

<sup>1</sup>Сретен Давидов, маг. ел. инж. , <sup>2</sup>д-р Милош Пантош

Факултет за електротехника – Љубљана, УЉ

[sreten.davidov@fe.uni-lj.si](mailto:sreten.davidov@fe.uni-lj.si);

[milos.pantos@fe.uni-lj.si](mailto:milos.pantos@fe.uni-lj.si)

## ОПТИМИЗАЦИСКИ МОДЕЛ ЗА ОДРЕДУВАЊЕ НА ЛОКАЦИИ ЗА ПОСТАВУВАЊЕ НА СТАНИЦИ ЗА ПОЛНЕЊЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИ ВОЗИЛА

### КУСА СОДРЖИНА

Поставувањето на станиците за полнење на електричните возила е доста важен фактор кој директно придонесува кон општата свест на усвојување и прифатливост на електричните возила. Поради унапредените технички можности на електричните возила, економичноста и променетите социјални гледишта нагло се зголемува и нивната популарност. Сепак, тоа наметнува и нови предизвици, како поставување на соодветна полнилна инфраструктура за неограничена мобилност. Од истата проблематика, произлегува и потребата за пронаоѓање на најдобра локација, соодветниот број на приклучоци за полнење како и дозволивата приклучна привидна моќ. Овој труд претставува оптимизациски модел за одредување на локациите за поставување на станици за полнење на електричните возила со земање во обзир на навиките на движење на возачите, досегот на електричните возила и патната мрежа. Основата на моделот е теоријата на прекривање на множества (Set Covering Theory) и теоријата на (дискретна) локализација (Location Theory). Оптимизацискиот модел е дефиниран во линеарна форма и е решен со помош на методот на линеарно (бинарно) програмирање. Примената на оптимизацискиот модел е покажана на тест патна мрежа. Резултат е минималниот број на полнилни станици поставени на оптимални локации во патната мрежа, за да возачите на електричните возила ги комплетираат своите траектории на движење.

**Клучни зборови:** *оптимизациски модел, локализација, теорија на прекривање на множества, линеарно (бинарно) програмирање*

### 1. ВОВЕД

Анализата на моменталната состојба во транспортот и индустријата дава главен акцент на зависноста од фосилните горива. Во таков амбиент на зголемување на потребите по ваквиот вид на гориво, а со тоа и зголемување на несаканите последици во поглед на животна околина и економичноста, електричните возила (ЕВ) добиваат се повеќе на социјална популарност и внимание помеѓу луѓето. Пред сè, важни фактори кон зголемената побарувачка на ЕВ е нивната намалена цена на чинење т.е. економска дозволивост, споредлива транспортна ефикасност со класичните возила на гориво (енергија/km), како и нивниот позитивен придонес, од гледна точка кон животната средина [1]. Сите овие фактори, помагаат кон усвојувањето на ЕВ. Во една таква атмосфера, потребно е паралелно развивање, планирање и инвестирање во полнилната инфраструктура (ПИ) за да се овозможи неограничена мобилност. Поставувањето на ПИ, зафаќа неколку аспекти и тоа: технички, економски и социјален аспект. Првиот е поврзан со можноста за приклучување на станиците за полнење (СП) на електроенергетската мрежа, предизвиканиот дополнителниот товар на дистрибуциската мрежа, проблемите на изместувањето на работните карактеристики на околните индустриски субјекти. Вториот, економски аспект, е поврзан со трошоците за поставување, купување/изнајмување на локациско место, трошоци за приклучок на мрежа, набавка на нови трансформатори, потреба

за накуп на енергија за прекривање на додатните активни загуби на моќност и трошоци за одржување. Социјалниот аспект е поврзан со самата поставеност. Средините во кои се изоставени СП се предмет на зголемена загаденост и бучава. Патувањата со ЕВ се тешко изводливи и ваквите средини се сметаат за социјално исклучени средини во однос на прашањето со ЕВ.

Постојат три вида на СП, во зависност од употребуваната технологијата на полнење, [2], [3]. Првите два вида се од бавен тип, третиот е од брз тип. При првиот вид на СП, е со еднофазен приклучок на дистрибутивно напонско ниво и презема од мрежата активна моќност од 2-3 kW. Времето на полнење на батеријата е до 10 часа. Вториот вид на бавно полнење е исто на дистрибутивно напонско ниво, но со трифазен приклучок на наизменичен напон, со зголемена способност за моќност на полнење од 3-20 kW. Времето на полнење во овој случај е скратено за само 1/3 и изнесува од 6-8 часа. Меѓутоа, СП со технологија на еднонасочен напон и полнење, ја оптоварува мрежата и до 240 kW со што батеријата се полни брзо. Времетраењето на полнење е од 20 мин. до 1 час.

Разни оптимизациски модели за поставување на СП се претставени во литературата [4-11]. Еден од најмногу употребуваните оптимизациски модели е оној кој се базира на теоријата на (дискретна) локализација (ТДЛ) и теоријата на прекривање на множества (ТПМ) [4], [5]. Таквите модели се базираат на изнаоѓање на најдобрите места кандидати, вид и број на приклучоци на СП, кои би биле поставени во рамки на патна мрежа, за да се задоволат барањата на комплетирање на планираните патувања. Во [6], авторот поставува оптимизациски модел кој што базира на ТПМ и ТДЛ со функција на цел на минимизирање на трошоците за поставивање на СП. Како ограничувања во моделот се јавува дозволивиот капацитет на оптоварување на кандидатските места и времето потребно за полнење за да се комплетира планираното патување. Во [7], авторот повторно се базира на истите теории и има целна функција за минимизирање на трошоците на поставување на СП. Меѓутоа, како ограничувања се појавуваат бројот на возила наменети за полнење како и воведување на расположлив буџет, наменет за инвестирање во ПИ. Во [8], авторот има целна функција максимизација на бројот на наполнети ЕВ, или максимизирање на вкупната електрична енергија потребна за повторно полнење. Ограничувањата се поставени на можниот дозволив капацитет на оптоварување на мрежата и број на примени ЕВ на кандидатските места. Целната функција во [9] е минимизација на бројот на патувања до СП. Ограничувањата се поставени во поглед на бројот на ЕВ кои што можат да бидат наполнети, како и задоволување на побарувачката по енергија за пристигнување во моделираните области на интерес. За решавање на ваквите оптимизациски модели, тие најпрвин се сведуваат на линеарна форма и се решаваат со методот на линеарно целобројно програмирање (ЛП) (integer linear programming) [10]. Во ваквата форма на прикажување на оптимизациските модели, резултатот е прикажан со целобројна вредност, што наведува дека истиот е строго дефиниран гледајќи од страна на местото на поставување на СП. Во референцата [11], може да се видат начини на сведување и разбивање на сложените проблеми на помали линеарни подпроблеми.

Овој труд воведува нов оптимизациски модел за одредување на локации за поставување на СП на ЕВ. Влезните параметри во оптимизацискиот модел се навиките на движење на возачите на ЕВ, нивниот досег и патиштата. Патиштата се дискретизирани, и секоја дискретна точка од патната мрежа е претставена со променлива на одлука. Во оптимизацискиот модел е воведена и временска компонента односно разгледуван временски период на оптимизирање, заради различноста во навиките на движење на возачите. Во моделот е аплицирана ТДЛ и теоријата на множества (ТМ) и ТПМ. Моделот дава резултат на минимален број и локација на СП за да возачите на ЕВ можат да ги комплетираат планираните патувања во разгледуваниот временски период. Оптимизацискиот модел ја збогатува палетата на оптимизациски модели, и е во корист на органите од логистиката/транспортот за поставување на оптимална ПИ како поддршка на електромобилноста.

Преостанатиот дел од трудот е распределен на следниот начин: Поглавјето 2, го опишува оптимизацискиот модел во детали. Примената на оптимизацискиот модел е претставена во поглавјето 3. Поглавјето 4 ги сумира главните заклучоци на овој труд.

## 2. ОПТИМИЗАЦИСКИ МОДЕЛ ЗА ОДРЕДУВАЕ НА ЛОКАЦИИ ЗА ПОСТАВУВАЊЕ НА СТАНИЦИ ЗА ПОЛНЕЊЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИ ВОЗИЛА

Оптимизациската процедура може да биде поделена на три дела, и тоа дел на влезни податоци, оптимизациски модел и резултати. Во ова поглавје се опишани и дефинирани истите.

Како влезни податоци во оптимизацискиот модел се патиштата, навиките на движење на возачите на ЕВ (траекториите во различен час од разгледуваниот временски период) и досегот на ЕВ. Влезните податоци се математично моделирани со помош на ТМ и е нивната дефиниција и опис претставена во детали во подпоглавјето 0.

Функцијата на цел и ограничувањата се дефинирани во подпоглавјето 0. Променливите се од целоброен (Binary, Boolean) тип [12], [13]. Секоја од точките во дискретизираната патна мрежа има своја целобројна променлива, со која моделот, одлучува за тоа дали ќе постави станица за полнење на таа точка или не, земајќи ги во предвид поставените ограничувања.

### 2.1. Влезни параметри

Влезни параметри во оптимизацискиот модел се патиштата, навиките на движење на возачите и досегот на ЕВ кој што е условен од капацитетот на батеријата. Дискретизацијата на патната мрежа ја дефинираме со помош на ТМ, [14], и ТМП. Всушност, патната мрежа ја претставуваме како множество  $\mathcal{M}$  на  $n$  дискретни точки во координатната рамнина:

$$\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

со земено растојание на оддалеченост меѓусебе од една единична мерка за растојание. Записот на равенката е како во **Error! Reference source not found.**

Моделирањето на навиките на движење возачите на ЕВ го вршине исто, со примена на ТМ. Оптимизацискиот модел ја вреднува и временската компонента на оптимизацискиот проблем, со тоа што зема во предвид дека разни возачи можат да имаат разни траектории на движење и можат да се движат во различно време од разгледуваниот период. Затоа, дефинираме во кое време од разгледуваниот временски период  $T$ , кој возач, по која траекторија се движи. Формираме  $m$  подмножества со точки- елементи од  $\mathcal{M}$ , секое од нив претставува траекторија на движење на различен возач, за час  $t$ :

$$\mathcal{P}_t = \{\{N_{t,1}\}, \dots, \{N_{t,m}\}\}; \forall t = 1, \dots, T \quad (2)$$

ТДЛ дефинира точки на побарувачка и точки на кандидатски места за прекривање на побарувачката [15]. Според таа дефиниција, применета во моделот, сите дискретизирани точки на патиштата, кои припаѓаат на било која траекторија во разгледуваниот временски период, се точки на побарувачка, бидејќи е потребно да возачите ги комплетираат патувањата, а воедно и кандидатски места за поставување на станици за полнење. Кое кандидатско место, колку точки од траекторијата може да прекрие, гледаме вклучувајќи го параметарот за досегот на возилото. Понатаму, формираме множество  $\mathcal{J}_{t,m}$  чие подмножество  $p$  ги содржи точките кои што би биле достигнати долж траекторијата на движење сметајќи го досегот на ЕВ, и тоа за секое кандидатско место.

$$\mathcal{J}_{t,m} = \{\{S_1\}, \dots, \{S_p\}\}; \forall t = 1, \dots, T; \forall m \in \mathcal{P}_t \quad (3)$$

Подреденоста на множествата, која што произлегува од дефиницијата во **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.** и **Error! Reference source not found.** е:

$$\mathcal{J}_{t,m} \subseteq \mathcal{P}_t \subseteq \mathcal{M} \quad (4)$$



Целосната прикриеност на траекторијата  $N_{t,m}$  ја запишуваме со изразот **Error! Reference source not found.**

$$U_{k=1}^p S_p = N_{t,m}; \forall t = 1, \dots, T; \forall m \in \mathcal{P}_t \quad (5)$$

## 2.2 Оптимизациски модел

Оптимизацискиот модел е претставен во стандардизирана форма на линеарен оптимизациски програм.

Целната функција ја дефинираме со изразот **Error! Reference source not found.**:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i \in \mathcal{M}} x_{t,i} \rightarrow \min \quad (6)$$

ограничувањата се:

$$[a_{i,j}]_{p \times |N_{t,m}|} \cdot x_{t,i} \geq 1; i \in \mathcal{M}; \forall t = 1, \dots, T; \forall m \in \mathcal{P}_t \quad (7)$$

$$x_{t+1,i} = x_{t,i}; i \in \mathcal{M}; \forall t = 1, \dots, T-1 \quad (8)$$

$$x_{t,i} \in \{0,1\}; i \in \mathcal{M}; \forall t = 1, \dots, T; \forall i \in \mathcal{M} \quad (9)$$

Функцијата на цел во равенката **Error! Reference source not found.**, го минимизира бројот на станици за полнење поставени во рамки на патната мрежа за одреден разгледуван временски период, за комплетирање на намерените патувања.

Ограничувањето **Error! Reference source not found.** наведува, да секоја точка од патната мрежа што се содржи во множеството на возени траектории во разгледуваниот период, мора да биде прекриена од барем една станица за полнење. Големината на матрицата во **Error! Reference source not found.**, е  $p \times |N_{t,m}|$ , што наведува на  $p$  равенки со  $|N_{t,m}|$  променливи на одлука (изразот  $|\cdot|$  е за кардиналности- големината на множеството на точки  $N_{t,m}$  што се содржат во траекторијата на возачот  $m$ ). За  $i$  и  $j$  важи  $i \in \mathcal{M}$  и  $j \in S_p$ . Множеството  $S_p$  е дефинирано во **Error! Reference source not found.**

Елементите на матрицата, употребена во **Error! Reference source not found.**, се дефинирани со изразот **Error! Reference source not found.**:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & d_{i,j} \leq R_{sv} \\ 0, & d_{i,j} > R_{sv} \end{cases}; i \in \mathcal{M}; \forall j \in S_p \quad (10)$$

Во равенката **Error! Reference source not found.**, го вклучуваме досегот,  $R_{sv}$ . Растојанието  $d_{i,j}$  помеѓу двете точки долж двете координатни оски,  $dx, dy$ , во **Error! Reference source not found.**, се пресметува со помош на вообичаената формула за Еуклидово растојание [16] помеѓу две точки:

$$d_{i,j} = \sqrt{(i-j)_{dx}^2 + (i-j)_{dy}^2} \quad (11)$$

Во ограничувањето **Error! Reference source not found.**, вредноста на променливата на одлука за дискретната точка  $i \in \mathcal{M}$ , е во временската инстанца  $x_{t+1,i}$  зависна од вредноста на истата променлива на одлука во претходната временска инстанца  $x_{t,i}$ . Ограничувањето служи за предаденост на вредноста на променливите на одлука за индивидуалните точки на патната мрежа долж целосниот разгледуван период на оптимизација. Ограничувањето **Error! Reference source not found.** наведува на целобројната (бинарна) дефиниција на природата на променливите на одлука во оптимизацискиот модел.

### 3. СТУДИЈА НА СЛУЧАЈ

Оптимизацискиот модел беше тестиран на тест патна мрежа, со големина **10 x 10** и еднакво меѓусебно растојание помеѓу точките од 1 р.и. единица за растојание.

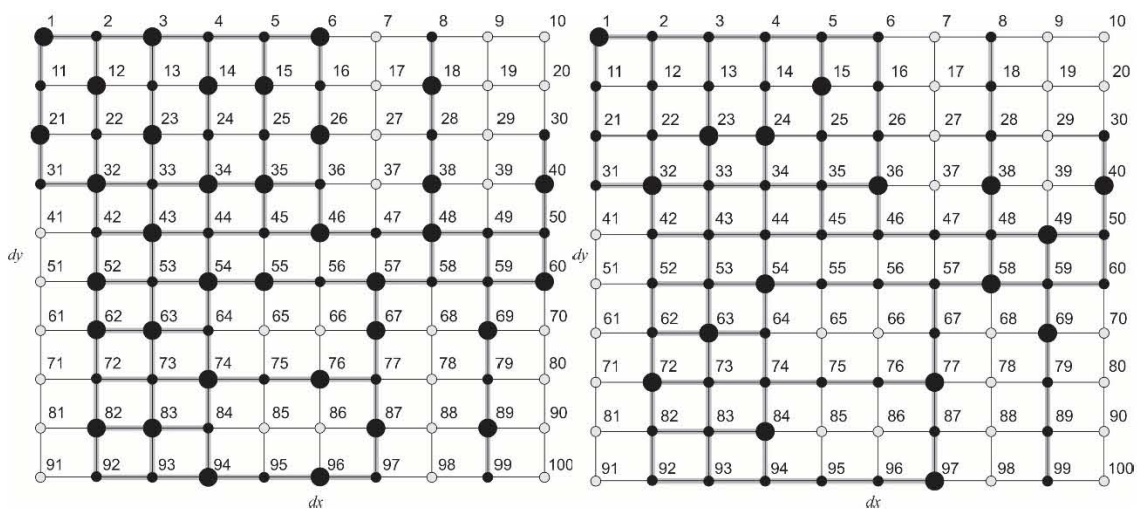
Во оваа студија на случај, земавме предвид 10 ЕВ и разгледуван временски период на оптимизација од  $T = 24$  часа. Во Табела 1 се претставени траекториите на движење на ЕВ.

Табела 1. Траектории на ЕВ

ЕВ	Час на движење	Траекторија
1	5	3-13- 23- 33- 43- 53- 63- 73- 83- 93
	15	93- 83- 73- 63- 53- 43- 33- 23- 13- 3
2	7	8- 18- 28- 38- 48- 58- 57- 67- 77- 87- 97
	11	97- 96- 95- 94
	19	94- 95- 96- 97- 87- 77
3	5	4- 14- 24- 34- 44- 54- 53- 52- 62- 72- 82- 92
	16	92- 82- 72- 62- 52- 53- 54- 44- 34- 24- 14- 4
4	9	5- 15- 25- 35- 45
	10	45- 35- 34
	15	34- 35- 25- 15- 5
5	1	1- 11- 21- 31- 32- 33
6	5	4- 14- 24- 34- 44- 54- 64- 74- 84- 94
	14	94- 84- 74- 64- 54- 44- 34- 24- 14- 4
7	8	2- 12- 22- 32- 42- 52- 53- 63- 73- 83- 93
	11	93- 94- 84- 74
	12	74- 75- 76- 77
	17	77- 87- 97
8	14	6- 16- 26- 36- 46
	18	46- 47- 48- 49
9	19	8- 18- 28- 38- 48- 58- 57- 56- 55- 54
	23	54- 55- 56- 57- 58- 48- 38- 28- 18- 8
10	12	99- 89- 79- 69- 59
	15	59- 60- 50- 40- 30

Примената на оптимизацискиот модел ја тестираме со две вредности на влезниот параметар за досегот на ЕВ, и тоа а)  $R_{EV} = 2$  р. и. и б)  $R_{EV} = 4$  р. и.

Сл. 2 ги прикажува резултатите по оптимизацијата. Во првиот случај а), кога дометот на ЕВ е помал (2 р.у.), последично и бројот на СП е поголем, и изнесува 35. Во вториот случај б), кога дометот на ЕВ е поголем (4 р.у.), бројот на поставени СП е помал, заради поголемиот досег на ЕВ и е еднаков на 17. Избраните точки на кој би се поставиле СП се (за случаите а) и б)), соодветно, се: 1, 3, 6, 12, 14, 15, 18, 21, 23, 26, 32, 34, 35, 38, 40, 43, 46, 48, 52, 54, 55, 57, 60, 62, 63, 67, 69, 74, 76, 82, 83, 87, 89, 94, 96 и 1, 15, 23, 24, 32, 36, 38, 40, 49, 54, 58, 63, 69, 72, 77, 84, 97. На Сл. 2, со црно се одбележани точките кои се дел од траекториите за разгледуваниот временски период, со бело се точките кои не припаѓаат на ниту една траекторија и избраните локации на патната мрежа за поставување на СП се покажани со зголемени црни точки. Траекториите од Табела 1 се претставени со сиви линии. Моделот не поставува обавезително СП на почетокот и крајот од траекториите. Состојбата за тоа колку е полна батеријата не се смета во моделот.



Сл. 2 – Резултати од оптимизацијата со а) Досег на ЕВ,  $R_{EV} = 2$  р.у. б) Досег на ЕВ,  $R_{EV} = 4$  р.у.

#### 4. ЗАКЛУЧОК

Со употреба на теоријата на прекиравање на множества и теоријата на локализација, овој труд воведува оптимизациски модел за изнаоѓање на минималниот број и локации на станици за полнење на електрични возила, за да возачите на електричните возила ги комплетираат своите планирани патувања. Како влезни податоци во оптимизацискиот модел се земени патната мрежа, навиките на движење на возачите и досегот на ЕВ. Функцијата на цел и ограничувањата се дефинирани во линеарна форма и соодветно е напишан линеарен (бинарен) програм на оптимизација. Примената на оптимизацискиот модел беше тестирана на тест патна мрежа, со земање во предвид на возните навиките на движење- т.е. траектории на движење, за дефиниран час во разгледуван временски период на десет ЕВ.

Во иднина, оптимизацискиот модел ќе биде надграден со доделување на соодветен тежински фактор за секоја дискретна точка од патната мрежа, кој што би ја искажал важноста на истата.

#### 5. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Saarenpää, M. Kolehmainen, and H. Niska, "Geodemographic analysis and estimation of early plug-in hybrid electric vehicle adoption," *Applied Energy*, vol. 107, pp. 456-464, 7// 2013.
- [2] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 371-380, 2010.
- [3] K. Morrow, D. Karner, and J. Francfort, "Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review," *Battelle Energy Alliance*, 2008.
- [4] P. B. Mirchandani and R. L. Francis, *Discrete location theory*, 1990.
- [5] T. A. Feo and M. G. Resende, "A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem," *Operations research letters*, vol. 8, pp. 67-71, 1989.

- [6] Y.-W. Wang and C.-C. Lin, "Locating road-vehicle refueling stations," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 45, pp. 821-829, 2009.
- [7] Y.-W. Wang, "Locating battery exchange stations to serve tourism transport: A note," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 13, pp. 193-197, 2008.
- [8] X. Xi, R. Sioshansi, and V. Marano, "Simulation-optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 22, pp. 60-69, 2013.
- [9] T. D. Chen, K. M. Kockelman, and M. Khan, "The electric vehicle charging station location problem: a parking-based assignment method for Seattle," in *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, 2013, pp. 13-1254.
- [10] R. S. Garfinkel and G. L. Nemhauser, *Integer programming* vol. 4: Wiley New York, 1972.
- [11] C. Lemke, H. Salkin, and K. Spielberg, "Set covering by single-branch enumeration with linear-programming subproblems," *Operations Research*, vol. 19, pp. 998-1022, 1971.
- [12] C.-Y. Lin and P. Hajela, "Genetic algorithms in optimization problems with discrete and integer design variables," *Engineering optimization*, vol. 19, pp. 309-327, 1992.
- [13] G. B. Dantzig, "On the significance of solving linear programming problems with some integer variables," *Econometrica, Journal of the Econometric Society*, pp. 30-44, 1960.
- [14] T. Jech, *Set theory*: Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] M. S. Daskin, *Network and discrete location: models, algorithms, and applications*: John Wiley & Sons, 2011.
- [16] P.-E. Danielsson, "Euclidean distance mapping," *Computer Graphics and image processing*, vol. 14, pp. 227-248, 1980.