

Optik Kalite Germanyum Alttaşın Tek Nokta Kristal Elmas ile Tornalanmasının İncelenmesi

Kamer Dorukhan KESME^{1,2}, Tahsin AYDIN³, Ekrem YARTAŞI^{4*}

¹ Savunma Teknolojileri, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sivas, Türkiye

² Aselsan Sivas Hassas Optik AŞ, Sivas, Türkiye

³ Savunma Teknolojileri, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sivas, Türkiye

⁴ Mühendislik Temel Bilimleri, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sivas, Türkiye

^{1,2} dorukhankesme@icloud.com, ³ thsnaydn23@gmail.com, ^{4*} ekrem.yartasi@sivas.edu.tr

(Geliş/Received: 31/10/2025;

Kabul/Accepted: 06/02/2026)

Öz: Bu çalışma, optik kalite tek kristal germanyum lenslerin tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (Sa) üzerindeki etkisini incelemektedir. 40 mm çap, 2 mm kalınlıktaki numuneler ultra hassas tek nokta elmas tornalamada işlenmiş, yüzeyler Fizeau ve beyaz ışık interferometreleriyle karakterize edilmiştir. Sa değerlerine eşlik eden topografik yükseklik haritaları türetilmiştir. Deneyler, 3×2×2 faktöriyel tasarım altında yürütülmüştür (V: 1000–3000 rpm; d: 3–6 µm; fr: 2–5 mm/dk). Takım geometrisi sabit tutulmuştur (talaş açısı $\gamma=-25^\circ$, boşluk açısı $\alpha=10^\circ$). En iyi Sa değeri 1.065 nm olarak elde edilmiş ve bu değer kabul edilen 4.640 nm sınırının belirgin biçimde altındadır. Ölçümlerden elde edilen veri setiyle, Sa'yı parametrelerle ilişkilendiren lineer ve lineer olmayan iki tahmin modeli kurulmuştur. Tasarım, üretim ayarlarının hızlı taranmasına ve etkileşimlerin (V–d–fr) anlaşılmasına olanak vermiştir. Modeller, 1–3 nm hedef aralığına inmek için pratik ayar pencereleri ve duyarlılık bilgisi sağlamaktadır. Çalışma, yerinde proses optimizasyonu için uygulanabilir bir çerçeve sunar.

Anahtar kelimeler: Yüzey pürüzlülüğü, optik metroloji, faktöriyel tasarım, germanyum alttaş.

Investigation of the Single-Point Diamond Turning of Optics-Grade Germanium Substrate

Abstract: This study investigates the influence of cutting parameters on surface roughness (Sa) in diamond turning of optical-grade single-crystal germanium lenses. Specimens (Ø40 mm, 2 mm thick) were machined on an ultraprecision single-point diamond turning (SPDT) lathe; surfaces were characterized using Fizeau and white-light interferometers, accompanied by surface topography maps. Experiments followed a 3×2×2 factorial design (V: 1000–3000 rpm; d: 3–6 µm; fr: 2–5 mm/min) with constant tool geometry (rake $\gamma = -25^\circ$, clearance $\alpha = 10^\circ$). The best Sa achieved was 1.065 nm, well below the accepted 4.640 nm threshold. From the measurements, two predictive models—linear and nonlinear—were established to relate Sa to the process parameters. The design enabled rapid exploration of settings and interactions (V–d–fr). The models provide practical tuning windows and sensitivity guidance to reach the 1–3 nm target band. Overall, the study offers a deployable framework for in-process optimization.

Keywords: Surface roughness, optical metrology, factorial design, germanium substrate.

1. Giriş

Termal görüntüleme sistemleri geniş şekilde askeri sistemler, endüstriyel uygulamalar, tıp, otomotiv sektörü, uzay ve uydu sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır [1-3]. Gece görüş sistemleri, hedef tespit ve takibi, insansız hava araçları (İHA) ve silahlı insansız hava araçları (SİHA) üzerindeki termal kameralar gibi birçok askeri uygulama alanlarına sahiptir [4,5]. Sivil tarafta ise, termal görüntüleme sistemleri temassız ve radyasyonsuz analiz yaparak hastalıkların tespit ve takibinin yapılmasında kullanılmaktadır. Meme kanseri gibi bazı kanser türlerinde, tümörün neden olduğu artan damarlaşma ve metabolik aktivitenin neden olduğu sıcaklık değişimlerinin tespit edilmesinde bu sistemler kullanılabilmektedir. Termal kameralarla temassız vücut sıcaklığı ölçümü yapılmaktadır [6,7]. Pandemi dönemlerinde havalimanları, hastaneler, kamu alanları gibi birçok alanda ateşi olan insanların tespitinde bu sistemler kullanılmıştır [8]. Endüstri ve otomotiv sektörüne örnek olarak gece yolculuklarında sürücünün görüş kapasitesini arttırarak insan, hayvan, araç gibi cisimlerin yaydığı ısıyı algılayarak daha güvenli bir yolculuk sağlar.

Termal görüntüleme sistemleri elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde (IR) çalışmaktadır. IR bölge yaklaşık olarak 750 nm ile 1 mm arasındaki dalga boylarını içermektedir (Çizelge 1). Bu bölge, spektrumda

* Sorumlu yazar: ekrem.yartasi@sivas.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ^{1,2} 0009-0001-5358-5757, ³ 0009-0006-3321-9043, ⁴ 0000-0003-0071-951X

komşusu olduğu görünür ışık ve mikrodalga bölgelerinden de benzerlik taşıyabilmektedir. IR bölge farklı fiziksel özellikler ve uygulamalar için üç bölgeye ayrılmıştır. Farklı dalga boyları farklı özellikler göstereceğinden ve IR bölgenin geniş bir spektruma sahip olmasından dolayı bu bölge içerisinde kullanılan dedektörlerin özelliklerine ve çalışma aralıklarına bağlı olarak IR bölge içerisinde üç ayrı spektruma ayrılmıştır.

Çizelge 1. Kızılötesi (IR) spektrum bölgeleri ve dalga boyu aralıkları

Yakın kızılötesi bölge (NIR)	0.7 μm – 1.3 μm
Orta kızılötesi bölge (MIR)	1.3 μm – 5.6 μm
Uzak kızılötesi bölge (FIR)	5.6 μm - 1000 μm

Termal görüntüleme sistemlerinde kullanılan optik malzemeler, sistemin dalga boyuna göre belirlenir. Bu malzemelerin temel görevi, IR ışınımı odaklamak, yönlendirmek veya iletmek olup, görünür ışık optiğindeki diğerden çok farklı özelliklere sahiptir. Cam görünür bölgedeki ışınımına şeffaftır ama 720 nm'nin üzerindeki dalga boylarını geçirmez. Bu sebepten ötürü bu ışınımı geçirebilen malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu malzemelerden başlıcaları, germanyum (Ge), silikon (Si), çinko selenit (ZnSe) ve çinko sülfür (ZnS) olarak örneklendirilebilir [9-11].

Germanyum (Ge), termal görüntüleme sistemlerinde optik bileşen olarak kullanılan stratejik öneme sahip yarı metalik bir elementtir. Germanyum, düşük dispersiyon katsayısı ve yüksek kırılma indisi (~ 4.0) sayesinde, termal görüntüleme sistemlerinde yüksek çözünürlüklü ve kontrastlı görüntüler elde edilmesini mümkün kılar. Bu özellikler hem askeri hem sivil uygulamalarda, özellikle gece görüş, hedef tespiti, sınır güvenliği ve uzay tabanlı termal izleme sistemlerinde kritik öneme sahiptir. Tek kristal germanyum üretimi ve tedariği maliyetli bir malzemedir. Bu nedenle ar-ge ve üretim aşaması oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda optik kalite tek kristal germanyum tornalanması literatürde geniş şekilde incelenmiştir.

Tunesi vd. [12], tek kristal (100) germanyumun tek nokta elmas torna (SPDT) ile tornalanmasında kesme hızının etkisini incelemiştir. Atomik kuvvet mikroskopu (AFM) ve dinamometre ölçümleri, hız arttıkça yüzeydeki gevrek kırıkların azaldığını ve ≥ 10 m/s'de kaybolduğunu göstermiştir. Ayrıca kesme ve itme kuvvetlerinin hızla birlikte belirgin biçimde düştüğü raporlanmıştır. Çalışma, Ge işlenebilirliğinin kesme hızıyla iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Zhang vd. [13], tek kristal germanyumun (Ge) SPDT'da gevrek-sünek geçişini ve bunun nano-yüzey oluşumuna etkisini (100) / (110) / (111) düzlemlerinde yüzey tornalama + daldırma (plunge) tornalama deneyleri ve moleküler dinamik simülasyonları ile incelemiştir. Yüzeylerde, kristal yapıya bağlı yelpaze biçimli (fan-shaped) anizotropi gözlenmiş, kritik geçiş derinliği/uzunluğu (D_c , L_c) kristal yönüne göre değişmiş ve gevrek bölgelerde her zaman daha sık/kısa bulunmuştur. Takım kenar yarıçapı büyüdükçe (aşınmış uç), sürme-kesme (plow-shear) geçişi ötelenmiş ve D_c ile L_c artmıştır. Dolayısıyla kenar yarıçapı kritik rol oynamaktadır. Amorf tabaka kalınlığı, kesme derinliği/kenar yarıçapı oranı ile artmış, üç düzlem içinde (111) / [110] yönelimi en iyi işlenebilirliği ve en küçük amorf tabakayı vermiştir. Moleküler dinamik sonuçları, elastikten süneğe geçişin eğilimini ve kristal örgü/bağ sınıfının anizotropiye etkisini doğrulayarak deneysel bulgularla uyum göstermiştir.

Zhang vd. [14], öncelikle kristal yönelimine bağlı kritik geçiş derinliği D_c için bir model geliştirilmiş, ardından bu model daldırma tornalama deneyleri ile doğrulanmıştır. 36 oluk içeren daldırma deneylerinde kırılma-sünek geçiş sınırının derinliği doğrudan ölçülerek D_c belirlenmiş; ortalama deneysel değerler sırasıyla (100) için 113.0 nm, (110) için 113.38 nm ve (111) için 98.82 nm olarak rapor edilmiş ve sonuçların model tarafından öngörülen eğilimlerle uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Prasad vd. [15], tek kristal germanyum (sc-Ge) üzerinde kübik freeform optiğin SPDT ile sünek rejimde işlenmesini, sabit açı / sabit yay ve hibrit takım yolu stratejilerini karşılaştırarak incelemiştir. Sabit açılı STS kesimde devir hızı (40–90 rpm) artırılrsa da en iyi ortalama pürüzlülük $S_a \approx 16.79$ nm olurken, hibrit takım yolu stratejisinde, Δs (takım yolu adım mesafesi) 0.1 mm, Nouter (dış bölge devir hızı) 55 rpm ve Ninner (iç bölge devir hızı) 2000 rpm olarak seçilmiş; bu koşullarda işlenen yüzeyde ortalama yüzey pürüzlülüğü $S_a = 2.09$ nm ve çukur hacim parametresi $S_{vk} = 8.34$ nm elde edilmiştir. Çizik (scratch) denemeleriyle gevrek-sünek geçişi belirlenmiştir. Geometrik hata analizleri için sabit açı/sabit yay adımları üzerinden yay uzunluğu ve açılal artıma dayalı hatalar, geçiş yarıçapı ve takım burun yarıçapı kompanzasyonu türetilmiştir. Serbest-biçim yüzey form hatası, profilometre ile 0.623 μm 'den 0.496 μm 'ye düşürülmüş, CGH-Fizeau interferometri ile nihai form hatası 0.47 μm olarak doğrulanmıştır.

Tang vd. [16], CaF_2 kristalinin SPDT ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünü (S_a) öngörmek amacıyla deneysel verilerden yanıt düzeyi metodu (RSM), kriging ve yapay sinir ağı (S-ANN) tabanlı modeller geliştirmiştir. Çalışmada, kesme derinliği $d = 200$ nm sabit tutulmuş; devir hızı, ilerleme ve rake açısının etkileri incelenmiştir. Bulgular, devir hızının artmasıyla S_a 'nın azaldığını, ilerlemenin artmasıyla S_a 'nın yükseldiğini ve

yaklaşık -15° rake açısında en düşük Sa değerlerinin elde edildiğini göstermiştir. Sa'yı devir hızı, ilerleme ve rake açına bağlı olarak tanımlayan çok terimli bir regresyon modeli geliştirmiş; modelde devir hızının artışının Sa'yı düşürdüğü, F'nin artışının Sa'yı yükselttiği, rake açısında ise negatif değerlerin daha düşük Sa ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. İkinci dereceden çok terimli lineer olmayan bir regresyon denklemi, Sa ile kesme parametreleri arasındaki ilişkiyi ifade etmek üzere deneysel verilere dayanarak elde edilmiştir. Karşılaştırmada, S-ANN modeli en yüksek doğrulukla sonuç vermiş ($R^2 \approx \%99.6$, $RMSE \approx 0.38$ nm), bu nedenle CaF_2 işlenebilirliğinde güvenilir bir öngörü aracı olarak önerilmiştir.

Bu çalışmada, optik kalite tek kristal germanyum lens yüzeylerinin tornalanarak işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelemektedir. 40 mm çapında ve 2 mm kalınlığında germanyum lens yüzeylerinin 12 farklı deneyin çeşitli kesme parametreleriyle işlenmesi ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesini amaçlamıştır. Deneyler, elmas uçlu torna tezgahında belirli parametreler doğrultusunda işlenmiş ve yüzey pürüzlülüğü, Fizeau interferometresi ve beyaz ışık interferometresi ile ölçülerek tepe-vadi yüksekliği farkı (PV), aritmetik ortalama yükseklik değerleri ve bu değerlere ait topografik model elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri ile modellenmesinde regresyon ve yanıt yüzeyi metodolojisine (RSM) dayalı yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır [17-20]. Bu yaklaşım, deney sayısını sınırlı tutarken parametre etkileşimlerinin modellenmesine ve proses optimizasyonuna olanak tanımaktadır. Bu çalışmada kullanılan lineer ve ikinci dereceden (lineer olmayan) regresyon modelleri de kavramsal olarak RSM çerçevesi ile uyumludur; ancak tasarım olarak tam faktöriyel $3 \times 2 \times 2$ düzen tercih edilmiştir. Kesme parametrelerinin Sa değerleri üzerindeki etkisi belirlenmiş ve elde edilen verilerle lineer ve lineer olmayan (non-linear) regresyon tahmin modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller, belirli kesme parametreleri altında yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesine olanak tanımaktadır. Bu denklemler sonucu zamandan ve deneyde kullanılan germanyum alttaşı, torna ucu gibi tornalama işlemlerinde kullanılan malzemelerden kar edileceği öngörülmüştür.

2. Materyal ve yöntem

Yapılan işlemlerde devir hızı (Spindle Speed-rpm), kesme derinliği (deep of cut- μ) ve ilerleme hızı (feedrate-mm/dk) parametrelerinin farklı kombinasyonlarının malzeme işleme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde tek bir adet 40 mm çapından 2 mm kalınlığında optik kalite tek kristal germanyum numune kullanılmıştır (Şekil 1). Üç farklı torna mili devir hızı (1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm), iki farklı kesme derinliği (3 μ , 6 μ) ve ilerleme hızı (2 mm/dk, 5 mm/dk) parametreleri kullanılmak üzere 12 farklı deney yapılmıştır. Her deney öncesinde yeni bir yüzey oluşturmak için yüzeyden iki seferde (4 μ + 4 μ) toplam 8 μ talaş kaldırılmıştır. Deney tasarımında tam faktöriyel tasarım yöntemi uygulanmış olup, her bir parametre kombinasyonu birer kez test edilmiştir.



Şekil 1. Deney süresince kullanılan germanyum alttaş

Yapılan deneyler Şekil 2'de verilen Precitech Nanoform X ultra hassas tek nokta elmas torna cihazında gerçekleştirilmiştir. Tüm işlemler ISO 8 sınıfı temiz oda laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Makine, granit gövde üzerinde hava yataklı C-eksen iğ ve sürtünmesiz X-Z doğrusal eksenleri ile nm mertebesinde

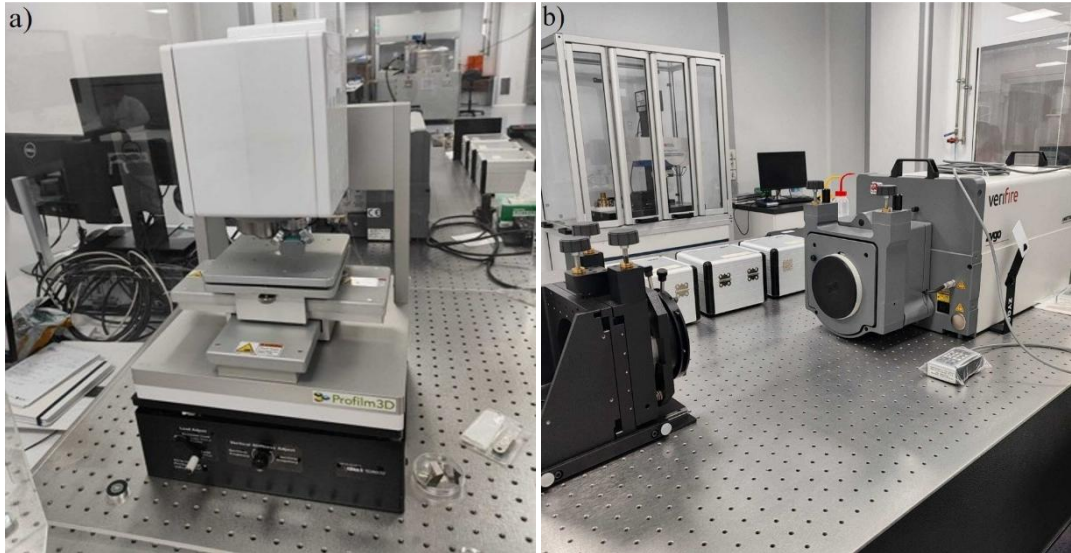
konumlama hassasiyeti sağlamaktadır. Parça vakum/mandren ile bağlandıktan sonra takım sıfırlaması yapılır ve CAD tabanlı takım yolu uygulanır. Devir hızı (rpm), ilerleme hızı (mm/dev) ve kesme derinliği (μ) parametreleri seçilerek C-eksen döndürülür ve X-Z eksenleri eşzamanlı hareket eder. Kırılgan kızılötesi malzemelerde (Ge, Si, CaF_2) negatif rake ve nm- μm düzeyinde d tercih edilerek sünek rejim hedeflenir. Bu mimari, nm düzeyinde pürüzlülük ve sub- μm form doğruluğu gerektiren IR optik bileşenlerin üretimine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada kullanılan polinom tabanlı regresyon modeli, RSM literatüründe yaygın olarak kullanılan birinci ve ikinci dereceden yaklaşımlarla uyumludur [17].



Şekil 2. Nanoform X cihazı ve kontrol paneli

2.1 Optik metroloji ve deney parametreleri

Her deneyden sonra beyaz ışık interferometresinde (WLI) dört farklı çap değerinden (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm) ortalama yüzey pürüzlülüğü (S_a), Fizeau lazer interferometresinden de yüzey profili (peak-to-valley, PV) ölçümü alınmıştır. Elde edilen veriler, işleme parametrelerinin malzeme üzerindeki etkilerini analiz etmek ve optimum parametre kombinasyonlarını belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir.

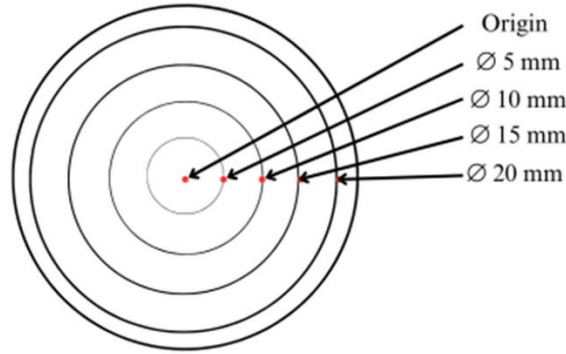


Şekil 3. a) Filmetrics® Profilim 3D beyaz ışık interferometresi (WLI), yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için b) Zygo Verifire® fizeau interferometresi, yüzey topografyasını elde etmek için kullanılmıştır

Yüzeylerin S_a değerleri beyaz ışık interferometri (WLI) prensibiyle çalışan Filmetrics® Profilim3D optik profilometresi (Şekil 3a) kullanılarak elde edilmiştir. İki farklı interferometrik objektif lensi (michelson ve mirau interferometreleri) bünyesinde barındıran bu cihaz, beyaz LED ışığının numune yüzeyinde oluşturduğu girişim

desenlerini desenlerinin analiziyle yüzey topoğrafyasını belirler. Zygo verifire ile kullanılarak ölçüm doğruluğunun artırılması amaçlanmıştır. Elde edilen Sa değerleri bu cihazda ölçülmüştür.

Zygo Verifire, fizeau tipi bir interferometredir (Şekil 3b). Ölçümde geniş alan ışık kaynağı (genellikle He-Ne lazer ya da beyaz ışık) kullanılır. Test yüzeyi ile yüksek optik kaliteli referans optik (fizeau flat veya fizeau lens) arasındaki girişim saçakları kaydedilir. Çalışma prensibi, referans optik ile numune yüzeyi arasındaki optik yol farkının faz farkına dönüşmesidir. Bu özellikleri sayesinde yüksek çözünürlük ve hassasiyetle yüzey ölçümü yapan etkili bir araçtır. Yüzey profilini çok ince ayrıntısına kadar çıkardığı için PV veya Sa gibi değerlerin çok güvenilir ve tekrar edilebilir şekilde ölçülmesi sağlanır.



Şekil 4. WLI ile Sa verilerinin alındığı yarıçap noktaları

Çizelge 2’de gösterilen parametrelere göre yapılan tornalama işlemlerinden sonra, orijine 5, 10, 15 ve 20 mm mesafeden (Şekil 4) fizeau ve beyaz ışık interferometrelerinden görüntüler alınmıştır. Elde edilen en iyi Sa değerine göre Çizelge 3 oluşturulmuştur.

Çizelge 2. Deney parametreleri

No.	Devir Hızı (N-rpm)	Kesme Derinliği (d-μ)	İlerleme hızı (fr-mm/dk)
D1	1000	3	2
D2	1000	6	2
D3	1000	3	5
D4	1000	6	5
D5	2000	3	2
D6	2000	6	2
D7	2000	3	5
D8	2000	6	5
D9	3000	3	2
D10	3000	6	2
D11	3000	3	5
D12	3000	6	5

Tornalama işleminde kullanılan parametrelerden olan devir hızı düşük seviyede (1000 rpm) -1, orta seviyede (2000 rpm) 0 ve yüksek seviyede (3000 rpm) +1 olarak kodlanmıştır. Bir diğer parametre olan kesme derinliği ise düşük seviyede (3 μ) -1, yüksek seviyede (6 μ) +1 olarak kodlanmıştır. Son parametremiz ilerleme hızı düşük seviyede (2 mm/dk) -1, yüksek seviyede (5 mm/dk) +1 olarak kodlanmıştır. Yapılan çalışma 3x2x2 faktörlü olarak ele alınmıştır. Denklem (1)’de gösterilen formüle göre de β katsayıları belirlenerek tahmin denklemi türetilmiştir. Burada X, -1,0 ve +1 ile kodlanan tasarım matrisi, y ise interferometreden alınan pürüzlülük değerleri olmak üzere:

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y \quad (1)$$

Tahmin denklemi için lineer ve non-lineer regresyon analizi olarak iki farklı yol izlenmiş, Denklem (2) ve Denklem (3) kullanılmıştır.

$$Sa_{linear} = \beta_1 + \beta_2 N + \beta_3 d + \beta_4 fr + \beta_5 Nd + \beta_6 Nfr + \beta_7 frd + \beta_8 Ndfr \quad (2)$$

$$Sa_{nonlinear} = \beta_1 + \beta_2 N + \beta_3 d + \beta_4 fr + \beta_5 N^2 + \beta_6 fr^2 + \beta_7 d^2 + \beta_8 Nd + \beta_9 Nfr + \beta_{10} frd + \beta_{11} Ndfr \quad (3)$$

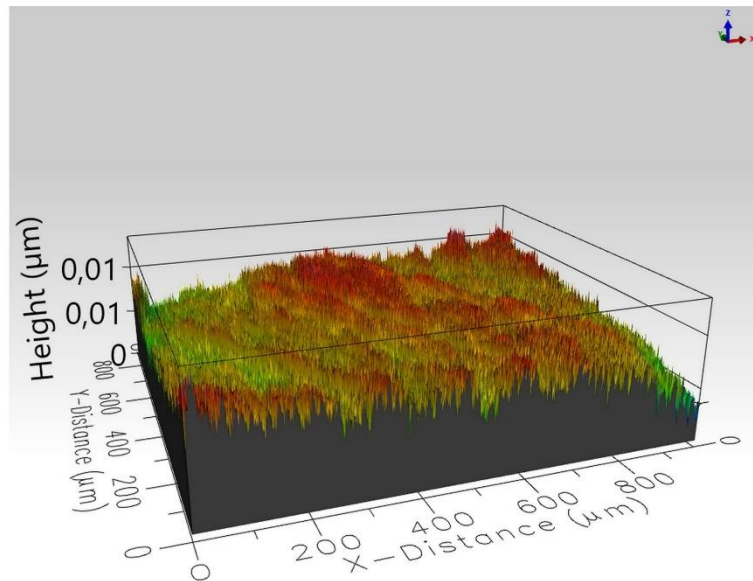
3. Bulgular ve tartışma

Yapılan ölçümler ile 12 deney için toplamda 48 farklı ölçüm kombinasyonları oluşmuştur. En uygun işlemler yarıçap fark etmeksizin değerlendirildiğinde Çizelge 3'te yazan sonuçlar elde edilmiştir. En düşük aritmetik ortalama pürüzlülük (Sa) değeri 1.065 nanometre ile 9. deneydir. Bu sonuç $\varnothing 10$ mm'de ölçülmüş ve orijin ile çapın tam orta noktasıdır. En düşük tepe-vadi yüksekliği farkı (PV) değeri ise ilk deneyde, 131.62 nm olarak bulunmuştur.

Çizelge 3. 12 Deneyin PV ve interferometrelerden elde edilen Sa değerleri

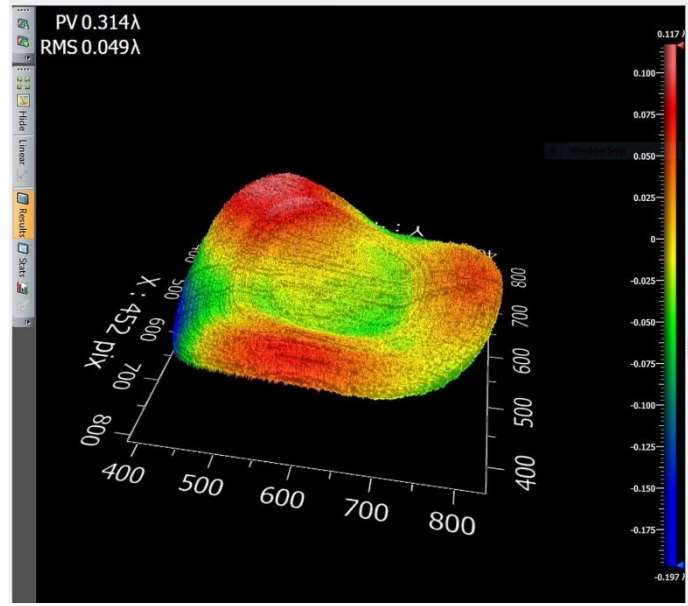
No.	PV (nm)	Sa (nm)
D1	131.62	1.79
D2	510.35	1.62
D3	482.83	2.21
D4	294.57	2.71
D5	184.14	1.92
D6	244.26	1.65
D7	178.13	1.47
D8	137.95	1.54
D9	199.02	1.06
D10	235.09	1.35
D11	239.83	1.83
D12	247.11	1.15

Tornalanan alttaşın kırmızı lazer interferometredeki yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Pürüzlülük değeri ölçümündeki değer, alttaşın beyaz ışık interferometresi ile 3D topoğrafyasına bakılarak kontrol edilmiştir. Sa değeri yaklaşık olarak 1.065 nm ölçülmüştür (Şekil 5). Sa değerinin düşük olması yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, daha homojen ve düzgün bir yüzey elde edildiğini göstermektedir. Yapılan çalışmada 9. deneyde kullanılan parametrelerin, diğer işlem parametreleri ile karşılaştırıldığında Sa değerinde düşüşe, yüzeyin genel homojenliğinin ve işleme kalitesinde artışa sebep olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için en uygun seçenektir. Bu yüzey, optik sistemler ve yüzey estetiği projeler gibi hassasiyetin kritik olduğu durumlarda tercih edilebilir. PV değeri 199.02 nm olarak bulunmuştur (Şekil 6).



Şekil 5. Dokuzuncu deneyin 10 mm yarıçapında ve beyaz ışık interferometresindeki yüzey kesit formu

En düşük Sa D9'da (1.06 nm) ölçülmesine rağmen PV sıralamasında 5. sırada yer alması ($0.629 \lambda \approx 199 \text{ nm}$), bu numunede ortalama pürüzlülük düşük olsa da yerel tepe-vadi farklarının görece yüksek kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, ortalama genliğin kritik olduğu durumlarda Sa, tekil hataların/saçılmanın kritik olduğu optik uygulamalarda ise PV önceliklendirilmelidir. Gerçekleştirilen yüzey topoğrafyası analizinde numunenin kök-ortalama-kare yüksekliği (Sq) 1.346 nm olup Sa'ya yakın değerde bulunması, yükseklik dağılımının uç değerlerden sınırlı düzeyde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Maksimum tepe ile maksimum çukur arasındaki yükseklik farkını ifade eden (Sz) parametresi yaklaşık olarak 13.41 nm olarak ölçülmüş, bu da yüzeyin ekstrem sapmalar açısından dengeli olduğunu göstermiştir. Eğrilik katsayısı (Ssk) -0.3349 olup yüzey profilinin hafif çukur ağırlıklı olduğunu, sivrilik katsayısı (Sku) ise 3.317 olup yükseklik dağılımının Gauss tipine yakın olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, yüzeyin hem ortalama pürüzlülük hem de maksimum yükseklik farkı bakımından yüksek yüzey kalitesine sahip olduğunu göstermektedir.

**Şekil 6.** Dokuzuncu deneyin kırmızı lazer interferometresindeki yüzey formu

Bu formül malzeme/takım kataloglarının verdiği önerilen hızlara göre uygun devir ayarlamak (veya tersi) için temel bağlantıdır. Burada V kesme hızı, D parça çapı ve N devir hızıdır. Denklem (4)'te verilen kesme hızı, tornalamada iş parçası yüzeyindeki çevresel hızdır ve çap ile devir hızına doğrusal bağlıdır.

$$V = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (4)$$

Seçilen parametrelerle yapılan deneylerin beyaz ışık interferometresinden alınan Sa sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. 48 deneyin Sa sonuçları

Numune	Yarıçap (mm)	N (rpm)	V (m/dk)	d (μ)	fr (mm/dk)	Sa (nm)
1	5	1000	15.70	3	2	2.40
1	10	1000	31.41	3	2	1.79
1	15	1000	47.12	3	2	1.77
1	20	1000	62.83	3	2	1.84
2	5	1000	15.70	6	2	1.77
2	10	1000	31.41	6	2	1.88
2	15	1000	47.12	6	2	1.62

2	20	1000	62.83	6	2	2.28
3	5	1000	15.70	3	5	2.59
3	10	1000	31.41	3	5	2.27
3	15	1000	47.12	3	5	2.42
3	20	1000	62.83	3	5	2.21
4	5	1000	15.70	6	5	4.64
4	10	1000	31.41	6	5	3.01
4	15	1000	47.12	6	5	4.33
4	20	1000	62.83	6	5	2.71
5	5	2000	31.41	3	2	3.11
5	10	2000	62.83	3	2	2.1
5	15	2000	94.24	3	2	4.42
5	20	2000	125.66	3	2	1.93
6	5	2000	31.41	6	2	2.86
6	10	2000	62.83	6	2	2.44
6	15	2000	94.24	6	2	1.87
6	20	2000	125.66	6	2	1.65
7	5	2000	31.41	3	5	2.19
7	10	2000	62.83	3	5	2.64
7	15	2000	94.24	3	5	1.47
7	20	2000	125.66	3	5	1.73
8	5	2000	31.41	6	5	1.54
8	10	2000	62.83	6	5	2.05
8	15	2000	94.24	6	5	2.07
8	20	2000	125.66	6	5	1.72
9	5	3000	47.12	3	2	1.78
9	10	3000	94.24	3	2	1.06
9	15	3000	141.37	3	2	2.17
9	20	3000	188.49	3	2	1.87
10	5	3000	47.12	6	2	1.78
10	10	3000	94.24	6	2	1.35
10	15	3000	141.37	6	2	1.59
10	20	3000	188.49	6	2	1.49
11	5	3000	47.12	3	5	2.11
11	10	3000	94.24	3	5	4.14
11	15	3000	141.37	3	5	1.83
11	20	3000	188.49	3	5	3.15
12	5	3000	47.12	6	5	3.55
12	10	3000	94.24	6	5	1.86
12	15	3000	141.37	6	5	1.53
12	20	3000	188.49	6	5	1.55

Materyal ve yöntem kısmında gösterilen matematiksel modelleme kullanılarak lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve beyaz ışık interferometresinden alınan sonuçlar ile tahmin sonuçları Çizelge 5'te karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden hata oranları incelenerek algoritmanın performansı değerlendirilmiştir.

Çizelge 5. Lineer regresyon analizi sonuçları

Katsayılar (β)	Gerçek y (nm)	Tahmini y (nm)	Fark (nm)	Yüzde Hata (%)	Ortalama Mutlak Hata (MAE) (nm)	Ortalama Kare Hata (MSE) (nm ²)	R-kare (R ²)
2.0005	1.794	2.0195	0.2255	12.5697	0.2926	0.1025	0.6292
-0.3943	1.884	2.1593	0.2753	14.6143			

0.101	2.266	2.515	0.249	10.9885
0.2268	3.013	2.8852	0.1278	4.2427
-0.0265	2.106	1.655	0.4510	21.415
-0.0785	2.443	1.8923	0.5507	22.5406
-0.0177	2.642	2.144	0.4980	18.8494
-0.0753	2.055	2.3107	0.2557	12.4412
-	1.065	1.2905	0.2255	21.1737
-	1.35	1.6253	0.2753	20.3951
-	1.524	1.773	0.249	16.3386
-	1.864	1.7362	0.1278	6.858

Analize göre oluşan tahmin denklemi, Denklem (5)'teki gibi elde edilmektedir:

$$Sa_{lineer} = 2 - 0.39V + 0.1d + 0.23fr - 0.03Vd - 0.08Vfr - 0.02frd - 0.08Vdfr \quad (5)$$

Denklem 5'e bakıldığında, devir hızının artışı yüzey pürüzlülüğünü düşürmekte önemli bir parametre olarak yorumlanabilir. En yüksek katsayıya sahip olması, en büyük etkiye sahip olacağını göstermektedir. Kesme derinliğindeki artışın, pürüzlülükte artışa neden olabileceği öngörülmektedir. İlerleme hızındaki artışın da pürüzlülükte artışa neden olabileceği söylenebilir. Yine de denklemin tamamına göre hesabın yapıpı çıkın sonuca göre yorumlanması, daha doğru bir tahminle deney parametreleri seçmeye olanak sağlayacaktır.

Çizelge 6. Lineer olmayan regresyon denklemine göre 12 deneyin analizi

Gerçek y (nm)	Tahmini y (nm)	Fark (nm)	Yüzde hata (%)
1.794	1.8396	-0.0456	2.5394
1.884	1.9364	-0.0524	2.7803
2.266	2.3176	-0.0516	2.2791
3.013	2.9591	0.0539	1.7876
2.106	2.0541	0.0519	2.4627
2.443	2.2445	0.1985	8.1247
2.642	2.5217	0.1203	4.5518
2.055	2.9616	-0.9066	44.1168
1.065	1.1171	-0.0521	4.8907
1.35	1.401	-0.051	3.779
1.524	1.5742	-0.0502	3.2944
1.864	1.8124	0.0516	2.7666

Çizelge 6'da lineer olmayan regresyon analizi sonuçları görülmektedir. İlk yapılan lineer regresyon analizinde, 2000 devirde salınan değerlerin etkisiyle hata oranlarının yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durumu iyileştirmek için lineer modelin ötesine geçilerek, kareli terimler içeren bir lineer olmayan tahmin denklemi türetilmiştir. Yeni denklemde, x_1^2 , x_2^2 gibi ikinci dereceden terimler kullanılarak modelin doğruluk payı artırılmıştır. Bu düzenleme sonucunda, hata oranları gözle görülür şekilde azalmış ve %10'un altına inmiştir. Ancak, yalnızca 8. deneydeki düzensiz ve istikrarsız veri yapısı nedeniyle bu deneyde hata oranı yüksek kalmıştır. Lineer olmayan regresyon denklemine göre oluşan formül Denklem (6)'da gösterilmiştir.

$$Sa_{nonlinear} = 2,06 + 1,41V - 0,15d - 0,09fr - 1,98V^2 - 0,15fr^2 - 0,09d^2 + 0,5Vd + 0,43Vfr + 0,86frd - 0,79Vdfr \quad (6)$$

Bu çalışmada en düşük Sa değerlerinin, genel olarak yüksek devir/kesme hızı, düşük ilerleme ve düşük kesme derinliği kombinasyonlarında elde edildiği görülmüştür. Bu eğilim, tornalama/SPDT literatüründe sıklıkla raporlanan 'hız arttıkça yüzey kusurlarının azalması, ilerleme ve kesme derinliği arttıkça pürüzlülüğün artması' bulgusuyla uyumludur [19], [20]. Mekanizma açısından, hız artışıyla daha kararlı kesme ve daha düşük kırılma riskinin yükselmesi beklenir. Öte yandan tek kristal Ge'de kristal yönelimi, takım geometrisi ve ölçüm tekniği gibi

etkenler, bazı koşullarda literatürdeki değerlerden sapmalara yol açabilir. Bu nedenle burada sunulan model ve sonuçlar, özellikle çalışılan parametre aralığında hızlı ayar/optimizasyon rehberi olarak değerlendirilmelidir.

4. Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada tek kristal Ge alttaş üzerinde yürütülen $3 \times 2 \times 2$ tam faktöriyel deney tasarımı (N: 1000/2000/3000 rpm; d: 3/6 μm ; fr: 2/5 mm/dk), yüzey pürüzlülüğü Sa'nın en düşük değeri 1.065 nm ile N=3000 rpm, d=3 μm , fr=2 mm/dk koşullarında elde edilmiştir. Buna karşılık, PV (tepe-vadi) en düşük değer 131.62 nm ile N=1000 rpm, d=3 μm , fr=2 mm/dk koşulunda gözlenmiştir. Bu durum Sa ve PV hedeflerinin her zaman aynı noktada çıkmadığını göstermektedir. Lineer modelde hızın (N) Sa'yı düşüren baskın etken olduğu, ilerleme (fr) ve kesme derinliğinin (d) artışının ise Sa'yı yükseltme eğiliminde bulunduğu görülmüştür. Lineer olmayan (kareli terimli) model, lineer modele göre hata oranlarını anlamlı ölçüde düşürmüş, tüm koşullarda hatalar %10'un altına inerken yalnızca bir deney kombinasyonunda düzensiz veri davranışı nedeniyle sapma yüksek kalmıştır. Bu bulgular, çalışma penceresi içinde geliştirilen ampirik modellerin, nm düzeyi Sa hedeflerinde hızlı ayar rehberi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Geliştirilen lineer ve lineer olmayan regresyon denklemleri, yalnızca çalışma penceresi (N: 1000–3000 rpm; d: 3–6 μm ; fr: 2–5 mm/dk) ve kullanılan takım geometrisi ($\gamma \approx -25^\circ$, $\alpha \approx 10^\circ$) için geçerlidir. Pencere dışındaki hedefler için yeniden kalibrasyon ve yeni denklem önerilir. Model, atölye uygulamasında parametre girildiğinde beklenen Sa'yı hızlıca öngörerek deneme-yanılma maliyetini düşürür.

Teşekkür

Bu çalışma Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi BAP 2024-YLTP-Müh-0009 numaralı proje tarafından desteklenmiştir. Kamer Dorukhan KESME deney tasarımı oluşturmuş ve deneyleri gerçekleştirmiştir. Tahsin AYDIN verileri yorumlamış ve derlemiştir. Ekrem YARTAŞI istatistiksel analizleri, regresyon ve RSM tabanlı modellemeleri gerçekleştirmiş ve sonuçların yorumlanmasına katkı sağlamıştır. Tüm yazarlar makalenin yazımına katkıda bulunmuş ve son halini onaylamıştır.

Kaynaklar

- [1] K. P. Bouzoukis, G. Moraitis, V. Kostopoulos, and V. Lappas, "An Overview of CubeSat Missions and Applications," Jun. 01, 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- [2] E. F. J. Ring and K. Ammer, "Infrared thermal imaging in medicine," 2012, IOP Publishing Ltd.
- [3] C. T. Dang, T. Balaz, and M. Kyselak, "Research on the Design of a 4-Lens Athermalized Refractive Optical System in the LWIR Spectral Region," in 2025 10th International Conference on Military Technologies, ICMT 2025 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2025.
- [4] J. Wang, J. Frantz, E. Chumbley, A. Samad, and H. Hu, "An Explorative Study on Using Carbon Nanotube-Based Superhydrophobic Self-Heating Coatings for UAV Icing Protection," *Molecules*, vol. 30, no. 17, Sep. 2025.
- [5] J. Zheng, Z. Liu, and X. Yu, "Thermal UAV image super-resolution via bimodal image feature fusion," *Int J Remote Sens*, vol. 46, no. 1, pp. 205–225, 2025.
- [6] M. Khan, M. M. Su'ud, M. M. Alam, S. Karimullah, F. Shaik, and F. Subhan, "Enhancing Breast Cancer Detection Through Optimized Thermal Image Analysis Using PRMS-Net Deep Learning Approach," *J Imaging Inform Med*, 2025.
- [7] M. Sudhi, D. K. Shetty, J. M. Balakrishnan, D. R. Prabhu, R. Kamath, and S. Girisha, "Thermal Imaging Applications in Shock Detection: Technological Advancements and Clinical Implications," Feb. 01, 2025, Engineered Science Publisher.
- [8] Q. Liu et al., "Infrared thermography in clinical practice: a literature review," Jan. 16, 2025.
- [9] P. Anu, P. Sharma, H. Kumar, N. Sharma, P. Rani, and K. Immanuel Arokia James, "Machine learning in multi-spectral thermal imaging for enhanced detection of neurological disorders through thermoplasmonics," *J Therm Biol*, vol. 129, Apr. 2025.
- [10] L. He et al., "Compact Infrared Imaging System Based on Small-Diameter Chalcogenide Glass Fiber Bundles," *J. Lightwave Technol*, vol. 43, no. 14, pp. 6887–6893, 2025.
- [11] J. Q. Li, X. L. Xia, Z. W. Zheng, and X. Chen, "Inverse analysis on non-uniform temperature and emissivity fields based on multispectral infrared thermal image data," *Appl Therm Eng*, vol. 267, May 2025.
- [12] M. Tunesi, N. E. Sizemore, M. A. Davies, and D. A. Lucca, "Effect of cutting speed in single point diamond turning of (100)Ge," *Manuf Lett*, vol. 38, pp. 15–18, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.mfglet.2023.08.144.
- [13] G. Zhang, J. Han, Y. Chen, J. Wang, and H. Wang, "Brittle-ductile transition and nano-surface generation in diamond turning of single-crystal germanium," *J Manuf Process*, vol. 82, pp. 628–645, Oct. 2022.
- [14] G. Zhang, Z. Huo, J. Han, W. Zhang, and J. Zheng, "Cutting depth-oriented surface morphology control in diamond-turning brittle single-crystal germanium," *J Mater Process Technol*, vol. 319, Oct. 2023.

- [15] K. K. Prasad, M. P. Singh, V. S. Negi, V. Mishra, S. Jha, and G. S. Khan, "Ductile machining of single-crystal germanium freeform optics via ultra-precision diamond turning for high-performance infrared imaging systems," *Precis Eng.*, vol. 96, pp. 380–397, Oct. 2025.
- [16] K. E. Tang, Y. C. Huang, W. T. Lin, Y. C. Cheng, and C. W. Liu, "Optimization of single-point diamond turning processes for single crystal calcium fluoride: A surrogate model for surface roughness prediction," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 136, no. 2, pp. 775–787, Jan. 2025.
- [17] R. H. Myers, D. C. Montgomery and C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 4th ed., Wiley, New York, 2016.
- [18] M. Hasegawa, S. Serega and R. Lindberg, "Surface roughness model for turning," *Tribol. Int.*, vol. 9, no. 6, pp. 285–289, 1976.
- [19] P. Benardos and G. Vosniakos, "Predicting surface roughness in machining: a review," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.
- [20] T. Özel and Y. Karpat, "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 4–5, pp. 467–479, 2005.