

Metoda STEM, její aplikace a modifikace v dopravním výzkumu, zejm. v železniční dopravě

Ing. Pavel Purkart¹

ČVUT v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů
Horská 3, 128 03 Praha 2

e-mail_1: purkapav@fd.cvut.cz

Abstrakt

Metoda STEM (Step Method) je nástrojem, který se primárně využívá k výběru podmnožiny projektů, které bychom měli realizovat, pokud máme k dispozici omezené množství finančních prostředků k jejich realizaci s ohledem na skutečnost, abychom tímto výběrem maximalizovali přínosy. Metoda využívá přitom zadavatelem stanovená hodnotící kritéria, přičemž její zásadní výhodou je fakt, že sama na základě svého výpočtu přiřadí těmto kritériím váhy. Tím pro stanovení optimálních vah jednotlivých hodnotících kritérií není nutnost zřizovat nebo svolávat expertní tým.

V příspěvku dochází k modifikování této metody do dopravního výzkumu, zejména v oblasti železniční dopravy. Na Ústavu dopravních systémů ČVUT v Praze Fakulty dopravní byla tato metoda primárně aplikována na zjištění prioritizace výstavby nových tramvajových tratí na území Prahy. V další etapě výzkumu byla metoda aplikována do železniční dopravy, kdy byla uzpůsobena na případy hospodárného využívání kapacity stávající železniční dopravní cesty nebo stanovení priorit výstavby vysokorychlostních tratí na území České republiky (resp. tzv. Rychlých spojení, jejichž součástí by měly být úseky vysokorychlostních tratí). Příklad hospodárného využití kapacity železniční dopravní cesty je demonstrován nejen teoreticky, ale také prakticky na trati 160 (číslo dle KJŘ 2019/2020) Plzeň – Žatec, kde na příměstském úseku Plzně je dle této metody hledán optimální model osobní dopravy.

Klíčová slova

metoda STEM, optimalizace, kapacita železniční dopravní cesty, vysokorychlostní tratě, tramvajové tratě

The STEM Method, Its Application and Modifications in Transport Research, Especially in Railway Transport

The STEp Method (STEM method) is a tool that is primarily used to select a priority of projects that we should implement if we have a limited amount of funds available to implement them, given the fact that we can maximize the benefits by this selection. The method uses the evaluation criteria set by the contracting authority, and its main advantage is the fact that it assigns weights to these criteria based on its calculation. Thus, there is no need to set up an expert team to determine the optimal weights of the individual evaluation criteria.

The paper modifies this method in transport research, especially in the field of railway transport. At the Department of Transport Systems of the Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences, this method was primarily applied to determine the prioritization of the construction of new tram lines in the territory of Prague. With regard to research within this method, it is further modified and directed to railway issues. The STEM method was thus further adapted to cases of economical use of the capacity of the transport route or determination of priorities for the construction of high-speed railway lines in the Czech Republic (or so-called high-speed connections, which should include sections of high-speed lines). An example of economical use of the capacity of the railway transport route is demonstrated not only theoretically, but also practically on Pilsen - Žatec line (no. 160 in time table 2019/2020), where the optimal model of passenger transport is sought in the suburban section in the Region Pilsen according to this method.

Keywords

STEM method, optimization, railway capacity, high-speed railway lines, tram lines

1. Úvod

V současné době probíhá na Ústavu dopravních systémů ČVUT Fakulty dopravní v Praze výzkum s pomocí metody STEM (z angličtiny tzv. STEp Method). Tato metoda původně určená pro řešení ekonomických priorit (např. pořadí realizace projektů apod.) byla modifikována do dopravního výzkumu ke stanovení rozličných cílů.

Metoda STEM umožňuje řešení lineárních matematických problémů s více účelovými funkcemi. Cílem metody je najít kompromisní řešení, jehož realizace by přinesla nejvíce benefitů. Hlavním principem metody je skutečnost, že

nejdříve se spočtou ideální hodnoty účelové funkce pro jednotlivé případy a poté se minimalizují vážené odchylky kompromisního řešení od ideálních hodnot účelové funkce. Základem metody je iterativní postup hledání kompromisního řešení.

2. Popis metody STEM

Metoda STEM má tu výhodu, že vyžaduje minimální spolupráci mezi zadavatelem úlohy a jejím řešitelem oproti jiným metodám. Metoda stanoví váhy pro jednotlivá kritéria vlastním výpočtem a následně se zadavatel musí rozhodnout, zda je výsledek pro něj akceptovatelný či nikoli. Metoda se tak skládá jednak z procesu výpočetního, a jednak z procesu rozhodovacího. Pokud zadavatel rozhodne, že výsledek výpočtu je pro něj akceptovatelný, výpočet je konečný. Pokud tomu tak není, musí zadavatel informovat řešitele úlohy o změně vybraných kritérií nebo úpravě jejich počtu a výpočet je proveden znovu.

Metoda STEM se skládá z následujících kroků:

1. Řešitel spočte optimální řešení pro jednotlivá kritéria (účelové funkce) zvlášť. Počet výpočtů tedy odpovídá počtu kritérií.
2. Řešitel vyčíslí váhy jednotlivých kritérií na základě následujícího vzorce:

$$w_i = \frac{z_{ii} - \min_{i=j \dots k} z_{ij}}{z_{ii}} \frac{\alpha}{\sqrt{\sum_{i=1}^n c_{ij}^2}} \quad (1)$$

kde:

z_{ij} – prvek matice hodnot optimalizačních kritérií pro optimalizaci pro jednotlivá optimalizační kritéria (z_{ij} je hodnota optimalizačního kritéria $j = 1, \dots, k$ v případě optimalizace podle kritéria $i = 1, \dots, k$ [-])

c_{ij} – prvek tzv. „cenové matice“ – prvek matice koeficientů jednotlivých optimalizačních kritérií [-] [-]

Hodnota α se získá z následující rovnice:

$$\sum_{i=1}^k \frac{z_{ii} - \min_{i=j \dots k} z_{ij}}{z_{ii}} \frac{\alpha}{\sqrt{\sum_{i=1}^n c_{ij}^2}} = 1 \quad (2)$$

V praxi musíme nejdříve vypočítat hodnotu tohoto koeficientu a pak teprve můžeme vyčíslit váhy jednotlivých kritérií. Pokud je zadavatel spokojen s vybranými hodnotami optimalizačních kritérií, pak stanoví hodnotu $w_i = 0$. Pokud váha pro více kritérií splňuje podmínku $w_i > 0$, řešitel přidá novou proměnnou $d \geq 0$ a řeší model s novým optimalizačním kritériem:

$$\min f(x, d) = d \quad (3)$$

Pro korektní výpočet se zavede jednoduchá omezující podmínka:

$$w_{ii}(z_{ii} - \sum_{j \in J} c_{ij} X_j) \leq d \quad (4)$$

Pokud podmínka $w_i > 0$ platí pouze pro jedinou hodnotu $i = 1, \dots, k$, řešitel smí zjednodušit omezující podmínku takto:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^k w_{ii}(z_{ii} - \sum_{j \in J} c_{ij} X_j) \quad (5)$$

3. Řešitel prezentuje výsledky zadavateli. Pokud výsledek pro zadavatele není uspokojivý, ten musí upravit kritéria, případně jiná přidat nebo použitá zčásti odebrat. Následně se řešitel vrací k výpočtům dle bodu 2. Pokud je zadavatel s výsledky spokojen, řešitele nalezl tzv. kompromisní řešení. Pokud dosáhne při řešení problému hodnota $d = 0$, bylo dosaženo řešení optimálního.

3. Příklady využití metody STEM

Výzkum s použitím metody STEM proběhl na ČVUT v Praze Fakultě dopravní, Ústavu dopravních systémů na následujících problémech:

- stanovení priorit výstavby tramvajových tratí na území Prahy,
- hospodárné využití kapacity železniční dopravní cesty,
- stanovení priorit výstavby vysokorychlostních tratí na území České republiky.

3.1. Stanovení priorit výstavby tramvajových tratí na území Prahy

První test modelu byl proveden na problematice stanovení priorit výstavby tramvajových tratí na území Prahy. Zde ani metoda nemusela být nijak extra modifikována, jelikož byla použita ke svému původnímu účelu.

Metoda STEM pracovala s celkovou výší předpokládaných investičních nákladů, které je zadavatel v rámci realizace projektů ochoten vložit do jejich výstavby. Pro účely výpočtu v tomto článku byly stanoveny hranice 4 mld. Kč, 7 mld. Kč a 10 mld. Kč.

K výpočtu bylo vybráno celkem 16 projektů na území Prahy s investičními náklady od 238,4 mil. Kč až do zhruba 2 mld. Kč. Projekty včetně vybraných hodnotících kritérií představuje obrázek 1 na následující straně.

ozn.	název projektu	délka	investiční	potenciál	přep.	přep.	přep.	podíl nově	celk.	skóre dopr.-
		TT	náklady	spád.	zátěž na	zátěž na	potenciál	obslouže-	skóre	provaz.
		[m]	[mil. Kč]	[os]	[tis. os/den]	[tis. os/den]	[os/den·m]	ných z	[%]	aspektů
				území -	max.	min.	na jednotku	potenciálu		
				celkem			délky TT	celkem		
A	Dědinská - Dlouhá Mile - Terminál 3 - Prague Airport Park	2 077	773,3	16 000	3,0	2,6	7,703	100	46,32	36,48
B	Kobylisy - Bohnice	6 500	2 053,5	41 050	41,0	11,3	6,315	80	63,25	65,38
C	Počernická	2 400	620,0	19 440	21,3	6,8	8,100	58	53,90	52,63
D	Zlíchov - Dvorce (Dvorecký most)	600	990,0	1 030	53,8	53,8	1,717	17	57,99	93,31
E	Vinohradská/Škrétova - Muzeum - Hlavní nádraží - Bolzanova	1 163	424,0	33 970	25,0	24,5	29,209	0	57,24	89,75
F	Nádraží Podbaba - Suchdol	5 036	1 646,0	24 250	30,5	1,0	4,815	88	60,79	65,61
G	Spořilov - Choceradská	1 692	561,3	11 890	10,6	3,0	7,027	92	53,02	58,03
H	Choceradská - Chodovec - Opatov - Háje - Jižní Město	5 333	2 001,0	50 790	29,6	2,3	9,524	54	57,44	61,44
J	Na Veselí - Pankrác - Budějovická	1 387	704,0	38 500	8,0	7,0	27,758	2	49,84	49,66
K	Budějovická - Dvorce	2 778	739,4	27 070	48,0	32,0	9,744	22	62,05	78,82
L	Budějovická - Vyskočilova - Michle (U Plynárny)	2 153	784,9	19 930	24,0	15,0	9,257	88	55,31	67,95
M	Malovanka/Dlabačov - Strahov	1 539	660,0	10 410	14,0	3,5	6,764	60	48,67	41,37
N	Ústřední dílny DP - Průmyslová - Štěrboholy	2 003	730,2	6 210	8,1	2,0	3,100	77	36,59	35,47
O	Vypich - Nemocnice Motol - Motol	2 229	720,4	5 800	20,0	10,0	2,602	10	42,95	69,98
Q	Podbaba - Troja (ZOO)_1. etapa propojení Prahy 6 a Prahy 8	x	1 152,0	3 210	8,0	4,0	3,227	75	39,22	54,81
R	Vinohradská - Václavské náměstí	698	238,4	41 160	40,0	30,0	58,969	0	56,73	86,67
				MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX

Obr. 1. Tabulka všech projektů (úseků) nových tramvajových tratí v Praze se všemi hodnoticími kritérii

Následující tabulka shrnuje projekty vybrané pro jednotlivé investiční rámce.

projekt	výběr projektu		
	var. 4 mld. Kč	var. 7 mld. Kč	var. 10 mld. Kč
A	ano	ano	ano
B	ne	ne	ne
C	ne	ano	ano
D	ano	ano	ano
E	ano	ano	ano
F	ne	ne	ano
G	ano	ano	ano
H	ne	ne	ne
J	ne	ne	ano
K	ne	ano	ano
L	ano	ano	ano
M	ne	ano	ne
N	ne	ne	ano
O	ne	ne	ne
Q	ne	ano	ano

Obr. 2. Vybrané projekty pro jednotlivé investiční rámce

Zejména projekt J představuje ostře sledovaný plán výstavby tramvajové tratě až k areálu České zemědělské univerzity na okraji Prahy. Metoda STEM potvrzuje potřebnost tohoto záměru, nicméně až v případě dostatečné dostupnosti dostatku finančních prostředků. To je logické, jelikož intenzita přepravního proudu je nárazová (začátky/konce výuky na univerzitě, akademický rok vs. prázdniny), a tudíž důležitější jsou jiné projekty.

V žádné z variant nejsou doporučeny projekty B: Kobylisy – Bohnice, H: Choceradská – Chodovec – Opatov – Háje – Jižní město a O: Vypich – Nemocnice Motol – Motol, což zejména v případě projektů B a H jsou projekty s poměrně značnými investičními náklady a navíc v případech H a O je zajištěna alespoň částečně dopravní obslužnost území linkami pražského metra. Navíc se jedná o spíše okrajová území Prahy. Projekt M: Malovanka/Dlabačov – Strahov vyhodnocuje však metoda STEM také jako spíše okrajový a ve variantě 7 mld. Kč investic vychází rozhodně pouze jako doplněk.

3.2. Hospodárné využití kapacity železniční dopravní cesty

Kapacita železniční dopravní cesty je jednoznačně parametrem, který ovlivňuje její využitelnost. Nejen v České republice, ale ve všech vyspělých zemích, kde se osobní železniční doprava využívá jako páteřní v obsluze regionů, je významným problémem právě její kapacita, která často nedokáže uspokojit všechny požadavky. Je tak nastolena otázka, které vlaky provozovat tak, aby toto bylo s ohledem na omezující infrastrukturu co nejučelnější. Neexistují přitom jednotné postupy a prakticky každý stát, resp. provozovatel dráhy a objednavatel osobní železniční dopravy, k této problematice přistupuje jinak.

To vedlo při výzkumu na otázku, zda nelze nalézt model optimálního využití kapacity dopravní cesty, a to zejména v případě osobní dopravy. Modifikováním metody STEM byla dokázána i její využitelnost na tento problém. Jako limitní parametr byla stanovena kapacita omezujícího traťového úseku na zkoumané části železniční sítě vyjádřená v maximálním možném čase obsazení všemi vlaky pro daný směr, např. během intervalu 120 minut. K tomu byla přirozeně stanovena příslušná hodnocí kritéria:

- **denní předpokládaný průměrný počet cestujících v omezujícím úseku** v tisících,
- **denní předpokládaný průměrný počet cestujících v rámci celé linky** v tisících,
- **využití traťové rychlosti** v logicky ohraničeném úseku,
- **ohodnocení systémových přípojových vazeb** na lince v logicky vymezeném úseku,
- **porovnání cestovních dob IAD a dané linky** ve třech nejzatíženějších relacích na lince

Test modelu byl proveden jak teoreticky, tak prakticky na trati Plzeň – Žatec. Bylo uvažováno, že na trati zhruba ve stávajícím stavu infrastruktury dojde ke

střetu následujících požadavků objednatelů osobní železniční dopravy coby veřejné služby:

- linka R Plzeň – Most v intervalu 120 minut,
- linka Sp Plzeň – Žihle v intervalu 120 minut,
- linka Os 1 Plzeň – Žihle v intervalu 60 minut,
- linka Os 2 Nýřany – Plzeň – Plasy v intervalu 60 minut.

Bylo dosaženo výsledku, že na trať je vhodné umístit linky R, Os 1 a Os 2.

3.3. Stanovení priorit výstavby vysokorychlostních tratí na území České republiky

Pro stanovení priorit výstavby vysokorychlostních tratí na území ČR bylo stanoveno pět hodnotících kritérií:

- **náročnost trasování** (průchodnost trasy terénem a s tím související aspekty),
- **potenciál aglomerací na trase trati** (ohodnocení významu aglomerací na trase),
- **potenciál převodu intenzit dopravy z pozemních komunikací** (možnost převodu dopravy ze sítě pozemních komunikací na železniční síť, konkurenceschopnost železnice vůči IAD),
- **průměrný koeficient zkrácení cestovní doby ve zkoumaných relacích** (faktor zkrácení cestovních dob mezi významnými aglomeracemi po zprovoznění tratě),
- **význam s ohledem na počet převedených tras dálkové dopravy** (převod dálkových vlaků z konvenční železniční sítě a tím uvolnění kapacity železniční dopravní cesty pro jiné vlaky),

Pro získání výsledků byly sestaveny dva modely. Největší váhy byly v modelech přiřazeny kritériím **význam s ohledem na počet převedených tras dálkové dopravy** a **náročnost trasování**, a to v obou případech vyšší než 30 %. S hodnotou oscilující kolem váhy 20 % bylo ohodnoceno kritérium **průměrný koeficient zkrácení cestovní doby ve zkoumaných relacích**. Naopak v obou výpočtech vyšla velmi nízká hodnota pro kritéria **potenciál převodu intenzit dopravy z pozemních komunikací** a **potenciál aglomerací na trase**, a to nižší než 5 %.

Pro obě verze modelu byl proveden výpočet, přičemž ani v jednom případě nebylo dosaženo $d = 0$. Z toho plyne, že bylo dosaženo řešení kompromisních, nikoli optimálních.

Jako první dva prioritní úseky doporučené k výstavbě byly vybrány metodou STEM následující:

- Praha – Brno,
- Brno – [Slovensko/Rakousko]

Se střední preferencí následují tyto úseky:

- Brno – Ostrava – [Polsko],

- Praha – Plzeň – [Německo].

Nejnižší preferencí byly ohodnoceny zbývající dva úseky:

- Praha – Ústí – Německo s odbočkou do oblasti podkrušnohorské pánve,
- Praha – Hradec Králové/Liberec – [Polsko].

4. Závěr

Jak bylo představeno v tomto příspěvku, metodu STEM lze při její modifikaci v dopravním výzkumu využít k širokému spektru úloh. Je však nutné pečlivě nastavit hodnotící kritéria, aby její využití dávalo smysl a výsledky byly přijatelné. Metoda je tak s úspěchem na ČVUT v Praze Fakultě dopravní, Ústavu dopravních systémů využívána ke zcela novým účelům, než byla původně navržena.

Literatura

- [1] AHERN, A., G. ANANDARAJAH . Railway projects prioritisation for investment: Application of goal programming. *Transport Policy*, 2007, 14 (1), 70–80. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.10.003>
- [2] PURKART, Pavel. Optimální kooperace jednotlivých segmentů veřejné hromadné dopravy [doktorandské minimum]. Praha: ČVUT Fakulta dopravní v Praze, Ústav dopravních systémů. Datum obhajoby: 2019-12-06.. Školitel: L. TÝFA. Školitel-specialista: M. JACURA.
- [3] TEICHMANN, Dušan and Michal DORDA. Comparison of Two Selected Methods In Evaluating Of Investments in Transport Infrastructure. In *Finance and Performance of Firms in Science, Education and Practice : proceedings of the 7th International Scientific Conference: April 23-24, 2015, Zlín, Czech Republic*. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2015. s. 1524-1536. ISBN 978-80-7454-482-8.

Poděkování

Tento příspěvek byl realizován za podpory projektu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS20/138/OHK2/2T/16 „Stanovení a optimální využití parametrů železniční dopravní cesty“.