

МЕТОДЕ ОДЛУЧИВАЊА

АТ-6 Технологијачност производа

Инжењерство обрађених површина

ТЕХНОЛОГИЧНОСТ ПРОИЗВОДА

Технологијачност производа указује на изводљивост конструкционог решења. Технологијачност се односи на прикладност, способност материјала за обраду или обликовање неким технолошким поступком. Анализа технологијачности производа обухвата:

- геометријски облик
- мере и толеранције
- толеранције облика
- **површинску храпавост**
- врсту материјала и његову тврдоћу
- величину серије

За производ код кога је постигнут добар однос између оствареног квалитета и уложених ресурса (производне цене) кажемо да је **техноекономичан**. Производ који није технологијачан, по правилу не може бити ни конкурентан на светском тржишту.

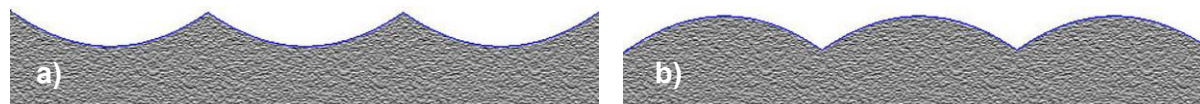
Посебна пажња ће бити посвећена површинској храпавости.

Инжењерство обрађених површина

Инжењерство површина описује и оцењује стање обрађене површине и слојева у материјалу испод ње, ради израде сигурних, поузданих и дуготрајних делова. Инжењерство површине се своди на квалитет обрађене површине који се одређује класом површинске храпавости и то преко параметара дефинисаних стандардом.

Површинска храпавост је важна мера квалитета производа и фактор који у многоме утиче на цену израде дела. У позадини механизма обраде једне површине се налазе веома динамичне, компликоване и међусобно зависне компоненте, које је тешко одредити теоријским и аналитичким путем. Стога се на основу поновљивих, практичних и експерименталних резултата доноси одлука о постизању жељене површинске храпавости избором одређеног метода обраде и адекватних режима. Утицајни фактори на храпавост обрађене површине су: корак, брзина резања, дубина резања, геометрија алата (посебно полупречник заобљења врха алата), хабање алата, силе резања, вибрације...

Остварена површинска храпавост се обично представља одређеним стандардним параметром храпавости или са више њих истовремено. **Стандардни параметри храпавости** не могу једнозначно одредити обрађену површину, тако да се различите површине могу подједнако вредновати (недостатак). То се може показати на примеру хипотетичких профила са слике 1.



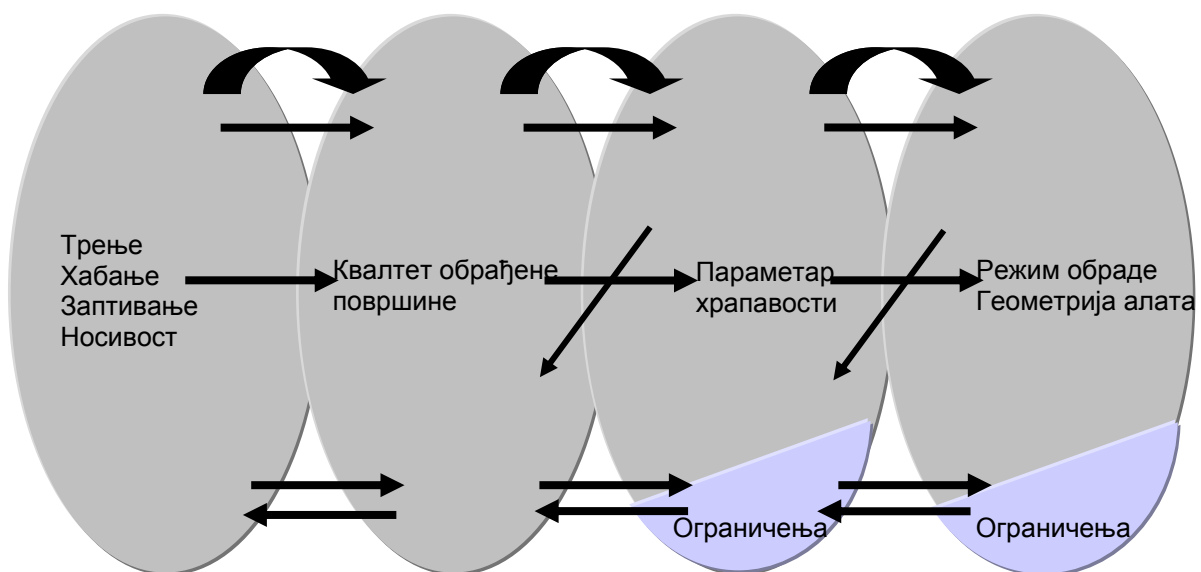
Слика 1. Хипотетички модели профила обрађене површине

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad p_{nc} = 100 \frac{l_n}{l} \quad l_n = l_{c_1} + l_{c_2} + \dots + l_{c_n}$$

Лако се може схватити недостатак параметарског описивања и оцењивања квалитета обрађене површине. Оба профила имају једнаку највећу висину неравнина $R_{max}=194\mu m$, једнако средње аритметичко и средње квадратно одступање $R_a=50\mu m$ и $R_q=3,36\mu m$. Једино се проценат ношења профила на нивоу пресека од 25% разликује и за профил под а) износи $p_{nc}=13,3\%$ а за профил под b) износи $p_{nc}=50,1\%$. У случају да је приказан профил део површине чије је функционално понашање везано за ношење, доношење одлуке на основу R_a као параметра је прилично несигурно.

Параметри пројектовања – Фрактална димензија

Машински делови који улазе у склоп неког производа обављају своју функцију током експлоатације тог производа. Површине преко којих се остварује контакт, својом храпавошћу значајно утичу на трење и хабање између њих, као и на заптивање и носивост. То су уједно и атрибути корисника у домену корисника код аксиоматског пројектовања. У функционалном домену се одређује **функционални захтев** као **храпавост обрађене површине**, који ће се остварити параметрима пројектовања. Избор параметра пројектовања је најчешће један од стандардних параметара храпавости, нпр. средње аритметичко одступање R_a . За постизање задатих параметара пројектовања одређују се процесне варијабле (корак, брзина резања, дубина резања, геометрија алата). На слици 2. је приказан простор аксиоматског пројектовања.



Потребе корисника Функционални захтеви Параметри пројектовања Производне варијабле

Слика 2. Простор аксиоматског пројектовања

Недостаци описа квалитета обрађене површине стандардним параметрима намећу алтернативни приступ, код кога се као параметар храпавости користи фрактална димензија. **Фрактална димензија** је мера или квантификатор неравномерности или комплексности само-сличних (Вон Кошова пахуљица на слици 3) или само-сродних објеката (обрађена површина на слици 4). Фрактална димензија је Хауздорф-Бесиковићева димензија D_k која се дефинише преко следеће релације:

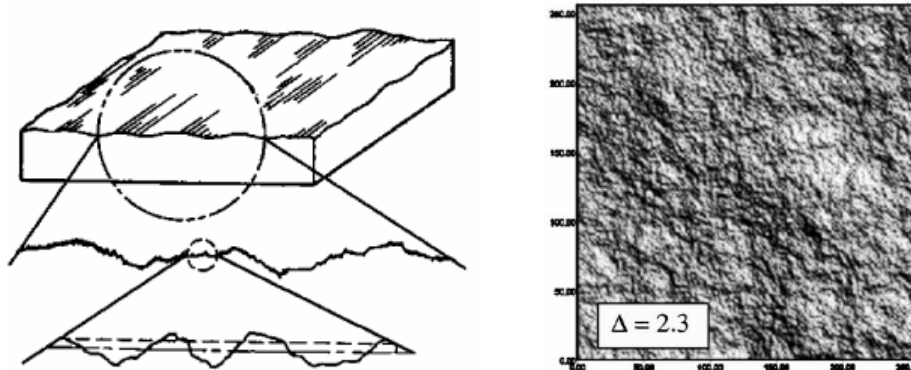
$$N = \varepsilon^{-D_k}$$

где је N најмањи број кругова пречника мањег или једнаког ε , потребан за прекривање датог скупа.



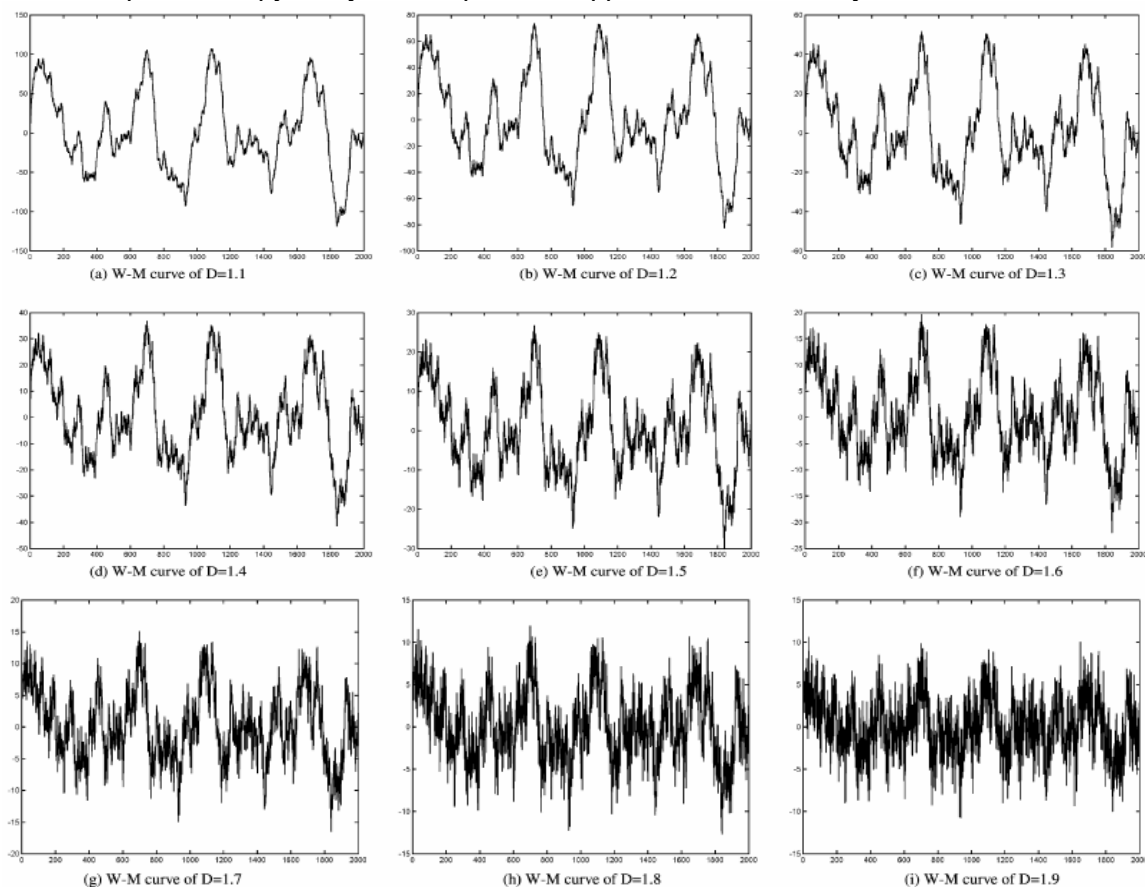
$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.2618$$

Слика 3. Ван Кошова пахуљица и њена фрактална димензија



Слика 4. Фрактални карактер хрпаве површине инваријантност у односу на скалу (лево) и топологија (десно)

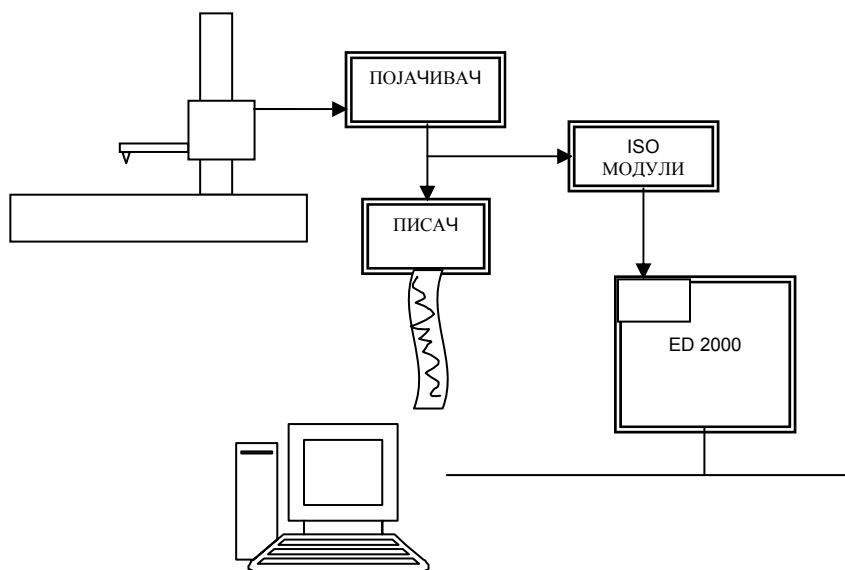
Вредност фракталне димензије профила, као мере неравномерности може бити између 1 и 2. На слици 5 приказан је профил хрпаве површине генерисан Вајерштрас-Манделбровом функцијом, за вредност фракталне димензије од 1,1 до 1,9.



Слика 5. Профил обрађене површине генерисан Вајерштрас-Манделбровом функцијом

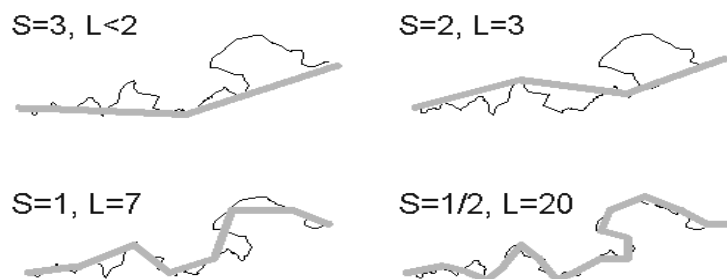
Јасно се види да већа фрактална димензија одговара храпавијем профилу. Показано је да се фрактална димензија може користити за идентификацију, карактеризацију и моделирање профила обрађене површине. Профил добре површине, у смислу оне која има добра контактна својства, је онај чија је фрактална димензија блиска вредности 1.5. Управо је то вредност која омогућава једнозначно оцењивање квалитета обрађене површине у смислу адекватне храпавости.

Контактни мерни системи – **профилметри**, који се користе за снимање профила обрађене површине су присутни у пракси као доступни, брзи и једноставни, а за опис храпавости користе стандардне параметре. С друге стране, скенирајући микроскопи високе резолуције, који уз стандардне дају и фракталне параметре су захтевни по питању цене, времена и врсте узорака. Одређивање фракталне димензије за профил обрађене површине, који је снимљен на профилметру и повезивање са стандардним параметрима храпавости пружа могућност касније процене фракталне димензије на основу стандардних параметара храпавости профила.



Слика 7. Аквизиција и обрада података везаних за профил обрађене површине

Метод одређивања фракталне димензије који се може применити на податке добијене профилметријским поступком је модификовани Ричардсонов поступак мерења обале Британског острва, приказан на слици 8, назива се **метод контуре**.



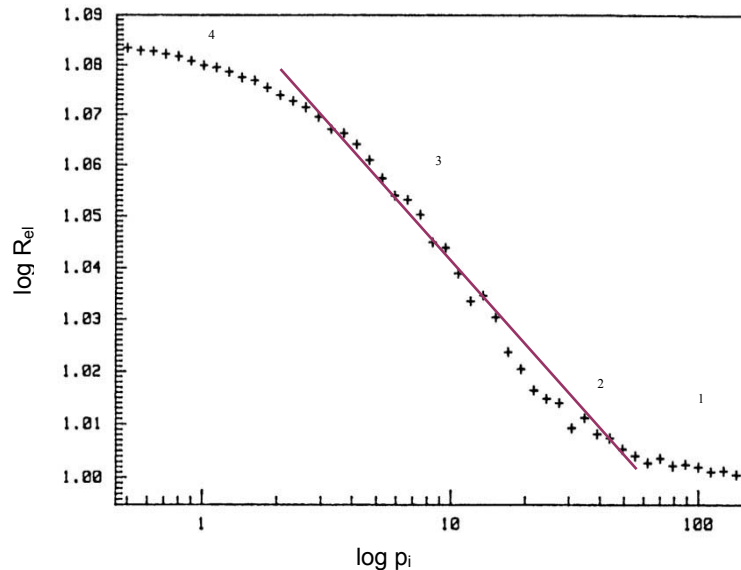
$$L(\varepsilon) = N(\varepsilon) \cdot \varepsilon = \varepsilon^{-D_k} \cdot \varepsilon = \varepsilon^{1-D_k} \Rightarrow \log L = \log c + (1 - D_k) \log \varepsilon$$

Слика 8. Метод контуре

На слици 9. се налази дијаграм зависности дужине профила R од мерила p у дуплој логаритамској скали. На дијаграму се уочава линеарни део криве, који се регресионом анализом може апроксимирати једначином праве чији је нагиб у релацији са

фракталном димензијом (1-D). Апликација развијена у Matlab окружењу одређује фракталну димензију профила.

$$\log R(p) = \log c + (1 - D)\log p$$



Слика 9. Дијаграм зависности дужине профила R од мерила p у дуплој логаритамској скали.

Доношење одлуке о квалитету обрађене површине применом вештачких неуронских мрежа

Вештачке неуронске мреже обезбеђују значајне предности при решавању проблема процесирања који захтевају интерпретацију међусобних односа између променљивих у вишедимензионалним просторима. Задатак им је да изврше процену вредности излазних података на основу улазних података. Подаци на основу којих се обучава неуронска мрежа се добијају експерименталним путем. Неуронске мреже се састоје од неурона међусобно повезаних везама са одговарајућим тежинским односима, који се током процеса обучавања мењају, по принципу минимизације грешке учења, све док се не постигне жељена трансформација улаза у излаз.

Како се у пракси, за опис квалитета обрађене површине, најчешће примењују стандардом дефинисани параметри храпавости одређени за репрезентативне профиле, а ређе фрактална димензија профила, неуронске мреже се могу користити у одређивању фракталних димензија профила површина добијених брушењем на основу измерених вредности стандардних параметара профила. Изабрана је хомогена (рекурентна) мрежа са простирањем грашке уназад, тзв. **BP** (Back Propagation) **мрежа**, што значи да се током обучавања тежинске вредности померају у правцу негативног градијента. Експериментално добијени подаци који се односе на стандардне и фракталне параметре храпавости профила, могу се употребити у обучавању вештачких неуронских мрежа као улазни и излазни вектори. Тако обучена неуронска мрежа се може користити за оцену квалитета обрађене површине претходно процењујући вредност фракталне димензије њеног профила на основу стандардних параметара.

Применом неуронских мрежа се омогућава **доношење одлуке** везане за избор боље површине у смислу оне која ће показати боље триболошко понашање у примени. Одлука се доноси на основу параметара храпавости D_k који представља фракталну димензију профила обрађене површине. Показано је да је обрађена површина са фракталном димензијом профила која је блиска вредности 1.5 са најбољим понашањем у контактним појавама. Стога познавањем вредности D_k профила обрађених површина и поређењем можемо одлучити која је површина боља.

Кроз конкретан пример, из области инжењерства површине, биће **ВР** мрежа употребљена за **функционалну апроксимацију**. Улазни скуп (параметар храпавости R_a) и излазни (фрактална димензија профила D_k) груписани у парове тачака чине основу за процес „фитовања“ криве кроз експерименталним путем добијене податке.

Кроз конкретан пример, из области инжењерства површине, биће **ВР** мрежа употребљена за **класификацију**. Класификација је представљена улазним скупом (стандардни параметри храпавости за профил), који са специфицираном класом (вредности фракталне димензије профила блиске 1.5) формира парове.

Кроз конкретан пример, из области инжењерства површине, биће **ВР** мрежа употребљена за **предикцију** фракталне димензије. Предикција је представљена претходним излазним вредностима (фракталним димензијама), као и тренутним и претходним улазним вредностима (стандардни параметри храпавости), које са будућим излазима формирају парове (стандардни параметри храпавости, фрактална димензија).

Задатак 1.

- ❑ Формирати улазни вектор за неуронску мрежу на основу вредности четири стандардна параметра храпавости (R_a , R_{max} , R_z , R_q) и излазни вектор на основу фракталне димензије D_k за тридесет измерених профила. Подаци се за групе 1 и 2 налазе у табели 3, а за групе 3 и 4 у табели 4.
- ❑ Формирати неуронску мрежу у **BPNet** окружењу са једним скривеним слојем (групе 1 и 3) или са два скривена слоја (групе 2 и 4).
- ❑ Обучити мрежу за податке дате у таблицама и варирати број неурона.
- ❑ Коришћењем одабране мреже извршити процену фракталне димензије профила обрађене површине
- ❑ На основу процењене вредности фракталне димензије, **донети одлуку** која је површина најбоља.

Задатак 2.

- ❑ Формирати улазни вектор за неуронску мрежу на основу вредности основног стандардног параметра храпавости (R_a) и излазни вектор на основу фракталне димензије D_k за тридесет измерених профила. Подаци се за групе 1 и 2 налазе у табели 1, а за групе 3 и 4 у табели 2.
- ❑ Формирати неуронску мрежу у Matlab окружењу (**Neural fitting tool**).
- ❑ Обучити мрежу за податке дате у таблицама и варирати број неурона.
- ❑ Коришћењем одабране мреже извршити процену фракталне димензије профила обрађене површине на основу нових улаза датих у табели 2 за групе 1 и 2, односно у табели 1 за групе 2 и 3.
- ❑ На основу процењене вредности фракталне димензије, **донети одлуку** која је површина најбоља.

Задатак 3.

- ❑ Формирати улазни вектор за неуронску мрежу на основу вредности четири стандардна параметра храпавости (R_a , R_{max} , R_z , R_q) и излазни вектор на основу фракталне димензије D_k за тридесет измерених профила. Подаци се за групе 1 и 2 налазе у табели 3, а за групе 3 и 4 у табели 4.
- ❑ Формирати неуронску мрежу у Матлаб окружењу (**Neural network tool и развијена апликација**) са једним скривеним слојем (групе 1 и 3) или са два скривена слоја (групе 2 и 4).
- ❑ Обучити мрежу за податке дате у таблицама и варирати број неурона и функције преноса.
- ❑ Коришћењем одабране мреже извршити процену фракталне димензије профила обрађене површине на основу нових улаза датих у табели 4 за групе 1 и 2, односно у табели 3 за групе 2 и 3.
- ❑ На основу процењене вредности фракталне димензије, **донети одлуку** која је површина најбоља и изабрати 5 најбољих површина.

Извештај треба сачинити на нивоу групе. Потребно је да садржи:

- ❑ Кратак уводни део (вештачке неуронске мреже и одлучивање)
- ❑ Улазне податке (прикупљање података)
- ❑ Архитектуру неуронских мрежа
- ❑ Добијене резултате (грешке између жељених и излазних вредности)
- ❑ Одлуку (најбоља/е обрађене површине)

Табела 1. Параметар храпавости и фрактална димензија за профил брушене плочице од алатне керамике

УЗОРАК	Улазни вектор за BPN	Излазни
	Ra [μm]	Dk
1	0,2649	1,4338
2	0,3522	1,4746
3	0,2404	1,4606
4	0,3246	1,4656
5	0,3713	1,4594
6	0,4538	1,4182
7	0,4276	1,4595
8	0,4625	1,4715
9	0,2974	1,4172
10	0,2995	1,4956
11	0,1419	1,4962
12	0,2851	1,4402
13	0,4417	1,4943
14	0,4429	1,4747
15	0,4582	1,4818
16	0,4105	1,4488
17	0,3376	1,4455
18	0,4445	1,4879
19	0,4634	1,4782
20	0,5342	1,4670
21	0,3070	1,4425
22	0,4845	1,4140
23	0,2557	1,4983
24	0,3491	1,4436
25	0,4921	1,4767
26	0,3742	1,4800
27	0,4828	1,4999
28	0,6070	1,4871
29	0,3808	1,4608
30	0,5201	1,4802

Табела 2. Параметар храпавости и фрактална димензија за профил брушене плочице од алатне керамике

УЗОРАК	Улазни вектор за BPN	Излазни
	Ra [μm]	Dk
1	0,3526	1,4525
2	0,4907	1,4778
3	0,2757	1,4356
4	0,4850	1,4995
5	0,3712	1,4951
6	0,3643	1,4216
7	0,3589	1,4867
8	0,5120	1,4694
9	0,4184	1,4904
10	0,3245	1,4595
11	0,3920	1,4239
12	0,3722	1,4188
13	0,3153	1,4711
14	0,2921	1,4972
15	0,2780	1,4772
16	0,3679	1,4811
17	0,3581	1,4510
18	0,2850	1,4416
19	0,3951	1,4250
20	0,4623	1,4636
21	0,5113	1,4729
22	0,4334	1,4814
23	0,3875	1,4625
24	0,4372	1,4990
25	0,4619	1,4353
26	0,3248	1,4770
27	0,4591	1,4605
28	0,3946	1,4683
29	0,3606	1,4525
30	0,2991	1,4984

Табела 3. Параметри храпавости и фрактална димензија за профиле брушене плочице од алатне керамике

УЗОРАК	Улазни вектор за BPN				Излазни
	Ra [μm]	Rmax [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Dk
1	0,2649	1,6238	1,2019	0,1119	1,4338
2	0,3522	2,1277	1,7358	0,1828	1,4746
3	0,2404	1,3376	1,1132	0,0848	1,4606
4	0,3246	2,3579	1,5906	0,1793	1,4656
5	0,3713	2,0646	1,6745	0,2090	1,4594
6	0,4538	2,8331	1,9184	0,2962	1,4182
7	0,4276	3,0012	2,0934	0,2923	1,4595
8	0,4625	2,6934	2,3745	0,3477	1,4715
9	0,2974	1,8005	1,4057	0,1369	1,4172
10	0,2995	2,0095	1,4198	0,1354	1,4956
11	0,1419	0,8841	0,7387	0,0332	1,4962
12	0,2851	1,7982	1,4132	0,1279	1,4402
13	0,4417	2,3068	1,9613	0,2804	1,4943
14	0,4429	2,7899	2,3774	0,3198	1,4747
15	0,4582	2,7722	2,1594	0,3236	1,4818
16	0,4105	2,6900	2,1113	0,2781	1,4488
17	0,3376	2,5316	1,7434	0,1944	1,4455
18	0,4445	3,5098	2,4491	0,3435	1,4879
19	0,4634	2,9637	2,2552	0,3307	1,4782
20	0,5342	3,5804	2,6981	0,4820	1,4670
21	0,3070	1,7719	1,4717	0,1464	1,4425
22	0,4845	2,9032	2,3080	0,3666	1,4140
23	0,2557	1,4392	1,1302	0,0966	1,4983
24	0,3491	2,9453	1,9184	0,2211	1,4436
25	0,4921	3,6102	2,2170	0,4005	1,4767
26	0,3742	2,5080	1,7887	0,2055	1,4800
27	0,4828	3,2025	2,4929	0,3702	1,4999
28	0,6070	4,1067	3,0142	0,5916	1,4871
29	0,3808	2,5890	1,8651	0,2320	1,4608
30	0,5201	3,9319	2,8255	0,4774	1,4802

Табела 4. Параметри храпавости и фрактална димензија за профил брушене плочице од алатне керамике

УЗОРАК	Улазни вектор за BPN				Изразни
	Ra [μm]	Rmax [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Dk
1	0,3526	1,9767	1,6085	0,1895	1,4525
2	0,4907	3,2037	2,4632	0,3953	1,4778
3	0,2757	1,8465	1,4458	0,1214	1,4356
4	0,4850	2,8537	2,1991	0,3291	1,4995
5	0,3712	2,2110	1,7335	0,2141	1,4951
6	0,3643	2,4252	1,8420	0,2046	1,4216
7	0,3589	2,8478	1,8736	0,1920	1,4867
8	0,5120	3,0047	2,4599	0,3866	1,4694
9	0,4184	2,4662	2,0377	0,2754	1,4904
10	0,3245	1,9824	1,6887	0,1770	1,4595
11	0,3920	2,8006	1,8854	0,2561	1,4239
12	0,3722	2,3155	1,7547	0,2202	1,4188
13	0,3153	1,8746	1,5519	0,1495	1,4711
14	0,2921	1,6539	1,3340	0,1255	1,4972
15	0,2780	1,8652	1,3736	0,1206	1,4772
16	0,3679	1,6758	1,4830	0,1802	1,4811
17	0,3581	2,2858	1,4033	0,1950	1,4510
18	0,2850	1,7102	1,3113	0,1214	1,4416
19	0,3951	2,4347	1,8792	0,2301	1,4250
20	0,4623	3,1284	2,1231	0,3457	1,4636
21	0,5113	3,2816	2,4642	0,3978	1,4729
22	0,4334	2,5872	1,9547	0,2782	1,4814
23	0,3875	3,1137	1,9283	0,2585	1,4625
24	0,4372	3,6191	2,2151	0,3203	1,4990
25	0,4619	3,2595	2,3377	0,3716	1,4353
26	0,3248	2,0319	1,5637	0,1600	1,4770
27	0,4591	3,5327	2,1557	0,3769	1,4605
28	0,3946	2,4183	1,8453	0,2324	1,4683
29	0,3606	2,5095	1,7236	0,1986	1,4525
30	0,2991	2,5152	1,7066	0,1536	1,4984