab temperature in reheating furnaces, (May). <https://doi.org/10.1051/metal>
- Suzuki, S., Yoshimura, T., Kwon, E. P., Fujieda, S., Shinoda, K., & Sato, S. (2011). Characteristic microstructure of polycrystalline Fe-Mn-C alloys deformed by tensile test. *Procedia Engineering*, 10, 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.017>
- Ueji, R., Tsuchida, N., Terada, D., Tsuji, N., & Tanaka, Y. (2008). Tensile properties and twinning behavior of high manganese austenitic steel with fine-grained structure, 59, 963–966. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.06.050>
- Zan, N., Ding, H., Guo, X., Tang, Z., & Bleck, W. (2015). Effects of grain size on hydrogen embrittlement in a Fe-22Mn-0.6C TWIP steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(33), 10687–10696. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.112>

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	BURAK BAL
Proje No:	118M448
Proje Başlığı:	Farklı Mikroyapısal Değişkenlerin Yüksek Manganlı Fe-33Mn Çeliğinin Pekleşme Davranışına Etkilerinin Araştırılması
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	KAYSERİ ABDULLAH GÜL Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2018 - 01/09/2019
Onaylanan Bütçe:	28550.0
Harcanan Bütçe:	27750.0
Öz:	<p>İleri yüksek mukavemetli çelikler sahip olmuş oldukları yüksek mukavemet, yüksek süneklik ve yüksek pekleşme kabiliyeti gibi üstün özellikler sayesinde otomotiv, demiryolu, savunma sanayi uygulamalarında ve yapı endüstrisi gibi pek çok farklı alanda tercih edilmektedir. Bu projede yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler sınıfından olan yüksek manganlı çeliklerin pekleşme davranışına etki eden farklı mikroyapısal değişkenlerin etkisi kristal plastisite modellemesi yoluyla araştırılmıştır. Öncelikle östenitik Fe-33Mn çeliğinin 1x10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> gerinim hızındaki malzeme davranışının, tane sayısı, kristal yapı ve malzeme dokusu gibi faktörleri girdi olarak kullanarak kristal plastisite modellemesi yapılmıştır ve pekleşme sabitleri bulunmuştur. Daha sonra bulunan pekleşme sabitleri sabit tutularak, malzeme dokusu, hız gradyanı, gerinim artışı ve etkileşim tensörü cinsi gibi tek bir mikroyapısal girdi değiştirilerek bu girdilerin malzemenin toplam pekleşme davranışına etkisi açığa çıkarılmıştır. Spesifik olarak, proje önerisinin üzerine konularak farklı karbon konsantrasyonlarının pekleşme sabitlerine olan etkisi de hesaplanmıştır. Bahsi geçen çeliğin oda sıcaklığında ve düşük gerinim hızındaki malzeme davranışı proje yürütücüsünün daha önceki çalışmalarında çekme testi yardımı ile makro ölçekte gözlemlenmiştir. Fe-33Mn çeliğinin seçilme nedeni, yüksek manganlı östenitik çeliklerinin sahip olduğu çok yüksek pekleşme kapasitesi ile birlikte yüksek süneklik değerleri ve aşınma direnci sayesinde uzay-havacılık, otomotiv, savunma sanayi gibi öncül sektörlerde yer alması ve önümüzdeki yıllarda çok daha fazla miktarda yer alacağına inanılmasıdır. Bu konunun seçilme nedeni ise, bugüne kadar yapılan kristal plastisite çalışmalarında deneysel davranışı modelleyebilmek için genelde tek tip malzeme dokusu, hız gradyanı, gerinim artışı ve etkileşim tensörü kullanılmıştır. Bu doğru bir yaklaşım olmasına rağmen bu girdilerin toplam malzeme pekleşme davranışına etkisi bilinmemektedir. Bu kapsamda kristal plastisite modellemeleri Visco-Plastic Self-Consistent (VPSC) algoritması yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Fe-33Mn çeliğinin oda sıcaklığında ve düşük gerinim hızındaki tek eksenli deformasyon davranışı voce tipi pekleşme teorisi ile modellenmiştir ve bulunan Voce parametreleri bütün simülasyonlarda aynı kalmıştır. Böylelikle değişik mikroyapısal değişkenlerin Fe-33Mn çeliğinin pekleşme davranışına etkileri aynı pekleşme teorisi ile açığa çıkarılmıştır. Proje sonucunda 1 adet bilimsel makale, etki faktörü yüksek bir dergiye (EF=4.1) gönderilmiş ve proje bitim raporu teslim tarihi itibarı ile hakem değerlendirmesindedir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Yüksek mukavemetli çelikler, Mikroyapı, Kristal Plastisite, Pekleşme, Modelleme
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet