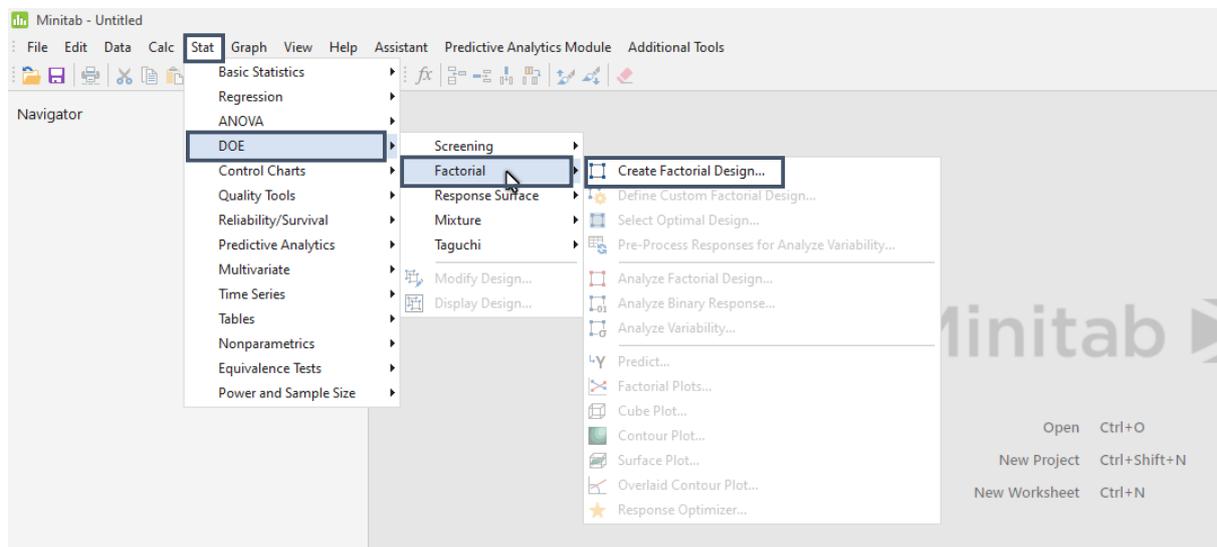


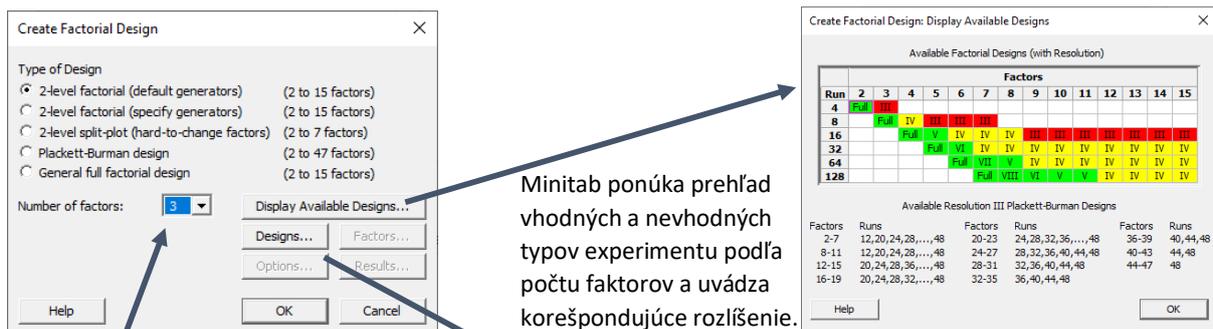
# DOE v softvéri Minitab \_Faktorový experiment

Uvažujme o experimente typu  $2^3$  s dvoma replikáciami v každom bode (príklad z prednášky \_nitridové leptanie plazmových doštičiek). V Minitabe nasledujúcim spôsobom vytvoríme plán experiment, doplníme namerané hodnoty a spustíme analýzu dát.

1. Výberom v hlavnom menu z ponuky Stat\_DOE si zvolíme faktorový experiment, t.j. zvolíme Factorial s možnosťou Create Factorial Design...



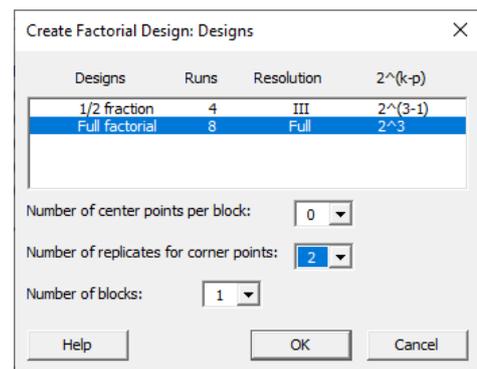
V dialógovom okne volíme typ experimentu, t.j. 2 úrovňový s tromi faktormi.



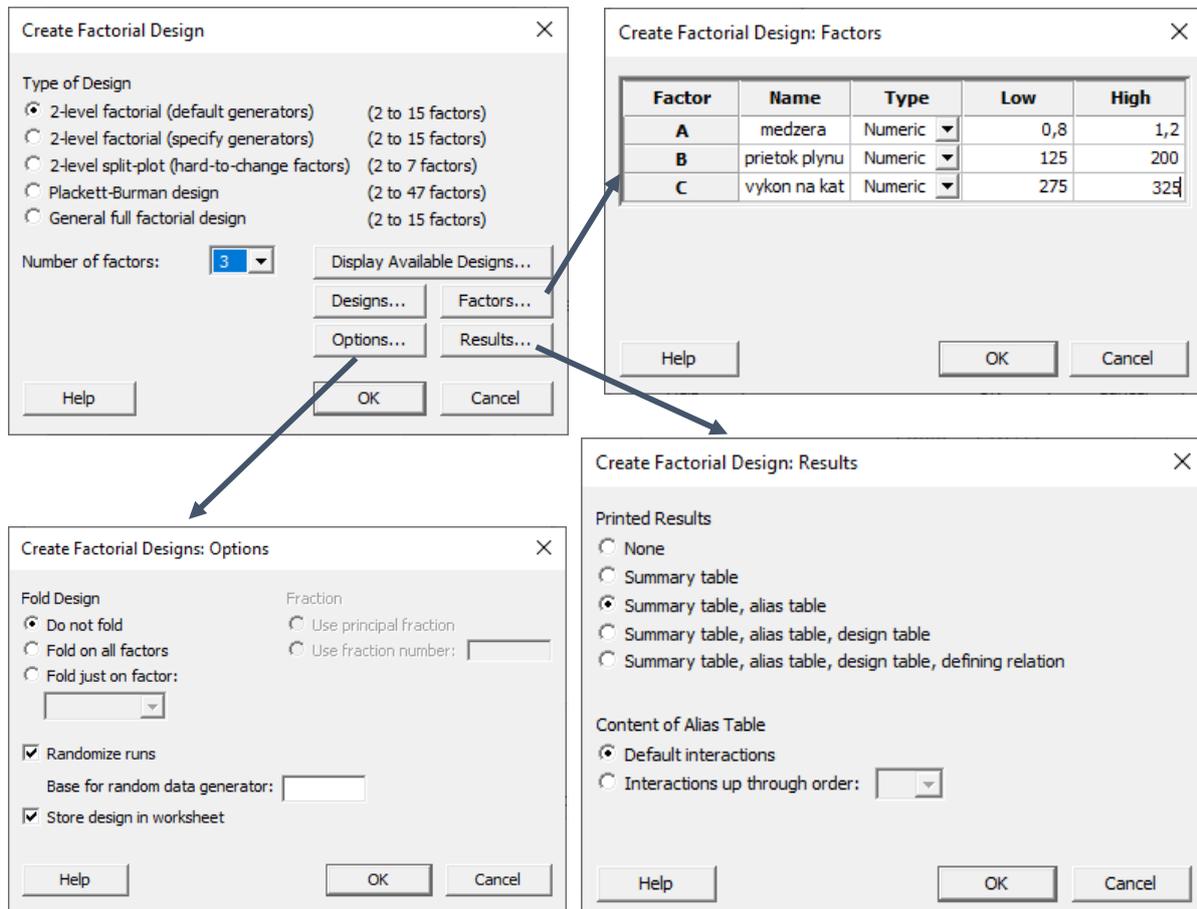
Volíme počet faktorov.

V položke Designs volíme:

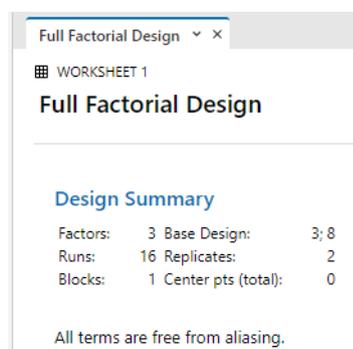
- typ experimentu úplný alebo čiastočný;
- počet centrálnych bodov, resp. počet replikácií v centrálnom bode;
- počet replikácií vo faktorových bodoch;
- počet blokov.



V ďalšom kroku je potrebné v položke **Create Factorial design** definovať faktory, ich úroveň, zadať typy faktorov (kvantitatívnych premenných – Numeric alebo kvalitatívnych premenných – Text). V položke **Create Factorial Design** 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 zobrazíť plán experimentu v pôvodnom poradí. V položke **Results** volíme typ zobrazenia výsledkov...



Minitab ponúka výstup v nasledujúcom tvare:



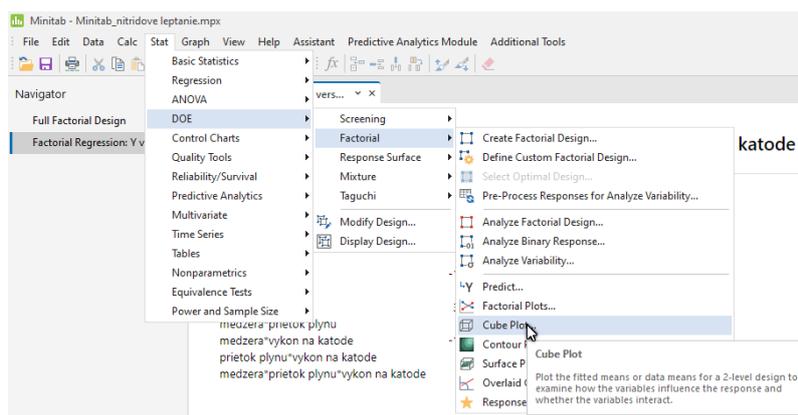
Okrem zhrnutia zadaných údajov (počet faktorov, počet úrovní, počet replikácií) výpis obsahuje počet bodov plánu experimentu a počet meraní zohľadňujúci počet replikácií

v každom bode. V našom prípade pracovný list obsahuje všetky kombinácie 2 úrovní pre 3 faktory v náhodnom poradí s 2 replikáciami. K tomuto plánu experimentu je potrebné doplniť stĺpec (C8) s nameranými hodnotami odoziev 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

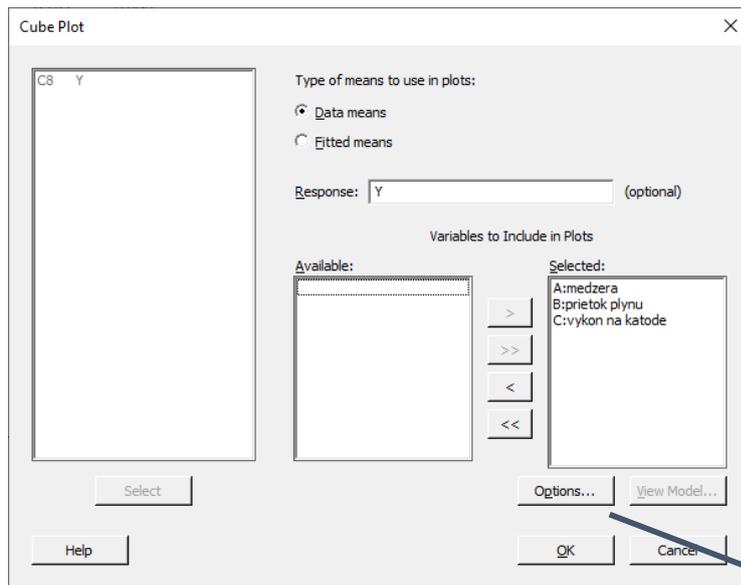
K vygenerovaným hodnotám úrovni zadaných faktorov , t.j. k jednotlivým bodom plánu experimentu, doplníme zodpovedajúce hodnoty nameraných rýchlostí nitrídového leptania.

2. Na grafické zobrazenie priemeru nameraných hodnôt alebo predikovaných hodnôt používame ponuku Cube Plot.

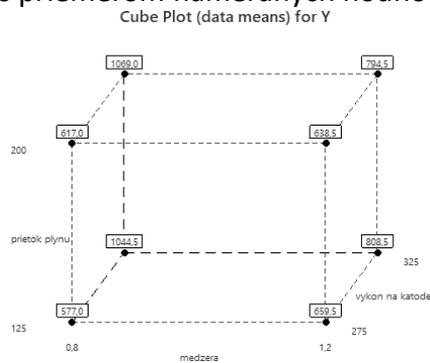


Okno **Cube Plot** vyžaduje zadanie hodnoty, ktorú chce zobraziť, t.j. vyberáme priemer nameraných odoziev (Data means) alebo predikované hodnoty (Fitted means). Pri zadávaní premennej do odozvy vyberáme z ponuky v ľavom okne výberom označenej premennej a potvrdením cez Select alebo dvojklikom ľavého tlačidla myši. V časti Variables to Include in Plots zadávame, ktoré faktory chceme v grafe zobraziť (výber z ponúkaných má význam

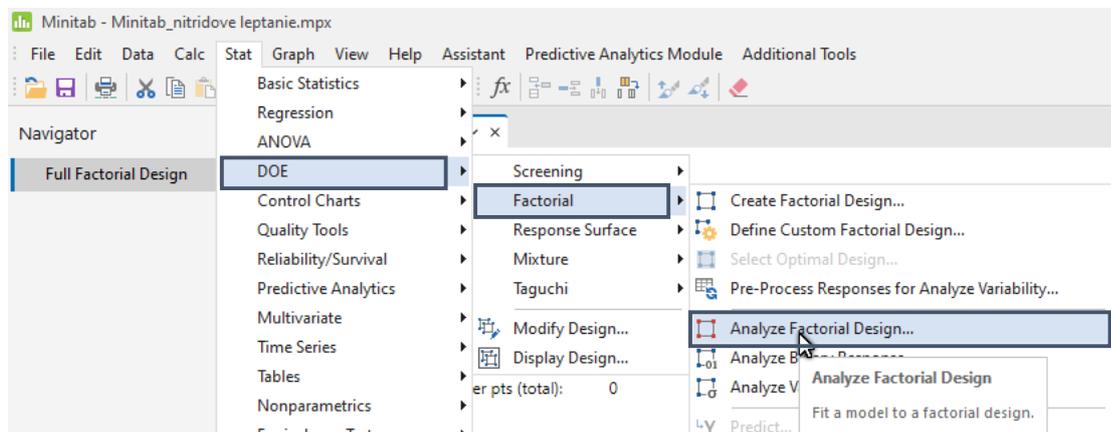
najmä pri veľkom počte faktorov). V našom prípade nechávame všetky 3 faktory. Options ponúka doplniť názov CPlot-u.



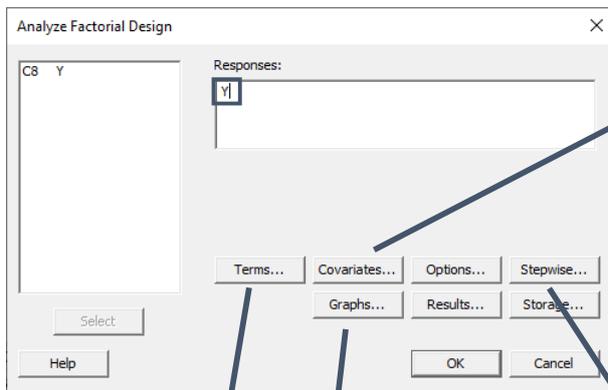
Výsledný CPlot s priemerom nameraných hodnôt vo faktorových bodoch:



3. Po zadaní nameraných hodnôt odozvy je možné spustiť analýzu faktorového experimentu.



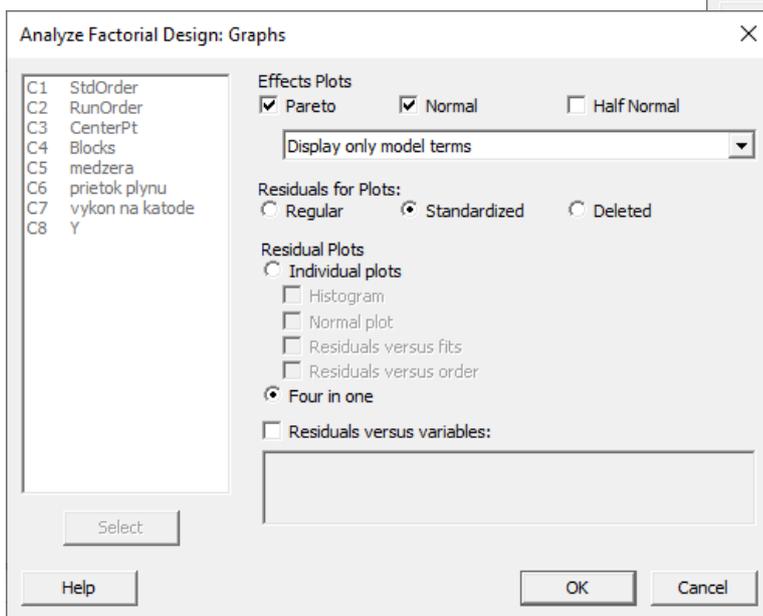
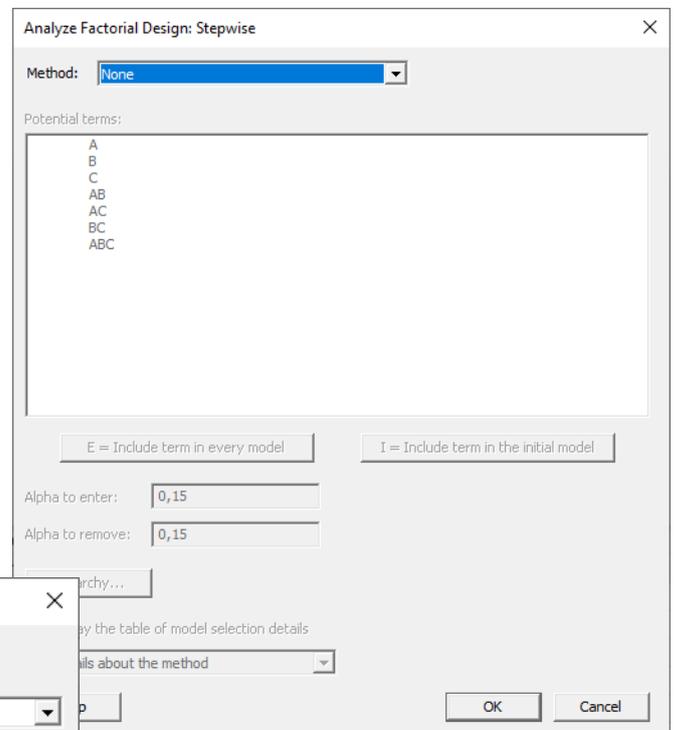
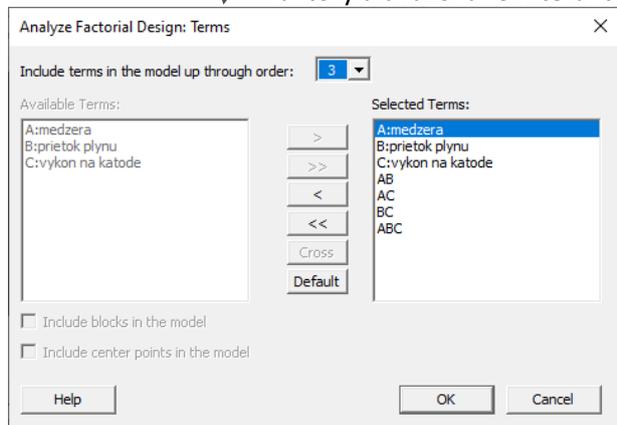
Definovanie odozvy, t.j. závislej premennej. V prípade viacerých sledovaných závislých premenných sa spracovanie výsledkov robí pre každú osobitne.



Kovariát je kvantitatívna premenná, ktorú počas experimentu cielene nemeráme, 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.

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

V položke **Stepwise** volíme metódu, ktorou vylúčime z modelu nevýznamné členy (viď hierarchický model).



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

Výstup vieme zobraziť v jednoduchovej alebo rozšírenej tabuľke. Zadáваме požadované štatistiky, ktoré chceme ďalej spracovávať.

Analyze Factorial Design: Results

Display of Results: Simple tables

Method

Analysis of variance

Model summary

Coefficients: Default coefficients

Regression equation

Alias structure:

- Display default interactions
- Display interactions up through order: [ ]

Fits and diagnostics: Only for unusual observations

Means

Help OK Cancel

Analyze Factorial Design: Storage

Fits

Residuals

Standardized residuals

Deleted residuals

Leverages

Cook's distance

DFITS

Effects

Coefficients

Design matrix

Means

Help OK Cancel

Výstup Minitabu je v nasledujúcom tvare:

Factorial Regression: Y vers... ✕

WORKSHEET 1

### Factorial Regression: Y versus medzera; prietok plynu; výkon 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			

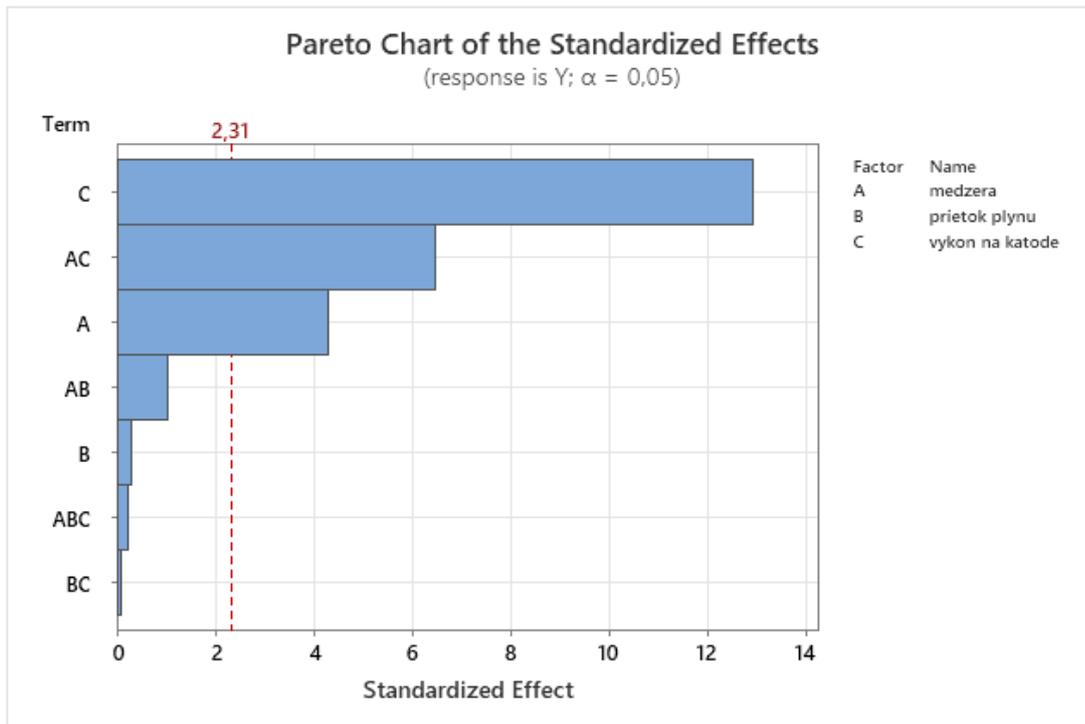
#### Regression Equation in Uncoded Units

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

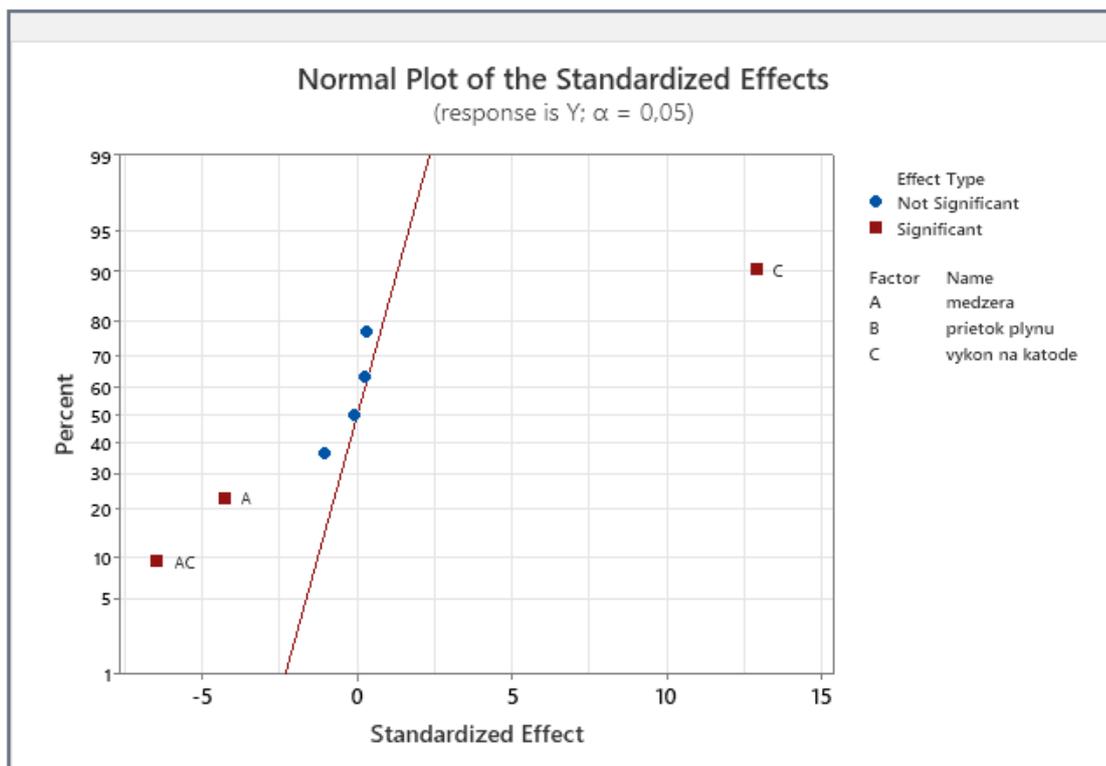
Výstup obsahuje vypočítané hodnoty efektov, bodové odhady koeficientov regresného modelu, ich štatistiky, index determinácie, upravený index determinácie. ANOVA umožňuje posúdiť štatistickú významnosť regresného modelu, príspevok lineárnych členov, interakcií 2. i 3. rádu.

Rovnica regresného modelu je uvedená v nekódovaných (pôvodných) jednotkách.

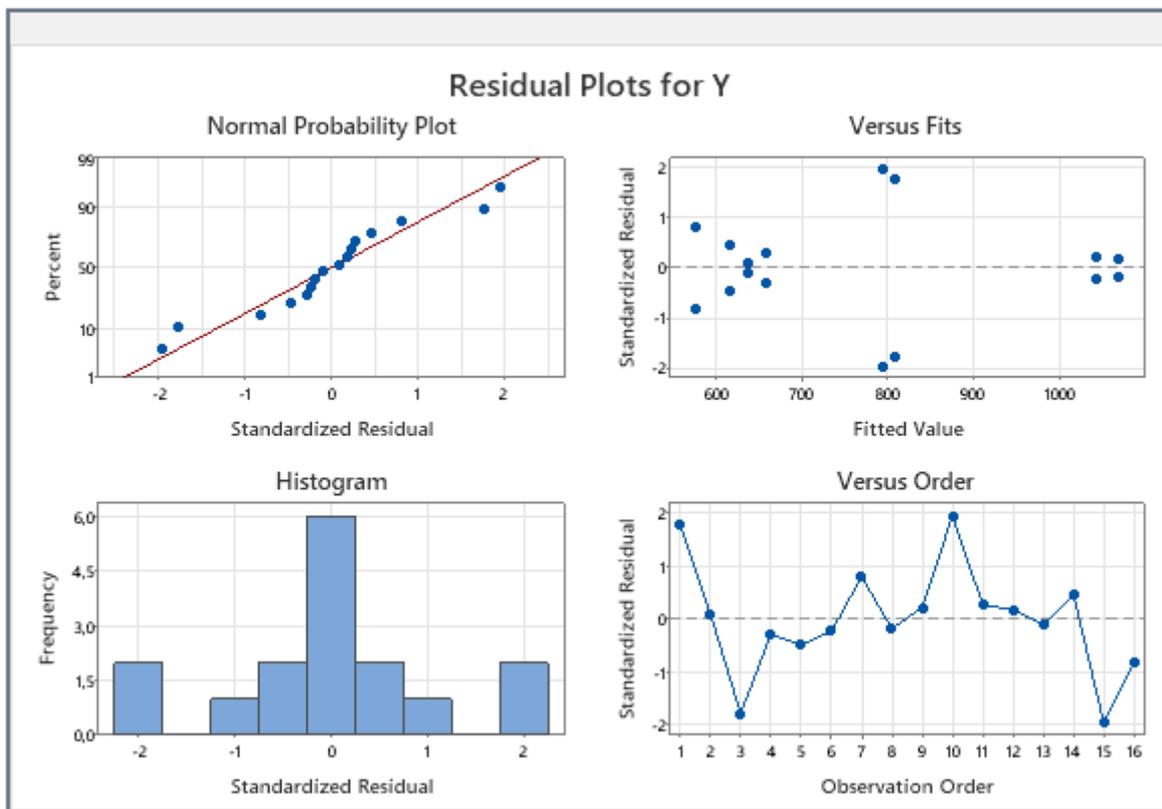
V Pareto grafe sú efekty usporiadané podľa veľkosti zostupne.



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



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



4. 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.

The screenshot shows the 'Analyze Factorial Design: Stepwise' dialog box with the following settings:

- Method: Backward elimination
- Potential terms: A, B, C, AB, AC, BC, ABC
- Buttons: E = Include term in every model, I = Include term in the initial model
- Alpha to enter: [ ]
- Alpha to remove: 0,05
- Buttons: Hierarchy...
- Display the table of model selection details:
- Details about the method: [ ]
- Buttons: Help, OK, Cancel

Výstup Minitabu je v tvare:

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

### Backward Elimination of Terms

$\alpha$  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%

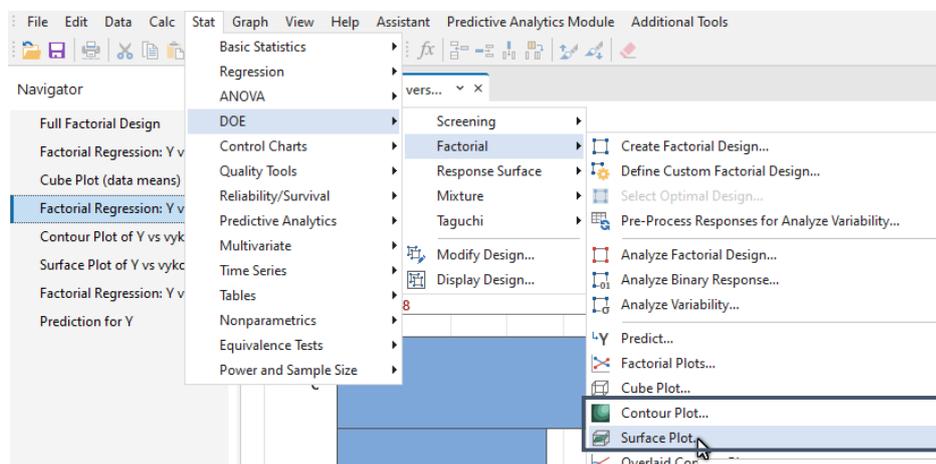
### Analysis of Variance

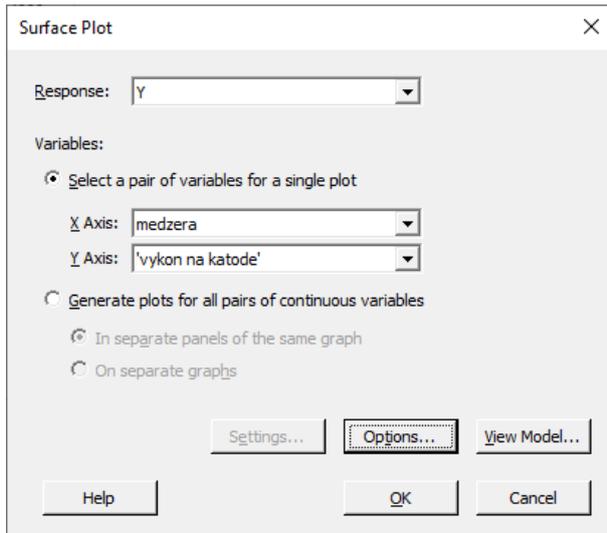
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	510563	170188	97,91	0,000
Linear	2	416161	208080	119,71	0,000
medzera	1	41311	41311	23,77	0,000
vykon na katode	1	374850	374850	215,66	0,000
2-Way Interactions	1	94403	94403	54,31	0,000
medzera*vykon na katode	1	94403	94403	54,31	0,000
Error	12	20858	1738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

### Regression Equation in Uncoded Units

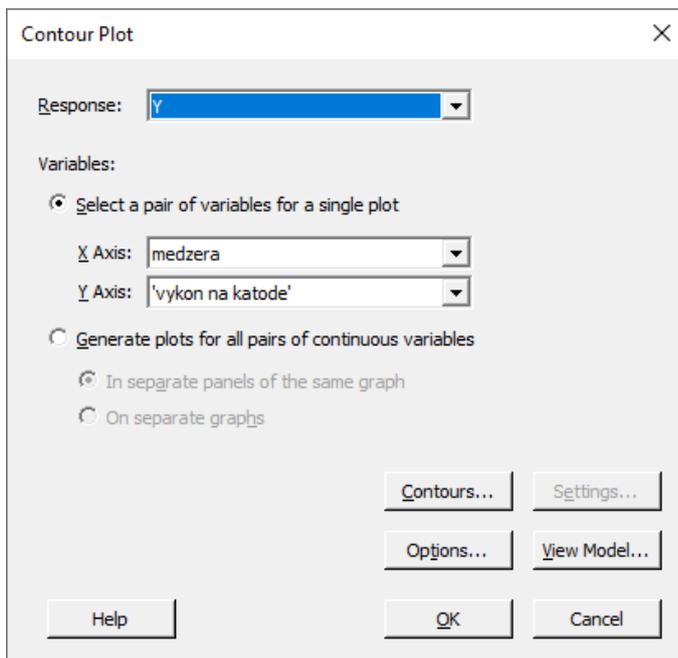
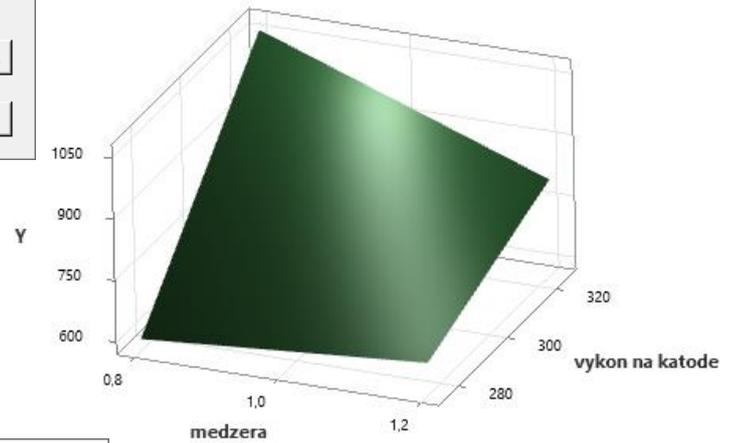
$$Y = -5415 + 4355 \text{ medzera} + 21,48 \text{ vykon na katode} - 15,36 \text{ medzera*vykon na katode}$$

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

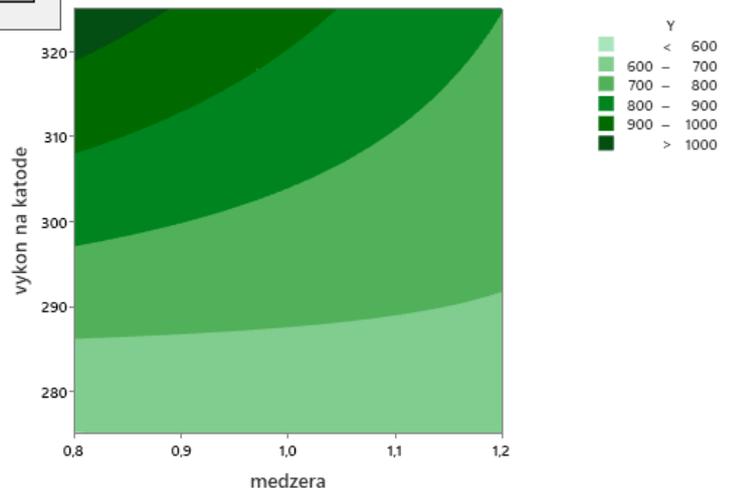




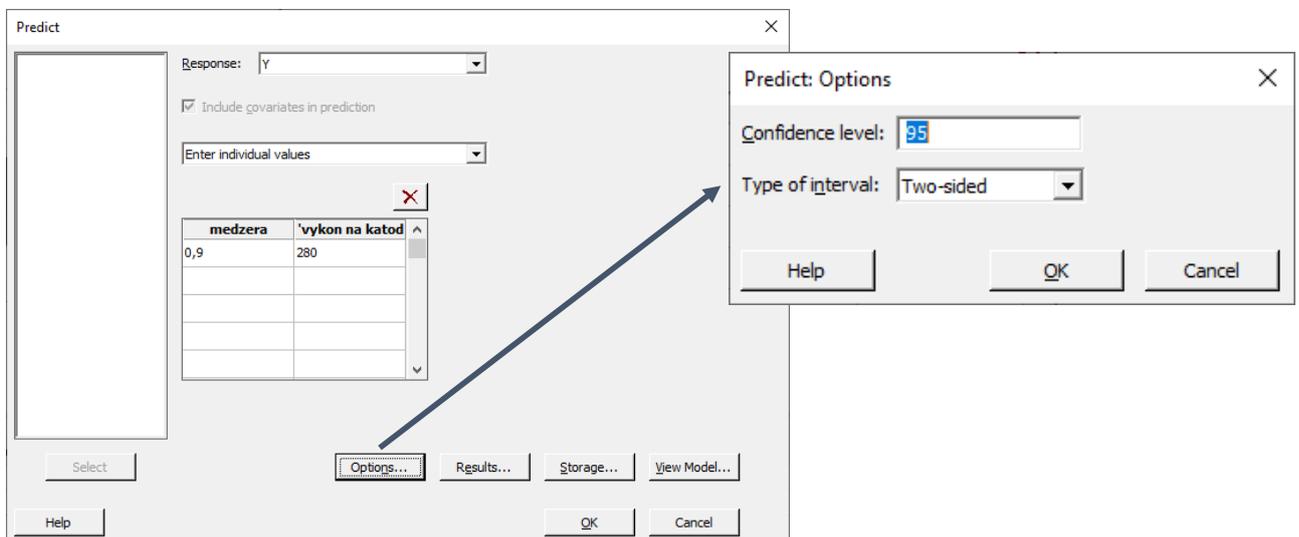
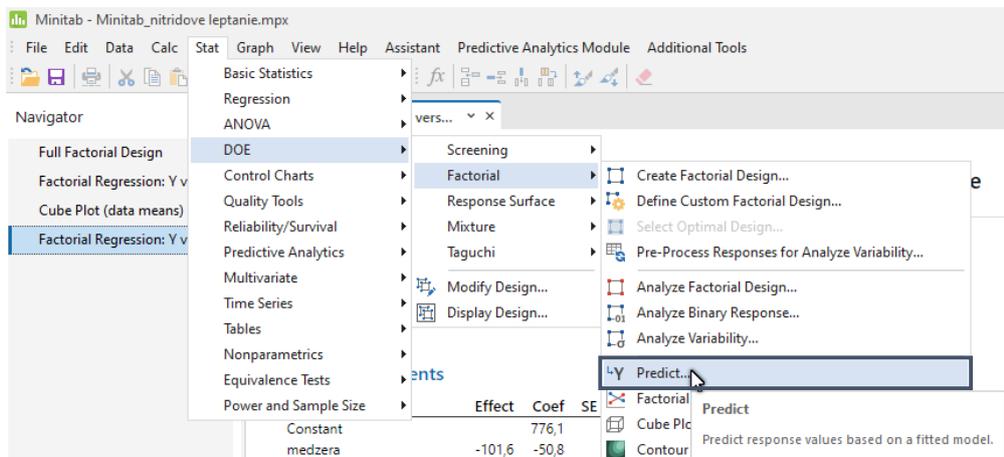
Surface Plot of Y vs vykon na katode; medzera



Contour Plot of Y vs vykon na katode; medzera



6. Model je možné použiť na predikciu rýchlosti nitrídového leptania pre zvolené úrovne faktorov medzera a výkon na katóde.



Výstup Minitabu je v nasledujúcom tvare:

### Prediction for Y

#### Regression Equation in Uncoded Units

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

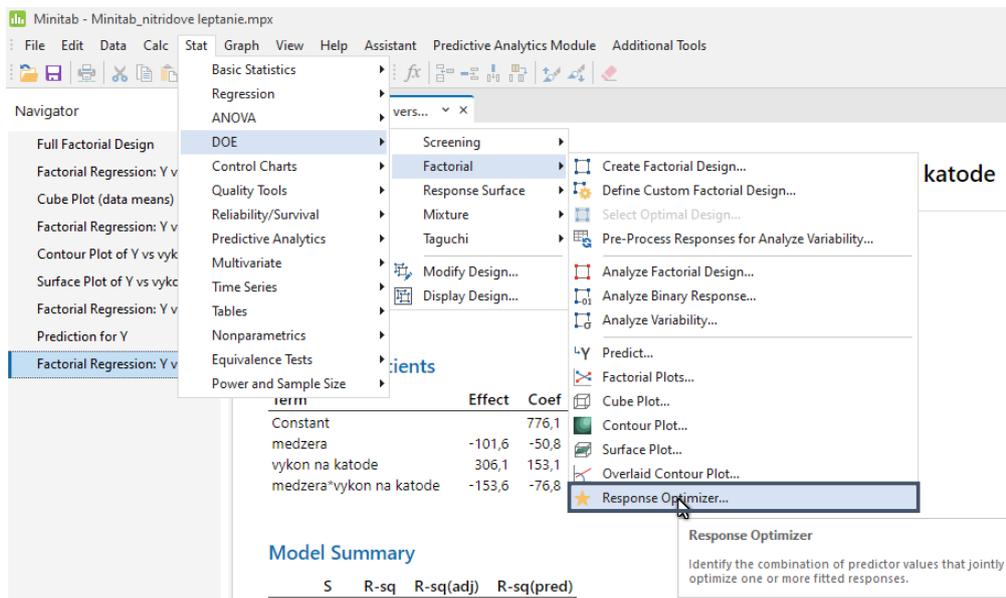
#### Settings

Variable	Setting
medzera	0,9
vykon na katode	280

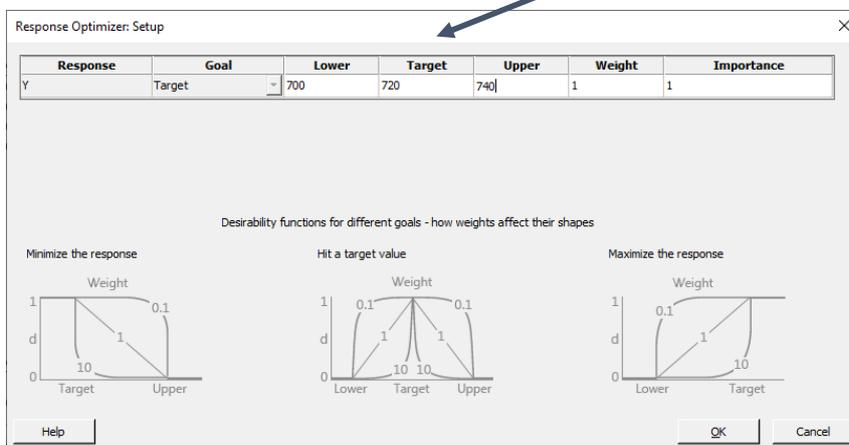
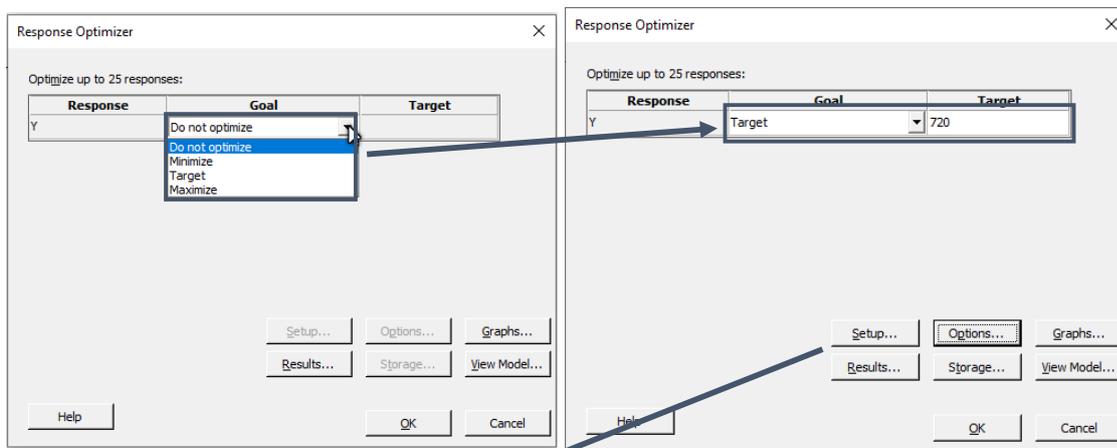
#### Prediction

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

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



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



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

Ak by sme úrovně 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 voľíme 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

Zadáваме počet riešení, ktoré chceme zobrazit:

Response Optimizer: Results

Parameters

Solutions

Number of solutions to display: 10

Prediction

Help OK Cancel

Minitab našiel 5 rôznych riešení. Prvé z nich je veľmi podobné riešeniu, ktoré sme vypočítali v Exceli.

## 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)