DEU FMD 28(83) (2026) 191-197

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi
Dokuz Eylul University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering
Elektronik/Online ISSN: 2547-958X

ARAŞTIRMA MAKALESI / RESEARCH ARTICLE

Düz Ovalama Kalıbı ile Diş Çekme İşleminde Sıfır Ayarının ve Operasyon Hızının Ürün Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi

Investigation of Zero Adjustment and Rolling Speed Effects on Product Quality in Flat Die Thread Rolling Process

Oğuz Ateş *, **Halit Gün**

Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Uşak, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: atesoguz45@gmail.com

Öz

Bu çalışmada, düz kalıp yöntemiyle gerçekleştirilen diş ovalama sürecinde sıfır ayarının doğruluğu ile operasyon hızının ürün kalitesi üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal analizler yoluyla araştırılmıştır. 42CrMo4 malzemesinden üretilmiş M30 cıvatalar üzerinde yürütülen deneyler ile Simufact yazılımında gerçekleştirilen sonlu elemanlar simülasyonları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, sıfır ayarındaki küçük sapmaların dahi diş formunda bozulmalara yol açtığını; ayrıca yüksek hızlarda kalıplar arasında senkronizasyonun bozulmasıyla çapaklanma ve yüzey düzensizliklerinin arttığını göstermiştir. Sonuçlar, diş ovalama prosesinde kaliteyi artırmak için hassas ayar ve optimum hız seçiminin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Diş Ovalama, Simülasyon, Sonlu Elemanlar, Sıfır Ayarı, Operasyon Hızı*

Abstract

In this study, the effects of zero adjustment accuracy and operation speed on product quality were investigated through experimental and numerical analyses in the flat die thread rolling process. Experiments were conducted on M30 bolts made of 42CrMo4 steel, and corresponding finite element simulations were performed using Simufact software. The findings revealed that even slight deviations in the zero adjustment caused distortions in the thread profile. Moreover, at higher operation speeds, the loss of synchronization between the dies led to increased burr formation and surface irregularities. The results emphasize the critical importance of precise adjustment and the selection of an optimal operation speed to improve thread quality in the flat die rolling process.

Keywords: *Thread Rolling, Numerical Simulation, Finite Elements, Zero Setting, Process Speed*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Fasteners are widely used in industrial applications such as machinery, automotive, construction, and aerospace due to their load-bearing capacity, ease of assembly, and disassembly. Threaded elements like bolts and screws stand out for their high mechanical strength and assembly convenience. The main criteria in the production of such elements are high dimensional accuracy, superior surface quality, low production cost, and high efficiency [1].

Although traditional machining methods have been used in the production of threaded surfaces for many years, they have disadvantages such as material waste and long production time. Therefore, in recent years, chipless manufacturing methods such as cold forming—and especially flat die thread rolling—have gained prominence[2]. Flat die thread rolling plastically deforms the workpiece to generate the thread profile, which not only eliminates material loss but also enhances mechanical strength through grain refinement and increased dislocation density [3].

During the rolling process, the workpiece is compressed between two flat dies, one stationary and one moving, transferring the thread form to the surface by linear motion. This process significantly improves tensile, fatigue, and torsional strength, and increases surface hardness [4]. These positive properties for the screw thread can be achieved by corretly selecting and controlling the process parameters. In this context, the accuracy of the zero setting and the suitability of the operating speed play a critical role in the dimensional accuracy, surface quality, and repeatability of the produced threads [5].

In conventional production lines, zero adjustment is generally based on operator experience, which may cause quality variations and delays. Simulation-assisted manufacturing, especially Finite Element Method (FEM)-based software, has become a powerful tool to analyze the effects of process parameters on product quality [6,7]. FEM enables the prediction of deformation distribution, forming forces, plastic zones, contact pressures, and temperature changes [3], reducing the number of physical trials and improving production efficiency.

Numerous studies have utilized FEM for process optimization, covering tool life extension, fatigue behavior, microstructure control, and force prediction [5–13]. Literature emphasizes that rolling speed and pass number significantly affect mechanical properties and surface quality [14–17]. High rolling speeds reduce friction but may increase forming forces and coarsen grain structure. Likewise, improper zero adjustment or excessive speed may lead to defects such as burr formation, profile distortion, and slippage.

Despite extensive research on thread rolling, studies focusing on the combined influence of zero adjustment and rolling speed—supported by both experimental and numerical approaches—remain limited. This study aims to fill this gap by investigating

DOI: https://doi.org/10.21205/deufmd.2026288304

Geliş Tarihi / Received: 20.07.2025
Kabul Tarihi / Accepted: 07.08.2025

these two parameters in a flat die thread rolling process for M30 bolts. Both physical experiments and FEM-based simulations using Simufact were conducted under varying speed conditions.

Materials and Methods

Thread rolling experiments were performed on M30×200 mm bolts made of 42CrMo4 steel, following ISO 4014 standards. Zero adjustment was applied using a controlled alignment procedure. Numerical simulations were developed using Simufact Forming 2024.3, incorporating an elastic–plastic material model and a refined hexahedral mesh with remeshing capabilities. Seven different die speeds (353–3785 mm/s) were analyzed. Contact behavior was modeled using the Amontons-Coulomb law with a friction coefficient of μ = 0.3 [18, 19, 20, 21].

Findings and Industrial Significance

Experimental and numerical findings revealed that even minor zero adjustment deviations caused thread profile distortions and burr formation. Additionally, speeds exceeding 1802 mm/s resulted in loss of die synchronization, excessive material folding, and severe surface defects. Both approaches exhibited strong correlation, confirming the reliability of the FEM model.

The study highlights the necessity of precise zero adjustment and controlled speed management to ensure dimensional accuracy and surface integrity. For M30 bolts, the optimal operating speed should not exceed 1500 mm/s. These findings provide a practical basis for process standardization, enabling repeatable, defect-free production and improved industrial competitiveness.

1. Giriş

Bağlantı elemanları, makine, otomotiv, inşaat ve havacılık gibi pek çok endüstriyel uygulamada yük taşıma, birleştirme ve sökülebilirlik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle cıvata ve vida gibi dişli elemanlar hem montaj kolaylığı hem de yüksek mekanik dayanım özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Bu tür elemanların üretiminde hedeflenen başlıca kriterler; yüksek boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi, düşük üretim maliyeti ve yüksek üretim hızıdır [1].

Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri, dişli yüzeylerin üretilmesinde uzun yıllardır kullanılmakla birlikte, malzeme kaybı ve üretim süresi açısından bazı dezavantajlar taşımaktadır. Bu nedenle son yıllarda, talaşsız imalat yöntemleri olan soğuk şekillendirme ve özellikle düz kalıpla diş çekme (flat die thread rolling) yöntemi öne çıkmıştır [2]. Düz kalıpla diş çekme işlemi, malzemenin plastik deformasyon yoluyla diş formuna sokulmasını sağlar. Bu yöntem, talaş kaldırmadan üretim yaptığı için hem malzeme tasarrufu sağlar hem de dislakasyon yoğunluğunun artması nedeniyle mukavemeti artırır [3].

Diş çekme işlemi sırasında iş parçası, iki düz kalıp arasında sıkıştırılır ve kalıplardan biri hareketli diğeri sabit olacak şekilde lineer hareket sağlanarak diş profili parça yüzeyine aktarılır. İşlem sırasında uygulanan deformasyon, parçanın çekme, yorulma ve burulma mukavemetini önemli ölçüde artırmakta, ayrıca yüzey sertliği de gelişmektedir [4]. Ancak bu avantajlar yalnızca proses parametrelerinin doğru şekilde seçilmesi ve kontrol edilmesiyle mümkündür. Bu bağlamda sıfır ayarının hassasiyeti ve operasyon hızının uygunluğu, elde edilen ürünün diş formu doğruluğu, yüzey kalitesi ve tekrarlanabilirliği açısından kritik rol oynamaktadır [5].

Geleneksel üretim hatlarında sıfır ayarı genellikle operatör tecrübesine dayanarak yapılmaktadır. Bu durum, üretim sürecinde yüksek varyans, ayar tekrarında gecikme ve kalite dalgalanmaları gibi olumsuzluklara yol açabilmektedir. Claus (2021), düz kalıpla diş çekme işlemlerinde yaşanan bu problemi "ölçülemeyen, tekrarlanamayan ve aktarılması zor" bir ayar sorunu olarak tanımlamakta ve yeni nesil kalıp sistemlerinin bu sorunu azaltabileceğini belirtmektedir [2].

Son yıllarda, bu tür problemleri öngörmek ve önlemek amacıyla simülasyon destekli üretim yaklaşımları yaygınlaşmıştır. Özellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilen analizler sayesinde, işlem parametrelerinin ürün üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenebilmekte ve optimum parametreler önceden belirlenebilmektedir [6,7]. SEY analizleri ile; deformasyon dağılımı, kalıp kuvvetleri, plastikleşme bölgeleri, temas basıncı ve sıcaklık değişimleri gibi veriler elde edilebilmektedir [3]. Böylece hem fiziksel deneme sayısı azaltılmakta hem de üretim kalitesi artırılmaktadır.

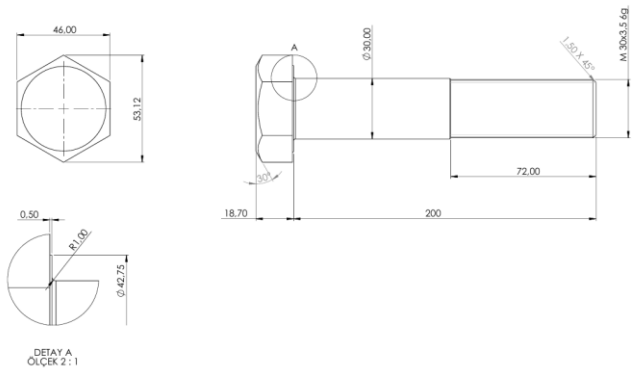
Bu doğrultuda literatürde SEY kullanımıyla ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. O'Connell ve ark. (1996), flanşsız altı köşe başlı bir vidanın dövme yükünü tahmin etmek için DEFORM-2D yazılımını geliştirmiştir [8]. Kim ve Altan (1996) FORMEX programını geliştirerek üretim süresini ve kalıp tasarımını optimize etmiştir [9]. Vazquez ve ark. (1998), tungsten karbür kalıpların ömrünü artırmaya yönelik analizler yapmıştır [10]. Falk ve ark. (2001), soğuk dövme takımlarının yorulma davranışını SEY ile değerlendirmiştir [11]. Janicek ve ark. (2002), micro alaşımlı çelik cıvataların gerekli mukavemetini sağlamak için ANSYS yazılımını kullanmıştır [12]. Min ve Kim (2003), otomotiv parçalarının hassas dövme işlemini DEFORM-3D ile analiz ederek üretim verimliliğini artıran yeni bir süreç önermiştir [13]. Kao ve ark. (2006), konik uçlu diş haddeleme kalıpları için entegre CAD/CAE/CAM sistemleri geliştirmiştir [5]. Hsia ve ark. (2016), konik uçlu sac levha vidası üretiminde DEFORM-3D simülasyon sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmıştır [6]. Haddeleme ve diş ovalama süreçlerinde operasyon parametreleri, özellikle merdane hızı ve geçiş sayısı, ürünün mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkileyen kritik faktörlerdir. Murthy ve arkadaşları [14], merdane hızı ve çapının, sıcak ve soğuk haddeleme işlemlerinde ısı transferi, sürtünme katsayısı, haddelenen malzemenin mikro yapısı, kalıntı gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler üzerinde belirleyici rol oynadığını belirtmişlerdir. Çalışmada, yüksek haddeleme hızının daha düşük sürtünme katsayısına yol açtığı ancak artan hadde kuvveti ve daha büyük taneli mikro yapıya neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, soğuk haddeleme koşullarında hız artışının kalıntı gerilmeleri azalttığı, yüksek çaplı merdanelerin ise plastik şekil değiştirmeyi ve Von Mises gerilmelerini düşürdüğü rapor edilmiştir. Aktas ve Kişioğlu [15] ise AISI4140 çeliğinden üretilen M12×1.75 ve M20×2.5 cıvatalar üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, diş ovalama işleminde kullanılan oluşturma hızı (rpm) ve geçiş sayısının mekanik özelliklere ve mikro yapıya etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlara göre, artan oluşturma hızı (22,5 rpm'den 40 rpm'e) çekme dayanımını artırırken, çoklu geçiş uygulamaları (tek geçişten üç geçişe) mukavemeti düşürmüş ve lap hatası derinliğini artırmıştır. Ayrıca, tek geçişte daha küçük tane boyutları elde edilirken, çoklu geçişlerde tane büyümesi gözlenmiştir. Çalışmada, mukavemet artışının Hall-Petch ilişkisiyle uyumlu olduğu ve mikro sertliğin diş köklerinde maksimum değerlere ulaştığı vurgulanmıştır. Katta Udaya ve ark. (2019), farklı çaplarda düz kalıp haddeleme için teorik, deneysel ve ANSYS tabanlı analizler gerçekleştirmiştir [1]. Zhang ve arkadaşları (2022), diş çekme sürecini analiz etmek amacıyla geliştirdikleri tek dişli kayma çizgisi modeli (slip line field theory) ve slab yöntemi sayesinde işlem kuvvetlerini ve malzeme akışını yüksek doğrulukla tahmin edebilmişlerdir. Bu modelleme

sayesinde kalıp tasarımı ve malzeme davranışı daha etkin şekilde optimize edilebilmektedir [4]. Kukiełka (2023), soğuk diş açma sürecinin FEM ile modellenmesinin karmaşık sınır koşulları ve doğrusal olmayan yapısı nedeniyle zorlu olduğunu, bu nedenle non-lineer analiz yöntemlerinin zorunlu hale geldiğini vurgulamaktadır. Ayrıca deformasyon hızının malzeme akma gerilmesini %20'ye kadar artırabileceği belirtilmiş ve bu etkinin modellemede doğru temsil edilmesi gerektiği ifade edilmiştir [16]. Volz ve Groche (2024), düz kalıp diş açma prosesinde kayma riskinin vuruş hızı ve tribolojik sistem ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir. Çalışmada, polimer bazlı yağlayıcı kullanılan sistemlerde kaymanın düşük hızlarda (≈15 stroke/dk) başladığı, fosfat kaplama + yağ kombinasyonunda ise 42–70 stroke/dk aralığında kayma riskinin arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca yüksek hızın yağlayıcı performansını olumsuz etkilediği, sürtünme katsayısının azalmasına ve kayma nedeniyle proses başarısızlığına yol açtığı belirlenmiştir [17]. Brutti ve ark. (2025), bağlantılarda yük taşıma kapasitesinin sürtünme katsayısı ve hatve gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir [18].

Bu çalışmanın temel amacı, düz kalıp ile gerçekleştirilen diş ovalama sürecinde sıfır ayarının hassasiyeti ve farklı operasyon hızlarının ürün kalitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu doğrultuda hem fiziksel deneyler gerçekleştirilmiş hem de Simufact Forming yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Araştırmada farklı hız parametreleri değerlendirilerek, prosesin kritik kalite faktörlerinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular hem üretim süreçlerinde optimizasyon hem de endüstriyel uygulamalarda standartlaştırılmış yöntemlerin geliştirilmesi açısından önemli katkılar sunmaktadır.

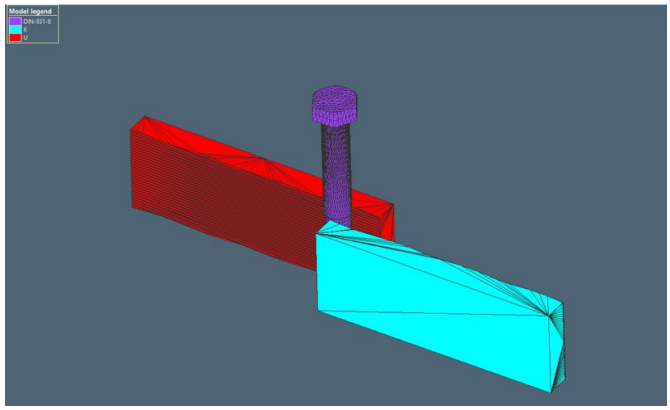
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, düz kalıp ile gerçekleştirilen diş ovalama işleminde sıfır ayarının doğruluğu ve operasyon hızının ürün kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla hem fiziksel deney hem de sayısal analizler yapılmıştır. Deneysel çalışmada, 42CrMo4 çeliğinden üretilmiş, ISO 4014 standardına uygun M30×200 mm ölçülerinde bir cıvata kullanılmıştır (Şekil 1). Diş çekme işlemi düz kalıp yöntemiyle gerçekleştirilmiş olup, biri sabit diğeri ise doğrusal hareketli iki düz kalıp arasında deformasyon uygulanmıştır (Şekil 2). Tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. M30x200mm.

Figure 1. M30x200 ISO 4014.



Şekil 2. Düz kalıp ile ovalama.

Figure 2. Thread rolling with flat die.

Sıfır ayarı, kalıpların iş parçası ile ilk temas ettiği pozisyonun hassas şekilde belirlenmesini içermektedir. Bu amaçla, hareketli kalıp iş parçasına temas edinceye kadar ilerletilmiş; ardından kalıp yüzeyi ile diş tepesi arasında plastik ezilme izi oluşuncaya dek sıkıştırılmış ve iş parçası yaklaşık yarım tur döndürülerek sıfır ayarı tamamlanmıştır. Bu klasik uygulama hem ideal hem de bilinçli olarak hatalı senaryolarla tekrarlanarak, her bir durumda oluşan diş formu ve yüzey kalitesi detaylı biçimde incelenmiştir.

Sayısal analizler Simufact Forming yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelde hem iş parçası hem de kalıplar üç boyutlu olarak oluşturulmuş, 42CrMo4 çeliği için elastik-plastik davranışı ve sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Sonlu eleman ağı, üç boyutlu hexahedral (altı yüzlü) elemanlardan oluşmakta olup, mesh oluşturma işlemi Hexmesh algoritmasıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir elemanın kenar uzunluğu 1,0 mm olarak belirlenmiş ve toplam 88.060 adet elemanla yüksek hassasiyetli bir çözüm ağı oluşturulmuştur. Simülasyon sırasında oluşan büyük deformasyonların analiz doğruluğunu etkilemesini önlemek amacıyla yeniden ağ oluşturma (remeshing) yöntemi aktif olarak kullanılmıştır. Bu yeniden ağ oluşturma işlemi, %40'ın üzerindeki plastik şekil değiştirme miktarı ve eleman kenar uzunluğunun belli eşik değerleri aşması durumunda devreye girmiştir. Rafine mesh bölgesi olarak, diş açılan bölgedeki iki silindirik yüzey seçilmiştir.

Simülasyonun süresini optimize etmek ve hesaplama yükünü azaltmak amacıyla yalnızca dişli bölge olan paso uzunluğu (72 mm) analiz kapsamına alınmıştır. Cıvatanın şaft bölgesini temsil etmek amacıyla iş parçasının merkezine Die Insert yerleştirilmiştir. Kalıp–iş parçası arasındaki temas koşulları Amontons-Coulomb sürtünme modeli ile tanımlanmış ve sürtünme katsayısı $\mu = 0,3$ olarak alınmıştır. Bu değer literatürde önerilen aralıkla uyumludur [18, 19, 20, 21]. İşlem ortamı oda sıcaklığı olarak tanımlanmıştır.

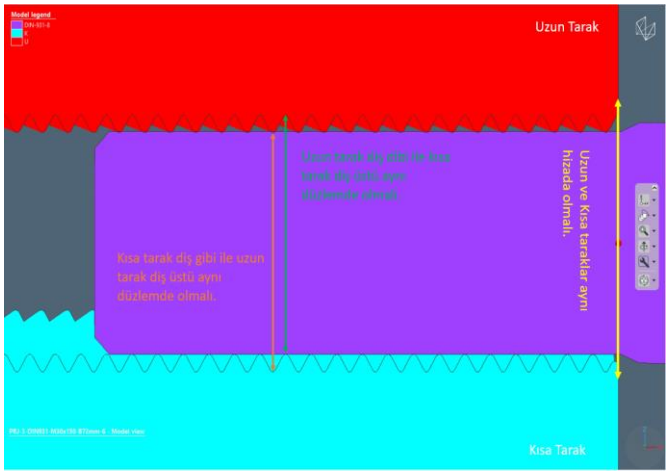
Operasyon hızının ürün kalitesi üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla, sıfır ayarı sabit tutularak yedi farklı deformasyon hızı senaryosu oluşturulmuştur. Bu hızlar sırasıyla 353 mm/s, 482 mm/s, 1325 mm/s, 1802mm/s, 2120 mm/s, 2409 mm/s ve 3785 mm/s olarak tanımlanmıştır. Her bir hız senaryosunda aynı model parametreleri korunarak simülasyonlar yürütülmüştür.

Diş yüzeyinde meydana gelen şekil düzensizlikleri, çapaklanma ve aşırı ezilme gibi durumlar dikkatle incelenmiştir. Sayısal bulgular, deneysel sonuçlarla birlikte hem görsel hem de sayısal olarak kıyaslanmış ve her iki yaklaşımın tutarlılığı irdelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada elde edilen deneysel ve sayısal bulgular, sıfır ayarının doğruluğu ile operasyon hızının diş ovalama kalitesi üzerindeki etkilerini detaylı şekilde ortaya koymuştur.

3.1. Sıfır Ayarının Etkisi

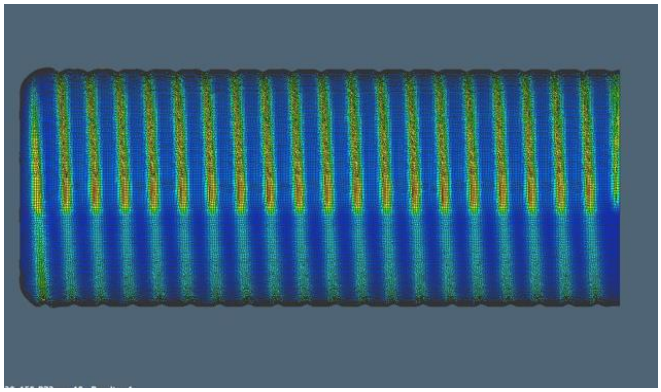


Şekil 3. Doğru sıfır ayarının kesit gösterimi.

Figure 3. Cross-sectional view of correct zero adjustment.

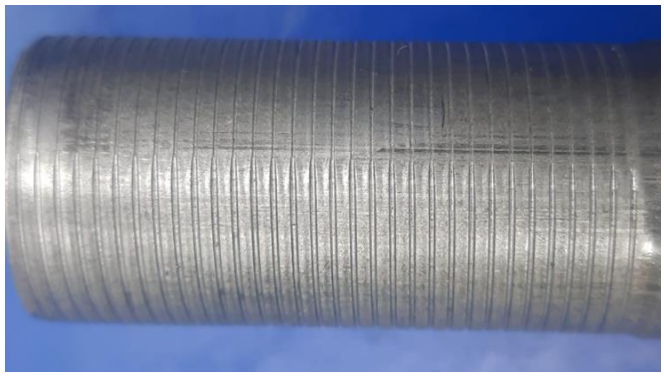
Şekil 3'de kesit düzleminde doğru sıfır ayarının temsili gösterilmiştir. Burada, kalıpların aynı düzlemde ve eksende yer alması gerektiği, sabit kalıptaki diş üstünün hareketli kalıptaki diş dibiyle hizalanması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu hizalamanın sağlanmasıyla birlikte, dişlerin eksenel senkronizasyonu korunmakta ve deformasyon doğru bir şekilde gerçekleşmektedir.

Gerçekleştirilen fiziksel deneyler ve sayısal simülasyonlar, sıfır ayarının diş formu üzerinde doğrudan etkili olduğunu açıkça göstermiştir. Doğru bir sıfır ayarı yapıldığında diş formunun düzgün oluştuğu, kontur hatlarının netleştiği ve hatve ile diş profilinin ilgili standarda uygun olarak elde edildiği tespit edilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'de doğru sıfır ayarının görsel temsili, Şekil 6 ve Şekil 7'te ise bu ayar ile elde edilen düzgün diş profili görülmektedir.



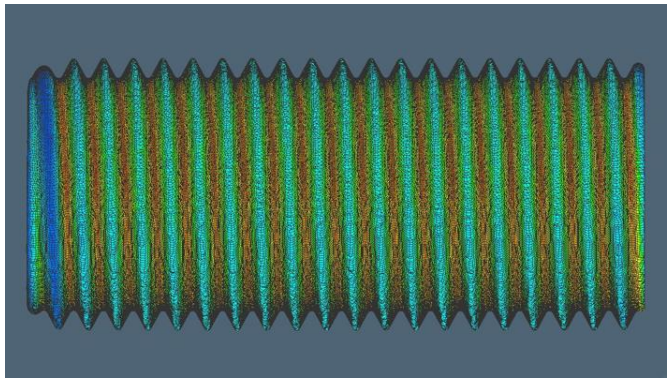
Şekil 4. Doğru sıfır ayarı.

Figure 4. Correct zero adjustment.



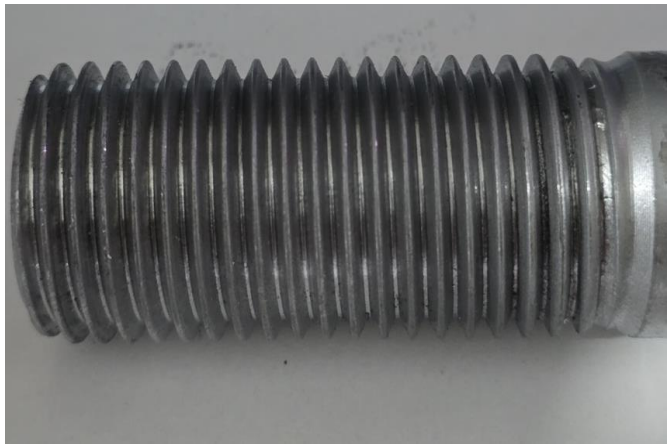
Şekil 5. Doğru sıfır ayarı (Deneysel).

Figure 5. Correct zero adjustment (Experimental).



Şekil 6. Doğru sıfır ayarı ile elde edilen düzgün diş profili.

Figure 6. Uniform thread profile obtained with correct zero adjustment.



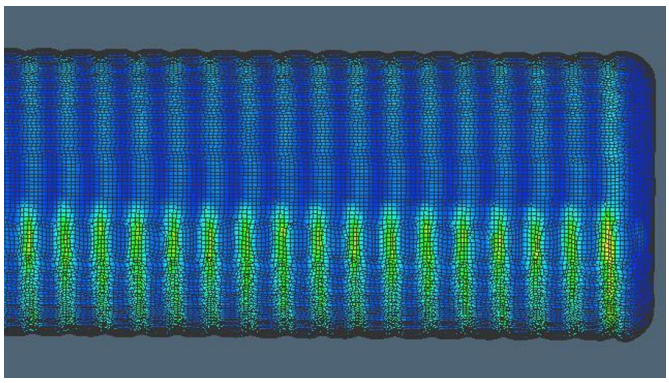
Şekil 7. Doğru sıfır ayarı ile elde edilen düzgün diş profili (Deneysel).

Figure 7. Uniform thread profile obtained with correct zero adjustment (Experimental).

Ancak, sıfır ayarının hassasiyetle yapılmadığı senaryolarda, deformasyonun özellikle diş köşelerinde yetersiz kaldığı, kontur formunun bozulduğu ve profilin belirgin şekilde eksik oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 10 ve Şekil 11'de, yanlış sıfır ayarı ile elde edilen diş profillerinin deformasyon eksiklikleri ve yapısal bozuklukları açıkça görülmektedir.

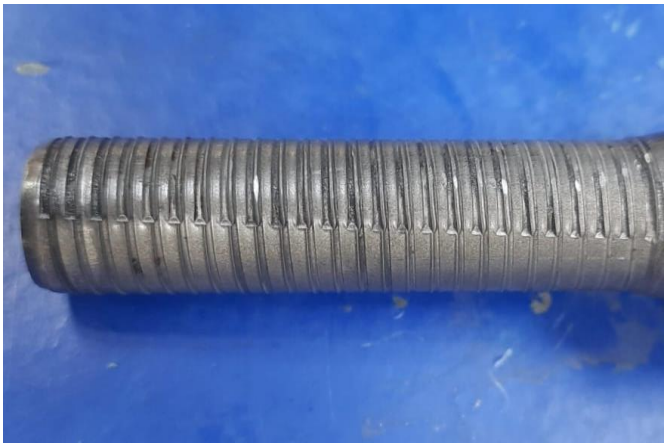
Yapılan simülasyonlar sonucunda, kalıplar aynı hizada olsa bile sıfır pozisyonunun diş profiline göre P/4 oranında sapma göstermesi durumunda, sabit kalıp tarafından şekillendirilen

dişin, hareketli kalıp tarafından ezildiği ve diş geometrisinin tamamen bozulduğu anlaşılmıştır. Bu durum, diş oluşumunun engellenmesine ve ciddi form kusurlarının ortaya çıkmasına yol açmıştır.



Şekil 8. Yanlış sıfır ayarı.

Figure 8. Incorrect zero adjustment.

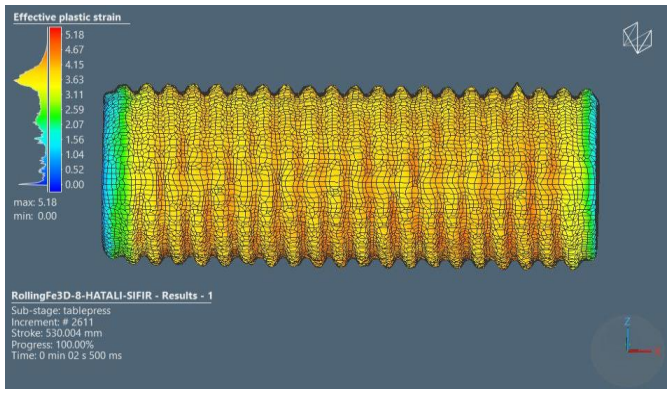


Şekil 9. Yanlış sıfır ayarı (Deneysel).

Figure 9. Incorrect zero adjustment (Experimental).

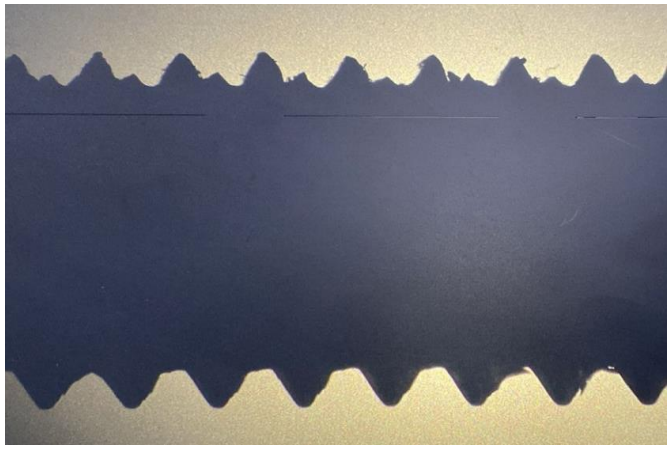
3.2. Operasyon Hızının Etkisi

Sayısal simülasyon sonuçlarına göre, deformasyon hızı ile ürün üzerindeki plastik şekil değiştirme miktarı ve sıcaklık arasında güçlü bir ilişki saptanmıştır. Tablo 1 de yedi farklı hız senaryosu altında simülasyon çalışması yapıldı. Yapılan analizlerde operasyon hızı arttıkça parçadaki ısınma ve kayma oranı genel olarak artmıştır.



Şekil 10. Yanlış sıfır ayarı ile elde edilen diş profili.

Figure 10. Thread profile obtained with incorrect zero adjustment.



Şekil 11. Yanlış sıfır ayarı ile elde edilen diş profili (Deneysel).

Figure 11. Thread profile obtained with incorrect zero adjustment (Experimental).

Tablo 1. Deneysel ve Simülasyon Çalışmalar.

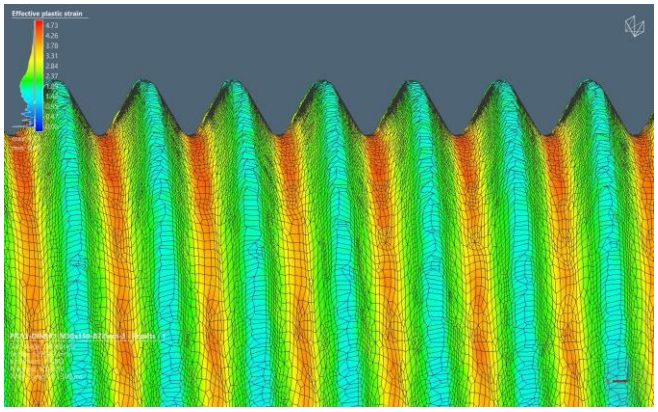
Table 1. Experimental and Simulation Studies.

	Standart EN ISO 4014	Deneysel	Sim.1	Sim.2	Sim.3	Sim.4	Sim.5	Sim.6	Sim.7
Sürtünme Katsayısı (μ)		-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Kalıp Hızı (mm/s)		600	353	482	1325	1802	2120	2409	3785
Z Ekseni Baskı (mm)		-2,16	-2,16	-2,16	-2,16	-2,16	-2,16	-2,16	-2,16
Anma Çapı, d (mm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Diş Üstü Çapı (mm)	Max: 29,947	29.77	29,9	29,81	29,727	29,6	29,72	29,86	29,837
	Min: 29,522								
Diş Dibi Çapı (mm)	Max:25.706	25.40	25,39	25,39	25,39	25,39	25,39	25,39	25,39
	Min: 25,306								

Tablo 1 (devam)

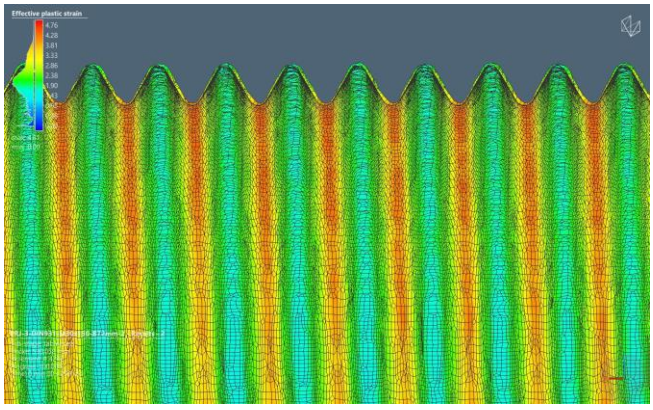
Diş Hatvesi (mm)	3,5	3.489	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Paso Boyu (mm)	Min:72	72.38	72,727	72,72	72.47	72,74	72.81	72.81	72.87
Uzama Miktarı (mm)	-	0.52	0,541	0,53	0.47	0,56	0.63	0.63	0.697
Kuvvet (kN)	-	-	525,27	518,65	484	501	509,27	527,4	523.45
Ortalama Sıcaklık °C	-	-	220	240	300	317	350	370	380
Hareketli Tarak ΔY (mm)	-	530	530	530	530	530	530	530	530
İş Parçası ΔY (mm)	-	265	264,4	264,4	264,4	264,32	264,28	264,15	263,3
Kayma ΔY (mm)	-	-	0,6	0,6	0,6	0,68	0,72	0,85	1,7

Özellikle 1802 mm/s hız değerinden sonra, kayma değerlerinde keskin bir artış meydana gelmiştir. Bu hızın üzerinde, kalıpların oluşturduğu diş profilleri arasında hizasızlık gözlemlenmiş ve deformasyonun simetrik biçimde iletilememesi nedeniyle diş formu bozulmuştur. Şekil 12'da, 2409 mm/s kalıp hızıyla elde edilen dişli yapıda oluşan çapaklanma ve deformasyon bölgeleri; Şekil 13'de ise 3785 mm/s hızla yapılan proses sonunda oluşan diş tepesi bozulmaları ve kontur düzensizlikleri gösterilmektedir.



Şekil 12. Kalıp hızı 2409 mm/s olan proses sonucunda elde edilen ürün

Figure 12. Product obtained from the process with a die speed of 2409 mm/s



Şekil 13. Kalıp hızı 3785 mm/s olan proses sonucunda elde edilen ürün

Figure 13. Product obtained from the process with a die speed of 3785 mm/s

Bu hız değerlerinde dişler arası bölgelerde lokal malzeme yığılmaları meydana gelmiş, bu da yüzey kalitesinde ciddi bozulmalara ve çapak oluşumuna neden olmuştur. Elde edilen bu bulgular, yüksek operasyon hızlarının diş formunun stabilitesini ve geometrik doğruluğunu olumsuz etkilediğini göstermektedir.

3.3. Genel Değerlendirme

Tüm analizler değerlendirildiğinde, diş ovalama prosesinin özellikle sıfır ayarı ve operasyon hızı gibi parametrelere son derece duyarlı olduğu anlaşılmıştır. Sıfır ayarındaki küçük konum hataları dahi ürün formunu bozabilmekte, daha büyük sapmalar ise doğrudan işlem başarısızlığına neden olmaktadır. Benzer şekilde, deformasyon hızının artması üretim süresini azaltma açısından avantaj sağlasa da 1802 mm/s üzerindeki değerlerde deformasyon davranışı agresifleşmekte ve bu durum kaliteyi ciddi biçimde olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle optimum hız aralığının belirlenmesi ve sıfır ayarının yüksek hassasiyetle yapılması hem geometrik kalite hem de işlevsel performans açısından kritik öneme sahiptir.

Bununla birlikte, düz kalıp diş açma sürecinde geleneksel kurulum yöntemlerinin tekrarlanabilirlik (repeatability), ölçülebilirlik (measurability) ve aktarılabilirlik (transferability) açısından ciddi sınırlılıklar içerdiği görülmüştür. Bu durum, kalite dalgalanmaları ve operatör becerisine olan aşırı bağımlılık nedeniyle üretimde risk oluşturmaktadır. Literatürde önerilen yenilikçi yaklaşımlar, kalıp hizalama ve basınç ayarlarını ölçülebilir parametrelere dayandırarak bu bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir. Özellikle son dönemde geliştirilen numaralı barlar ve harfli diskler ile yapılan ayar sistemi, optimum kurulum koşullarının kaydedilip (Mule Recipe) tekrar uygulanabilmesine imkân tanıyarak standardizasyon ve kalite sürekliliği açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır [2].

Sonuç olarak, hem yapılan deneysel ve sayısal analizler hem de literatürdeki yenilikçi çözümler dikkate alındığında, sıfır ayarı hassasiyetinin artırılması ve operasyon hızının kontrollü yönetimi, prosesin başarısı ve ürün kalitesi için belirleyici unsurlardır. Bu iki parametrenin optimize edilmesi, üretim verimliliği ve endüstride rekabet gücü açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, düz kalıp ile gerçekleştirilen diş ovalama işleminde sıfır ayarının doğruluğu ve operasyon hızının ürün kalitesi üzerindeki etkileri hem deneysel yöntemler hem de Simufact tabanlı sayısal analizlerle kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki sonuçlar ortaya konulmuştur:

- Sıfır ayarının hassasiyeti, diş formunun standartlara uygun ve simetrik şekilde oluşmasında kritik bir parametredir. Uygun sıfır ayarı ile hatasız diş profilleri elde edilirken, ayar kaçıklığında kontur düzensizlikleri, çapak oluşumu ve profil deformasyonları gözlenmiştir.

- Çalışmada, iş parçası merkez hızı ile hareketli kalıp hızı arasındaki oranı ifade eden $\dot{\lambda}$ katsayısı tanımlanmıştır. Kaymanın olmadığı durumlarda $\dot{\lambda}$ değeri 0,5 iken, kayma meydana geldiğinde bu değer 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu oranın korunamaması, özellikle 1802 mm/s ve üzeri hızlarda senkronizasyon kaybına neden olmuş; çapaklanma, pullanma ve şekil bozuklukları gibi kalite kusurları oluşmuştur.

- Sayısal simülasyonlar ile deneysel bulgular arasında yüksek uyum elde edilmiştir. Bu durum, kullanılan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu ve simülasyon yaklaşımının geçerliliğini göstermektedir.

- Operasyon hızı arttıkça işlem süresi kısalmış, ancak yüksek hızlarda ürün kalitesi belirgin şekilde düşmüştür. Bu nedenle, M30 boyutundaki civatalar için operasyon hızının 1500 mm/s değerini aşmaması önerilmektedir.

- Analizlerde, kalıp ve iş parçası arasındaki temas yüzeylerinde Coulomb sürtünme modeli kullanılmış ve sürtünme katsayısı 0,3 olarak kabul edilmiştir. Ancak bu parametrenin malzeme akışı, diş formu ve yüzey kalitesi üzerindeki kritik etkisi nedeniyle farklı katsayıların inceleneceği ileri çalışmalar gereklidir.

- Yüksek hızlarda lokal sıcaklık artışları ihmal edilmemelidir. Artan deformasyon hızına bağlı olarak oluşan sıcak bölgeler, ürün kalitesini olumsuz etkilerken kalıp aşınması ve termal yorgunluk risklerini de artırmaktadır. Bu nedenle proses tasarımında sıcaklık etkileri, yalnızca ürün kalitesi açısından değil, kalıp ömrü açısından da dikkate alınmalıdır.

Gelecek çalışmalarda farklı malzemeler, yağlama sistemleri, kalıp tasarımı, soğutma stratejileri ve gerçek zamanlı proses kontrol yöntemleri gibi faktörler detaylı olarak araştırılacaktır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Bu makalenin yazarları, çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul onayı ve/veya yasal izin gerektirmediğini beyan eder. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında, yüksek lisans süresi boyunca SİMUFACT yazılımının ücretsiz kullanımını sağlayarak analizlerin gerçekleştirilmesine olanak tanıyan NETFORM Mühendislik Makine Metal A.Ş. firmasına teşekkür ederim. Programın öğrenilmesi sürecinde verdikleri desteklerden ötürü Ali Baran Mete ve Burak Hızlı Bey'e, kalıp tasarımı konusundaki teknik katkıları için Ceviz Pres Döküm A.Ş. firmasına ayrıca teşekkür ederim.

Yazar katkılarının beyanı

Oğuz Ateş: Çalışmanın fikri altyapısı, deneylerin tasarımı ve yürütülmesi, simülasyonların gerçekleştirilmesi, veri analizi ve makalenin yazımı.

Prof. Dr. Halit Gün: Akademik danışmanlık

Kaynaklar

[1] Udaya K, Kishore K, Sreekrishna S. Analysis on Thread Rolling Using Flat Dies. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2019;6(4):4632-8.

[2] Claus L. New flat die thread rolling Technology. 2021. Available from: https://www.nnitraining.com/wp-content/uploads/2021/10/FW_189_E_264.pdf [Accessed 15 June 2025].

[3] Onder C. Analysis of Bolt Production by Metal Forming [Master's thesis]. Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2004. Available from: https://netformmetal.com/download/Kutuphane/tezler/soguk_sekillendirme/2004_METU_Canderim_Onder_ANALYSIS_OF_BOLT_PRODUCTION_BY_METAL_FORMING.pdf.

[4] Zhang S, Zheng S, Jiang Y, Ren Y, Zhang D, Lee MG. Analysis of thread rolling process using an analytical single tooth rolling model based on the slip line field theory and slab method. Journal of Manufacturing Processes 2022;76:675-86. doi:10.1016/j.jmapro.2022.02.054.

[5] Kao YC, Cheng HY, She CH. Development of an integrated CAD/CAE/CAM system on taper-tipped thread-rolling die-plates. Journal of Materials Processing Technology 2006;177:98-103. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.04.082.

[6] Hsia SY, Chou YT, Lu GF. Analysis of Sheet Metal Tapping Screw Fabrication Using a Finite Element Method. Applied Sciences 2016;6:300. doi:10.3390/app6100300.

[7] Domblesky JP, Feng F. A parametric study of process parameters in external thread rolling. Journal of Materials Processing Technology 2002;121:341-9. doi:10.1016/S0924-0136(01)01223-7.

[8] O'Connell M, Painter B, Maul G, Taylan A. Flashless closed-die upset forging-load estimation for optimal cold header selection. J Mater Process Technol 1996;59:81-94. doi:10.1016/0924-0136(96)02289-3.

[9] Kim H, Altan T. Cold forging of steel-practical examples of computerized part and process design. J Mater Process Technol 1996;59:122-31. doi:10.1016/0924-0136(96)02293-5.

[10] Vazquez V, Hannan D, Altan T. Tool life in cold forging–example of design improvement to increase service life. J Mater Process Technol 2000;98:90-6. doi:10.1016/S0924-0136(99)00309-X.

[11] Falk B, Engel U, Geiger M. Fundamental aspects for the evaluation of the fatigue behavior of cold forging tools. J Mater Process Technol 2001;119:158-64. doi:10.1016/S0924-0136(01)00934-7.

[12] Janicek L, Petruska J, Maros B, Rusz S. Cold forming of bolts without thermal treatment. J Mater Process Technol 2002;125-126:341-6. doi:10.1016/S0924-0136(02)00296-0.

[13] Min D, Kim M. A study on precision cold forging process improvements for the steering yoke ofgid–plastic finite-element method. J Mater Process Technol 2003;138:339-42. doi:10.1016/S0924-0136(03)00095-5.

[14] Murthy PLS, Patil H, Sarada BN. Analysis of Roller Speed and Roller Diameter – A Review. International Journal of Advances in Engineering Research 2016;11(III):1-5.

[15] Aktas S, Kisioglu Y. Effects of Thread Rolling Processing Parameters on Mechanical Properties and Microstructures of High-Strength Bolts. Materials Testing 2020;62(10):1017-24. doi:10.3139/120.111579.

[16] Kukiełka K. Application of the FEM Method to Modeling and Analysis of the Cold Thread Rolling Process—Part 1: Conditions for Ensuring a Plane State of Deformations. Materials 2023;16(13):4647. doi:10.3390/ma16134647.

[17] Volz S, Groche P. Experimental investigation on slip conditions during thread rolling with flat dies. Friction 2024;12(1):136-43. doi:10.1007/s40544-023-0753-7.

[18] Brutti C, Groth C, Biancolini ME. A fast analytical method for elastic–plastic analysis of threaded connections. Applied Mechanics 2025;6(2):42. doi:10.3390/applmech6020042.

[19] Groche P, Kramer P. Numerical investigation of the influence of frictional conditions in thread rolling operations with flat dies. Int J Material Forming 2018;11(4):687-703. doi:10.1007/s12289-017-1383-2.

[20] Domblesky JP, Feng F. A parametric study of process parameters in external thread rolling. JMPT 2002;121:341-9. doi:10.1016/S0924-0136(01)01223-7.

[21] Popova E, Popov V. The research works of Coulomb and Amontons and generalized laws of friction. Friction 2015;3(2):183-90. doi:10.1007/s40544-015-0074-6.