


NİKEL NANOTELLER İÇİN MÜHENDİSLİK PARAMETRELERİ ÖLÇEKLENDİRME KURALI

Yunus Onur YILDIZ *

Alınma: 14.01.2021; düzeltme: 10.03.2021; kabul: 01.04.2021

Öz: Bu çalışmanın ana konusunu, son yıllarda fiziksel özellikleriyle araştırmacıların ilgi odağında olan nikel nanoteller oluşturmaktadır. Tek kristalli nikel nanotellerin mekanik özellikleri moleküler dinamik simülasyonları vasıtasıyla incelenmiş ve literatürdeki deneysel çalışmalardan da faydalanılarak mühendislik parametreleri (elastisite modülü, akma gerilmesi ve maksimum gerilme) için ölçeklendirme kuralı geliştirilmiştir. Ayrıca nikel nanotellerin deformasyon esnasındaki kristal yapısının değişimi ortak komşu analizi ile ortaya konmuştur. Bu çalışmanın en önemli hedefi; nikel nanoteller özelinde çok ölçekli modelleme için literatüre ölçeklendirme kuralı kazandırmaktır.

Anahtar Kelimeler: Nikel nanoteller, Moleküler dinamik, Çok ölçekli modelleme

Scaling Law of Engineering Parameters for Nickel Nanowires

Abstract: The nickel nanowires which have been the focus of researchers' attention for their physical properties in recent years are the main subject of this study. The mechanical properties of the single crystal nickel nanowires have been investigated with the help of molecular dynamics simulations and scaling law has been developed for engineering parameters (elasticity modulus, yield stress and maximum stress) by using earlier published experimental studies. In addition, the evolution of crystal structure during the deformation of nickel nanowires was examined by common neighbor analysis. The most important goal of this study is to develop a scaling law for multi-scale modeling of the nickel nanowires.

Keywords: Nickel nanowires, Molecular dynamics, Multiscale modelling

* Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 57000, Merkez / Sinop.
İletişim Yazarı: Yunus Onur YILDIZ (yildizy@sinop.edu.tr, yunusonur@gmail.com)

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile nano boyutta sentezlenen malzemeler günlük hayatımıza girmeye başladı. Nano malzemeler makro boyuttaki malzemelerden farklı özellikler sergilemekte ve bu sayede sağlık, tekstil ve elektronik endüstrileri başta olmak üzere gün geçtikçe kendine daha fazla uygulama alanı bulmaktadır (Abdullaeva, 2017). Nano malzemelerin avantajlarından ve potansiyelinden iyi bir şekilde yararlanabilmek için bu yapıların özellikleri ve karakteristiği detaylı olarak incelenmelidir.

Uygulama alanlarına bağlı olarak bu malzemelerin bazı özellikleri önem kazanmaktadır. Örneğin; bir basınç sensörü olarak kullanılan çok duvarlı karbon nanotüpün basınca gösterdiği elektriksel tepkinin yanında, mekanik dayanımı da önem arz etmektedir (Kulshrestha ve diğ., 2017). Uygulama alanına yönelik olarak bu malzemelerin özelliklerinin tespiti bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Nano malzemelerin özelliklerini tespit amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar gerek kullanılan teçhizatların pahalılığı gerekse işlemlerin zahmetli olması nedeniyle oldukça zordur ve deneyim gerektirmektedir (Peng ve diğ., 2012, 2013). Bu nedenle, sayısal modelleme ile nano malzemelerin özelliklerinin ve davranışlarının araştırılması daha çok tercih edilmekte ve moleküler dinamik simülasyonları bu yapıların incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Nano malzemelerden biri olan nikel nanoteller hareket sensörü (Wang ve diğ., 2018), biyoanaliz (Pinheiro ve diğ., 2013) ve pil teknolojisinde (Su ve diğ., 2012) kendine yer bulmaktadır. Daha önceden de belirtildiği gibi bu malzemelerin uygulama yerlerine göre mekanik dayanımı önem kazanmaktadır. Literatürde nanotellerin farklı yükleme, sıcaklık ve şekil değiştirme oranları altındaki mekanik davranışları incelenmiştir (Park, Gall ve Zimmerman, 2006; Dupont ve Sansoz, 2009; Wang, Yi ve Fan, 2013). Mekanik açıdan bakıldığında; malzemenin dayanımında boyut önemli bir rol oynamaktadır. Bunun en büyük nedeni yüzey alanı/hacim oranı olup, bu oran arttıkça yüzey enerjisi daha aktif hale gelmektedir (Diao, Gall ve Dunn, 2004; Wu, 2006; Molleman ve Hiemstra, 2018). Diğer bir kriter olan yükleme hızı da malzemenin mekanik parametrelerini etkilemektedir.

Bu çalışmada farklı yüzey alanı/hacim oranına ve yükleme hızına göre nikel nanotellerin elastisite modülleri moleküler dinamik yöntemi ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar (Peng ve diğ., 2012, 2013) ile yapılan moleküler dinamik analizler arasında bir köprü kurmak amacıyla bir ölçeklendirme kuralı ortaya konmuştur. Bu ölçeklendirme kuralı sayesinde nikel nanotellin farklı boyut ve yükleme hızlarına bağlı olarak elastisite modülünü elde etmek mümkündür. Ayrıca bu çalışma çok ölçekli modelleme için bir temel oluşturmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD

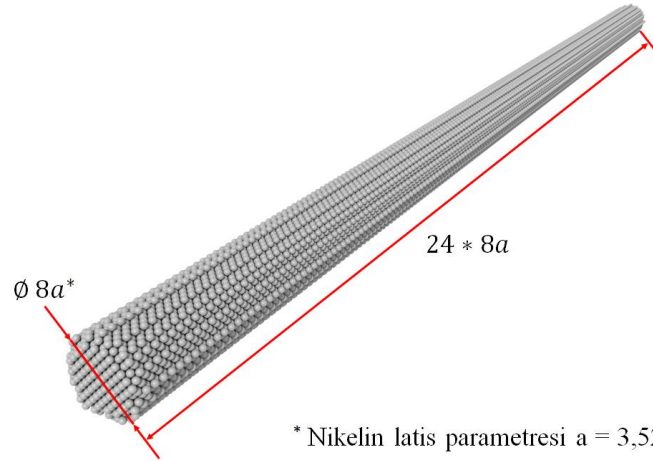
Deneysel çalışmalardaki (Peng ve diğ., 2012, 2013) en/boy oranına uyması amacıyla en boy oranı 1/24 olacak şekilde 3 farklı yüzey alanı/hacim oranına göre <111> oryantasyonundaki tek kristal yapısına sahip atomistik modeller hazırlanmıştır. Atomistik modellere ilişkin geometrik ifadeler ve modellerin barındırdığı atom sayıları Tablo 1’de verilmiştir. Burada verilen tüm ölçüler; Nikel elementinin latis parametresinin katları şeklinde verilmiştir. Şekil 1’de ise örnek bir atomistik model verilmiştir.

Tablo 1. Atomistik modellerin geometrik parametreleri

Model Adı	Çap (a*)	Boy (a*)	A/V (a*)
106 nm**	295	8892	1,09E-03
104 nm**	301	9375	1,11E-03
16a	16	3840	2,55E-01
16a	16	3840	2,55E-01
16a	16	3840	2,55E-01
12a	12	2880	3,40E-01
12a	12	2880	3,40E-01
12a	12	2880	3,40E-01
8a	8	1920	5,10E-01
8a	8	1920	5,10E-01
8a	8	1920	5,10E-01

* Nikel elementinin latis parametresi $a = 3,52 \text{ \AA}$ (Ölçüler Nikel elementinin latis parametresi cinsinden verilmiştir.)

** Literatürdeki çalışmalardan alınan değerler [4]



* Nikelin latis parametresi $a = 3,52 \text{ \AA}$

Şekil 1:
Model 8a'nın geometrisi

Analizler klasik moleküler dinamik metodu kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, açık kaynak kod olan LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) (Plimpton, 1995) programı kullanılmıştır. Analizler esnasında nikel atomları arasındaki etkileşim gömülü atom metodu (EAM – The Embedded Atomic Method) ile tanımlanmıştır. Bu metotta toplam potansiyel enerji, atom elektron yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak gömme (embedding) enerjisinden ve ikili etkileşim (pair-wise interaction) enerjisinden (Daw ve Baskes, 1984; Foiles, Baskes ve Daw, 1986) oluşmaktadır.

$$E_i = f \left(\sum_{j \neq i} \rho(r_{ij}) \right) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \varphi(r_{ij}) \quad (1)$$

burada E toplam enerji, f gömme enerji fonksiyonu, ρ atom elektron yoğunluğu, φ ikili potansiyel etkileşim ve r_{ij} i ve j atomları arasındaki mesafedir.

Simülasyonlar sırasında zaman aralığı olarak 1 femtosaniye seçilmiş ve simülasyon kutusu her yönde periyodik olacak şekilde sınır şartları belirlenmiştir. Sistemin potansiyel enerjisini en aza indirmek amacıyla minimizasyon işlemi yapılmıştır. Daha sonrasında sistem 1 nanosaniye süresince NPT (izotermal – izobarik) topluluk integrasyonu ile 300 K’de termalize edilmiştir. Termalizasyon işleminden sonra atomistik modeller y-ekseni doğrultusunda 3 farklı çekme hızında (0,0001, 0,0005 ve 0,001 ps⁻¹) NVT kanonikal topluluk yaklaşımı kullanılarak analizleri yapılmış ve elastisite modülleri tespit edilmiştir. Burada çekme hızları statik test aralığından çok yüksek olmaktadır. Bunun nedeni; çok küçük zaman adımında yapılan analizler olup, bu durum moleküler dinamik yönteminin bir dezavantajı olarak görülmektedir. Büyük zaman adımlarında yapılan analizler büyük hatalara yol açarken, istenen zaman zarfında yapılacak analizler ise; işlem gücü kısıtlamasına takılmaktadır. Analizler sırasında virial gerilme (Zhou, 2003; Thompson, Plimpton ve Mattson, 2009) teoremi (bkz Eş. 2) kullanılarak her bir adım aralığındaki gerilmeler hesaplanmıştır.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \left(-m_i \dot{\mathbf{u}}_i \otimes \dot{\mathbf{u}}_i + \frac{1}{2} \sum_{j(\neq i)} \mathbf{r}_{ij} \otimes \mathbf{f}_{ij} \right) \quad (2)$$

burada σ virial gerilme, V hacim, m i parçasının kütlesi, \mathbf{u}_i i ’nci parçanın referans pozisyona olan relative uzaklığı, \mathbf{f}_{ij} kuvvet vektörü ve \mathbf{r}_{ij} i ve j atomları arasındaki uzaklıktır.

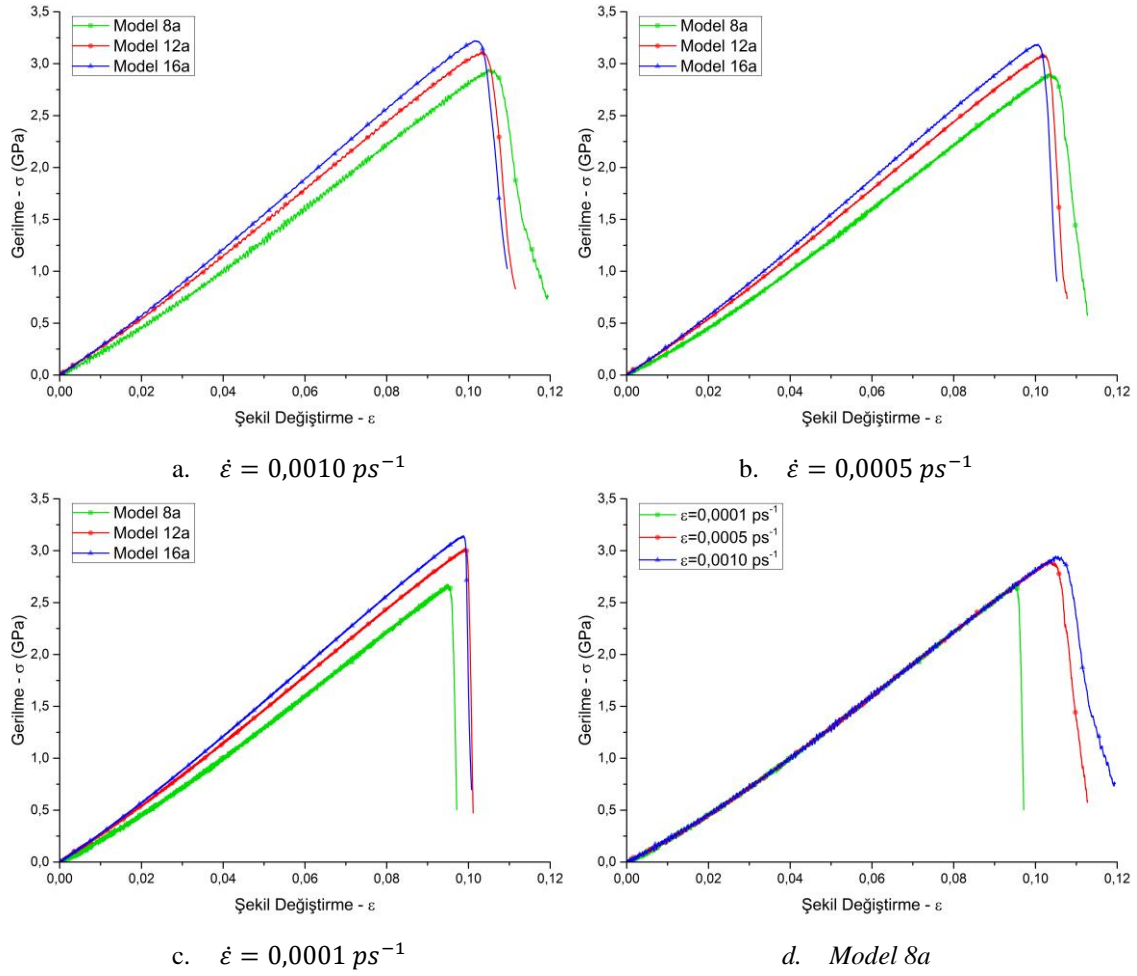
Ölçeklendirme kuralını ortaya koymak için yapılan analizlerden elde edilen mühendislik parametreleri, yüzey alanı/hacim oranına ve çekme hızına bağlı olarak 3-boyutlu bir grafik haline getirilmiştir. Bu grafiğe makro boyuta çıkmak için literatürde yer alan ve 1/24 en boy oranına uygun olan iki adet deneysel sonuç (Peng ve diğ., 2012) da eklenmiştir. Daha sonrasında sonuçlar arasında matematiksel bir ilişki kurmamızı sağlayan ve bu matematiksel ilişkiyi polinom şeklinde sunan “poly23” yüzey uydurma tekniği kullanılmıştır. Bu sayede yüzey alanı/hacim oranı (A/V) ve şekil değiştirme hızına ($\dot{\epsilon}$) bağlı elastisite modülü, akma gerilmesi ve maksimum gerilme gibi mühendislik parametreleri ($F_{(E,\sigma_y,\sigma_u)}$) elde edilmiştir (Bknz. Eş. 3).

$$F_{(E,\sigma_y,\sigma_u)} = f(A/V, \dot{\epsilon}) \quad (3)$$

Malzemenin deformasyon mekanizmasını incelemek ve kristal yapısındaki değişimlerin şekil değişimine bağlı değişimini ortaya koymak için uyarlanabilir ortak komşu analizi (adaptive Common Neighbor Analysis – aCNA) OVITO yazılımı (Stukowski, 2010, 2012) kullanılarak yapılmıştır. Bu analizin sonucunda farklı atom dizilimindeki atomlar şu şekilde renklendirilmiştir; yüzey merkezli kübik (YMK) yeşil renk, hacim merkezli kübik (HMK) mavi renk, sıkı düzen hekzagonal (SDH) kırmızı renk, sınıflandırılmayan atomlar (yüzey atomları gibi) ise gri renk.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

Belirlenen geometrilerde hazırlanan atomistik modeller farklı çekme hızında zorlanarak, gerilme – şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir (Bknz. Şekil 2). Gerilme – şekil değiştirme grafiği nikel nanotel özelinde incelendiğinde çekme hızının elastisite modülüne belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Buna karşılık çekme hızı arttıkça yapının daha erken deforme olmaya başladığı, “Model 8a” için Şekil 2.d’de verilen grafikten net bir şekilde anlaşılmaktadır. Bu durum diğer atomistik modeller için de aynı şekildedir. Ayrıca malzemenin yüzey alanı/hacim oranının azalması ile elastisite modülü ve maksimum gerilmeye bir artmanın olduğu grafiklerden anlaşılmıştır.



Şekil 2:
Gerilme – şekil değiştirme grafikleri

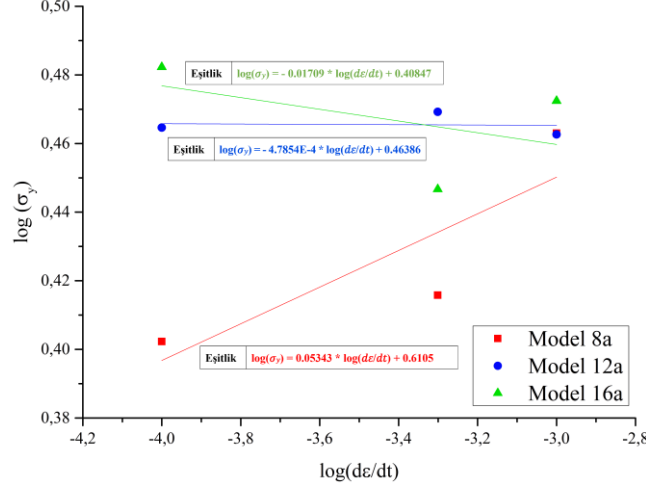
Tablo 2. Mühendislik parametreleri

Model Adı	A/V (a*)	Strain rate ($\dot{\epsilon}$)	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Akma Gerilmesi (σ_y) (GPa)	Maksimum Gerilme (σ_u) (GPa)
106 nm**	1,09E-03	1,00E-15	73,4350	2,1100	2,4780
104 nm**	1,11E-03	1,00E-15	94,4720	2,2900	2,5210
16a	2,55E-01	1,00E-04	33,8348	3,0359	3,1425
16a	2,55E-01	5,00E-04	34,7738	2,7970	3,1873
16a	2,55E-01	1,00E-03	34,3142	2,9678	3,2211
12a	3,40E-01	1,00E-04	32,2820	2,9150	3,0214
12a	3,40E-01	5,00E-04	32,4186	2,9460	3,0824
12a	3,40E-01	1,00E-03	32,5556	2,9017	3,1139
8a	5,10E-01	1,00E-04	30,4207	2,5251	2,6761
8a	5,10E-01	5,00E-04	30,8437	2,6050	2,9101
8a	5,10E-01	1,00E-03	30,2741	2,9040	2,9473

* Nikel elementinin latis parametresi a = 3,52 Å

** Literatürdeki çalışmalardan alınan değerler [4]

Grafikten elde edilen sonuçlara göre elde edilen mühendislik parametrelerine (Elastisite Modülü, Akma ve Maksimum Gerilme) Tablo 2’de yer verilmiştir. Oluşturan atomistik modellerin şekil değiştirme hızına duyarlılığı Şekil 3’de verilmiştir. Şekil 3’de edilen grafiklerin eşitliklerine baktığımızda malzemenin boyutunun artması ile eğim ifadesinin azaldığı görülmektedir. Burada malzemenin boyutunun büyümesi ile birlikte şekil değiştirme duyarlılık katsayısı azalmaktadır.



Şekil 3:

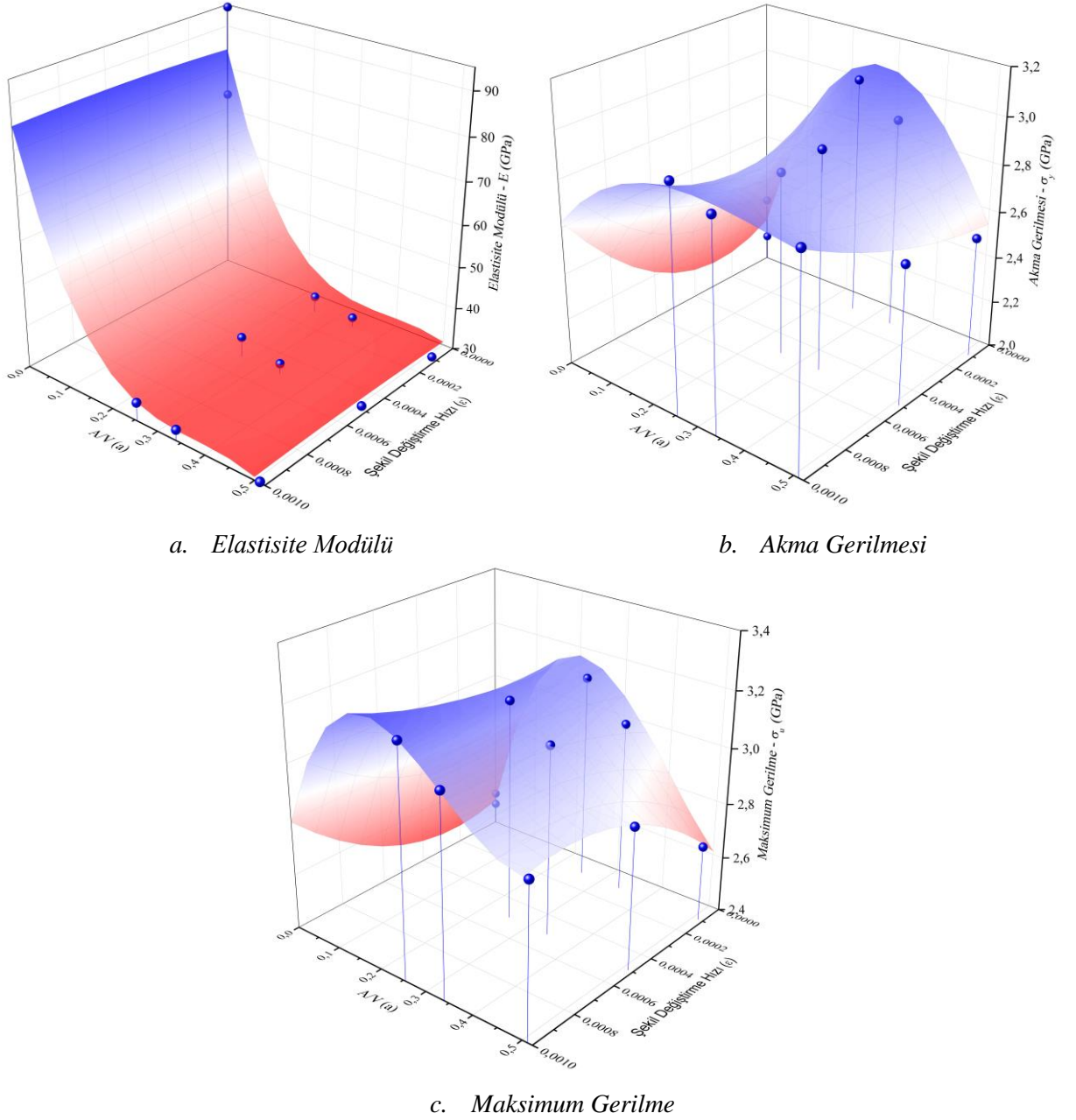
Şekil değiştirme hızı duyarlılığı

Tablo 2’deki veriler ışığında MATLAB (Matrix Laboratory) yardımıyla Eş. 3’de verilen $f(A/V, \dot{\epsilon})$ yüzey denklemi her mühendislik parametresi için iki değişkenli polinom şeklinde elde edilir. Tablo 2’ye göre elde edilen 3-Boyutlu yüzey grafikleri Şekil 4’de verilmiştir. Bu grafiklerde verilen noktalar literatürdeki deneysel sonuçlar (Peng ve diğ., 2012, 2013) ve LAMMPS Moleküler Dinamik Simülasyon programı ile elde edilen sonuçlardır. Bu sonuçlara göre elde edilen yüzeyler ise; o mühendislik parametresinin A/V - yüzey alanı/hacim oranına ve $\dot{\epsilon}$ - şekil değiştirme hızına göre değişimini göstermektedir. Buna göre; “poly23” yüzey uydurma tekniği ile elde edilen iki değişkenli polinomlar Eş. 4’te, polinomlara ait katsayılar ise; Tablo 3’de verilmiştir.

$$F_{(E, \sigma_y, \sigma_u)} = f(A/V, \dot{\epsilon}) = a + b * (A/V) + c * \dot{\epsilon} + d * (A/V)^2 + e * (A/V) * \dot{\epsilon} + f * \dot{\epsilon}^2 + g * (A/V)^3 + h * (A/V)^2 * \dot{\epsilon} + i * (A/V) * \dot{\epsilon}^2 \quad (4)$$

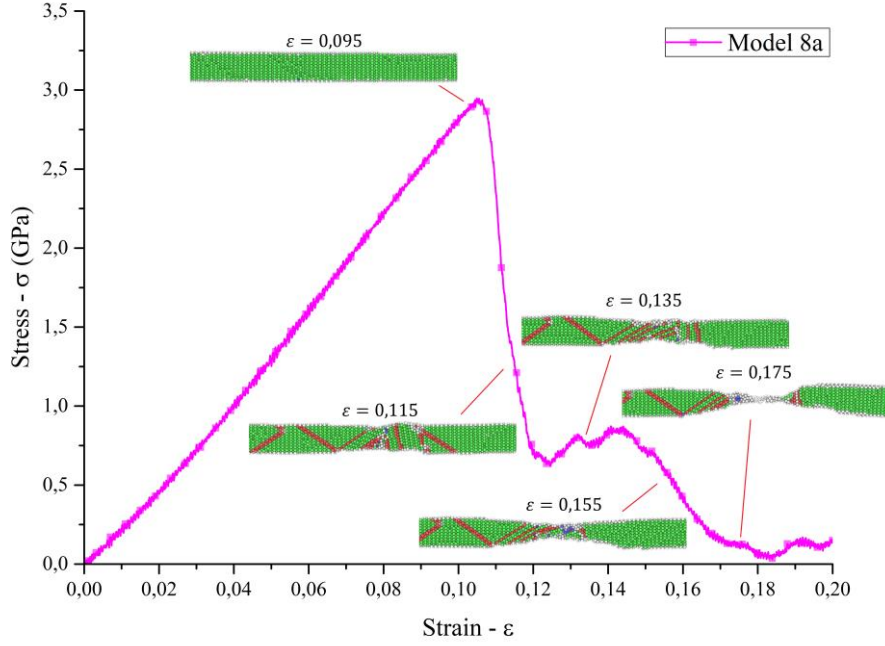
Tablo 3. Eş. 4’deki mühendislik parametreleri için verilen polinomun katsayıları

Katsayılar	Elastisite Modülü (E)	Akma Gerilmesi (σ_y)	Maksimum Gerilme (σ_u)
a	84,41	2,19	2,49
b	-413,30	6,96	7,56
c	3574,00	-551,20	-245,60
d	1079,00	-15,10	-24,95
e	-1075,00	-2848,00	337,80
f	-2,75E+06	9,84E+05	5,48E+05
g	-934,10	5,08	20,64
h	-4795,00	8387,00	3721,00
i	1,91E+06	-1,49E+06	-2,13E+06



Şekil 4:
Mühendislik parametrelerinin A/V ve şekil değiştirme hızına ($\dot{\epsilon}$) göre değişimi

Bu çalışmalara ilave olarak deformasyona bağlı malzemenin kristal yapısındaki değişim aCNA analizi ile incelenmiştir (Bknz. Şekil 5). Buna göre; yapıda gerilmenin artması ile yüzeyden malzemenin merkezine doğru dislokasyonların çekirdeklendiği, kopma öncesi yapıda lokal bir bölgede sünek davranış gözlemlenmiştir. Sünek davranış gösteren bölgede deformasyonun artması ile birlikte tanımlanamayan atom yapısında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise; bölgenin artan yükleme ile amorflaşma göstermesi olup, bu durum literatürdeki çalışmalarla (Yildiz ve Kirca, 2017; Erturk, Yıldiz ve Kirca, 2019) sabittir.



Şekil 5:

Model 8a'nın gerilme-şekil değiştirme grafiği ve ortak komşu analiz sonuçları ($\dot{\epsilon} = 0,001 ps^{-1}$)

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada nikel nanoteller için en/boy oranı 1/24 olan üç farklı atomistik model oluşturulup, bu atomistik modellerin çekme yükü altındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Daha sonrasında aynı en/boy oranına sahip literatürdeki nikel nanotellerin deneysel sonuçları da kullanılarak, bu malzemelerin mühendislik parametreleri (elastisite modülü, akma gerilmesi, maksimum gerilme) için şekil değiştirme hızına ve yüzey alanı/hacim oranına bağlı olarak ölçeklendirme kuralı ortaya konmuştur. Buna ilave olarak; yükleme altındaki krisal yapısındaki değişim, uyarlanabilir ortak komşu analizi ile incelenmiştir.

Çekme analizlerinde çekme hızının elastisite modülüne belirgin bir etkisinin olmadığı, sadece akma ve maksimum gerilmeyi etkilediği görülmüştür. Malzemenin boyutunun artması (yüzey alanı/hacim oranının azalması) ile elastisite modülü ve maksimum gerilmelerde artmanın olduğu grafiklerden görülmüştür. Elde edilen sonuçların literatürdeki deneysel sonuçlarla birlikte değerlendirilmesi sonucu ortaya konan ölçeklendirme kuralı sayesinde çok ölçekli modelleme için teorik bir altyapı sağlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda önerilen ölçeklendirme kuralı kullanılarak çok ölçekli modelleme için nümerik bir modelleme yapılması düşünülmektedir. Ayrıca aynı teknik kullanılarak farklı malzeme ve boyuttaki nanotellerin ölçeklendirme kuralı ortaya konabilir ve bu ölçeklendirme kuralları için bir standardizasyona gidilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmada yer alan kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadır.

YAZAR KATKISI

Yunus Onur YILDIZ çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analiz ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması ve fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi dahil çalışmanın her yönünden sorumludur.

KAYNAKLAR

1. Abdullaeva, Z. (2017) *Nanomaterials in daily life: Compounds, synthesis, processing and commercialization*, Springer International Publishing, A.B.D.
2. Daw M.S., Baskes M.I. (1984) Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals, *Phys. Rev. B.*, 29, 6443–53. doi:10.1103/PhysRevB.29.6443
3. Diao J., Gall K., Dunn M.L. (2004) Atomistic simulation of the structure and elastic properties of gold nanowires, *J. Mech. Phys. Solids*, 52, 1935–62. doi:10.1016/j.jmps.2004.03.009
4. Dupont V., Sansoz F. (2009) Molecular dynamics study of crystal plasticity during nanoindentation in Ni nanowires, *J. Mater. Res.*, 24, 948–56. doi:10.1557/jmr.2009.0103
5. Ertürk A. S., Yıldız Y. O. ve Kırca M. (2019) Mechanical Performance ve Morphological Evolution of Heat-Treated Nanoporous Gold: A Molecular Dynamics Study, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 108, 15-21. doi:10.1016/j.physe.2018.11.028
6. Foiles S.M., Baskes M.I., Daw M.S. (1986) Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys, *Phys. Rev. B.*, 33, 7983–91. doi:10.1103/PhysRevB.33.7983
7. Kulshrestha K., Thakur B., Verma Y.P., Jindal P. (2017) Development of Small Pressure Sensing Unit using Nano-Materials, *Mater. Today Proc.*, vol. 4, p. 10422–6. doi:10.1016/j.matpr.2017.06.392
8. Molleman B., Hiemstra T. (2018) Size and shape dependency of the surface energy of metallic nanoparticles: Unifying the atomic and thermodynamic approaches, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 20, 20575–87. doi:10.1039/c8cp02346h
9. Park H.S., Gall K., Zimmerman J.A. (2006) Deformation of FCC nanowires by twinning and slip, *J. Mech. Phys. Solids*, 54, 1862–81. doi:10.1016/j.jmps.2006.03.006
10. Peng C., Zhong Y., Lu Y., Narayanan S., Zhu T., Lou J. (2013) Strain rate dependent mechanical properties in single crystal nickel nanowires, *Appl. Phys. Lett.*, 102, 083102. doi:10.1063/1.4793481
11. Peng C., Ganesan Y., Lu Y., Lou J. (2012) Size dependent mechanical properties of single crystalline nickel nanowires, *J. Appl. Phys.*, 111, 063524. doi:10.1063/1.3698625
12. Pinheiro P.C., Sousa C.T., Araújo J.P., Guiomar A.J., Trindade T. (2013) Functionalization of nickel nanowires with a fluorophore aiming at new probes for multimodal bioanalysis, *J. Colloid Interface Sci.*, 410, 21–6. doi:10.1016/j.jcis.2013.07.065
13. Plimpton S. (1995) Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics, *J. Comput. Phys.*, 117, 1–19. doi:10.1006/jcph.1995.1039

14. Su D., Kim H.S., Kim W.S., Wang G. (2012) Mesoporous nickel oxide nanowires: Hydrothermal synthesis, characterisation and applications for lithium-ion batteries and supercapacitors with superior performance, *Chem - A Eur. J.*, 18, 8224–9. doi:10.1002/chem.201200086
15. Thompson A.P., Plimpton S.J., Mattson W. (2009) General formulation of pressure and stress tensor for arbitrary many-body interaction potentials under periodic boundary conditions, *J. Chem. Phys.*, 131, 154107. doi:10.1063/1.3245303
16. Wang W.D., Yi C.L., Fan K.Q. (2013) Molecular dynamics study on temperature and strain rate dependences of mechanical tensile properties of ultrathin nickel nanowires, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed)*, 23, 3353–61. doi:10.1016/S1003-6326(13)62875-7
17. Wang S., Chen K., Wang M., Li H., Chen G., Liu J., et al. (2018) Controllable synthesis of nickel nanowires and its application in high sensitivity, stretchable strain sensor for body motion sensing, *J. Mater. Chem. C.*, 6, 4737–45. doi:10.1039/C7TC05970A
18. Wu H.A. (2006) Molecular dynamics study on mechanics of metal nanowire, *Mech. Res. Commun.*, 33, 9–16. doi:10.1016/j.euromechsol.2005.11.008
19. Yıldız Y. O. ve Kırca M. (2017) Effects of Ultrathin Coating on the Tensile Behavior of Nanoporous Gold, *Journal of Applied Physics*, 122, 084305. doi:10.1063/1.5000368