

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954165/POSTEL.2022.007>

## **ANALIZA RIZIKA POREMEĆAJA U FUNKCIONISANJU USLUŽNIH MREŽA**

Branka Dimitrijević, Branislava Ratković, Vladimir Simić  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Beograd  
b.dimitrijevic@sf.bg.sc.rs, b.ratkovic@sf.bg.sc.rs, vsima@sf.bg.sc.rs

**Rezime:** *Generalno gledano strateško planiranje lokacija objekata uslužnih mreža opredeljeno je troškovima uspostavljanja tih sistema i/ili postizanja određenog standarda u pogledu zadovoljenja korisničke tražnje. Tako projektovani sistemi baziraju se na ideji da će funkcionisati u regularnim uslovima eksploatacije, bez ikakvih ometanja. Međutim, različiti poremećaji mogu dovesti do delimičnog ili potpunog prestanka funkcionisanja delova uslužnih mreža. U radu je ukazano na značaj analize poremećaja u funkcionisanju uslužnih mreža i predstavljen je lokacijski model r-medijana interdikcije kao jedan od pristupa razvijenih u te svrhe. Dat je ilustrativni primer određivanja najranjivijih tačaka uslužnih mreža čije određivanje pruža mogućnost sagledavanja efekata potencijalnih poremećaja u njihovom funkcionisanju i preduzimanja odgovarajućih preventivnih radnji koje će te situacije eliminisati ili bar ublažiti.*

**Ključne reči:** *uslužne mreže, poremećaji, lokacijska analiza, r-medijana interdikcije*

### **1. Uvod**

Tradicionalni pristupi lociranju objekata zasnovani su na pretpostavci da će sistemi funkcionisati onako kako je zamišljeno i isprojektovano, bez ikakvih ometanja. Međutim, neželjeni događaji uzrokovani namerom (npr. sajber napadi, štrajkovi, teroristički napadi i krađa), nenamerne ljudske aktivnosti (npr. slučajni gubitak podataka ili oštećenje opreme), tehnološke katastrofe ili elementarne nepogode (npr. zemljotresi, uragani, klizišta, poplave itd) mogu isprojektovane sisteme učiniti nefunkcionalnim ili neefikasnim na neko vreme. Danas se sve više uočava značaj identifikovanja potencijalnih štetnih događaja i rizika od njihovog uticaja na postojeće sisteme. Naime, kada se desi neki od ometajućih događaja, usluge koje pruža posmatrani sistem mogu biti degradirane ili čak uništene.

Transportna mreža i objekti koji se nalaze na njoj predstavljaju ključne elemente svakog proizvodnog, distributivnog i uslužnog sistema i istraživanje rizika od neželjenih događaja i njihovog uticaja na poremećaje u funkcionisanju ovih sistema spada u oblast upravljanja katastrofama (engl. Disaster Management). U fokusu ovog rada je istraživanje poremećaja u funkcionisanju objekata uslužnih mreža kao posledica pojave neželjenih događaja, čije je modeliranje u teoriji lokacije relativno novo. U literaturi se navode tri

glavna pitanja na koje je, u istraživanju poremećaja funkcionisanja objekata različitih sistema, potrebno dati odgovore [1]:

- Koliko poremećaj može biti poguban za sistem, odnosno koliko štete može da nanese? Odgovorom na ovo pitanje se pronalaze vitalni objekti, odnosno objekti čijim onesposobljavanjem se nanosi najveća šteta sistemu.
- Da li postoje načini da se sistem zaštiti od poremećaja? Odgovorom na ovo pitanje pronalaze se načini zaštite objekata kako bi se sprečili poremećaji u funkcionisanju sistema. U zavisnosti od neželjenih događaja i poremećaja koje sistem zbog njih trpi, zaštita objekata može podrazumevati i jednostavnije aktivnosti kao što je obezbeđivanje rezervnih generatora za napajanje ili pojačanje bezbednosnih i sigurnosnih sistema koji će odbiti potencijalne napadače. Sa druge strane, takve aktivnosti bi mogle uključiti i planiranje izmeštanja nekog objekta na obližnju lokaciju koja je manje podložna nekom neželjenom događaju, kao što je na primer poplava.
- Da li postoji mogućnost za rekonfiguraciju postojećeg sistema ili kreiranje novih koji je će u boljoj meri odgovoriti na rizike od potencijalnih poremećaja? Odgovorom na ovo pitanje se otvara mogućnost kreiranja potpuno novih sistema otporni(ji)h na potencijalne uticaje poremećaja.

Predmet ovog rada je analiza rizika poremećaja u funkcionisanju uslužnih mreža poput poštanske mreže, mreže paketomata, bankomata itd. kroz modeliranje uslužne mreže na način koji određuje najnepovoljnije efekte prestanka funkcionisanja zadanog broja objekata u posmatranom sistemu primenom lokacijskog modela  $r$ -medijana interdikcije (engl.  $r$ -interdiction median). Cilj je da se analizom ustanove vitalni objekti uslužne mreže, odnosno objekti čijim onesposobljavanjem se nanosi najveća šteta sistemu, što predstavlja prvi korak u analizi rizika od poremećaja u funkcionisanju uslužnih mreža i preduslov za pravljenje strategije u cilju sprečavanja ili pak ublažavanja efekata poremećaja.

Rad je organizovan na sledeći način. U narednom poglavlju dat je kratak pregled literature vezano za lokacijski model  $r$ -medijana interdikcije. U trećem poglavlju prikazana je i objašnjena formulacija ovog modela, a četvrto poglavlje sadrži ilustrativni primer uslužne mreže na kome je demonstrirana njegova primena, dati rezultati i njihova diskusija. U poslednjem poglavlju rada data su zaključna razmatranja i pravci daljih istraživanja.

## 2. Pregled literature

Do početka XXI veka, gotovo svi autori koji su se bavili lokacijskom analizom ignorisali su analizu rizika od poremećaja u funkcionisanju sistema pri optimizaciji lokacija objekata. Usled veoma širokog spektra poremećaja koji su postali izraženi u poslednjih dvadeset godina (od prirodnih i tehnoloških katastrofa do štrajkova i terorističkih napada) povećano je interesovanje za modeliranje ranjivosti posmatranih mreža. Radovi [2] i [3] bili su fundamentalni radovi koji su se bavili problemom ispitivanja pouzdanosti i rezilijentnosti lociranih objekata na mreži. Autori su u radu [2] predložili dva nova lokacijska modela bazirana na  $p$ -medijana modelu i modelu maksimalnog pokrivanja. Oba modela za posmatrani sistem identifikuju one lokacije objekata koje u slučaju da postanu nefunkcionalne najviše utiču na pružanje usluga. Nadalje su autori nadograđivali pomenute modele, pa se tako u radu [3] predlaže višekriterijumski model baziran na  $p$ -medijan modelu, u kome je pretpostavljeno da  $p$  objekata ima podjednaku verovatnoću da ispadnu iz sistema, a zatim se svaki od korisnika alokira ka objektima nižeg hijerarhijskog nivoa u

slučaju da su svi objekti višeg nivoa nefunkcionalni. Prva funkcija cilja predstavlja ukupno pređeno rastojanje korisnika do objekata višeg hijerarhijskog nivoa, dok druga funkcija cilja predstavlja očekivane transportne troškove usled otkaza pojedinih objekata na nižem hijerarhijskom nivou sistema. U radu [4] autori su posmatrali problem lociranja objekata koji eksplicitno uzima u obzir mogućnost da neki od objekata ispadnu iz sistema, što dovodi do toga da korisnici traže uslugu od funkcionalnih objekata, međutim to za rezultat ima povećanje transportnih troškova. Predloženi model predstavlja generalizaciju  $p$ -medijana modela, a model je primenjen na lokacije opštih bolnica u Torontu. Primenjeni model je pokazao da ocena kvaliteta trenutnih lokacija bolnica u velikoj meri zavisi od toga da li se uzima u obzir mogućnost poremećaja, pri čemu trenutni sistem funkcioniše blizu optimalnog ukoliko je verovatnoća pojave poremećaja velika. Rad [5] razmatra problem zaštite kritične infrastrukture u sistemima snabdevanja u pogledu potencijalnih namernih napada. Autori su predložili probabilistički model  $r$ -medijana interdikcije, a za rešavanje problema većih dimenzija razvili su gramzivu heuristiku. U radu [6], autori su proširili model  $r$ -medijana interdikcije kako bi obuhvatili i aspekt zaštite objekata od potencijalnih poremećaja u funkcionisanju kao posledica neželjenih događaja uzrokovanih namerom. Predstavljeni model celobrojnog programiranja uzima u obzir ograničene resurse za zaštitu objekata. U radu [7], model  $r$ -medijana interdikcije je takođe proširen kako bi obuhvatio zaštitu objekata što je rezultiralo dvonivojskim modelom matematičkog programiranja koji istovremeno uzima u obzir i egzogene i endogene poremećaje izazvane namernim napadima na sistem. Rad [8] se bavi modeliranjem i formulacijom  $r$ -medijana interdikcije sa zaštitom objekata u fazi okruženju.

### 3. Lokacijski problem $r$ -medijana interdikcije

Ovaj lokacijski model je izabran da bude predstavljen jer posmatra postojeću uslužnu mrežu kao medijana problem, što je u praksi i najčešća situacija. Njime se određuju najnepovoljniji efekti prestanka funkcionisanja zadatog broja objekata ( $r$ ) na mreži, određujući maksimalno ponderisano rastojanje između preostalih objekata na mreži i korisnika pridruženih njima najbližim preostalim objektima. Dakle, nemogućnost jednog ili više objekata da pružaju usluge rezultira smanjenjem kvaliteta usluga posmatrane mreže kroz povećanje transportnih troškova, a lokacijski problem  $r$ -medijana interdikcije ustanovljava kojih  $r$  uslužnih objekata bi svojim prestankom funkcionisanja doveli do najvećeg povećanja transportnih troškova u pružanju usluga korisnicima.

U nastavku je prikazana korišćena notacija i promenljive koje figurišu u formulaciji lokacijskog problema  $r$ -medijana interdikcije.

Notacija:

$I$  – skup čvorova postojećih lokacija objekata,

$J$  – skup čvorova korisnika,

$i, k$  – indeksi čvorova postojećih lokacija,

$j$  – indeks čvorova korisnika,

$V_j$  – težinski koeficijent korisničkog čvora  $j$  (zahtevi ili potražnja korisnika  $j$ ),

$d_{ij}$  – najkraće rastojanje između objekta  $i$  i korisnika  $j$ ,

$r$  – unapred definisan broj objekata čija je funkcionalnost onemogućena,

$T_{ij} = \{k \in I \mid d_{kj} > d_{ij}\}$ ,  $\forall i \in I, j \in J$  – skupovi koje čine one lokacije objekata  $k$  iz skupa  $I$

koje su na većem rastojanju od korisnika  $j$  nego što je posmatrana lokacija  $i$ .

Promenljive:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{ako je lokacija objekta } i \text{ van funkcije} \\ 0, & \text{ako nije} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ako lokacija } i \text{ opslužuje korisnike u čvoru } j \\ 0, & \text{ako ne} \end{cases}$$

Formulacija problema [2]:

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} V_j d_{ij} Y_{ij} \quad (1)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} X_i = r \quad (3)$$

$$\sum_{k \in T_{ij}} Y_{kj} \leq X_i, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4)$$

$$X_i = \{0,1\}, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$Y_{ij} = \{0,1\}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

Funkcija cilja (1) maksimizira sumu ponderisanih rastojanja između objekata  $i$  i korisnika  $j$ . Prvi skup ograničenja (2) se odnosi na činjenicu da svaki korisnik mora biti opslužen iz nekog od uslužnih objekata koji su u funkciji. Drugo ograničenje (3) podrazumeva da je broj objekata koji nisu u funkciji jednak  $r$ . Treći skup ograničenja (4) obezbeđuje da se korisnici opslužuju u njima najbližim objektima koji su u funkciji. Konačno, ograničenja (5) i (6) se odnose na binarnu prirodu promenljivih  $X_i$  i  $Y_{ij}$ .

#### 4. Ilustrativni primer i analiza rezultata

Neka hipotetičku uslužnu mrežu čini 16 čvorova - postojećih lokacija objekata ( $i=1,\dots,16$ ) i 17 čvorova agregirane korisničke tražnje ( $j=1,\dots,17$ ). Tražnja za uslugom, izražena npr. kroz broj potencijalnih korisnika, u svakom od korisničkih čvorova data je u tabeli 1, dok je u tabeli 2 data matrica najkraćih rastojanja između uslužnih objekata i korisnika.

Tabela 1. Korisnička tražnja

$j$	Broj potencijalnih korisnika	$j$	Broj potencijalnih korisnika
1	213742	10	57607
2	183003	11	56865
3	177338	12	51889
4	174197	13	46406
5	168841	14	45253
6	165739	15	35732
7	108198	16	26855
8	86585	17	19819
9	72124		

Tabela 2. Matrica najkraćih rastojanja između lokacija objekata i korisnika u km

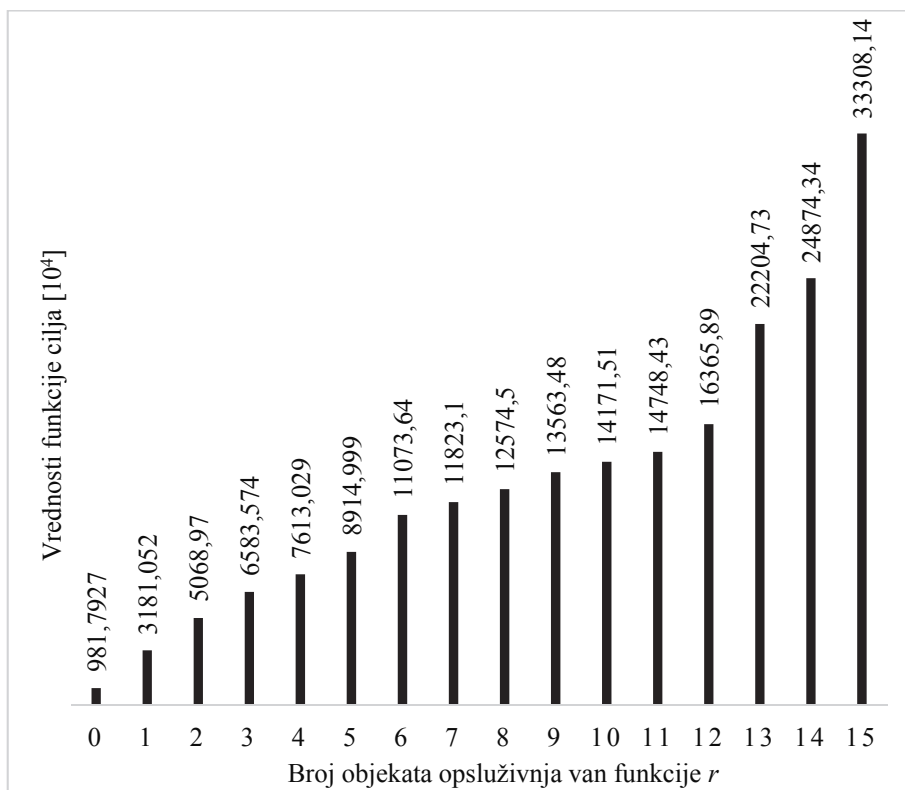
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	8,0	9,5	11,2	9,4	3,9	1,3	11,4	27,7	34,2	3,3	62,6	52,5	27,2	2,7	3,0	34,1	53,7
2	8,4	14,3	10,6	11,1	1,5	3,7	8,4	31,9	33,6	2,6	59,2	47,9	26,6	4,9	3,5	30,7	49,1
3	2,8	13,8	11,5	1,5	10,3	7,4	13,9	40,8	44,7	9,9	62,9	56,8	20,0	6,3	6,5	34,4	58,0
4	10,0	27,0	2,9	13,9	8,7	10,4	2,2	41,2	30,0	8,3	52,2	57,2	25,9	10,2	9,8	23,7	35,9
5	43,3	51,4	27,8	44,8	33,4	33,4	33,1	64,0	0,9	33,1	40,5	61,1	27,7	33,2	32,0	24,7	45,3
6	77,7	85,8	52,1	79,2	62,3	62,3	52,8	70,9	41,8	62,0	1,1	48,9	63,2	63,3	62,0	35,8	41,3
7	54,5	70,5	54,6	57,4	48,2	50,5	57,1	36,0	79,6	49,1	50,4	0,8	72,7	52,3	50,0	33,7	14,7
8	40,0	36,8	42,2	43	33,7	36,1	42,6	1,0	65,2	34,7	71,4	36,0	58,2	37,9	35,6	38,2	38,5
9	22,6	38,7	12,6	25,6	10,7	11,7	9,0	26,4	47,8	10,3	61,3	42,4	40,8	12,9	11,2	32,8	37,3
10	56,2	72,3	35,2	59,1	49,9	52,2	35,8	37,8	45,7	50,9	43,1	15,2	50,2	54,1	51,7	20,0	0,15
11	34,4	61,6	22,9	37,3	33,1	33,6	23,5	37,6	24,6	32,8	34,3	37,5	37,8	32,9	31,6	0,3	21,7
12	18,5	19,6	43,1	14,9	24,8	24,6	28,4	55,2	48,9	24,3	86,2	71,3	24,2	22,8	23,6	57,7	69,9
13	18,9	27,4	23,1	20,8	25,6	25,4	26,7	56,6	28,9	27,2	66,2	72,1	0,75	23,6	24,8	37,7	49,8
14	25,8	6,9	21,4	20,9	16,0	12,4	21,5	48,7	60,4	14,7	72,8	63,2	35,7	13,0	13,2	44,3	64,4
15	5,5	14,7	9,7	7,2	5,3	3,8	10,1	37,0	32,6	3,7	66,2	53,0	25,9	2,6	2,2	32,4	47,9
16	16,1	32,2	5,8	19,0	14,8	16,5	9,6	45,4	21,9	14,6	55,7	58,5	16,9	14,7	13,4	23,2	35,4

Za rešavanje ovog lokacijskog problema korišćen je solver LINGO 19.0. Na slici 1 data su rešenja problema u pogledu maksimalne vrednosti funkcije cilja za različite vrednosti parametra  $r$ , dok su u tabeli 3 dati indeksi lokacija objekata na ilustrativnoj uslužnoj mreži koji za dato  $r$  dovode do najvećih poremećaja u njenom funkcionisanju, odnosno do maksimalnih vrednosti funkcije cilja.

U slučaju kada je  $r=0$ , odnosno kada svi postojeći objekti funkcionišu (regularno stanje), vrednost funkcije cilja iznosi 9817927. Treba napomenuti da je to ujedno i vrednost funkcije cilja kada bi ovaj problem bio rešavan kao  $p$ -medijana lokacijski problem za  $p=16$ , odakle se jasno uočava veza između  $r$ -medijana interdikcije i  $p$ -medijana lokacijskog problema.

U slučaju da se desi poremećaj u funkcionisanju sistema koji podrazumeva ispadanje iz funkcije jednog od uslužnih objekata ( $r=1$ ), na sistem bi najveći negativan uticaj imalo ispadanje objekta 8 (tabela 3) kada bi vrednost funkcije cilja iznosila 31810520, što je 3,24 puta veća vrednost nego kada su svi objekti u funkciji, odnosno transportni troškovi pružanja usluga bi se u tom slučaju uvećali za 324% u odnosu na regularne uslove funkcionisanja sistema. Kada je  $r=2$  vrednost funkcije cilja iznosi 50698700, a dva objekta čiji bi prestanak funkcionisanja doveo do tolike vrednosti kriterijumske funkcije, odnosno imao najveći negativan uticaj na transportne troškove uslužne mreže, su 6 i 8 (tabela 3) i tako redom.

Dakle, rezultati iz tabele 3 daju analitičarima i menadžmentu sistema informacije koji su to objekti čijim ispadanjem dolazi do najvećih poremećaja u funkcionisanju uslužne mreže što otvara mogućnost da se u skladu sa raspoloživim finansijama odrede i prioriteta, odnosno redosled kojim bi se preduzimale aktivnosti prevencije ovih objekata u cilju smanjenja rizika od identifikovanih potencijalnih poremećaja.



Slika 1. Vrednosti funkcije cilja u zavisnosti od broja lokacija van funkcije

Tabela 3.  $r$  lokacija čije nefunkcionisanje ima najveći negativan uticaj na sistem

$r$	Lokacije van funkcije
1	8
2	6,8
3	5,6,8
4	5,6,8,11
5	5,6,7,8,11
6	5,6,7,8,10,11
7	5,6,7,8,10,11,13
8	5,6,7,8,10,11,13,16
9	4,5,6,7,8,10,11,13,16
10	4,5,6,7,8,9,10,11,13,16
11	2,4,5,6,7,8,9,10,11,13,16
12	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,15
13	1,2,3,4,5,8,9,11,12,13,14,15,16
14	1,2,3,4,5,6,8,9,11,12,13,14,15,16
15	1,2,3,4,5,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16

## 5. Zaključak

U radu je naglašena važnost sprovođenja analize rizika poremećaja u funkcionisanju uslužnih mreža. Lokacijski problem  $r$ -medijana interdikcije primenjen je za modeliranje razmatranog problema. Priložen je numerički primer određivanja najranjivijih tačaka korisničkih mreža kako bi se detaljno analizirali efekti poremećaja i utvrdio redosled kojim bi se preduzimale aktivnosti prevencije.

Značajan pravac budućeg istraživanja ranjivosti uslužnih mreža predstavlja proširenje predstavljenog modela  $r$ -medijana interdikcije. U skladu sa konceptom održivog razvoja, za modeliranje ranjivosti uslužnih mreža, pored transportnih troškova koji vrlo dobro reprezentuju kako funkcionisanje uslužnih mreža, tako i efekte poremećaja, ima smisla uključiti u razmatranje i ostale reprezentive poremećaja, poput bezbednosti korisnika uslužnih mreža, a u nekim slučajevima i negativne ekološke efekte koje poremećaji mogu izazvati u okruženju. Na taj način bi se posmatrani problem preselio u domen višekriterijumske optimizacije. Za rešavanje ovako strukturiranog višekriterijumskog optimizacionog modela, u slučajevima kada postoji veliki broj postojećih lokacija objekata uslužne mreže i korisničkih čvorova, neophodna je primena neke od mnoštva postojećih metaheuristika ili razvoj nove. U tom smislu, buduća istraživanja će ići i pravcu rešavanja problema većih dimenzija koji bi bio realna uslužna mreža.

## Literatura

- [1] G. Laporte, S. Nickel, F. Saldanha da Gama, *Location Science*, Springer, Switzerland, 2015.
- [2] R.L. Church, M.P. Scaparra, and R.S. Middleton, „Identifying critical infrastructure: the median and covering facility interdiction problems”. *Annals of the Association of American Geographers* 94, pp. 491–502, 2004. DOI: 10.1111/j.1467-8306.2004.00410.x
- [3] L.V. Snyder, and M.S. Daskin, “Reliability models for facility location: the expected failure cost case”. *Transportation Science* 39, pp. 400–416, 2005. DOI: 10.1287/trsc.1040.0107
- [4] O. Berman, D. Krass, and M.B.C. Menezes, “Facility Reliability Issues in Network  $p$ -Median Problems: Strategic Centralization and Co-location Effects”. *Operations Research, INFORMS*, 55 (2), pp.332-350, 2007, DOI: 10.1287/opre.1060.0348.
- [5] Y. Zhu, Z. Zheng, X. Zhang, and K. Cai, “The  $r$ -interdiction median problem with probabilistic protection and its solution algorithm”. *Computers & Operations Research*, 40(1), pp. 451–462, 2013. DOI: 10.1016/j.cor.2012.07.017
- [6] K. Zhang, X. Li, M. Jin, “Efficient Solution Methods for a General  $r$ -Interdiction Median Problem with Fortification”. *INFORMS Journal on Computing*, 34(2), pp.1272-1290, 2021, DOI: 10.1287/ijoc.2021.1111.
- [7] R.L. Church, M.P. Scaparra, “Protecting Critical Assets: The  $r$ -Interdiction Median Problem with Fortification”. *Geographical analysis*, 39(2), pp. 129-146, 2007, DOI: 10.1111/j.1538-4632.2007.00698.x
- [8] H. R. Maleki, R. Khanduzi, "Modeling  $r$ -interdiction median problem with fortification in a fuzzy environment". *4th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS)*, pp. 1-5, 2015, DOI: 10.1109/CFIS.2015.7391685

**Abstract:** *The facility location problem in the context of user networks is predetermined by the investment costs and/or achieving a certain standard of satisfying users' demand. Systems designed in this way are based on the idea that they will function in regular exploitation conditions, without any interference. Various disruption events can lead to a partial or complete shutdown of parts of the user networks. First, the paper highlights the importance of the impact assessment of disruption events on user networks. Then, the  $r$ -interdiction median location model is presented as a potential solution approach. Finally, a numerical example of the determination of the most vulnerable points of user networks is provided to illustrate the effects of potential disruptions, as well as appropriate preventive actions that eliminate or at least mitigate those situations.*

**Keywords:** *user networks, disruptions, location analysis,  $r$ -interdiction median*

## **DISRUPTION RISK ANALYSIS OF USER NETWORKS**

Branka Dimitrijević, Branislava Ratković, Vladimir Simić