



Одређивање потребног броја базних станица за зимско одржавање путева и њихових локација целобројним линеарним програмирањем

Александра Ивановић^а, Милош Николић^а, Милица Шелмић^а

^а Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет, Војводе Степе 305, Београд, Србија

ПОДАЦИ О РАДУ

DOI: 10.31075/PIS.70.03.06

Стручни рад

Примљен: 24.08.2024.

Прихваћен: 06.09.2024.

Коресподент аутор:

m.nikolic@sf.bg.ac.rs

ORCID ID

Александра Ивановић: N.A.

Милош Николић: 0000-0001-5892-8248

Милица Шелмић: 0000-0003-2507-3663

Кључне речи:

Теорија локације

Покривање скупа

Станице за зимско одржавање путева

РЕЗИМЕ

Хладно време и падавине које се јављају током зиме могу значајно да угрозе уобичајено функционисање друмског саобраћаја. Због тога, активности зимског одржавања путева су веома важне и потребно их је унапред планирати. У неке од одлука у вези са зимским одржавањем путева могу се убројати: одређивање броја и локација базних станица, одређивање структуре возног парка, дефинисање количине материјала за посипање путева који је потребно набавити, итд. У оквиру овог рада пажња је посвећена одређивању броја и локација базних станица за зимско одржавање путева. Ово је важан проблем стратешке природе који је у раду решаван у два корака. У првом кораку се одређује минималан потребан број базних станица како би се покрио цео посматрани регион. У другом кораку одређују се конкретне локације објеката, са циљем да се минимизира укупно растојање које треба да пређу возила при одржавању путева. У оба корака решавање се врши применом целобројног линеарног програмирања. У раду је тестирање модела извршено на примеру одржавања путева у Банатском округу. За решавање постављених задатака целобројног линеарног програмирања коришћен је Excel Solver.

1. Увод

Зимско одржавање путева је уобичајена пракса у многим земљама и захтева сложене стратешке и оперативне планске одлуке. Неки од примарних проблема укључених у ову сложену процедуру планирања су одређивање броја базних станица и њихово лоцирање (што је тема овог рада), планирање возног парка, рутирање возила, итд. Зимско одржавање путева укључује уклањање снега као и посипање соли и других материјала по путевима. Значај зимског одржавања огледа се кроз безбедност саобраћаја и смањење трошкова корисника. Оптимизацијом броја и локација базних станица за зимско одржавање путева се постиже и побољшање мобилности и ефикасности, смањење негативног утицаја на животну средину, као и значајне уштеде на трошковима одржавања.

У овом раду предложени су модели за одређивање минималног броја базних станица за зимско одржавање путева и њихово лоцирање, и за додељивање путева лоцираним објектима.

Предложени модели су базирани на моделима за локацијски проблем покривања скупа и проблем лоцирања p -медијана. Модели су тестирани на примеру Банатског округа у Србији.

2. Зимско одржавање путева у Републици Србији

Радови на зимском одржавању путева захтевају многе сложене планске одлуке. Главни стратешки и оперативни проблеми укључују дефинисање политике на нивоу услуга, лоцирање базних станица, рутирање возила, конфигурисање возног парка, пројектовање сектора и распоређивање возила. Циљ зимског одржавања путева је да се осигура безбедно одвијање саобраћаја у зимским условима са минималним трошковима, минималним штетним утицајем на околину и минималним ометањем саобраћаја.

Званични почетак рада зимске службе у Србији је 1. новембар, а завршетак 31. март. У просеку снег пада око 45 дана годишње. На основу података са званичног сајта ЈП "Путеви Србије" за сезону 2023/2024 [1], одржавање путева се обавља из 172 базне станице, при чему укупна дужина мреже

државних путева за зимско одржавање износи 14.951,62 km, и то[1]:

- I Приоритета - 5.980,392 km;
- II Приоритета - 4.393,915 km;
- III Приоритета - 4.577,311 km.

Према приоритету путеви се могу категорисати на следећи начин:

- I Приоритета - аутопут, полуаутопут, неке деонице путева I реда;
- II Приоритета - преостали путеви I реда;
- III Приоритета - преостали путеви II реда.

Путеви првог приоритета се чисте од снега и посипају чистом соли, тако да се омогући одвијање саобраћаја уз максималну дозвољену брзину од 60 km/h. Код путева другог приоритета пут се чисти и посипа само ризлом или шљаком, тако да се омогући одвијање саобраћаја са максималном дозвољеном брзином од 40 km/h. Путевы трећег приоритета се само чисте од снега и максимална брзина одвијања саобраћаја је 40 km/h. Путевы трећег приоритета се чисте након извршеног чишћења путева I и II приоритета, дакле са закашњењем, зато су на овим путним правцима могући дужи застоји [1].

Зимско одржавање путева је организовано кроз мрежу седишта и локалних база које добијају информације о времену од Републичког хидрометеоролошког завода Србије, који представља националну службу за временску прогнозу. Подаци о временској прогнози су од великог значаја за зимско одржавање путева, али временским прогнозама у Србији недостају неки временски и просторни детаљи који се могу користити за предузимање мера зимског одржавања путева базираних на локацији и у реалном времену [2]. Главни недостатак је што су активности зимског одржавања путева реактивне, односно почињу након што су се снежне падавине смањиле или престале. Међутим, у иностранству се прави помак од реактивних ка проактивним активностима зимског одржавања, као што је на пример коришћење материјала против залеђивања пре очекиване промене температуре [3].

3. Методологија

У овом раду је посматран проблем одређивање броја базних станица за зимско одржавање путева, њихово лоцирање и додељивање путева лоцираним објектима. При одређивању локација ових објеката тежи се минимизирању њиховог броја. Због тога у првом кораку је потребно за посматрани регион решити локацијски проблем покривања скупа. Као решење овог проблема добиће се минималан број објеката које је потребно поставити на мрежи.

Међутим решавањем проблема на овај начин не води се рачуна о оперативним трошковима које ће имати возила која из тих база треба да иду до неких путева које треба да очисте. Због тога у другом кораку је за посматрани регион потребно решити проблем лоцирања p медијана, где се за p (број медијана, односно објеката који се лоцирају) узима вредност из претходног корака. Решавањем проблема у другом кораку добиће се информације о томе у којим чворовима треба да се поставе базне станице, али исто тако и информације из којих станица ће бити опслужени који путеви у посматраном региону.

У нашем претходном истраживању [4] предложено је да се одређивање броја и локација базних станица врши решавањем локацијског проблема покривања. Локације које би се добиле на тај начин би представљале и крајње решење. Недостатак тог приступа је што уколико постоји више решења са истим минималним бројем објеката који се лоцирају, не прави се никаква разлика између њих. На тај начин може се усвојити решење које ће проузроковати веће трошкове транспорта. Због тога у овом раду предложени приступ решавању проблема је унапређен и проширен. Решавање локацијског проблема покривања скупа се ради у првом кораку и има за циљ само да се одреди минималан број објеката, односно база, а у другом кораку се решава локацијски проблем p медијана како би се нашле најбоље локације и њима извршила додела путева. Који су путеви додељени којим базним станицама је нешто што се није могло видети из решења која су се добијала у претходном раду [4], тако да и то представља унапређење овог приступа у односу на претходни.

3.1. Одређивање минималног броја базних станица

Проблем одређивања минималног броја базних станица за зимско одржавање путева у овом раду је решаван као локацијски проблем покривања скупа. Приликом одређивања локације базне станице зимског одржавања на мрежи, циљ је да се покрије што је могуће веће опслужно подручје путева. Уколико се унапред дефинише максимално прописано растојање D_p , које се назива "растојање покривања", тада су путеви који се налазе унутар тог растојања опслужени, у супротном нису [5].

Да би се локацијски проблем покривања скупа формулисао потребно је увести следеће променљиве, уз напомену да су путеви који би требало да буду опслужени посматрани као чворови [5]:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{уколико је објекат лоциран у чвору } j \\ 0, & \text{у супротном} \end{cases}$$

I - скуп чворова који захтевају опслугу,
 i - индекс чворова који захтевају опслугу,
 J - скуп чворова кандидата за лоцирање објеката,
 j - индекс чворова кандидата за лоцирање објеката,
 d_{ij} - растојање између чвора i који захтева опслугу и чвора кандидата j ,
 D_p - максимално прописано растојање тј. растојање "покривања",
 N_i - скуп чворова кандидата из којих чвор i може бити опслужен, при чему је: $N_i = \{j | d_{ij} \leq D_p\}$

Математичка формулација овог локацијског проблема покривања скупа гласи [6]:

Минимизирати:

$$\sum_{j \in J} x_j \quad (1)$$

при ограничењима:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

Први израз (1) означава критеријумску функцију чија вредност се минимизира и представља укупан број објеката који су лоцирани на мрежи. Други израз (2) представља скуп ограничења где се захтева да сваки чвор буде покривен од стране најмање једног објекта, тј. да сваки чвор који треба да буде опслужен мора да буде на растојању мањем од D_p . Последње ограничење (3) значи да променљива x_j може узети вредност нула или један.

На овај начин се математички формулише локацијски проблем покривања скупа који је у четвртом поглављу примењен за проблем одређивања минималног броја базних станица за зимско одржавање путева у Банатском округу.

3.2. Одређивање локација базних станица и додељивање путева

Проблем одређивања локација базних станица и додељивање путева у овом раду је решаван као модификована верзија проблема лоцирања p -медијана. Проблем медијане се може дефинисати на следећи начин: потребно је лоцирати један или више објеката на мрежи, тако да се минимизира просечно растојање (просечно време путовања, просечни транспортни трошкови итд.) од објекта до корисника или од корисника до објекта [7].

Да би се проблем p -медијана формулисао потребно је увести следеће променљиве, уз напомену да су путеви који би требало да буду опслужени посматрани као чворови [8]:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{уколико је чвор } i \text{ опслужен од стране} \\ & \text{објекта који је лоциран у чвору } j \\ 0, & \text{у супротном} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{уколико је објекат лоциран у чвору } j \\ 0, & \text{у супротном} \end{cases}$$

I - скуп чворова који захтевају опслугу,
 i - индекс чворова који захтевају опслугу,
 J - скуп чворова кандидата за лоцирање објеката,
 j - индекс чворова кандидата за лоцирање објеката,
 d_{ij} - растојање између чвора i који захтева опслугу и чвора кандидата j .

Математичка формулација овог модела гласи [8]:

Минимизирати:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad (4)$$

при ограничењима:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (6)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (7)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

Први израз (4) означава критеријумску функцију чија вредност се минимизира и представља укупно пређено растојање од објеката до чворова који захтевају опслугу. Други израз (5) представља скуп ограничења где се захтева да сваки чвор буде опслужен од стране само једног објекта. Ограничење (6) указује да на мрежи треба да постоји укупно p објеката. Израз (7) се односи на чињеницу да сваки чвор i који захтева опслугу, а лоциран је у неком од објеката, добија опслугу из тог објекта. Последње ограничење (8) значи да су x_{ij} и y_j бинарне променљиве.

Да би се путеви доделили базама у оквиру овог проблема неопходно је водити рачуна и о максималном растојању покривања базних станица (D_p). Због тога у формулацији (4)-(8) индекс j не може да увек узима све вредности из скупа J , него само оне вредности које су садржане у скупу N_i . На тај начин претходна математичка формулација се може написати на следећи начин:

Минимизирати:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i} d_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

при ограничењима:

$$\sum_{j \in N_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N_i} y_j = p \quad (11)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in N_i \quad (12)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in N_i \quad (13)$$

Значења функције циља и ограничења су иста као и код математичке формулације (4)–(8). Овако математички формулисан проблем p -медијана је у наредном поглављу примењен на проблем лоцирања базних станица за зимско одржавање путева у Банатском округу.

4. Лоцирање базних станица за зимско одржавање путева у Банатском округу

Предложени модели из трећег поглавља коришћени су на путној мрежи Банатског округа укључујући путеве I и II приоритета зимског одржавања (слика 1). Путеве I приоритета су означени љубичастом бојом, док су путеве II приоритета плавом. Предузеће које врши зимско одржавање путева у Банатском округу је "Strabag d.o.o." – огранак "Војводинапут" Панчево. У званичном плану зимске службе за одржавање путева за сезону 2023/2024 [1] је наведено да постоји седам базних станица за зимско одржавање путева у Банатском округу и то на следећим локацијама: Панчево, Вршац, Бела Црква, Ковин, Ковачица, Перлез и Сечањ.



Слика 1. План зимског одржавања Банатског округа¹

¹ https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/zimska_sluzba/Plan-zimske-sluzbe-2023-2024.pdf (Accessed: 10/10/2023 at 10:52)

У првом кораку је потребно одредити минималан потребан број базних станица. Градови који су у овој анализи изабрани да буду потенцијални кандидати за лоцирање база су приказани у табели 1.

Табела 1. Градови - кандидати и њихове ознаке

Ознака града	Град
1	Панчево
2	Ковин
3	Бела Црква
4	Вршац
5	Планиште
6	Сечањ
7	Ковачица
8	Алибунар
9	Перлез

Путеви који захтевају опслуживање из базних станица наведени су у табели 2.

Табела 2. Путеве I и II приоритета који захтевају опслуживање

Путеви I и II приоритета - ознака
10
14
134
18
133
129
13
129S
130
129P

Следећи корак је да се одреди матрица најкраћих растојања између градова - кандидата у којима ће бити лоциране базне станице за зимско одржавање путева и путева I и II приоритета који захтевају опслугу. У табели 3 је приказана матрица најкраћих растојања. Подаци су прикупљени помоћу апликације Google Maps.

Табела 3. Матрица најкраћих растојања између градова кандидата и путева који треба да се опслуже

d(i,j)	10	14	134	18	133	129	13	129S	130	129P
1	0	0	33,9	64,5	50,3	30,7	40,9	72,0	0	53,5
2	33,9	0	0	46,0	44,1	62,9	73,1	104,0	33,9	86,3
3	33,3	46,0	0	0	17,6	99,8	127,0	93,8	99,8	127,0
4	0	64,4	34,7	0	14,5	80,3	102,0	59,4	64,4	107,0
5	13,1	61,8	61,8	0	37,1	60,2	82,8	38,8	60,2	87,1
6	51,9	72,0	93,5	0	63,4	42,7	35,5	0	42,7	51,9
7	30,8	30,8	63,6	42,7	66,5	0	22,6	42,7	0	26,8
8	1,5	34,7	50,2	27,1	16,9	49,6	72,1	46,5	34,7	76,4
9	53,5	53,3	85,8	45,6	93,4	4,5	0	51,9	14,2	0

У зависности од растојања покривања у раду су разматрана два сценарија: први када је $D_p = 30$ km и други када је $D_p = 50$ km. На основу матрице најкраћих растојања и растојања покривања D_p добија се скуп N_i (табела 4) према следећој релацији: $N_i = \{j/d_{ij} \leq D_p\}$.

Табела 4. Скуп чворова кандидата N_i

N_i	$D_p = 30$	$D_p = 50$
N_{10}	{1,4,5,8}	{1,2,3,4,5,7,8}
N_{14}	{1,2}	{1,2,3,7,8}
N_{134}	{2,3}	{1,2,3,4}
N_{18}	{3,4,5,6,8}	{2,3,4,5,6,7,8,9}
N_{133}	{3,4,8}	{2,3,4,5,8}
N_{129}	{7,9}	{1,6,7,8,9}
N_{13}	{7,9}	{1,6,7,9}
N_{129s}	{6}	{5,6,7,8}
N_{130}	{1,7,9}	{1,2,6,7,8,9}
N_{129p}	{7,9}	{7,9}

На основу математичке формулације (1)-(3) и података приказаних у табели 3 и у табели 4, добијају се следећи задаци целобројног програмирања:

За $D_p = 30$ km

Минимизирати

$$F = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9$$

при ограничењима

$$x_1 + x_4 + x_5 + x_8 \geq 1$$

$$x_1 + x_2 \geq 1$$

$$x_2 + x_3 \geq 1$$

$$x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_8 \geq 1$$

$$x_3 + x_4 + x_8 \geq 1$$

$$x_7 + x_9 \geq 1$$

$$x_7 + x_9 \geq 1$$

$$x_6 \geq 1$$

$$x_1 + x_7 + x_9 \geq 1$$

$$x_7 + x_9 \geq 1$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j \in J$$

За $D_p = 50$ km

Минимизирати

$$F = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9$$

при ограничењима

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_8 \geq 1$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_7 + x_8 \geq 1$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \geq 1$$

$$x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 \geq 1$$

$$x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_8 \geq 1$$

$$x_1 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 \geq 1$$

$$x_1 + x_6 + x_7 + x_9 \geq 1$$

$$x_5 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 1$$

$$x_1 + x_2 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 \geq 1$$

$$x_7 + x_9 \geq 1$$

$$x_j = \{0,1\} \quad \forall j \in J$$

Након формирања задатака целобројног програмирања следи њихово решавање у програму Excel Solver. У табели 5 су приказана решења.

Табела 5. Решења проблема локација базних станица

$D_p = 30$ km								
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1	0	1	0	0	1	1	0	0
$D_p = 50$ km								
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
0	1	0	0	0	0	1	0	0

На основу добијених резултата може се закључити да је, у случају ако се постави да је $D_p = 30$ km, потребно користити четири базне станице на следећим локацијама: Панчево, Бела Црква, Сечањ и Ковачица. Уколико би се дозволило да растојање покривања буде веће, односно 50 km, тада је потребно користити две базне станице које би биле лоциране у Ковину и Ковачици. Постављањем базних станица на овај начин путеви I и II приоритета би могли бити опслужени са аспекта локацијског проблема покривања скупа. У наставку рада је разматран проблем лоцирања p -медијана помоћу којег ће се одредити локације базних станица и доделити путеви, за случајеве када је $p = 2$ и $p = 4$.

На основу математичке формулације (9)-(13) и података приказаних у табели 3 и у табели 4, добијају се следећи задаци целобројног програмирања:

За $p = 4$ ($D_p = 30$ km)

Минимизирати

$$F = d_{1,1}x_{1,1} + d_{1,4}x_{1,4} + d_{1,5}x_{1,5} + d_{1,8}x_{1,8} + \dots + d_{10,7}x_{10,7} + d_{10,9}x_{10,9}$$

при ограничењима

$$x_{1,1} + x_{1,4} + x_{1,5} + x_{1,8} = 1$$

$$x_{2,1} + x_{2,2} = 1$$

$$x_{3,2} + x_{3,3} = 1$$

$$x_{4,3} + x_{4,4} + x_{4,5} + x_{4,6} + x_{4,8} = 1$$

$$x_{5,3} + x_{5,4} + x_{5,8} = 1$$

$$x_{6,7} + x_{6,9} = 1$$

$$x_{7,7} + x_{7,9} = 1$$

$$x_{8,6} = 1$$

$$x_{9,1} + x_{9,7} + x_{9,9} = 1$$

$$x_{10,7} + x_{10,9} = 1$$

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9 = 4$$

$$x_{1,1} \leq y_1 \quad x_{4,5} \leq y_5 \quad x_{9,9} \leq y_9$$

$$x_{2,1} \leq y_1 \quad x_{4,6} \leq y_6 \quad x_{10,9} \leq y_9$$

$$x_{9,1} \leq y_1 \quad x_{8,6} \leq y_6$$

$$x_{2,2} \leq y_2 \quad x_{6,7} \leq y_7$$

$$x_{3,2} \leq y_2 \quad x_{7,7} \leq y_7$$

$$x_{3,3} \leq y_3 \quad x_{9,7} \leq y_7$$

$$\begin{aligned}
x_{4,3} &\leq y_3 & x_{10,7} &\leq y_7 \\
x_{5,3} &\leq y_3 & x_{1,8} &\leq y_8 \\
x_{1,4} &\leq y_4 & x_{4,8} &\leq y_8 \\
x_{4,4} &\leq y_4 & x_{5,8} &\leq y_8 \\
x_{5,4} &\leq y_4 & x_{6,9} &\leq y_9 \\
x_{1,5} &\leq y_5 & x_{7,9} &\leq y_9
\end{aligned}$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in N_i$$

На исти начин се и за случај $p = 2$ ($D_p = 50$ km) формирају задаци целобројног програмирања.

Након решавања задатака целобројног програмирања, за оба случаја ($p = 2$ и $p = 4$) у програму Excel Solver, добијају се решења приказана у табели 6.

Табела 6. Решења проблема лоцирања базних станица и додељивања путева

$D_p = 30$ km
$y_1 = y_3 = y_6 = y_9 = 1; y_2 = y_4 = y_5 = y_7 = y_8 = 0$ $x_{1,1} = x_{2,1} = x_{3,3} = x_{4,3} = x_{5,3} = x_{6,9} = x_{7,9} = x_{8,6} = x_{9,1} = x_{10,9} = 1;$ остале променљиве једнаке су нули
$D_p = 50$ km
$y_3 = y_7 = 1; y_1 = y_2 = y_4 = y_5 = y_6 = y_8 = y_9 = 0$ $x_{1,7} = x_{2,7} = x_{3,3} = x_{4,3} = x_{5,3} = x_{6,7} = x_{7,7} = x_{8,7} = x_{9,7} = x_{10,7} = 1;$ остале променљиве једнаке су нули

Резултати приказани у табели 6 показују да:

- I. За случај $p = 4$ и $D_p = 30$ km:
 - базне станице треба лоцирати у Панчеву, Белој Цркви, Сечању и Перлезу;
 - возила из базне станице у Панчеву опслужују путеве 10, 14 и 130;
 - возила из базне станице у Белој Цркви опслужују путеве 134, 18 и 133;
 - возила из базне станице у Сечању опслужују пут 129S;
 - возила из базне станице у Перлезу опслужују путеве 129, 13 и 129P.
- II. За случај $p = 2$ и $D_p = 50$ km:
 - базне станице треба лоцирати у Белој Цркви и Ковачици;
 - возила из базне станице у Белој Цркви опслужују путеве 134, 18 и 133;
 - возила из базне станице у Ковачици опслужују путеве 10, 14, 129, 13, 129S, 130 и 129P.

У случају када је $p = 4$ и $D_p = 30$ km, ангажована возила ће укупно прећи растојање од 22,1 km, док у другом случају, када је $p = 2$ и $D_p = 50$ km, ангажована возила ће укупно прећи 171,3 km.

5. Закључак

Зимско одржавање путева представља веома битну ставку сваке државе с обзиром да се директно одражава на безбедност и мобилност саобраћаја, као и на повећање трошкова корисника. Повећање трошкова корисника се јавља зато што се зими троши много више горива због успорене и отежане вожње. Развој модела оптимизације за лоцирање базних станица за зимско одржавање путева је од изузетног значаја за унапређење активности зимског одржавања.

У раду је представљен модел за оптимално лоцирање базних станица за зимско одржавање путева у Банатском округу коришћењем локацијског проблема покривања скупа, за два сценарија, када је максимално прописано растојање 50 km, односно 30 km. Циљ је да се одреди минималан број базних станица за зимско одржавање тако да сви путеви буду опслужени. Након дефинисања математичке формулације проблема добијено је решење у Excel Solver-у: потребно је лоцирати четири базне станице за случај када је растојање покривања 30 km, односно две базне станице, за случај када је растојање покривања 50 km. Затим је у наставку рада представљен модел за одређивање локација базних станица и додељивање путева помоћу проблема лоцирања p -медијана, са случај $p = 2$ и $p = 4$ базне станице. Након математичке формулације проблема добијено је решење: за случај $p = 4$ и $D_p = 30$ km потребно је лоцирати базне станице у Панчеву, Белој Цркви, Перлезу и Сечању, а за случај $p = 2$ и $D_p = 50$ km, базне станице треба лоцирати у Белој Цркви и Ковачици. Ангажована возила ће на овај начин прећи 22,1 km, односно 171,3 km.

У разматраном примеру Банатском округа, у зависности од растојања покривања, долази се до закључка да је могуће помоћу четири или две базне станице опслужити све путеве I и II приоритета. При избору најбољег решења, а и најподеснијег растојања покривања, требало би водити рачуна о пређеним километрима сваког ангажованог возила, о броју возила и броју возача. Гледајући са финансијске стране, можемо да се запитамо да ли је исплатљивије имати две базне станице (мањи трошкови одржавања базних станица али већи трошкови горива због већег броја пређених километара) или можда повећати број базних станица јер у том случају трошкови одржавања возила, трошкови горива услед мање пређених километара, као и трошкови радне снаге, се смањују. Управо ово наведено ће бити предмет даљих истраживања аутора рада.

Литература

- [1] План зимског одржавања путева, доступно на https://www.putevisrbije.rs/images/pdf/zimska_sluzba/Plan-zimske-sluzbe-2023-2024.pdf (Accessed: 10/10/2023 at 10:52).
- [2] Главић Д., Младеновић М., Стевановић А., "Policy Improvements for Winter Road Maintenance in South-East Europe: Case Study of Serbia", *Public Works Management and Policy*, pp. 178-179, 2015.
- [3] Noble J., Jang W., Klein C., Nemmers C., "An Integrated Systems Approach to the Development of Winter Maintenance / Management Systems", *InTrans Project Reports 160*, pp. 1-2, 2006.
- [4] Ивановић, А., Николић, М., Шелмић, М. "Одређивање броја и локација базних станица за зимско одржавање путева", 50. Симпозијум о оперативним истраживањима, Тара, Србија, стр. 817-823, 2023.
- [5] Ћалић Ј., Николић М., Шелмић М., "Локација маневарских локомотива применом локацијског проблема покривања скупа", XLVI Симпозијум о оперативним истраживањима, Кладово, Србија, стр. 668, 2019.
- [6] Теодоровић Д., Димитријевић Б., Шелмић М., "Location analysis in transportation", In: *Routledge Handbook of Transportation*, Routledge, eBook ISBN9881315756684, 2015.
- [7] Теодоровић Д., *Транспортне мреже*, шесто издање, Београд, Србија, Универзитет у Београду-Саобраћајни факултет, стр.390-391, 2021.
- [8] Главић Д., Миленковић М., Николић М., Младеновић М., "Determining the number and location of winter road maintenance depots - a case study of the district road network in Serbia", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 41, NO. 2, pp. 144, 2018.

Determining the required number of base stations for winter road maintenance and their locations by integer linear programming

Aleksandra Ivanović, M.Sc.

University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic Engineering

Miloš Nikolić, Ph.D.

University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic Engineering

Milica Šelmić, Ph.D.

University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic Engineering

Abstract: Cold weather and precipitation that occur even in the winter can significantly threaten the normal functioning of road traffic. Therefore, winter road maintenance activities are significant and need to be planned. Some of the decisions related to winter road maintenance can include determining the number and location of base stations, determining the structure of the vehicle fleet, defining the amount of road-spreading material that needs to be procured, etc. This paper focused on determining the number and locations of base stations for winter road maintenance. This is an important problem of a strategic nature, which was solved in two steps in the paper. In the first step, the minimum required number of base stations is determined to cover the entire observed region. In the second step, specific locations of facilities are determined, to minimize the total distance that vehicles need to travel during road maintenance. In both steps, the solution is performed using integer linear programming. In the paper, the model was tested using the example of road maintenance in the Banat district. Excel Solver was used to solve integer linear programs.

Keywords: location theory, set covering, stations for winter road maintenance