

RPI TORNA DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMALI ZAMANI ÇOXMEYARLI OPTİMALLAŞDIRMA VƏ SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMALARI

Nizami Dəmir oğlu Yusubov, Heyran Mürşüd qızı Abbasova, Ramil Yengibar oğlu Dadaşov
Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPROACHES IN THE MACHINING OF CONICAL SURFACES ON CNC LATHES

Nizami Damir Yusubov, Heyran Murshud Abbasova, Ramil Yengibar Dadashov

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

nizami.yusubov@aztu.edu.az, abbasova.heyran@aztu.edu.az, dadashov@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>,

<https://orcid.org/0000-0003-1786-8060>

Abstract. The article analyzes the influence of technological parameters on surface quality and productivity during the machining of conical surfaces on CNC lathes using a system-based approach. The machining process is shown to be multi-parameter, interconnected, and non-stationary. Surface roughness is formed not only by geometric factors but also by deformation, thermal, and tribological effects. Feed rate is identified as the dominant parameter, while cutting speed and depth of cut have mainly indirect effects. The variation of diameter causes local changes in cutting speed, limiting the applicability of classical models. The trade-off between surface quality and productivity is formulated as a multi-criteria optimization problem and addressed using the Pareto approach. The potential of artificial intelligence methods is also justified.

Keywords: CNC lathe, conical surfaces, surface quality, multi-criteria optimization, artificial intelligence.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

GİRİŞ

Müasir maşınqayırma sənayesində istehsalın səmərəliliyinin artırılması və yüksək keyfiyyətli səthlərin əldə edilməsi əsas problemlərdəndir. Detalların etibarlılığı və yeyilməyə davamlılığı səth keyfiyyətindən asılıdır. Bu baxımdan səthin kələ-kötürlüyü (R_a) mexaniki emal proseslərinin əsas göstəricilərindən biri olub, onun formalaşması kəsmə zonasındakı mürəkkəb fiziki və mexaniki proseslərlə bağlıdır [1, s. 15–25], [2, s. 120–160], [3].

Məhsuldarlığın artırılması da mühüm tələbdir, lakin səth keyfiyyəti ilə məhsuldarlıq arasında ziddiyyət mövcuddur və bu, prosesi çoxmeyarlı optimallaşdırma məsələsinə çevirir. Kəsmə prosesində texnoloji parametrlərin dəyişməsi kəsmə qüvvələrinə, istilik yaranmasına və alət-detallı qarşılıqlı təsirinə birbaşa təsir göstərir ki, bu da emal prosesinin həm məhsuldarlığına, həm də səth keyfiyyətinə təsir edən əsas mexanizmlərdən biridir [4, s. 405–420], [5, s. 50–70], [6,7].

RPI torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Detalın diametrinin dəyişməsi kəsmə sürətinin sabit olmasına və prosesin qeyri-stasionar xarakter almasına səbəb olur. Müasir tədqiqatlar göstərir ki, səthin formalaşması yalnız həndəsi amillərlə deyil, həm də deformasiya, istilik və sürtünmə proseslərinin kompleks qarşılıqlı təsiri ilə müəyyən edilir [4], [8, s. 100–130]. Bundan əlavə, müxtəlif emal üsullarında aparılan eksperimental tədqiqatlar səth keyfiyyətinin texnoloji rejimlərdən və emal şəraitindən asılı olaraq dəyişdiyini göstərir [9], [10–12]. Texnoloji parametrlərin modelləşdirilməsi üçün empirik və statistik metodlar, o cümlədən çıxış parametrlərinin səth metodologiyası, Taguchi üsulu və süni intellekt yanaşmaları tətbiq olunur. Xüsusilə neyron şəbəkələr və hibrid optimallaşdırma metodları mürəkkəb asılılıqların müəyyən edilməsində yüksək effektivlik göstərir [13–17].

Son tədqiqatlar mexaniki emal proseslərinin daha dəqiq təsviri üçün yeni modelləşdirmə yanaşmalarının vacibliyini göstərir. Taguchi metodununun tətbiqi ilə optimallaşdırma da geniş şəkildə araşdırılmışdır [18,19].

Çoxmeyarlı optimallaşdırma Pareto yanaşmasına əsaslanır və bu sahədə əsas işlərdən biri K. Deb tərəfindən işlənmişdir. Səth keyfiyyətinə təsir edən amillər texnoloji, konstruktiv və proses amilləri kimi qruplaşdırılır [20, 21].

Beləliklə, konik səthlərin emalı mürəkkəb və çoxparametrlı prosesdir və bu prosesdə keyfiyyətlə məhsuldarlıq arasında optimal balansın tapılması əsas məqsəddir.

TEXNOLOJİ PROSESİN SİSTEM YANAŞMASI

RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı mürəkkəb, çoxparametrlı və qarşılıqlı əlaqəli texnoloji prosesdir. Müasir kəsmə nəzəriyyəsinə görə emal nəticələri ayrı-ayrı parametrlərin deyil, onların kompleks qarşılıqlı təsiri ilə formalaşır [4, s. 405–420], [5, s. 10–25]. Bu baxımdan sistem yanaşması prosesin fiziki mahiyyətinin daha adekvat izahına imkan verir.

Texnoloji baxımdan torna emalı giriş və çıxış dəyişənləri arasında əlaqəyə malik idarə olunan sistem kimi qəbul edilir. Giriş dəyişənləri ($t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a$ – Cədvəl 1) səth kələ-kötürlüyü (R_a) və məhsuldarlıq (Q) kimi çıxış göstəricilərinə təsir edir. Bu parametrlər arasında əlaqə qeyri-xətti və qarşılıqlı asılı xarakter daşıyır [4, s. 405–420], [7], [8, s. 120–140].

Bu baxımdan texnoloji sistem çoxparametrlı funksional asılılıq kimi aşağıdakı şəkildə ifadə olunur:

$$R_a = f(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a) \quad (1)$$

$$Q = f(t, s, v) \quad (2)$$

Bu asılılıqlar texnoloji sistemin strukturunu və giriş dəyişənləri ilə çıxış göstəriciləri arasında mövcud olan qarşılıqlı təsir mexanizmini ümumiləşdirilmiş şəkildə ifadə edir. Müasir tədqiqatlar göstərir ki, emal prosesinin nəticələri yalnız ayrı-ayrı parametrlərin təsiri ilə deyil, həm də onların qarşılıqlı təsiri nəticəsində formalaşır və bu təsirlər əksər hallarda qeyri-xətti xarakter daşıyır [4, s. 405–420], [7], [8, s. 120–140].

Cədvəl 1

Texnoloji sistemin giriş və çıxış dəyişənləri və onların xarakteristikası

Grup	Parametrin adı	İşarə	Ölçü vahidi	Təsviri
Giriş dəyişənləri	Kəsmə dərinliyi	t	mm	Kəsilən material qatının qalınlığını müəyyən edir
	Veriş	s	mm/dövr	Səthin mikrorelyefinə (kələ-kötürlüyünə) birbaşa təsir edən əsas parametrlər
	Kəsmə sürəti	v	m/dəq	İstilik və triboloji şəraiti müəyyən edir
	Uc radiusu	r	mm	Səthin həndəsi formalaşmasına təsir edir
	Qabaq bucaq	γ	°	Talaş əmələ gəlmə mexanizmini müəyyən edir
	Arxa bucaq	α	°	Sürtünmə və kontakt şəraitinə təsir edir
	Alət yeyilməsi	h_a	mm	Alətin aşınma səviyyəsini xarakterizə edir
Çıxış dəyişənləri	Səthin kələ-kötürlüyü	R_a	μm	Emal olunmuş səthin keyfiyyət göstəricisi
	Məhsuldarlıq	Q	$\text{mm}^3/\text{dəq}$	Vaxt vahidində çıxarılan material həcmi

Cədvəl 1-dən görüldüyü kimi, texnoloji parametrlər kəsmə rejimləri, alət həndəsəsi və prosesin fiziki vəziyyəti üzrə qruplaşdırılır və onların qarşılıqlı təsiri emal nəticələrinin formalaşmasında həlledici rol oynayır.

Kəsmə rejimləri arasında veriş səthin kələ-kötürlüyünün formalaşmasında əsas parametrlərdir. Kəsmə sürəti əsasən istilik və triboloji proseslər vasitəsilə dolayı təsir göstərir, kəsmə dərinliyi isə materialın çıxarılma intensivliyini və kəsmə qüvvələrini müəyyən edir.

Alətin həndəsi parametrləri də mühüm rol oynayır. Uc radiusunun artması səthin kələ-kötürlüyünü azaltsa da, kəsmə qüvvələrini artırır. Qabaq və arxa bucaqlar isə talaş əmələ gəlməsi və sürtünmə şəraitinə təsir edir [4, s. 250–270], [5, s. 100–120], [6].

Alət yeyilməsi texnoloji sistemin dinamik göstəricilərindən biridir və onun artması səthin keyfiyyətinin pisləşməsinə səbəb olur.

Konik səthlərin emalında dəyişən diametr səbəbindən kəsmə sürətinin sabit olmaması prosesin qeyri-stasionar xarakter almasına gətirib çıxarır. Bu isə klassik modellərin tətbiqini çətinləşdirir.

Beləliklə, emal prosesinin effektiv idarə olunması parametrlərin ayrı-ayrılıqda deyil, onların qarşılıqlı təsiri nəzərə alınmaqla həyata keçirilməlidir.

ÇOXMEYARLI OPTİMALLAŞDIRMA YANAŞMASININ NƏZƏRİ ƏSASLARI

RPI torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərin seçilməsi bir neçə qarşılıqlı ziddiyyət təşkil edən meyarların eyni vaxtda nəzərə alınmasını tələb edir. Əsas məqsəd funksiyaları kimi səthin kələ-kötürlüyü (R_a) və məhsuldarlıq (Q) qəbul olunur. Praktiki olaraq səth keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması məhsuldarlığın azalmasına, məhsuldarlığın artırılması isə səth keyfiyyətinin pisləşməsinə səbəb olur. Bu səbəbdən emal prosesinin optimallaşdırılması çoxmeyarlı məsələ kimi çıxış edir [16, 17].

Çoxmeyarlı optimallaşdırma məsələsi ümumi şəkildə aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$R_a(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a) \rightarrow \min \quad (3)$$

$$Q(t, s, v) \rightarrow \max \quad (4)$$

Texnoloji sistem üçün optimallaşdırma məsələsi (3) və (4) ifadələrində göstəriləndi kimi səthin kələ-kötürlüyünün minimumlaşdırılması və məhsuldarlığın maksimumlaşdırılması ilə xarakterizə olunur. Bu halda məqsəd texnoloji parametrlərin elə optimal kombinasiyasını müəyyən etməkdir ki, səthin kələ-kötürlüyü minimum, məhsuldarlıq isə maksimum olsun. Lakin bu iki meyar bir-biri ilə ziddiyyət təşkil etdiyindən kompromis həllərin axtarılması tələb olunur.

Bu məqsədlə Pareto-optimal həll anlayışı tətbiq olunur. Pareto-optimal həll elə həllər çoxluğuudur ki, həmin həlli yaxşılaşdırmaq üçün digər məqsəd funksiyalarından ən azı birinin pisləşməsi qaçılmaz olur. Riyazi olaraq bu şərt aşağıdakı kimi ifadə olunur və bu bərabərsizliklərdən ən azı biri ciddi xarakter daşıyır.

$$R_a(X^*) \leq R_a(X) \quad (5)$$

$$Q(X^*) \geq Q(X) \quad (6)$$

(5) və (6) ifadələri Pareto-optimal həllin riyazi şərtini ifadə edir və bu yanaşma kompromis həllərin seçilməsinə imkan verir [17].

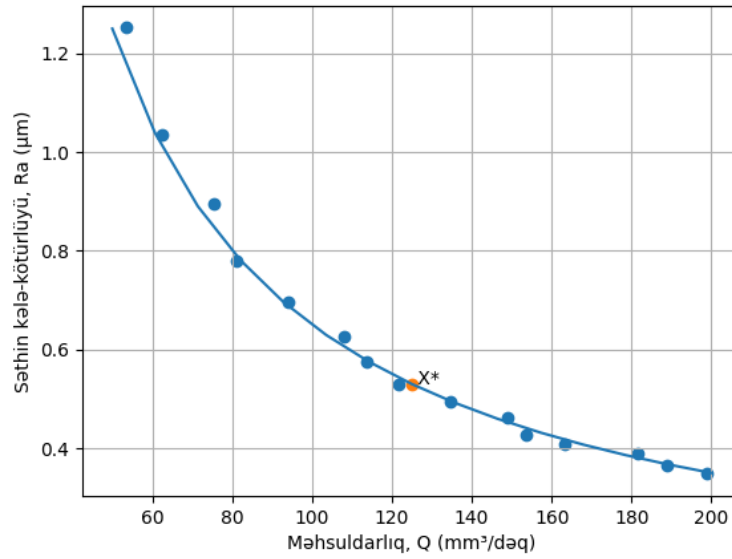
Çoxmeyarlı optimallaşdırmada səth keyfiyyəti və məhsuldarlıqla yanaşı alət yeyilməsi, kəsmə qüvvəsi və enerji sərfi də nəzərə alınır. Əsas meyarlar Cədvəl 2-də göstərilmişdir.

Cədvəl 2

Optimallaşdırma meyarları və məqsəd funksiyaları

Meyar	İşarə	Riyazi ifadə	Məqsəd istiqaməti	Fiziki mənası	Təsir edən əsas parametrlər
Səthin kələ-kötürlüyü	R_a	$R_a = f(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a)$	Minimum	Emal olunmuş səthin keyfiyyətini və mikroyəfəfini xarakterizə edir	s, r, v, h_a
Məhsuldarlıq	Q	$Q = f(t, s, v)$	Maksimum	Vaxt vahidində çıxarılan material həcmi göstərir	t, s, v
Alət yeyilməsi	h_a	$h_a = f(t, s, v)$	Minimum	Alətin yeyilmə intensivliyini və davamlılığını xarakterizə edir	$v, t, \text{temperatur}$
Kəsmə qüvvəsi	F	$F = f(t, s, v)$	Minimum	Enerji sərfiyyatını və sistemin yüklənməsini müəyyən edir	t, s
Enerji sərfi	E	$E = f(F, v)$	Minimum	Emal prosesinin enerji effektivliyini xarakterizə edir	F, v

Cədvəl 2-dən göründüyü kimi, optimallaşdırma məsələsi çoxparametrlili və qarşılıqlı əlaqəli xarakter daşıyır. Bu meyarlar arasında mövcud ziddiyyət Pareto-optimal həllər çoxluğunun müəyyən edilməsini zəruri edir. Çoxmeyarlı optimallaşdırma məsələsinin həlli Pareto-optimal həllər çoxluğu ilə xarakterizə olunur. Bu sahə səth keyfiyyəti və məhsuldarlıq arasında mövcud kompromis rejimləri əks etdirir. Pareto sərhəd xətti və optimal nöqtə Şəkil 1-də təqdim olunmuşdur.



Şəkil 1. Səthin kələ-kötürlüyü R_a (μm) və məhsuldarlıq Q (mm^3/daq) üzrə Pareto-optimal həllər sahəsi və optimal nöqtə (X^*)

Şəkil 1-dən göründüyü kimi, Pareto-optimal həllər sahəsi səthin kələ-kötürlüyü ilə məhsuldarlıq arasında ziddiyyəti əks etdirir. Məhsuldarlığın artması səth keyfiyyətinin pisləşməsi, səthin yaxşılaşdırılması isə məhsuldarlığın azalması ilə müşayiət olunur. Pareto sərhədindəki hər bir nöqtə optimal rejimi xarakterizə edir və seçim istehsal tələblərindən asılıdır.

Çoxmeyarlı optimallaşdırmada çəkili cəmlər metodu, Taguchi üsulu, çıxış parametrlərinin səth metodologiyası və genetik alqoritmlər tətbiq olunur. Süni intellekt metodları, xüsusilə neyron şəbəkələr və hibrid yanaşmalar mürəkkəb qeyri-xətti asılılıqların müəyyən edilməsində yüksək effektivlik göstərir [13–17]. Konik səthlərin emalında optimallaşdırma daha mürəkkəbdir, çünki proses qeyri-stasionardır və kəsmə sürəti diametrdən asılı olaraq dəyişir. Buna görə optimallaşdırma adaptiv və real vaxt rejimində aparılmalıdır [20], [21].

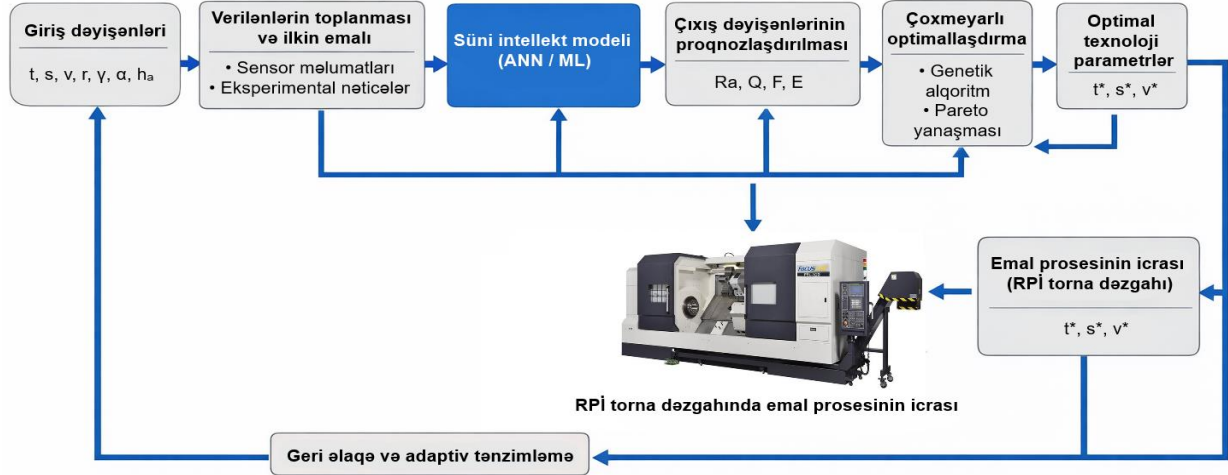
Beləliklə, çoxmeyarlı optimallaşdırma səth keyfiyyəti ilə məhsuldarlıq arasında optimal balansın təmin edilməsinə imkan verir.

TEXNOLOJİ PARAMETRLƏRİN İDARƏ EDİLMƏSİ VƏ SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMALARI

RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji prosesin effektivliyi parametrlərin idarə olunma səviyyəsindən asılıdır və qeyri-stasionar xarakter adaptiv idarəetməni zəruri edir. Emal prosesi giriş (t , s , v , r , γ , α , h_a) və çıxış (R_a , Q) dəyişənləri arasında əlaqəyə malik dinamik sistem kimi qəbul edilir. Diametrin dəyişməsi kəsmə sürətinin sabit saxlanmasını çətinləşdirir və parametrlərin adaptiv tənzimlənməsini tələb edir [20,21]. Süni intellekt metodları qeyri-xətti sistemlərin modelləşdirilməsi və optimallaşdırılmasında effektivdir. Neyron şəbəkələr parametrlər arasındakı asılılıqları modelləşdirir, genetik alqoritmlər isə Pareto-optimal həllərin tapılmasını təmin edir [16,17]. Bu yanaşmalar adaptiv idarəetmə və emal prosesinin səmərəliliyinin artırılmasına imkan verir. Texnoloji parametrlərin idarə olunması və optimallaşdırmanın süni intellektlə inteqrasiyası aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər:



Beləliklə, süni intellekt metodları texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mürəkkəb asılılıqların daha dəqiq modelləşdirilməsinə, optimallaşdırmanın effektiv həyata keçirilməsinə və emal prosesinin real vaxt rejimində idarə olunmasına şərait yaradır. Texnoloji parametrlərin süni intellekt əsasında idarə olunmasının ümumi strukturu Şəkil 2-də təqdim olunmuşdur.



Şəkil 2. RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı süni intellekt əsaslı adaptiv idarəetmə və optimallaşdırma sxemi

Şəkil 2-dən göründüyü kimi, RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərin idarə olunması süni intellekt əsaslı adaptiv sistem vasitəsilə həyata keçirilir. Giriş dəyişənləri kimi kəsmə dərinliyi t , veriş s , kəsmə sürəti v , alətin həndəsi parametrləri (r , γ , α) və alət yeyilməsi h_a qəbul olunur və ilkin olaraq verilənlərin toplanması və emalı blokunda formalaşdırılır.

Emal olunmuş məlumatlar süni intellekt modelinə ötürülərək giriş və çıxış dəyişənləri arasında mövcud olan qeyri-xətti asılılıqlar əsasında səth kələ-kötürlüyü R_a , məhsuldarlıq Q , kəsmə qüvvəsi F və enerji sərfi E proqnozlaşdırılır. Alınan nəticələr optimallaşdırma blokunda emal edilərək genetik alqoritmlər və Pareto yanaşması vasitəsilə optimal texnoloji parametrlər (t^* , s^* , v^*) müəyyən olunur və dəzgaha ötürülür.

Geri əlaqə mexanizmi vasitəsilə real nəticələr sistemə daxil edilir və bu, parametrlərin dəyişən şəraitə uyğun adaptiv tənzimlənməsini təmin edir.

Süni intellekt metodları, xüsusilə süni neyron şəbəkələr (Artificial Neural Networks – ANN), maşın öyrənməsi (Machine Learning – ML) və genetik alqoritmlər, texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mürəkkəb qeyri-xətti asılılıqların modelləşdirilməsinə və Pareto-optimal həllərin müəyyən edilməsinə imkan verir. Bu yanaşma konik səthlərin emalında real vaxt rejimində optimallaşdırmanı və prosesin səmərəliliyinin artırılmasını təmin edir.

TEXNOLOJİ PARAMETRLƏRİN EMPİRİK MODELLEŞDİRİLMƏSİNİN NƏZƏRİ ƏSASLARI

RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mövcud olan mürəkkəb və qeyri-xətti asılılıqların analitik ifadəsi çətin olduğundan, bu əlaqələrin təsviri üçün empirik modelləşdirmə yanaşmalarından istifadə olunur. Bu yanaşma prosesin riyazi modellərlə təsvirinə və optimallaşdırma məsələlərinin həllinə imkan verir [13–15].

Səth kələ-kötürlüyü (R_a) texnoloji parametrlərin funksiyası kimi aşağıdakı ümumi formada ifadə oluna bilər:

$$R_a = f(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a) \quad (7)$$

Məhsuldarlıq (Q) isə əsasən kəsmə rejimləri ilə müəyyən olunur:

$$Q = f(t, s, v) \quad (8)$$

(7) və (8) ifadələri texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında ümumi funksional asılılığı xarakterizə edir [4, s. 405–420], [5, s. 100–120], [6]. Lakin bu asılılıqların analitik şəkildə ifadəsi mürəkkəb olduğundan, onların təsviri üçün empirik modelləşdirmə yanaşmalarından geniş istifadə olunur. Bu yanaşmalar arasında ən geniş yayılmış üsullardan biri çoxparametrlili qüvvət tipli modellərin qurulmasıdır. Bu halda səthin kələ-kötürlüyü üçün model aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$R_a = C \cdot t^{x_1} \cdot s^{x_2} \cdot v^{x_3} \cdot r^{x_4} \cdot \gamma^{x_5} \cdot \alpha^{x_6} \cdot h_a^{x_7} \quad (9)$$

(9) ifadəsi səthin kələ-kötürlüyünün empirik modelini xarakterizə edir və texnoloji parametrlərin təsir dərəcələrini qiymətləndirməyə imkan verir [4, s. 405–420], [5, s. 100–120], [6]. Məhsuldarlıq üçün isə:

$$Q = k \cdot t^{y_1} \cdot s^{y_2} \cdot v^{y_3} \quad (10)$$

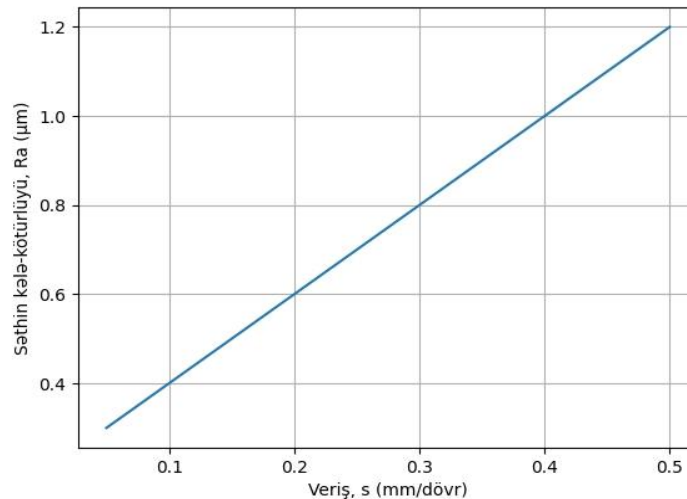
Burada C və k empirik sabitlər, x_i və y_i isə texnoloji parametrlərin təsir dərəcələrini xarakterizə edən göstəricilərdir. (10) ifadəsi məhsuldarlığın empirik modelini göstərir və kəsmə rejimlərinin material çıxarılma intensivliyinə təsirini əks etdirir. Empirik modellərin sadələşdirilməsi və parametrlərin qiymətlərinin təyin olunmasını asanlaşdırmaq məqsədilə bu asılılıqlara loqarifmik çevirmə tətbiq edilir.

$$\ln(R_a) = \ln(C) + x_1 \ln(t) + x_2 \ln(s) + x_3 \ln(v) + x_4 \ln(r) + x_5 \ln(\gamma) + x_6 \ln(\alpha) + x_7 \ln(h_a) \quad (11)$$

$$\ln(Q) = \ln(k) + y_1 \ln(t) + y_2 \ln(s) + y_3 \ln(v) \quad (12)$$

(11) və (12) ifadələri modellərin loqarifmik çevrilməsi nəticəsində alınmışdır və qeyri-xətti asılılıqları xətti formaya gətirərək çoxlu regresiya analizinin tətbiqinə imkan verir. Bu yanaşma texnoloji parametrlərin səth keyfiyyəti və məhsuldarlıq üzərində təsirinin kəmiyyətə qiymətləndirilməsini təmin edir.

Ədəbiyyat məlumatlarına əsasən, səthin kələ-kötürlüyünün formalaşmasında veriş (s) əsas təsiredici parametr kimi çıxış edir və onun artması R_a -nın artmasına səbəb olur. Kəsmə sürəti (v) isə əsasən istilik və triboloji proseslər vasitəsilə dolayı təsir göstərir. Kəsmə dərinliyi (t) və alət yeyilməsi (h_a) isə həm məhsuldarlıq, həm də səth keyfiyyəti üzərində mühüm rol oynayır [4, s. 405–420], [5, s. 100–120], [6], [12]. Empirik modelə əsasən verişin səthin kələ-kötürlüyünə təsiri qrafik olaraq Şəkil 3-də təqdim olunmuşdur.



Şəkil 3. Veriş s (mm/dövr) ilə səthin kələ-kötürlüyü R_a (μm) arasında nəzəri asılılıq

Şəkil 3-dən göründüyü kimi, verişin artması səthin kələ-kötürlüyünün artmasına səbəb olur və bu, onun səth mikroyefinin formalaşmasında dominant parametrlər olduğunu göstərir. Konik səthlərin emalında dəyişən diametr səbəbindən kəsmə sürəti sabit qalmır və modellər lokal xarakter alır. Buna görə empirik modellər dəyişən kinematik şərait üçün uyğunlaşdırılmalıdır [7], [8, s. 200–220], [20], [21].

Beləliklə, empirik modelləşdirmə texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mürəkkəb asılılıqların riyazi təsvirini təmin edərək optimallaşdırma məsələlərinin həlli üçün əsas yaradır.

NƏTİCƏ

Aparılan tədqiqatlar göstərir ki, RPI torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı mürəkkəb, çox-parametrlili və qeyri-stasionar prosesdir. Texnoloji parametrlərin qarşılıqlı təsiri səthin kələ-kötürlüyü və məhsuldarlıq arasında ziddiyyət yaradır. Müəyyən edilmişdir ki, veriş səthin formalaşmasında əsas parametrdir, kəsmə sürəti isə əsasən dolayı təsir göstərir. Kəsmə dərinliyi və alət yeyilməsi isə həm keyfiyyətə, həm də məhsuldarlığa təsir edən mühüm amillərdir. Konik səthlərdə diametrin dəyişməsi kəsmə sürətinin sabit saxlanmasını çətinləşdirir və bu səbəbdən texnoloji parametrlərin adaptiv idarə olunması tələb olunur. Empirik modelləşdirmə texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında qeyri-xətti asılılıqların müəyyən edilməsinə imkan verir, çoxmeyarlı optimallaşdırma isə keyfiyyət və məhsuldarlıq arasında optimal balansın seçilməsini təmin edir. Süni intellekt metodlarının tətbiqi bu proseslərin daha dəqiq modelləşdirilməsinə, optimal rejimlərin avtomatik seçilməsinə və emalın real vaxtda idarə olunmasına imkan yaradır.

Beləliklə, optimallaşdırma və süni intellekt metodlarının inteqrasiyası texnoloji parametrlərin effektiv idarə olunması və emal prosesinin səmərəliliyinin artırılması üçün perspektivli yanaşmadır.

Bu iş Azərbaycan Elm Fondunun maliyyə dəstəyi ilə yerinə yetirilmişdir - Qrant № **AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01**

ƏDƏBİYYAT

1. Astakhov V.P. Tribology of Metal Cutting. Amsterdam: Elsevier, 2006, 424 p.
2. Koshin A.A. Obrabotka na tokarnykh stankakh: naladka, rezhimy rezaniya. Spravochnik [Processing on lathes: adjustment, cutting conditions. Handbook]. Chelyabinsk, Siti-Print, 2012. 744 p.
3. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Modeling of machining accuracy of conical surfaces on CNC machine tools. Proceedings, 2025, vol. 2, pp. 59–67.
4. Grzesik W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2008, 536 p.
5. Stephenson, D.A., Agapiou J.S. Metal Cutting Theory and Practice. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016, 933 p.
6. Dadashov R.Y., Yusubov N.D., Abbasova H.M. Modeli sil rezaniya pri mekhanicheskoy obrabotke na sovremennykh stankakh tokarnoy gruppy (Models of Cutting Forces During Mechanical Machining on Modern Machines of Turning Group). Proceedings of the All-Russian Forum of Young Researchers - 2023, 2023, pp. 236–246.
7. Balabanov I., Movlazade V., Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R., Huseynov R. Development of a Parametric Model for Calculating Cutting Forces in External Cylindrical Turning of 20CRMN Steel (1.7147) Using an SNMG 15 06 16-pr 4425 Insert. Reliability: Theory and Applications, 2025, Vol. 20, Issue 7, pp. 335–342.
8. Trent E.M., Wright P.K. Metal Cutting. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000, 446p.
9. Simon S., Yusubov N.D., Amirli S.F., Amirov F.G. Waterjet cutting of HARDOX-500 workpiece. Russian Engineering Research, 2024, vol. 44, no. 11, pp. 1572–1576.
10. Simon S., Yusubov N.D., Amirli S.F., Amirov F.G. Hardness of Surface Layers Obtained after Waterjet Cutting of Chromium-Nickel Steel Workpieces. Russian Engineering Research, 2025, 45, pp. 1714–1718.
11. Ardashev D., Shipulin L., Degtyareva-Kashutina A., Yusubov N. Research on chrome plating quality of the internal surfaces in the hydraulic drives with hydrostatic guideways. Materials Science Forum, 2021, 1037 MSF, pp. 417–422. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.417
12. Nalbant M., Gökkaya H., Sur G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. Materials & Design, 2007, Vol. 28, No. 4, pp. 1379–1385.
13. Ardashev D., Yusubov N., Shipulin L., Degtyareva-Kashutina A. Development of environmental protection system for installation of chrome plating of the internal surfaces of hydraulic drives with hydrostatic guideways. E3s Web of Conferences, 2020, 193, 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/202019302015

14. Mia M., Dhar N.R. Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using artificial neural network. *Measurement*, 2016, Vol. 92, pp. 464–474.
15. Yusubov N., Abbasova, H. Models of Cutting Forces in The Matrix Theory of Multitool Machining Accuracy. *Key Engineering Materials*, 2024, 979, pp. 27–38. DOI: 10.4028/p-bW48Sb
16. Gupta A., Singh, H., Aggarwal A. Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel. *Expert Systems with Applications*, 2011, Vol. 38, No. 6, pp. 6822–6828.
17. Savin I. A., Movlazade V. Z., Yusubov N. D., Shaparev A. V., Khankishiyev I. A., Abbasova H. M., Huseynov Y. E. Comprehensive study of thermal, optical and material factors influencing fiber laser cutting efficiency. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2025, No. 4, pp. 351–359.
18. Asiltürk İ., Akkuş H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 2011, Vol. 44, No. 9, pp. 1697–1704.
19. Simon S., Yusubov N.D., Amirli S.F., Amirov F.G. Surface Roughness of Chromonickel Steel after Water Jet Machining: A Full Factorial Experiment. *Russian Engineering Research*, 2025, 45(3), pp. 341–345.
20. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Matrix Model of Accuracy in Machining Conical Surfaces on CNC Lathes. *Reliability Theory and Applications*, 2025, Vol. 20, Iss. 7, pp. 393–400.
21. Abellán-Nebot J.V., Vila Pastor C., Siller H.R. A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability. *Materials*, 2021, Vol. 14, No. 3, pp. 1–31.

RPİ TORNA DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMALI ZAMANI ÇOXMEYARLI OPTİMALLAŞDIRMA VƏ SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMALARI

N.D.Yusubov, H.M.Abbasova, R.Y.Dadaşov

Xülasə. Məqalədə RPİ torna dəzqahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərin səth keyfiyyəti və məhsuldarlığa təsiri sistem yanaşması əsasında təhlil edilmişdir. Göstərilmişdir ki, emal prosesi çoxparametrlı, qarşılıqlı əlaqəli və qeyri-stasionar xarakter daşıyır. Səth kələ-kötürlüyü yalnız həndəsi amillərlə deyil, həm də deformasiya, istilik və triboloji proseslərin təsiri ilə formalaşır. Veriş əsas təsiredici parametr kimi müəyyən edilmiş, kəsmə sürəti və kəsmə dərinliyinin isə əsasən dolayı təsir göstərdiyi göstərilmişdir. Konik səthlərin emalı zamanı diametrin dəyişməsi kəsmə sürətinin lokal dəyişməsinə səbəb olur və klassik modellərin tətbiqini məhdudlaşdırır. Səth keyfiyyəti ilə məhsuldarlıq arasındakı ziddiyyət çoxmeyarlı optimallaşdırma problemi kimi təqdim olunmuş, Pareto yanaşması əsasında həll imkanları göstərilmişdir. Süni intellekt metodlarının tətbiq perspektivləri də əsaslandırılmışdır.

Açar sözlər: RPİ torna dəzqahı, konik səthlər, səth keyfiyyəti, çoxmeyarlı optimallaşdırma, süni intellekt.

Accepted: 29.04.2026