

## بهبود تاب آوری شهری در تخلیه اضطراری شهر با استفاده از مدیریت تقاضا

الهام گرجی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

سید نادر شتاب

دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

محمد علی گرجی<sup>۱</sup>

دکتری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

با گسترش فجایع شهری مانند زلزله، حملات جنگی، خرابی نیروگاه‌های هسته‌ای و موارد دیگر، لزوم برنامه ریزی جهت تخلیه اضطراری شهرها بیش از پیش احساس می‌شود. مدیریت تخلیه اضطراری شهروندان بعد از وقوع فاجعه می‌تواند نقشی مهم در بهبود زمان تخلیه ایفا نماید. این مدیریت می‌تواند در راستای نظم بخشیدن به رفتار شهروندان در انتخاب زمان شروع حرکت از محل سکونتشان به پناهگاه‌ها و همچنین مشخص نمودن مسیر حرکتشان در شبکه حمل و نقل شهری بسیار کارا ظاهر شود. مطالعه حاضر به دنبال ارائه سیاستهایی برای مدیریت رفتار شهروندان جهت بهبود وضعیت تخلیه اضطراری شهر در زمان وقوع فجایع می‌باشد. به همین منظور در ابتدا طی سناریویی، نتایج رفتار شهروندان در انتخاب پناهگاه و مسیر حرکتشان به سوی آن در زمان تخلیه اضطراری و در وضعیتی که هیچ مدیریتی وجود ندارد بر روی شبکه ای آزمایشی (شبکه حمل و نقلی سوفالز)، مشخص شد. سپس طی سناریوهای مختلف بر روی همان شبکه حمل و نقلی، نتایج اعمال سیاستهایی همچون کنترل زمان شروع حرکت، تعیین پناهگاه و مشخص نمودن مسیر حرکت به پناهگاه در زمان تخلیه اضطراری برای ساکنین نواحی مختلف شهر تعیین گردید و این نتایج با نتایج وضعیتی که هیچگونه مدیریتی در این ارتباط وجود ندارد مقایسه گردید.

**واژگان کلیدی:** تاب آوری شهری، تخلیه اضطراری، مدیریت تقاضا

## مقدمه

افزایش وقوع فجایع در سالهای اخیر، اهمیت آمادگی در برابر فجایع را بیش از پیش برای کشورها مشخص نموده و دولت‌ها به دنبال اتخاذ تصمیمات و انجام فعالیتهایی برای مواجهه با این فجایع هستند. فعالیت‌هایی که در مورد مواجهه با این فجایع صورت می‌گیرد و باعث افزایش آمادگی و آسیب کمتر و بازیابی سریع تر می‌گردد اکنون با مفهومی به نام تاب‌آوری شناخته می‌شود. اصطلاح «resilience» از کلمه لاتین «resiliere» گرفته شده است که به معنی «برگشتن به عقب» است [۶،۷]. تعریفی از تاب‌آوری که توسط سازمان ملل ارائه شده است تاب‌آوری را "توانایی یک سیستم یا جامعه‌ی در معرض خطرات، در مقاومت، جذب، سازگاری و بازیابی به موقع از اثرات یک تهدید با شیوه‌ای کارآمد از جمله با حفظ و بازیابی ساختارهای اساسی و عملکردهای اساسی آن" معرفی می‌کند [۱۳،۱۴]. همچنین تاب‌آوری شهری مفهوم ارائه شده در راستای مقابله با فجایع درون شهرها می‌باشد.

اقداماتی که در زمینه تاب‌آوری شهری انجام می‌شود، نسبت به زمان وقوع فجایع دسته بندی شده‌اند. محققین چرخه زمانی ۴ مرحله‌ای شامل پیشگیری<sup>۲</sup>، آمادگی<sup>۳</sup>، مقابله<sup>۴</sup> (پاسخ)، و بازیابی<sup>۵</sup> (بازسازی) را برای اقدامات تاب‌آوری در مقابل فجایع تعریف کرده‌اند. دو مرحله اول مربوط به قبل از وقوع فاجعه می‌باشد. مراحل سوم و چهارم به اقدامات بعد از فاجعه اشاره دارد. در این بین اقداماتی که در مرحله مقابله صورت می‌گیرد از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورت انجام اقدامات موثر در این مرحله، می‌توان در صورت رخداد فاجعه، آسیب‌های ناشی از آن را کاهش داد. از جمله مهمترین اقدامات در مواجهه با بسیاری از فجایع شهری، تخلیه اضطراری شهر می‌باشد. تخلیه اضطراری را میتوان به معنی انتقال مردم از مکانی پرخطر به مکانی ایمن دانست [۵]. تخلیه اضطراری شهر به عنوان رویکردی کارآمد برای محافظت از جان انسان‌ها در مواجهه با فجایع می‌باشد [۶].

مدیریت شهری هنگام تخلیه اضطراری به دنبال دستیابی به اهداف مختلفی می‌باشد. بطور مثال استفاده از مسیرهای ایمن هنگام تخلیه میتواند سلامت شهروندان را تضمین نماید [۷]. جلوگیری از ایجاد آشوب و اغتشاش در هنگام تخلیه را می‌توان از دیگر اهداف مدیریت شهری دانست [۸]. در این بین، تخلیه سریع شهروندان هدفی مهم هم برای شهروندان و هم برای مدیریت شهری می‌باشد [۹]. تخلیه اضطراری در زمان مناسب میتواند باعث کاهش خطر فاجعه و نجات بیشتر انسان‌ها شود [۱۰].

سرعت و زمان تخلیه اضطراری شهر تحت تأثیر مولفه‌های مختلفی قرار دارد. در فجایعی مانند زلزله، تخریب زیرساختها و انسداد خیابانها نقش اساسی بر روی مسیرهای در دسترس برای تخلیه دارند [۱۱، ۱۲]. مولفه‌ی اثرگذار دیگر وجود زیر ساخت‌های حمل و نقلی شهری مناسب برای تخلیه اضطراری می‌باشد [۱۳]. همچنین مولفه‌های اجتماعی مانند رفتار شهروندان مولفه بسیار تأثیرگذار بر روی سرعت و زمان تخلیه اضطراری است. تصمیم شهروندان هنگام تخلیه اضطراری در خصوص تخلیه یا عدم تخلیه [۱۴]، انتخاب وسیله نقلیه جهت تخلیه [۱۵]، زمان شروع تخلیه [۱۶]، انتخاب مقصد ایمن و انتخاب مسیر تخلیه از جمله مواردی هستند که بر روی تقاضای تخلیه اضطراری اثرگذار هستند. مطالعات عوامل مختلفی را در رفتار و تصمیمات شهروندان هنگام تخلیه اضطراری موثر می‌دانند. مطالعه حاضر، با تمرکز بر مسئله تخلیه اضطراری، بدنبال بهبود روند تخلیه شهروندان با استفاده از مدیریت تقاضای تخلیه است.

## روش تحقیق

در این بخش، ابتدا فرضیات مسئله ارائه می‌شود. سپس سناریوهای تخلیه اضطراری تعریف می‌گردد. فرضیات تعیین می‌کنند که نتایج مدل تا چه حد می‌توانند به شرایط واقعی تعمیم داده شوند، و کمک می‌کنند تا محدودیت‌ها و کاربردهای مدل بهتر درک شود. در ادامه با بیان فرضیات مسئله، در خصوص هر یک توضیحاتی ارائه می‌شود. فرض کنید:

۱- مدیریت شهری قبل از رسیدن فاجعه (طوفان، سیل یا آتش سوزی) به مناطق شهری آن را اعلام میکند. در نتیجه شبکه شهری هنگام تخلیه شهروندان سالم بوده و تخریب نشده است.

<sup>2</sup> Mitigation

<sup>3</sup> Preparedness

<sup>4</sup> Response

<sup>5</sup> Recovery

- ۲- مردم از تعداد و مکان پناهگاهها اطلاع کامل دارند.
- ۳- ظرفیت پناهگاهها نامحدود بوده و از نظر ویژگیها (کیفیت و لوازم در دسترس) یکسان هستند.
- ۴- به علت فاصله پناهگاهها از شهر، مردم برای جابجایی از وسیله نقلیه استفاده میکنند و بصورت پیاده عازم نمی شوند.
- ۵- هنگام اعلام هشدار، شهروندان همگی در محل سکونت خود بوده و عمل تخلیه و رفتن به پناهگاهها از محل سکونت شهروندان آغاز می شود.

در ارتباط با رفتار شهروندان هنگام تخلیه اضطراری، دو موضوع مهم در این پایان نامه مورد توجه قرار گرفته است. موضوع اول تبعیت در خصوص مسیریابی تخلیه اضطراری است. هنگام مواجهه با فاجعه، مدیریت شهر با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی اقدام به مسیریابی تخلیه اضطراری برای نقاط جمعیتی شهر می کنند. سپس این مسیر از طریق رسانه های مختلف مانند پیامک، پیام رسان های مجازی و یا صدا و سیما به شهروندان اطلاع رسانی می شود. تبعیت شهروندان از مسیریابی پیشنهادی مدیریت شهر موضوع مهمی است که بر روند تخلیه اضطراری اثرگذار است.

موضوع مهم دوم در ارتباط با رفتار شهروندان هنگام تخلیه اضطراری، در خصوص زمان شروع تخلیه اضطراری است. مدیریت شهری با استفاده از روش های بهینه سازی، علاقه مند است زمان شروع حرکت برای تخلیه اضطراری را به گونه ای تعیین کند که مدیریت تقاضا بر روی شبکه شهری صورت گیرد. در این خصوص نیاز است تقاضای موجود در نقاط جمعیتی بصورت تدریجی در طی زمان بر روی شبکه قرار گیرد تا از ازدحام و افزایش زمان سفر جلوگیری شود. تبعیت شهروندان از دستور مدیریت شهری در خصوص تأخیر برای شروع حرکت تخلیه اضطراری موضوعی است که بر روی زمان تخلیه اضطراری اثرگذار است.

حال با توجه به رفتار شهروندان در دو موضوع یاد شده، در ادامه سناریوهای مختلف تعریف می شود.

#### سناریو اول: عدم تبعیت شهروندان از دستورات مدیریت شهری

در این سناریو شهروندان کاملاً بصورت شخصی و بدون تبعیت از مدیریت شهری تصمیم گیری میکنند. بدیهی است که در حالت بحران و تخلیه اضطراری ممکن است شهروندان از تصمیمات مدیریت شهری پیروی نکنند [۵۹، ۶۰]. در این سناریو فرض می شود که هیچکدام از شهروندان در زمان بحران از دستورات مسئولین شهری تبعیت نکرده و سعی می کنند بعد از هشدار تخلیه، همزمان شروع به حرکت کرده و به نزدیک ترین پناهگاه نزدیک به محل سکونتشان بروند و در این بین حتی با مواجهه با شلوغی ترافیکی مسیر حرکتشان را تغییر نمی دهند.

مسئله تعیین جریان و کل زمان تأخیر در شبکه  $N(V, A)$ ، در این حالت از حل مدل زیر برای هر یک از شهروندان بدست می آید:

$$\begin{aligned}
 & x_{\rho}^{kz} = d^k \quad \hat{\rho} \in \rho_{kz}, (k, z) \in P \\
 S. t: & x_{\rho}^{kz} \geq 0 \quad \rho \in \rho_{kz}, (k, z) \in P \\
 & x_{ij} = \sum_{(k,z) \in P} \sum_{\rho \in \rho_{kz}} x_{\rho}^{kz} \delta_{ij,\rho}^{kz} \quad (i, j) \in A
 \end{aligned} \tag{1}$$

همچنین تابع هدف مسئله برای هر یک از شهروندان  $\min \sum_{(i,j) \in A} t_{ij}^0$  می باشد.

$V$ : مجموعه گره های شبکه  $s \in D$ ،  $s$ : پناهگاه

$A$ : مجموعه کمان های شبکه  $P$ : مجموعه مبدأ-مقصد های شبکه  $(k, s)$

$O$ : مجموعه نواحی جمعیتی (مبداها)  $\rho$ : مسیر

$D$ : مجموعه پناهگاه‌ها (مقصدها)

$\rho_{ks}$ : مجموعه مسیرهای بین ناحیه جمعیتی  $k$  و مقصد  $s$

$x_{ij}^{\rho}$ : حجم جریان از مبدأ  $k$  به مقصد  $s$  که از مسیر  $\rho$  عبور  
میکند.  $(\rho \in \rho_{ks})$   
 $x_{ij}$ : حجم جریان در کمان  $(i, j)$ ،  $((i, j) \in A)$

$d^k$ : میزان تولید سفر (در زمان بحران) از ناحیه  $k$   
 $t_{ij}(\cdot)$ : تابع زمان سفر-حجم کمان  $(i, j)$

$N_O^{\square}$ : شبکه  $N(V, A)$  هنگامی که حجم جریان در تمامی کمانهای آن صفر است

$t_{\rho N_O^{\square}}^{ks}$ : زمان سفر از مبدأ  $k$  به مقصد  $s$  بر روی مسیر  $\rho$  در شبکه  $N_O^{\square}$ .

$\hat{\rho} \in \rho_{ks}$ : کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ  $k$  به مقصد  $s$  در  $N_O^{\square}$ ، به صورت دیگر:  $\hat{\rho} = \left\{ \rho / \min_{\rho \in \rho_{ks}} t_{\rho N_O^{\square}}^{ks} \right\}$

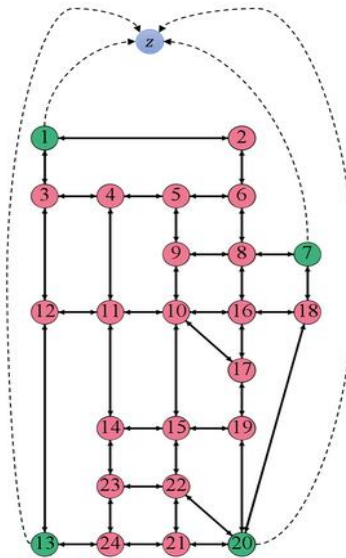
$\delta_{ij,\rho}^{ks}$ : متغیر صفر و یک که بصورت زیر تعریف می شود:

$$\delta_{ij,\rho}^{ks} = \begin{cases} 1 & \text{اگر کمان } (i, j) \text{ درون مسیر } \rho \text{ بین مبدأ - مقصد } (k, s) \text{ باشد.} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

#### سناریو دوم: تبعیت شهروندان از مدیریت در خصوص مسیریابی

در این سناریو فرض می شود هنگام تخلیه اضطراری هر کدام از شهروندان کاملاً تابع دستورات مسئولین شهری بوده و اطلاعات مربوط به مسیر حرکت خود را از طریق رسانه (مثلاً با استفاده از پیامک یا پیام رسان بر روی تلفن همراه) دریافت می کند. همچنین فرض می شود مسیریابی را که مسئولین شهری به شهروندان پیشنهاد می دهند از حل یک مدل بهینه سازی که با تعیین مکان پناهگاه و مسیر حرکت شهروندان سعی در حداقل کردن میانگین زمان تخلیه را دارد بدست می آید. فرمولاسیون مدل مربوط به این سناریوی در ادامه آمده است. با اینحال در این سناریو شهروندان در خصوص زمان حرکت به مدیریت شهری توجهی نداشته و بلافاصله پس از اعلام تخلیه بطور همزمان اقدام به حرکت میکنند.

جهت مدلسازی سناریو دوم، فرض کنید  $N(V, A)$  شبکه حمل و نقل مورد مطالعه با مجموعه گره های  $V$  و مجموعه کمانهای  $A$  می باشد. برای مدل کردن سناریوی مورد نظر، یک گره مجازی (مثلاً گره  $z$ ) را به شبکه اضافه کرده و هر کدام از نقاط خروج از شهر را با هزینه صفر به گره  $z$  وصل میکنیم و مجموعه این کمانها را  $A_z$  می نامیم. مطابق شکل زیر، شبکه ایجاد شده جدید را  $N'(V', A')$  می نامیم که در آن  $(A' = A \cup A_z)$  و  $(V' = V \cup \{z\})$  می باشند.



شکل ۱- شبکه سופالز با اتصال گره مجازی و کمان های متصل به آن

$N'_x$ : شبکه  $N'(V', A')$  می باشد وقتی که بردار حجم جریان بر روی کمانهای آن، بردار  $x$  باشد. به عنوان مثال  $N'_o$  شبکه  $N'(V', A')$  را هنگامی که حجم جریان در تمامی کمانهای آن صفر است را نشان می دهد.  
 $\hat{t}_{\rho, N'_x}^{kz}$ : زمان سفر از مبدأ  $k$  به مقصد  $z$  بر روی مسیر  $\rho$  در شبکه  $N'_x$ .

مسئله تعیین جریان و کل زمان تخلیه در شبکه در این حالت از حل مدل زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{(i,j) \in A'} x_{ij} \times t_{ij}(x_{ij}) \\ & \sum_{\rho \in \rho_{kz}} x_{\rho}^{kz} = d^k \quad (k, z) \in P \\ \text{s.t.} & x_{\rho}^{kz} \geq 0 \quad \rho \in \rho_{kz}, (k, z) \in P \\ & x_{ij} = \sum_{(k,z) \in P} \sum_{\rho \in \rho_{kz}} x_{\rho}^{kz} \delta_{ij, \rho}^{kz} \quad (i, j) \in A' \end{aligned} \quad (2)$$

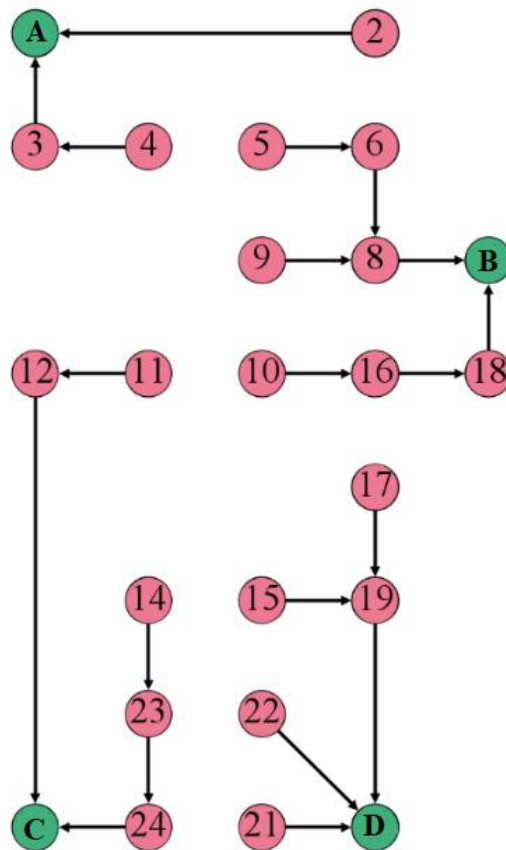
### تحلیل یافته ها

در این بخش، یافته های پژوهش گزارش می شود. جدول زیر نتایج بدست آمده از تخلیه اضطراری شهروندان بر اساس سناریو اول بر روی شبکه سופالز را نشان میدهد.

زمان سپری شده در شبکه سופالز در زمان تخلیه اضطراری در سناریوی اول

نسبت زمان سپری شده خیابان های منتهی به خروج از شهر به زمان کل شبکه	میانگین کل زمان تخلیه اضطراری هر شهروند	خروجی چهارم (گره ۲۰)	خروجی سوم (گره ۱۳)	خروجی دوم (گره ۷)	خروجی اول (گره ۱)	سناریوی اول
۰.۷۵	۴۷.۴۹	۱۰۱۲۷.۲	۹۹۸.۷	۴۹۶.۶	۰.۴	سناریوی اول

همچنین مسیر حرکت وسایل نقلیه هنگام تخلیه اضطراری در شکل زیر نشان داده شده است.



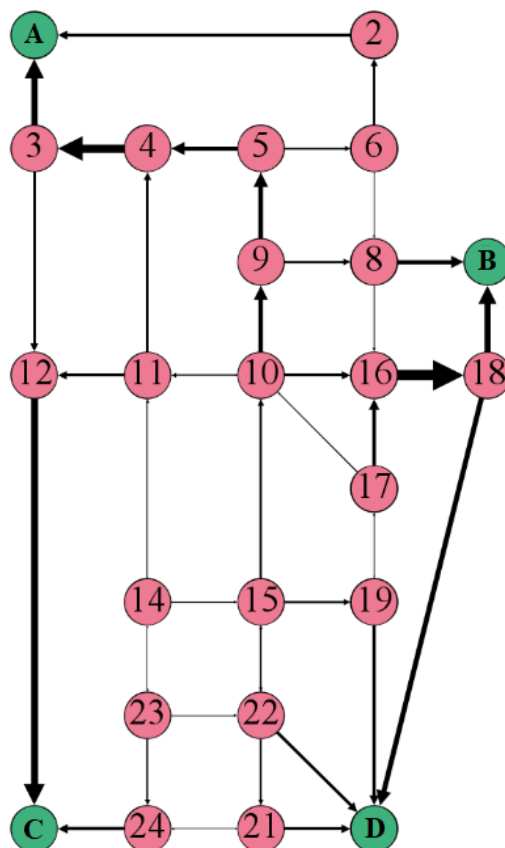
شکل ۱) مسیر حرکت وسایل نقلیه هنگام تخلیه اضطراری در سناریو اول

طبق سناریوی دوم، هنگام تخلیه اضطراری هر کدام از شهروندان کاملاً تابع دستورات مسئولین شهری بوده و اطلاعات مربوط به مسیر حرکت خود را از طریق رسانه دریافت می‌کنند. همچنین در این سناریو فرض می‌شود همه شهروندان بلافاصله پس از اعلان دستور تخلیه، بطور همزمان شروع به حرکت برای تخلیه می‌کنند. جدول نتایج بدست آمده از تخلیه اضطراری شهروندان بر اساس سناریوی دوم بر روی شبکه سופالز را نشان می‌دهد.

جدول ۲) زمان سپری شده در شبکه سופالز در زمان تخلیه اضطراری در سناریوی دوم

نسبت زمان سپری شده خیابان‌های منتهی به خروج از شهر به زمان کل شبکه	میانگین زمان اضطراری شهروند	کل تخلیه هر	زمان سپری شده در خیابان‌های منتهی به خروج از شهر	خروجی اول (گره ۱)	خروجی دوم (گره ۷)	خروجی سوم (گره ۱۳)	خروجی چهارم (گره ۲۰)	سناریوی دوم
۰.۴۲	۳.۲۶	۱۱۶.۳	۴۳.۸	۲۳.۶	۴.۲			

همانگونه که مشاهده می‌شود در این سناریو زمان تخلیه اضطراری نسبت به سناریوی اول کاهش قابل توجهی داشته است. همچنین زمان سپری شده در خروجی‌های شهر نسبت به سناریوی اول، توازن بیشتری پیدا کرده است. شکل ۳-۴، حرکت شهروندان به روی کمانهای شبکه را برای سناریوی دوم نشان می‌دهد. همچنین مسیر حرکت وسایل نقلیه هنگام تخلیه اضطراری در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲) مسیر حرکت وسایل نقلیه هنگام تخلیه اضطراری در سناریو دوم

## نتیجه گیری

تخلیه اضطراری شهر به عنوان یکی از عوامل اصلی در بهبود تاب‌آوری شهری و مدیریت بحران‌ها، نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. این فرآیند، در زمان حوادث و وضعیت‌های اضطراری مانند زلزله، سیل، حریق، تهدیدات امنیتی و حوادث طبیعی دیگر، به جان و امنیت شهروندان در مقابل خطرات بالقوه، پاسخ می‌دهد و خسارات جانی و مالی را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، به بهبود تاب‌آوری شهری در مواجهه با مسائل تخلیه اضطراری شهر پرداخته شده است، و از مدیریت تقاضا به عنوان یک ابزار برای این بهبود استفاده شده است. تمرکز اصلی این پژوهش بر جایگاه‌های سوخت و مدیریت پمپ‌های بنزین است که به واسطه رفتار و عملکرد شهروندان در موقعیت‌های بحرانی و تخلیه اضطراری مورد بررسی قرار گرفته است.

ما در این پژوهش سعی کردیم تا محدودیت‌های مختلفی که می‌توانند بر زمان تخلیه اضطراری تأثیر بگذارند را در نظر بگیریم، از جمله رفتار شهروندان و مسائل مربوط به پمپ‌های بنزین. با این حال، عوامل دیگری نیز وجود دارند که در این پژوهش به آن‌ها توجه نشده است و می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر تخلیه اضطراری داشته باشند.

گرچه در پژوهش حاضر سعی کردیم تا محدودیت‌های مختلفی که می‌توانند بر زمان تخلیه اضطراری تأثیر بگذارند را در نظر بگیریم، از جمله رفتار شهروندان و مسائل مربوط به پمپ‌های بنزین. با این حال، عوامل دیگری نیز وجود دارند که در این پژوهش به آن‌ها توجه نشده است و می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر تخلیه اضطراری داشته باشند.

## Enhancing urban resilience for emergency evacuation through demand management

**Elham Gorji, M.Sc. student, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology**

**Seyed Nader Shetab Boushehri, Associate Professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology**

**Mohmmad Ali Gorji<sup>۱</sup>, Ph.D., Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology**

### Abstract

As urban disasters like earthquakes, war attacks, and nuclear plant failures increase, the necessity for effective city evacuation planning is more urgent than ever. Emergency evacuation management of citizens after a disaster can play an important role in improving the evacuation time. This management can be very fruitful and efficient in order to regulate the behavior of citizens in choosing the time to start moving from their place of residence to the shelters, as well as specifying their movement route in the urban transportation network.

This thesis seeks to provide policies to manage the behavior of citizens to improve the emergency evacuation of the city during disasters. For this purpose, initially, during a scenario, the results of citizens' behavior in choosing a shelter and their route to it during an emergency evacuation and in a situation where there is no management were determined on an experimental network (Sioux Falls transportation network). Then, during different scenarios on the same transportation network, the results of applying policies such as controlling the start time of movement, determining the shelter and specifying the route to the shelter during emergency evacuation for the residents of different areas of the city were determined, and these results were determined with situational results. It was compared that there is no management in this connection. The results show the effectiveness of the proposed policies. At the end, suggestions were made to implement the proposed policies.

**Keywords:** Emergency evacuation, Routing, Demand management, Crisis management.