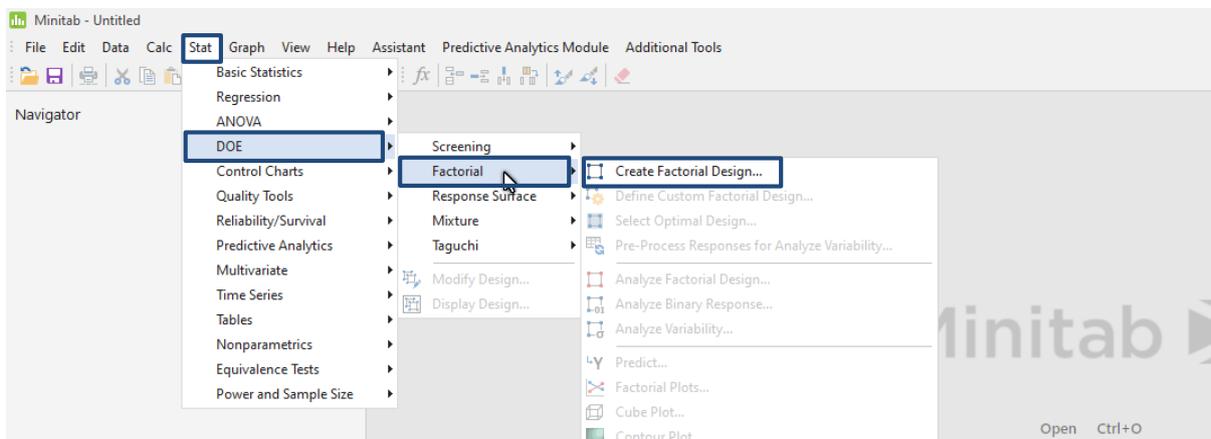


NÁVRH A VYHODNOTENIE DOE V SOFTVÉRI MINITAB PRE ÚPLNÝ FAKTOROVÝ EXPERIMENT n^k

Uvažujme o experimente typu 2^3 s dvoma replikáciami v každom bode (riešený príklad nitridové leptanie plazmových doštičiek). V Minitabe nasledujúcim spôsobom vytvoríme plán experimentu, doplníme namerané hodnoty a spustíme analýzu dát.

Výberom v hlavnom menu z ponuky Stat_DOE si zvolíme faktorový experiment, t. j. zvolíme Factorial s možnosťou Create Factorial Design...



Obr. 1 Výber faktorového experimentu z ponuky DOE

V dialógovom okne volíme typ experimentu, t. j. 2 úrovňový s tromi faktormi, obr. 2.

Minitab ponúka prehľad vhodných a nevhodných typov experimentu podľa počtu faktorov a korešpondujúceho rozlíšenia.

Run	Factors	Resolution
4	Full	III
8	Full	IV
16	Full	V
32	Full	VI
64	Full	VII
128	Full	VIII

Tu volíme počet faktorov 2.

V položke Designs volíme:

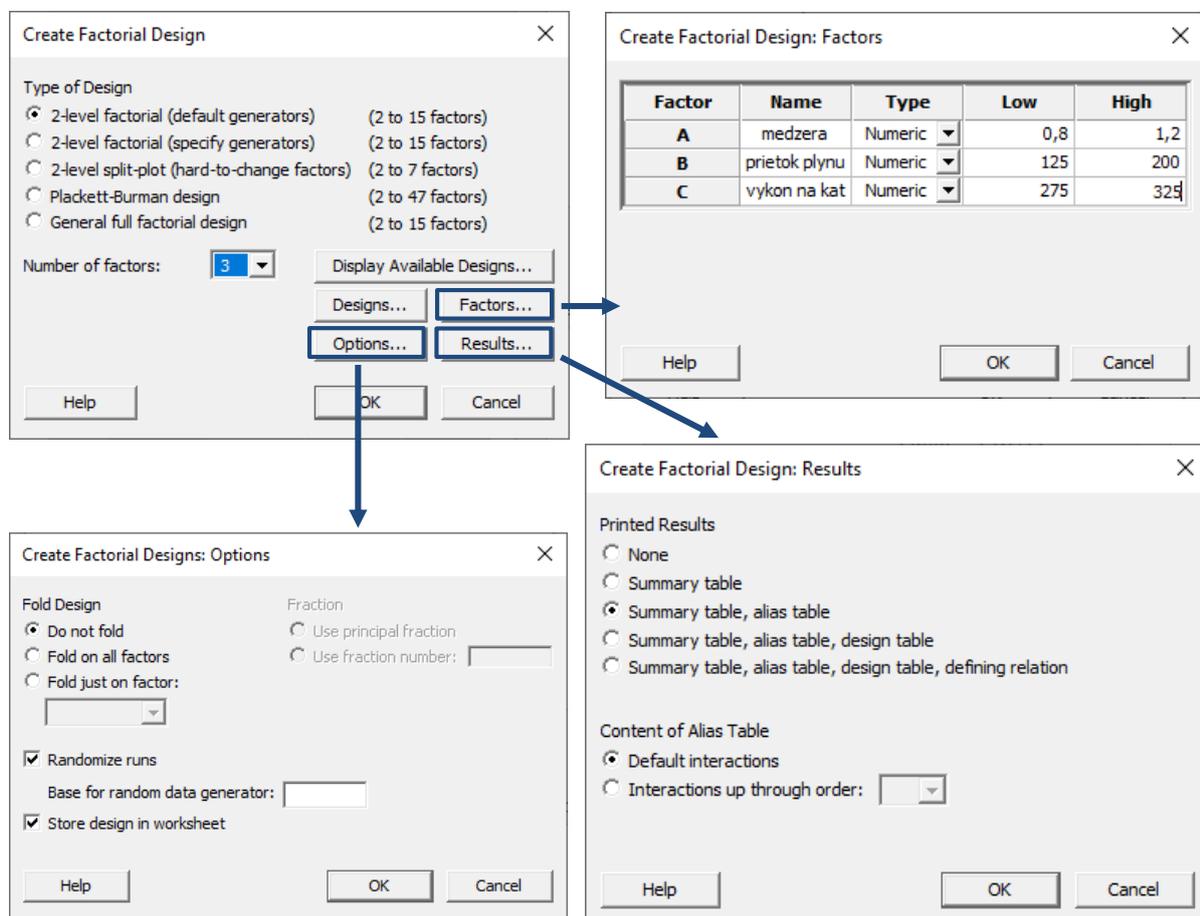
- typ experimentu úplný alebo čiastočný;
- počet centrálnych bodov, resp. počet replikácií v centrálnom bode;
- počet replikácií vo faktorových bodoch;
- počet blokov.

Obr. 2 Výber typu experimentu, voľba počtu faktorov, úrovni, počtu replikácií, počtu meraní v centrálnom bode a počtu blokov

V ďalšom kroku (obr. 3) sú v dialógovom okne **Create Factorial Design** po zadaní parametrov z predchádzajúceho kroku sprístupnené ďalšie položky. V okne **Create Factorial Design** je potrebné v položke **Factors** definovať faktory, ich dolnú a hornú úroveň, zadať typy faktorov. Kvantitatívne premenné sú označené **Numeric**. Kvalitatívne premenné majú označenie **Text**.

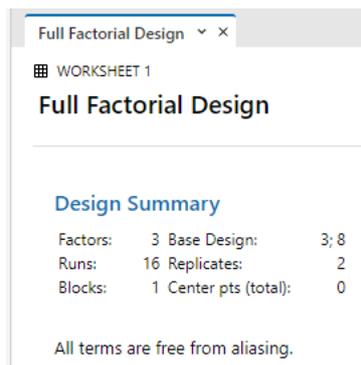
V položke **Options** určíme, či pridávame body plánu experimentu k predchádzajúcemu plánu (napr. budujeme zložitejší model) alebo začíname novým experimentom, či volíme náhodné poradie experimentálnych bodov (randomizáciu) alebo chceme zobrazit' plán experimentu v pôvodnom poradí.

V položke **Results** volíme typ zobrazenia výsledkov...



Obr. 3 Zadávanie položiek *Factors*, *Options* a *Results*

Minitab poskytne výstup so zápisom nadefinovaných parametrov experimentu v nasledujúcom tvare na obr. 4.



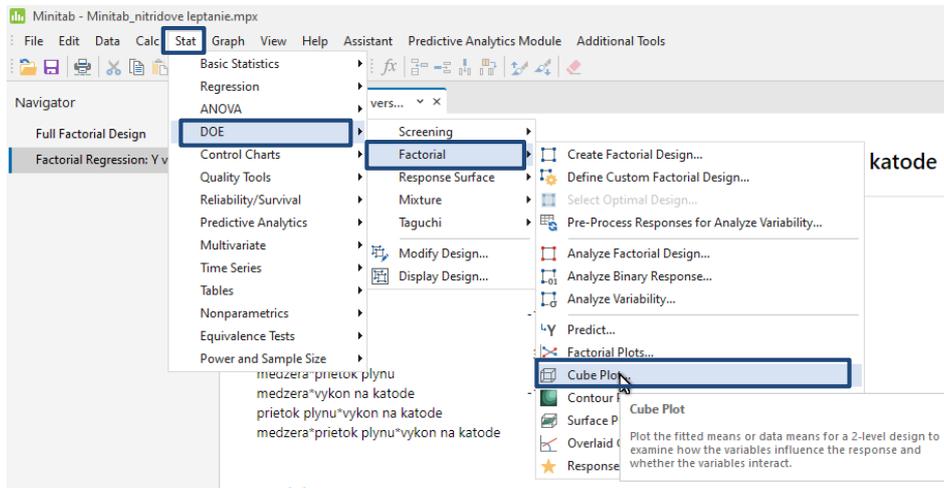
Obr. 4 Výpis Minitabu

Okrem zhrnutia zadaných údajov (počet faktorov 3, počet bodov experimentu 8, počet replikácií 2, počet meraní zohľadňujúci počet replikácii v každom bode označený Runs 16) výpis obsahuje plánu experimentu v pracovnom liste na obr.5. Stĺpce C1 a C2 označujú poradie randomizované a pred randomizáciou. Stĺpec C3 hovorí, že experiment neobsahuje centrálné body (bývajú označené 0). Stĺpec C4 hovorí, že všetky merania sa budú realizovať v jednom bloku. Stĺpce C5 a C6 predstavujú vygenerované kombinácie úrovní faktorov, t. j. jednotlivé body plánu experimentu, pri ktorých je potrebné urobiť merania. K tomuto plánu experimentu je potrebné doplniť stĺpec (C8) s nameranými hodnotami odozviev Y.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	medzera	prietok plynu	vykon na katode	Y
1	14	1	1	1	1,2	125	325	868
2	4	2	1	1	1,2	200	275	642
3	6	3	1	1	1,2	125	325	749
4	2	4	1	1	1,2	125	275	650
5	11	5	1	1	0,8	200	275	601
6	5	6	1	1	0,8	125	325	1037
7	1	7	1	1	0,8	125	275	604
8	7	8	1	1	0,8	200	325	1063
9	13	9	1	1	0,8	125	325	1052
10	16	10	1	1	1,2	200	325	860
11	10	11	1	1	1,2	125	275	669
12	15	12	1	1	0,8	200	325	1075
13	12	13	1	1	1,2	200	275	635
14	3	14	1	1	0,8	200	275	633
15	8	15	1	1	1,2	200	325	729
16	9	16	1	1	0,8	125	275	550

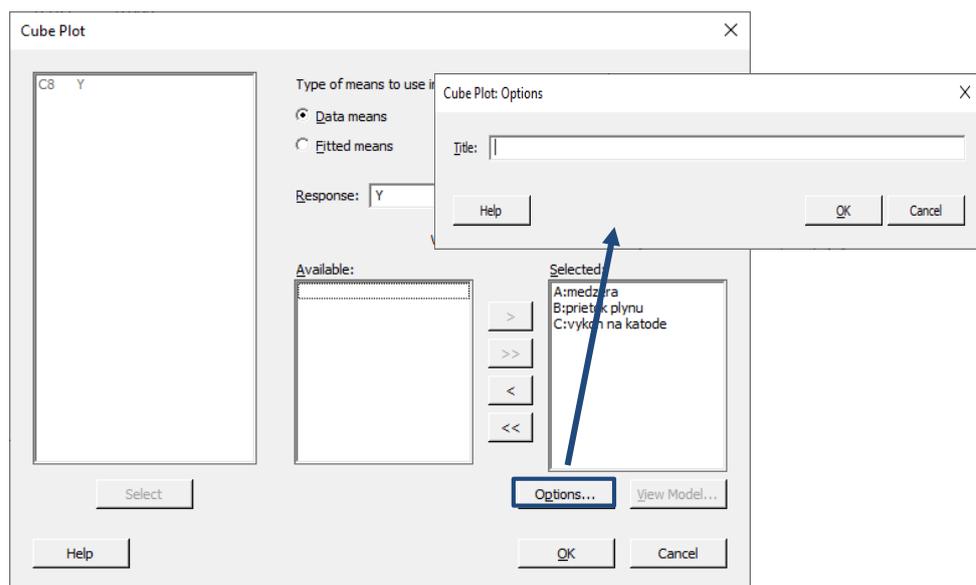
Obr. 5 Vygenerovaný plán experimentu s doplnením nameraných hodnôt odozvy

Na grafické zobrazenie priemeru nameraných hodnôt alebo predikovaných hodnôt používame ponuku Cube Plot na obr. 6.



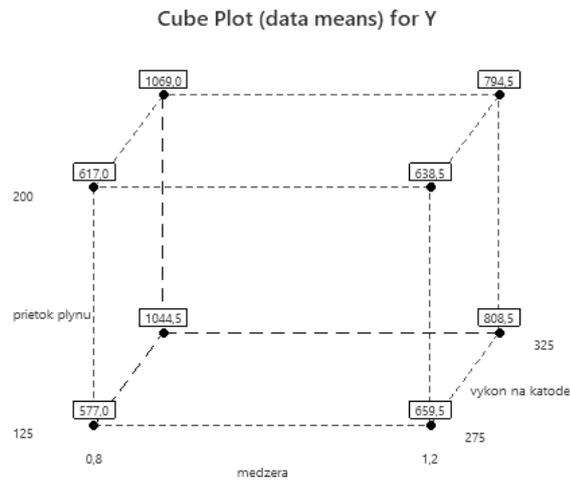
Obr. 6 Postupnosť krokov pri zadávaní zobrazenia Cplot z nameraných hodnôt

Okno Cube Plot vyžaduje zadanie hodnoty, ktorú chceme zobrazit', t. j. vyberáme priemer nameraných odoziev (Data means) alebo predikované hodnoty (Fitted means). Pri zadávaní premennej do odozvy vyberáme z ponuky v ľavom okne výberom označenej premennej a potvrdením cez Select alebo dvojklikom ľavého tlačidla myši. V časti **Variables to Include in Plots** zadávame, ktoré faktory chceme v grafe zobrazit' (výber z ponúkaných má význam najmä pri veľkom počte faktorov). V našom prípade nechávame všetky 3 faktory. Options ponúka doplniť názov Cplotu.



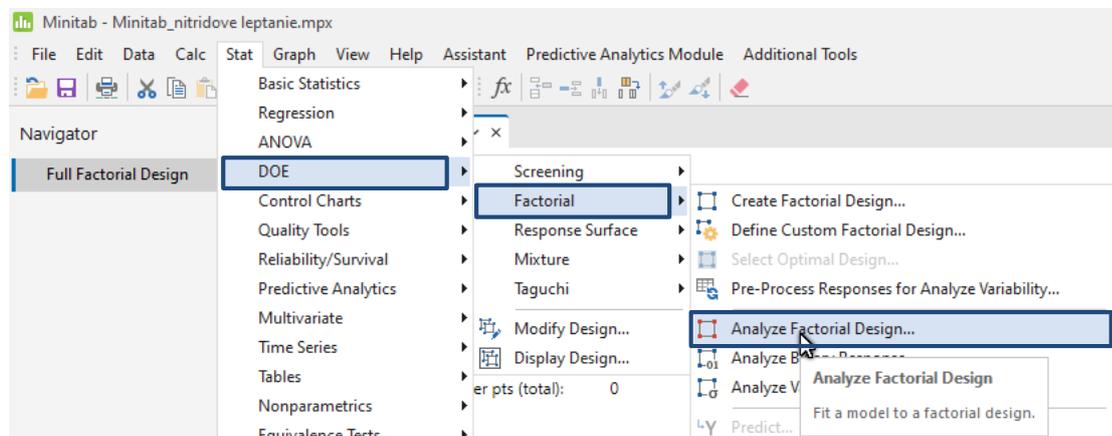
Obr. 7 Dialógové okno pre Cplot

Výsledný Cplot so zvoleným vypočítaným priemerom nameraných hodnôt vo faktorových bodoch je na obr. 8. Z tohto typu grafu je možné vidieť rozloženie bodov v experimentálnom priestore, v ktorých bolo realizované meranie.



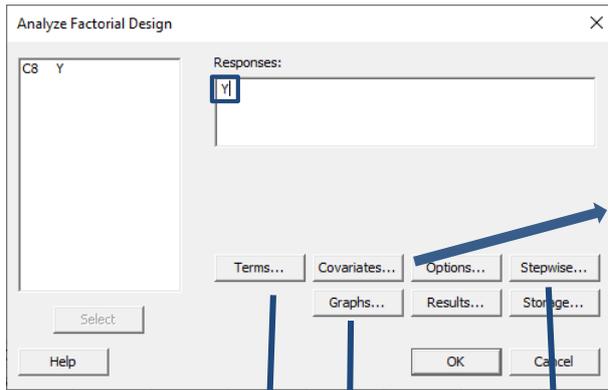
Obr. 8 Cplot ako výstup Minitabu

Po zadaní nameraných hodnôt odozvy je možné spustiť analýzu faktorového experimentu. Postupnosť krokov pri spustení analýzy je na obr. 9.



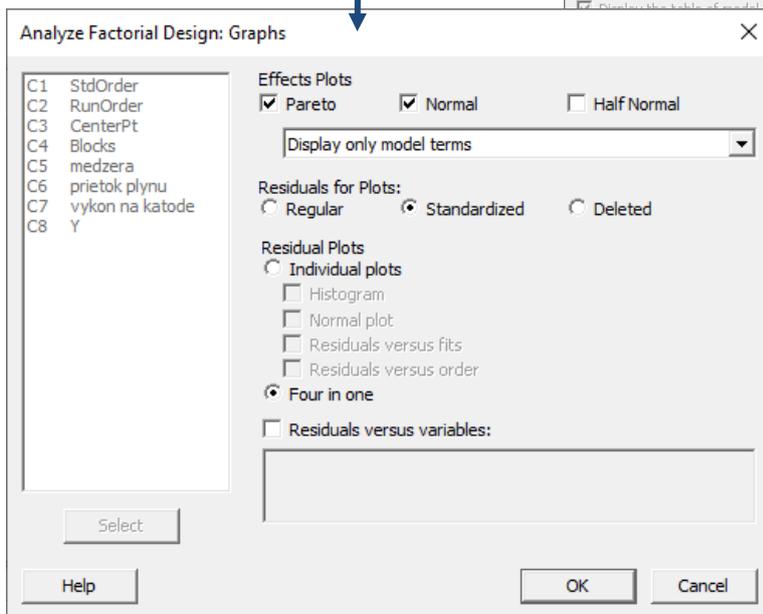
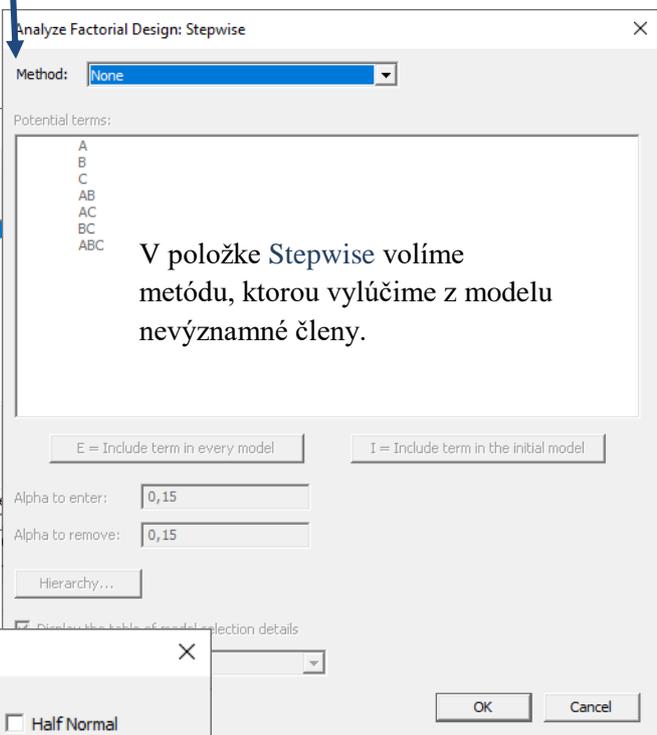
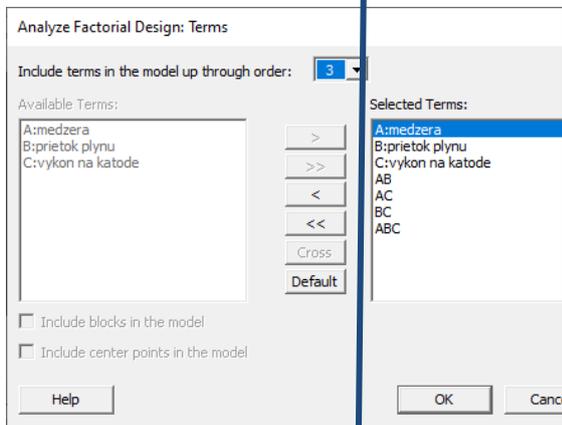
Obr. 9 Postupnosť krokov pri zadávaní analýzy nameraných hodnôt

Dialógové okno *Analyze Factorial Design* obsahuje prvky na definovanie odozvy, t. j. závislej premennej. V prípade viacerých sledovaných závislých premenných zapísaných do plánu experimentu sa spracovanie výsledkov robí vždy pre každú osobitne. Všetky ostatné nastavenia s požiadavkami na výstup, napr. typy grafov, metódy na získavanie hierarchického modelu, voľba kovariátov sú naznačené na obr. 10. Robíme výber cez nastavenie tlačidiel v okne *Analyze Factorial Design*.



Terms: Volíme členy v regresnom modeli, t. j. zadáme faktory a uvažované interakcie.

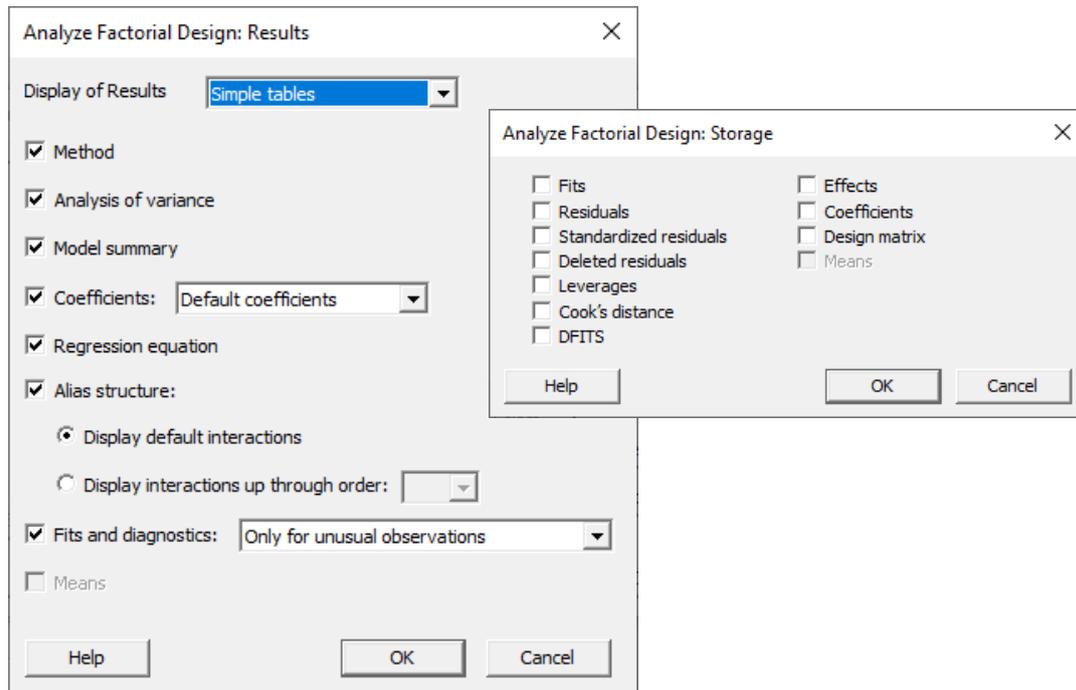
Kovariát je kvantitatívna premenná, ktorú počas experimentu cielene nemeníme, ale je možné ju merať (teplota okolia, vlhkosť, tlak, sieťové napätie.....). Model umožňuje kovariáty zahrnúť a upraviť ako vstupné premenné, ktoré boli merané, ale neboli randomizované alebo kontrolované v experimente. Pridanie kovariátov môže výrazne zlepšiť presnosť modelu a ovplyvniť konečné výsledky analýzy. Ich zahrnutie do modelu môže znížiť chybu v modeli a zvýšiť tak silu faktorových testov.



V ponuke Graphs zadávame požadované grafické výstupy (Pareto graf, normálny pravdepodobnostný graf, graf rezíduí).

Obr. 10 Zadávanie požiadaviek na výstup analýzy nameraných hodnôt

Výstup vieme zobrazit' v jednoduchaj alebo rozšírenej tabuľke v ponuke **Result**. Zadávame požadované štatistiky, ktoré chceme ďalej spracovávať.



Obr. 11 Dialógové okno ponuky Results pri zadávaní požiadaviek na analýzu nameraných hodnôt pri faktorovom experimente

Výstup analýzy v Minitabe možno rozdeliť na štyri časti. V časti **Coded Coefficients** sú vypočítané hodnoty efektov, bodové odhady koeficientov regresného modelu, štandardné chyby bodového odhadu týchto odhadov, prislúchajúce hodnoty testovacej štatistiky t-testu a p-hodnoty. Tabuľka **Model Summary** obsahuje index determinácie, upravený index determinácie a index determinácie vzťahujúci sa na predikciu. Tabuľka **ANOVA** umožňuje posúdiť štatistickú významnosť regresného modelu, príspevok lineárnych členov, interakcií 2. i 3. rádu. Rovnica regresného modelu je uvedená v nekódovaných (pôvodných) jednotkách – bodové odhady regresných koeficientov boli spätne transformované na pôvodné jednotky.

Výstup analýzy nameraných hodnôt odozvy v prvej fáze vyhodnotenia obsahuje aj členy, ktoré nie sú významné a možno ich z modelu alebo ďalšieho skúmania vylúčiť. Výstup Minitabu je v nasledujúcom tvare (obr. 12).

Factorial Regression: Y versus medzera; prietok plynu; vykon na katode

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		776,1	11,9	65,41	0,000	
medzera	-101,6	-50,8	11,9	-4,28	0,003	1,00
prietok plynu	7,4	3,7	11,9	0,31	0,764	1,00
vykon na katode	306,1	153,1	11,9	12,90	0,000	1,00
medzera*prietok plynu	-24,9	-12,4	11,9	-1,05	0,325	1,00
medzera*vykon na katode	-153,6	-76,8	11,9	-6,47	0,000	1,00
prietok plynu*vykon na katode	-2,1	-1,1	11,9	-0,09	0,931	1,00
medzera*prietok plynu*vykon na katode	5,6	2,8	11,9	0,24	0,819	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
47,4612	96,61%	93,64%	86,44%

Analysis of Variance

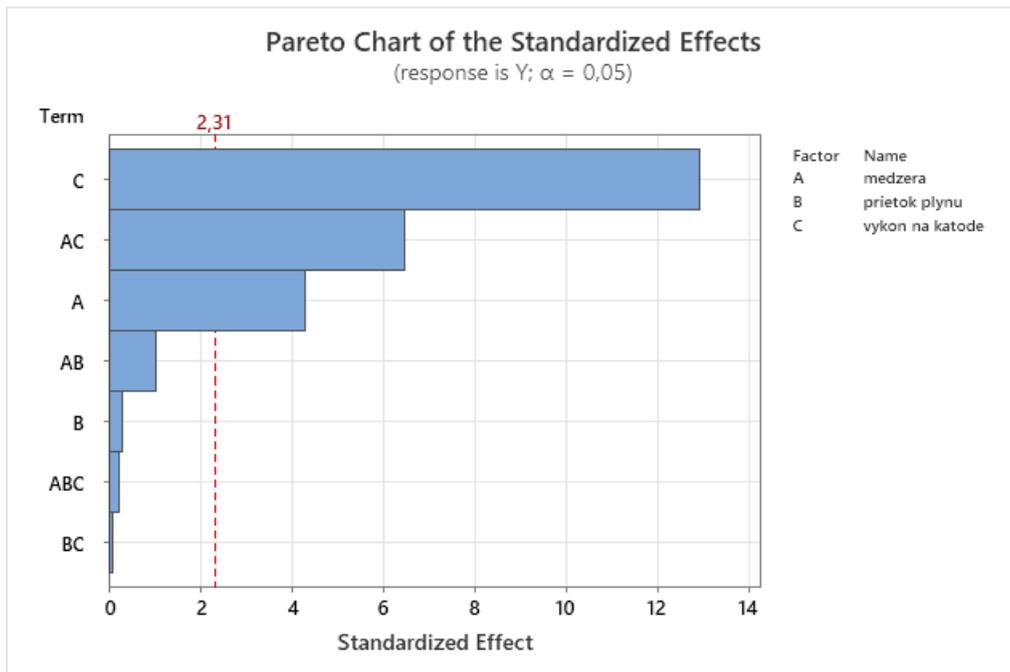
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	513400	73343	32,56	0,000
Linear	3	416378	138793	61,62	0,000
medzera	1	41311	41311	18,34	0,003
prietok plynu	1	218	218	0,10	0,764
vykon na katode	1	374850	374850	166,41	0,000
2-Way Interactions	3	96896	32299	14,34	0,001
medzera*prietok plynu	1	2475	2475	1,10	0,325
medzera*vykon na katode	1	94403	94403	41,91	0,000
prietok plynu*vykon na katode	1	18	18	0,01	0,931
3-Way Interactions	1	127	127	0,06	0,819
medzera*prietok plynu*vykon na katode	1	127	127	0,06	0,819
Error	8	18020	2253		
Total	15	531421			

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 Y = & -6487 + 5355 \text{ medzera} + 6,6 \text{ prietok plynu} + 24,1 \text{ vykon na katode} \\
 & - 6,2 \text{ medzera*prietok plynu} - 17,8 \text{ medzera*vykon na katode} \\
 & - 0,0161 \text{ prietok plynu*vykon na katode} + 0,0150 \text{ medzera*prietok plynu*vykon na katode}
 \end{aligned}$$

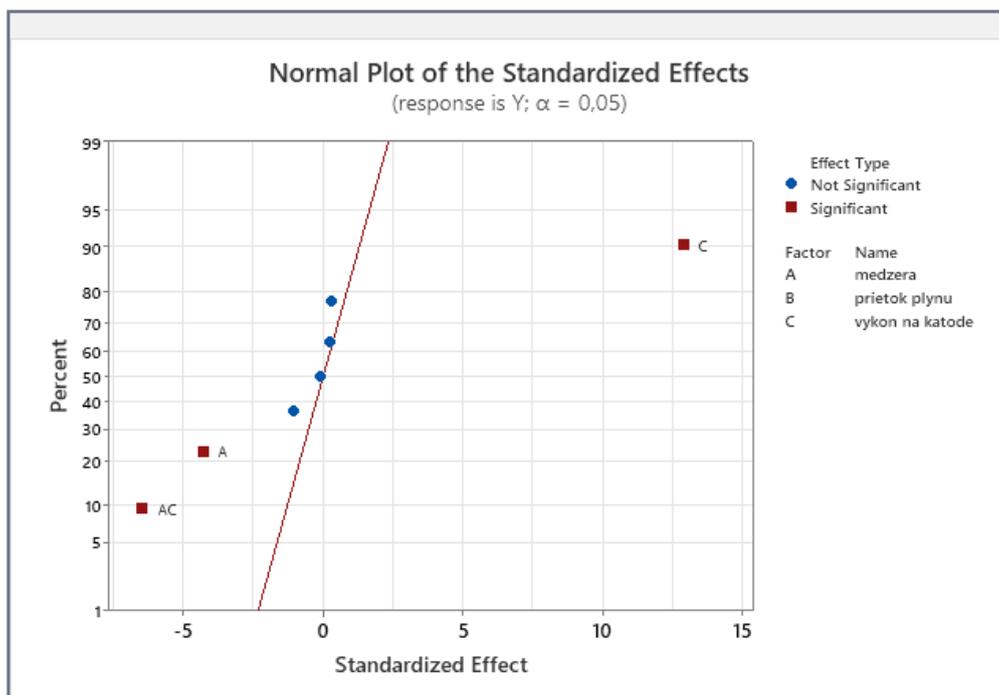
Obr. 12 Výstup analýzy nameraných hodnôt odozvy pozostáva zo štyroch častí – v prvej fáze vyhodnotenia obsahuje aj členy, ktoré nie sú významné

V Pareto grafe na obr. 13 sú štandardizované efekty usporiadané podľa veľkosti zostupne.



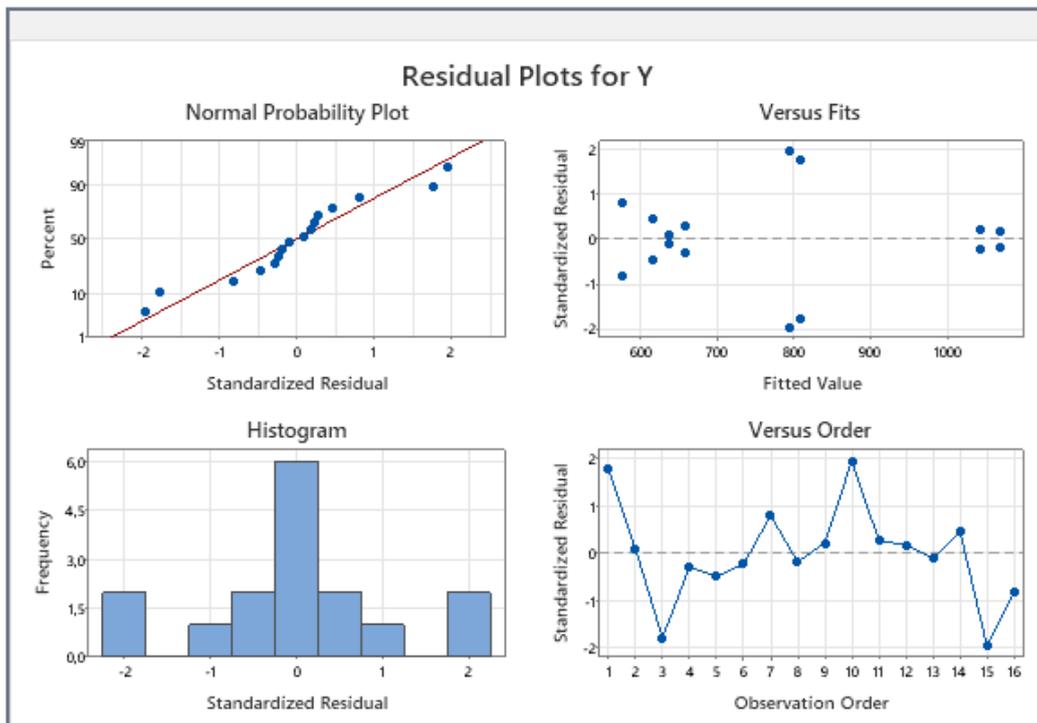
Obr. 13 Pareto graf štandardizovaných efektov

Normálny pravdepodobnostný graf zobrazuje významné efekty faktorov a ich interakcií. Tie, ktoré sú nevýznamné, ležia pozdĺž priamky.



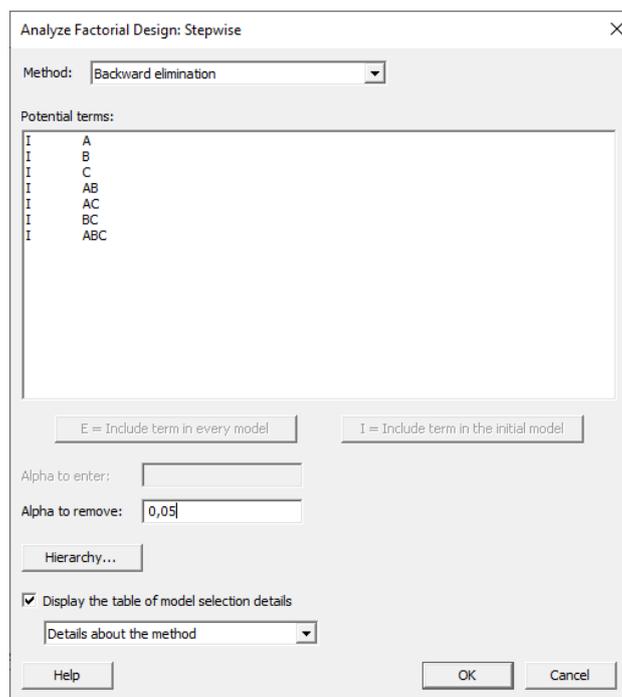
Obr. 14 Normálny pravdepodobnostný graf štandardizovaných efektov

V grafe reziduí vizuálne kontrolujeme normalitu reziduí $N(0;\sigma^2)$ a ich nezávislosť.



Obr. 15 Graf reziduí

Model obsahuje aj členy, ktorých vplyv na odozvu nie je signifikantný. Opätovným výberom ponuky *Analyze factorial design* volíme metódu Backward elimination a hladinu významnosti pri voľbe hierarchického modelu.



Obr. 16 Voľba spätnej eliminačnej metódy pri vylúčení nesignifikantných členov

Výstup Minitabu pre hierarchický model je obr. 17.

Factorial Regression: Y versus medzera; prietok plynu; výkon na katode

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0,05

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		776,1	10,4	74,46	0,000	
medzera	-101,6	-50,8	10,4	-4,88	0,000	1,00
vykon na katode	306,1	153,1	10,4	14,69	0,000	1,00
medzera*vykon na katode	-153,6	-76,8	10,4	-7,37	0,000	1,00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
41,6911	96,08%	95,09%	93,02%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	510563	170188	97,91	0,000
Linear	2	416161	208080	119,71	0,000
medzera	1	41311	41311	23,77	0,000
vykon na katode	1	374850	374850	215,66	0,000
2-Way Interactions	1	94403	94403	54,31	0,000
medzera*vykon na katode	1	94403	94403	54,31	0,000
Error	12	20858	1738		
Lack-of-Fit	4	2837	709	0,31	0,860
Pure Error	8	18021	2253		
Total	15	531421			

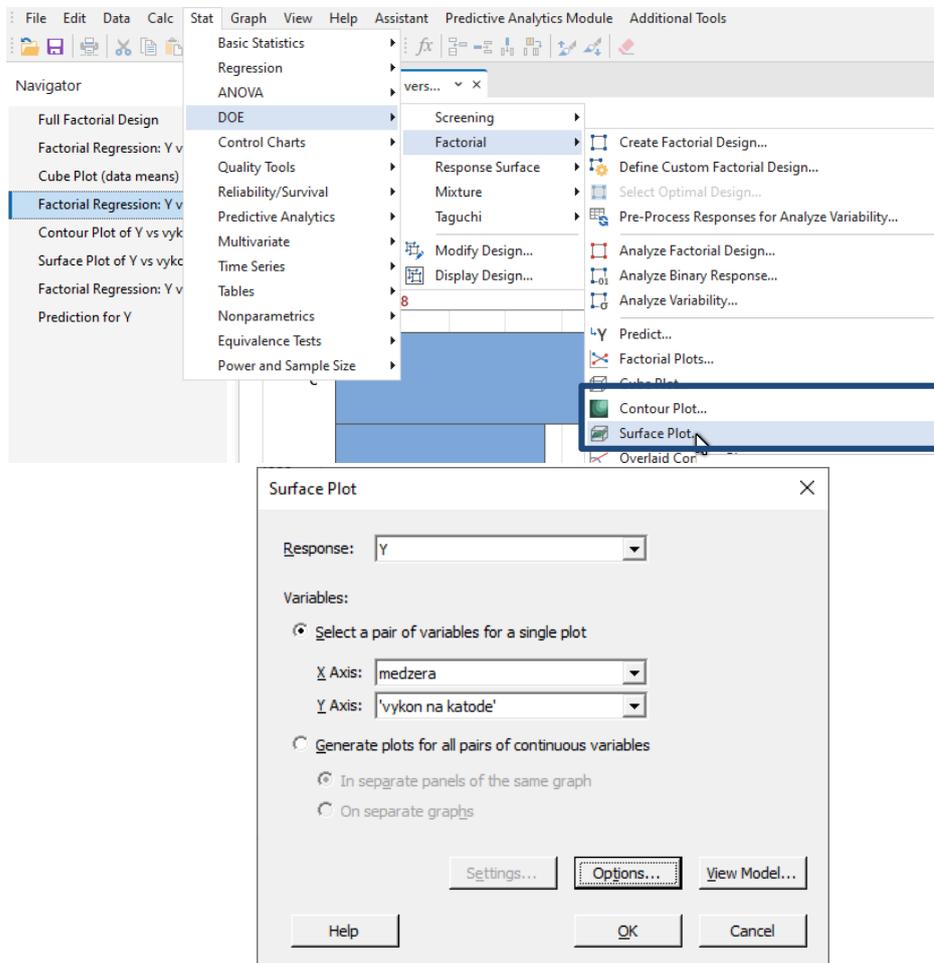
Regression Equation in Uncoded Units

$$Y = -5415 + 4355 \text{ medzera} + 21,48 \text{ vykon na katode} - 15,36 \text{ medzera*vykon na katode}$$

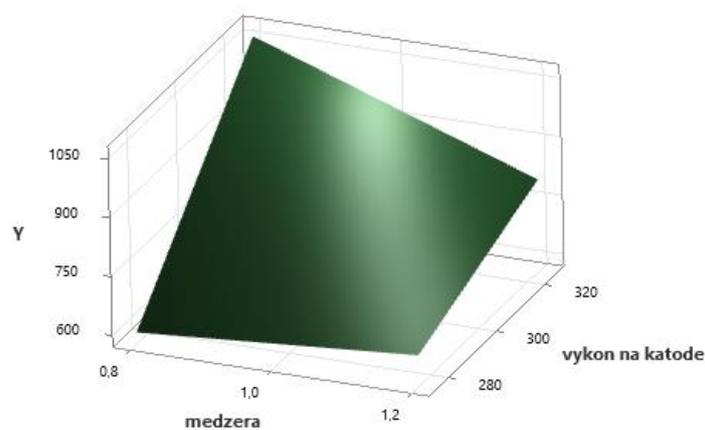
Obr. 17 Výstup analýzy po vylúčení členov, ktoré nie sú signifikantné

Po vylúčení prietoku plynu a všetkých interakcií s týmto faktorom je možné zobrazenie 3D grafu, t. j. získanej odozvovej plochy a vrstevnicového grafu (Contour Plot).

Zadávanie postupnosti príkazov pri zobrazení 3D grafu (výber **Surface Plot**) s výstupom je zobrazený na obr. 18.

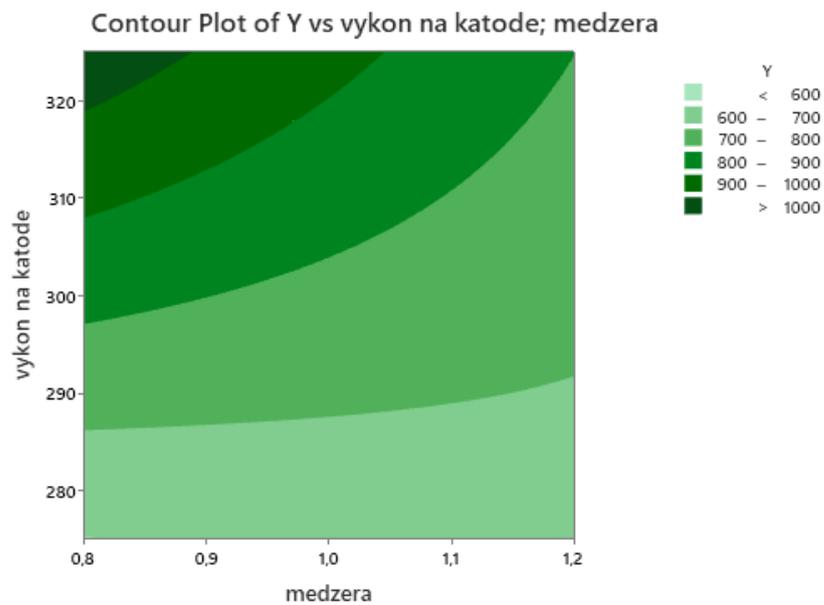
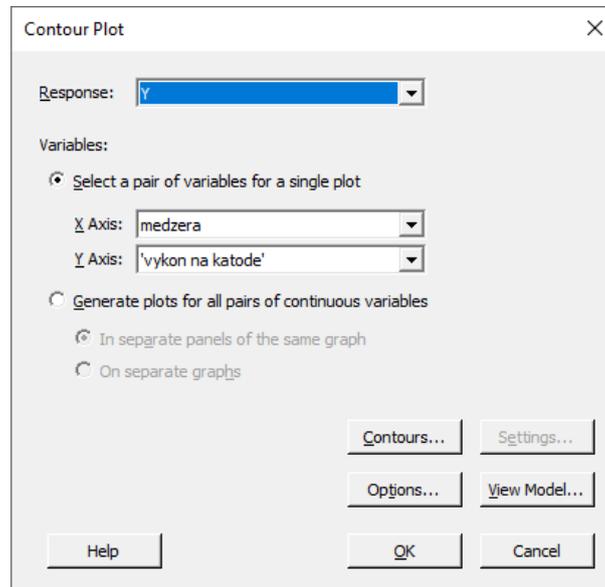


Surface Plot of Y vs vykon na katode; medzera



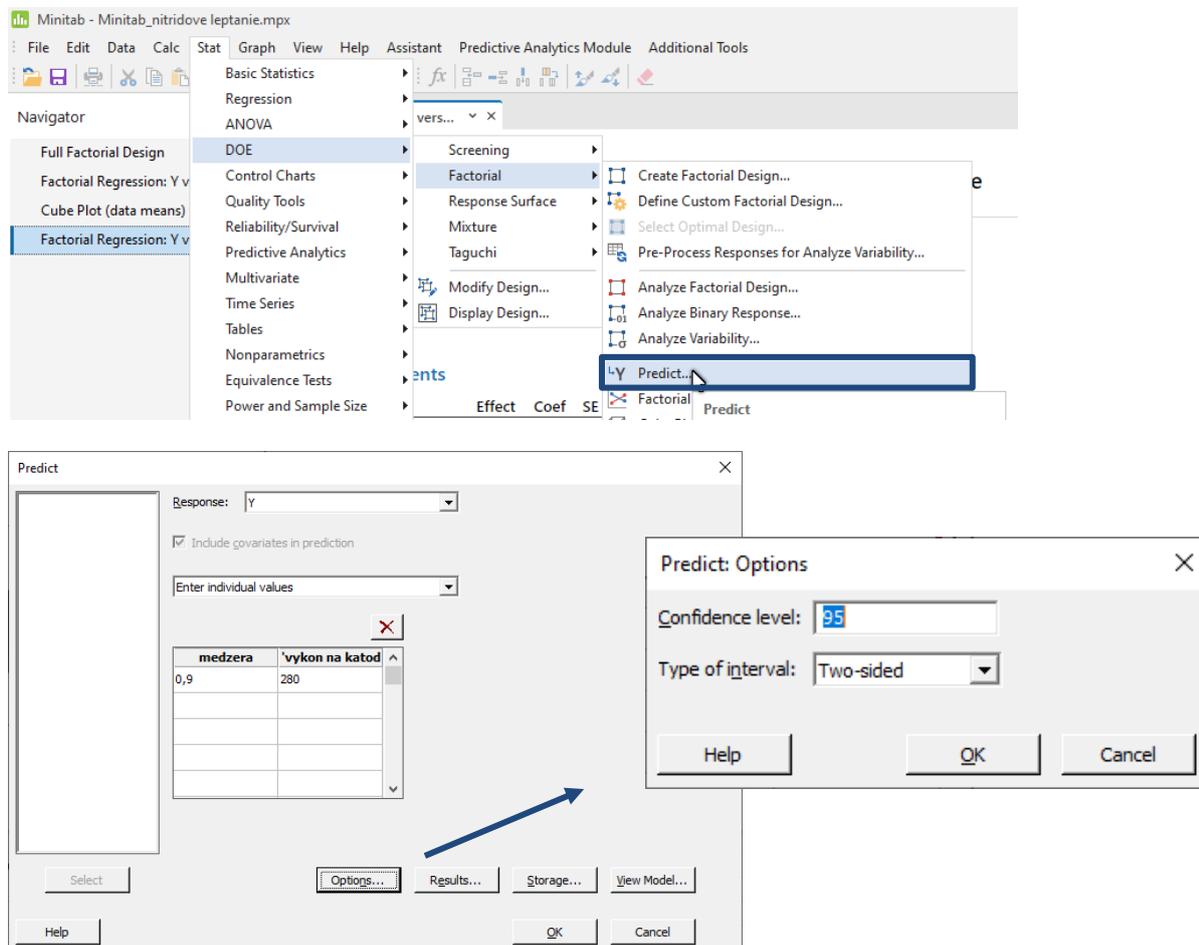
Obr. 18 Postupnosť príkazov pri zobrazovaní 3D grafu s výstupom

K tejto odozvovej ploche je možné zobrazit' zodpovedajúci vrstevnicový graf pomocou ponuky **Contour Plot**, vid'. obr. 19.



Obr. 19 Vrstevnicový graf pre danú odozvoú plochu

Získaný regresný model je možné použiť na predikciu rýchlosti nitridového leptania pre nami zvolené úrovne faktorov medzera a výkon na katóde.



Obr. 20 Zadávanie výpočtu predikovanej hodnoty pre zvolené hodnoty vstupov (faktorov)

Výstup Minitabu je v nasledujúcom tvare (obr.21):

Prediction for Y

Regression Equation in Uncoded Units

$$Y = -5415 + 4355 \text{ medzera} + 21,48 \text{ vykon na katode} - 15,36 \text{ medzera} \cdot \text{vykon na katode}$$

Settings

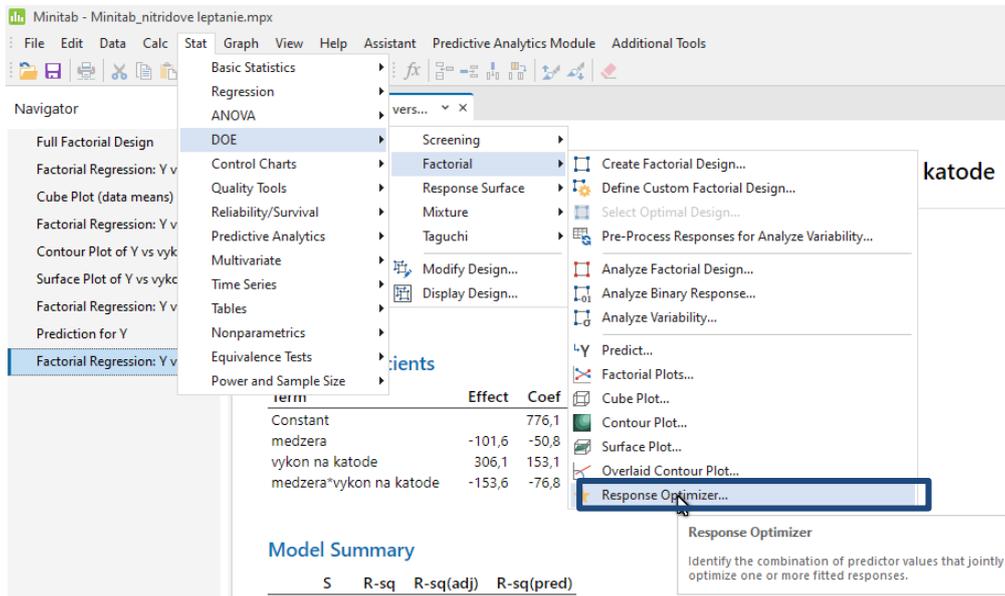
Variable	Setting
medzera	0,9
vykon na katode	280

Prediction

Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
648,294	14,9231	(615,779; 680,808)	(551,813; 744,775)

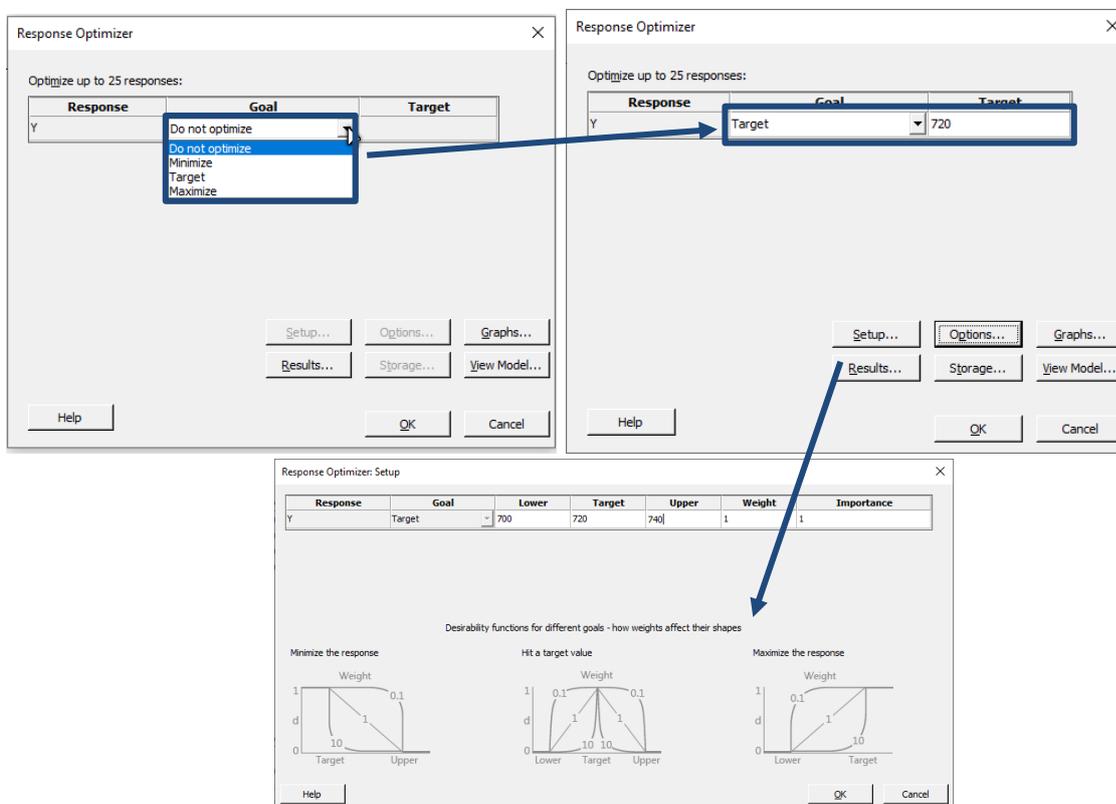
Obr. 21 Výstup s výsledkami pre predikciu

Regresný model možno použiť na výpočet optimálneho riešenia. Pri požadovanej hodnote odozvy vieme nájsť zodpovedajúce úrovne sledovaných faktorov.



Obr. 22 Postupnosť príkazov pri hľadaní optimálneho riešenia

V dialógovom okne volíme požadované riešenie, v našom prípade volíme rýchlosť nitrídového leptania $720 \cdot 10^{-10}$ m/min.



Obr. 23 Zadávanie požiadaviek na požadovanú (cieľovú) hodnotu odozvy

V ponuke **Options** je možné voliť obmedzenia, obr. 24. Podľa vrstevnicového grafu sa požadované hodnoty odozvy nenachádzajú iba na okraji experimentálneho priestoru, preto necháme podmienky hľadania riešenia bez obmedzení.

Ak by sme úrovne faktorov zadávali v kódovaných hodnotách, volili by sme obmedzenia faktorov -1 a 1.

Je možné hľadať optimálne riešenie aj v prípade viacerých závislých premenných. V tom prípade volíme pre každú odozvu konkrétne požiadavky, t. j. minimálnu, maximálnu alebo požadovanú konkrétnu hodnotu.

Response Optimizer: Options

Constraints

Variable	Constraint	Hold Value	Lower	Upper
medzera	No constraints			
'vykon na katode'	No constraints			

Starting Values

Variable	Starting Value
medzera	
'vykon na katode'	

Confidence level for all intervals: 95

Type of confidence level: Two-sided

Help OK Cancel

Obr. 24 Okno pre zadávanie obmedzení pre faktory

Zadáваме počet riešení, ktoré chceme zobrazíť, obr. 25.

Response Optimizer: Results

Parameters

Solutions

Number of solutions to display: 10

Prediction

Help OK Cancel

Obr. 25 Okno pre zadávanie požiadaviek na výsledky

Minitab našiel 5 rôznych riešení. Prvé z nich je veľmi podobné riešeniu, ktoré sme vypočítali v Exceli, vid' riešený príklad z nitridového leptania v kap. 8.

Response Optimization: Y

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Y	Target	700	720	740	1	1

Solutions

Solution	medzera	vykon na katode	Y Fit	Composite Desirability
1	1,01487	291,129	720	1
2	1,19617	297,998	720	1
3	1,20000	298,279	720	1
4	0,81020	288,462	720	1
5	0,92991	289,739	720	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
medzera	1,01487
vykon na katode	291,129

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Y	720,0	11,1	(695,8; 744,2)	(626,0; 814,0)

Obr. 26 Nájsené optimálne riešenia (všetky sú vzhľadom na hodnotu Desirability funkcie rovnako vhodné)