

استراتژی بهینه مقاوم سازی لرزه‌ای شریان‌های حیاتی وابسته با استفاده از مدل عدم عملکرد داده-ستانده دینامیکی با لحاظ عدم قطعیت

بابک امیدوار^{۱*}، صنم مقیمی^۲، سعید کاکایی^۲

۱- دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۲- کارشناس ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشگاه تهران

*bomidvar@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۰/۱۲]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۸/۲۵]

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در تصمیم‌گیری‌های کلان مطرح است، اولویت‌بندی و تخصیص بودجه مقاوم سازی لرزه‌ای شریان‌های حیاتی است. هنگامی که استراتژی بهینه انتخاب شود و تخصیص بودجه با اولویت‌بندی صحیح انجام شود، انتظار می‌رود که بیشترین کاهش خسارت حاصل شود. در حالتی که منابع مالی محدود باشد، اولویت‌بندی مذکور از درجه اهمیت بالاتری برخوردار است. در این پژوهش با استفاده از مدل عدم عملکرد دینامیکی داده-ستانده، استراتژی بهینه مقاوم سازی شریان‌های حیاتی آب، حمل و نقل، برق، گاز و مخازرات در برابر زلزله از دیدگاه خسارات اقتصادی غیر مستقیم و حساسیت انتخاب شده است. بدین منظور از شاخص‌های کاهش خسارت اقتصادی نسبت به هزینه استراتژی و کاهش حساسیت نسبت به هزینه استراتژی و همچنین روش پارتو استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش ۲۵ درصدی عملکرد لرزه‌ای شریان‌ها نسبت به وضعیت موجود استراتژی بهینه مقاوم سازی از دیدگاه اقتصادی است. در این استراتژی شاخص‌های کاهش خسارت اقتصادی نسبت به هزینه اجرای استراتژی و کاهش حساسیت نسبت به هزینه اجرای استراتژی به ترتیب برابر ۰/۳۹۹۶ و ۳/۶۶ است. شایان ذکر است که در تمامی محاسبات اندرکنش اقتصادی میان شریان‌ها مدنظر قرار گرفته شده است.

واژگان کلیدی: شریان‌های حیاتی، زلزله، مقاوم سازی، مدل داده-ستانده دینامیکی، اولویت‌بندی استراتژی مقاوم سازی.

۱- مقدمه

طبیعی، خسارات مستقیم و غیر مستقیم در پی دارد. خسارات مستقیم براساس تخریب‌های بوجود آمده پس از سانحه قابل تشخیص هستند. در اثر زلزله علاوه بر خسارت‌های مستقیم در شریان‌های حیاتی که وظیفه خدمات‌رسانی را بر عهده دارند، خسارات غیر مستقیم نیز بوجود می‌آید. عدم کارکرد شریان‌های حیاتی در اثر وجود وابستگی بین آن‌ها می‌تواند باعث بوجود

مقابله با برخی از سوانح طبیعی نظیر زلزله از دیدگاه مدیریت کاهش خطر پذیری فقط به معنای جلوگیری از وقوع آن‌ها نیست بلکه می‌توان براساس شناخت اینگونه پدیده‌های طبیعی، به انجام اقدامات مؤثر برای کاهش یا از بین بردن عواقب آن مبادرت نمود. زلزله مانند دیگر سوانح طبیعی و غیر

گرفتن آثار وابستگی شریان‌های حیاتی آب و برق را با استفاده از دو مدل تئوری گراف و داده ستانده لئونتیف مطالعه کرده‌اند [9]. در مطالعه‌ای دیگر نعیمی و امیدوار آثار شبکه برق بر شریان آب و تاثیر وابستگی شریان حیاتی آب به برق را بررسی نموده‌اند [10]. مطالعات فراوانی در زمینه خسارات مالی و اقتصادی غیر مستقیم ناشی از کاهش خدمات‌رسانی زیرساخت‌ها در اثر وابستگی و اندرکنش میان آن‌ها انجام شده است [11-14]. برای شناخت تبعات اقتصادی حوادث، استفاده از مدل داده-ستانده در بین پژوهشگران توصیه شده است [15].

هیمز و جیانگ در سال ۲۰۰۱ مدل عدم عملکرد داده ستانده (IIM^1) را با توجه به مدل اقتصادی لئونتیف [16, 17] توسعه داده‌اند. در این مدل عدم عملکرد شریان‌های حیاتی در ارتباط با یکدیگر مدنظر قرار می‌گیرد [18]. بر این اساس مدل عدم عملکرد داده-ستانده دینامیکی ($DIIM^2$) برای کمی کردن اثربخشی استراتژی‌های مقاوم‌سازی بخش‌های مختلف اقتصادی وابسته به یکدیگر و شریان‌های حیاتی توسعه داده شده است [19, 20]. از این مدل‌ها برای مطالعات روی حملات تروریستی و امنیت مجازی [19] و مطالعاتی در ارتباط با سوانح طبیعی [21] استفاده شده است. همچنین مدل داده-ستانده دینامیکی که بر مبنای مدل IIM با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود است به وسیله بارکر و هیمز در سال ۲۰۰۹ برای کاربردهای تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک به کار گرفته شده است [22].

با توجه به مرور مطالعات فوق، داشتن ابزاری برای تخصیص بهینه بودجه مقاوم‌سازی بین شریان‌های مختلف با لحاظ اندرکنش بین آنها ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش چگونگی توزیع بودجه مقاوم‌سازی لرزه‌ای در بین زیر ساخت‌های مختلف شهری با استفاده از مینیمم سازی خسارات، هزینه‌های استراتژی مقاوم‌سازی و حساسیت نسبت به پارامترهای ماتریس داده ستانده ارائه می‌شود.

آمدن خسارات غیر مستقیم می‌شود. همچنین وابستگی متقابل شریان‌ها به یکدیگر باعث افزایش خسارت می‌شود. مقاوم سازی شریان‌های حیاتی در مواجهه با حوادث و سوانح امری اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. یکی از مسائلی که در سطح کلان مطرح می‌شود، اقتصاد مقاوم‌سازی است. در این پژوهش با استفاده از مدل عدم عملکرد دینامیک داده-ستانده، عدم عملکرد شریان‌های آب، حمل و نقل، گاز، برق و مخابرات بدون مقاوم‌سازی (در وضعیت موجود) در اثر وقوع زلزله گسل شمال تهران با بزرگای $7/2$ به عنوان زلزله مبنا محاسبه شده است. سپس استراتژی بهینه از نظر اقتصادی با مینیمم سازی سه تابع هدف هزینه استراتژی، حساسیت و هزینه اجرای استراتژی انتخاب می‌شود.

۲- مرور ادبیات

جوامع مدرن وابستگی قابل ملاحظه‌ای به شریان‌های حیاتی دارند. برای درک بهتر شریان‌های حیاتی و وابستگی آن‌ها به یکدیگر، مدل‌سازی وابستگی شریان‌های حیاتی به ابزاری در بهبود برنامه‌ریزی‌ها و طراحی‌ها، تأمین و نگهداری و تصمیم‌گیری در شرایط اضطراری تبدیل شده است [1]. اندرکنش بین شریان‌های حیاتی را می‌توان به صورت خطی و پیچیده دسته‌بندی نمود. اندرکنش‌های خطی، اندرکنش‌های مورد انتظار و کاملاً محسوس هستند حتی اگر برنامه‌ریزی شده نباشند. در مقابل، اندرکنش‌های پیچیده آن‌هایی هستند که غیرمنتظره یا غیر برنامه‌ریزی شده بوده و به سرعت قابل درک نیستند [2]. به‌طور کلی روش‌های ارزیابی آثار وابستگی زیرساخت‌ها با استفاده از روش‌های مختلف مانند تحلیل شبکه‌ای، روش احتمالاتی، مدل‌سازی عامل محور و تحلیل داده-ستانده لئونتیف قابل محاسبه است [3-7]. امیدوار و همکاران در پژوهشی اندرکنش شریان آب و برق را برای یکی از مناطق کلانشهر تهران با استفاده از روش پتری نت و زنجیره مارکوف بررسی کردند [8]. اسکندری و همکاران میزان شاخص سرویس دهی با در نظر

1 Inoperability Input Output Model

2 Dynamic Inoperability Input Output Model

۳- متدولوژی

۳-۱- مدل داده-ستانده لئونتیف

اولین بحث مدل داده-ستانده لئونتیف در مورد اقتصاد در سال ۱۹۳۶ چاپ شد که یک توصیف عددی از ساختار اقتصادی آمریکا ارائه می‌داد [23]. دیدگاه لئونتیف، که جایزه نوبل اقتصاد را در ۱۹۷۳ دریافت کرد [17, 18] در مورد ساختارهای اقتصادی با اجزای صنعتی جداگانه است که با داد و ستد اجناس به هم مرتبط می‌شوند. انتقال اجناس (به واحد پول) از بخش i (بخش فروشنده) به بخش j (بخش خریدار) با Z_{ij} نشان داده می‌شود. جدول (۱) جریان کالا، تقاضا، ارزش افزوده و خروجی کل را در اقتصادی متشکل از N بخش اقتصادی به طور کلی نشان می‌دهد. توجه کنید که قسمت N بعدی هاشور خورده در جدول (۱) تحت عنوان Z یا همان، ماتریس جریان‌های کالا است.

جدول ۱. جریان کالا در بخش‌های مختلف صنعت

Sectors	1	2	j	N	Final demand	Total input
1	Z_{11}	Z_{12}	Z_{1j}	Z_{1n}	C_1	X_1
2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{2j}	Z_{2n}	C_2	X_2
i	Z_{i1}	Z_{i2}	Z_{ij}	Z_{in}	C_i	X_i
N	Z_{n1}	Z_{n2}	Z_{nj}	Z_{nn}	C_n	X_n
Added value	W_1	W_2	W_j	W_n		
Total output	X_1	X_2	X_j	X_n		

Table 1. Stock flow in different sectors of industry

فرض بر این است که یک سیستم اقتصادی، از N بخش یا صنعت تشکیل شده که باهم ارتباط درونی دارند (جریان کالا) و هر صنعت، خود به تنهایی محصولاتی تولید می‌کند.

صنعت یا بخش یادشده، نیازمند نیروی کار، ورودی کالا از منابع خارجی و نیز کالا از صنایع مرتبط است. هر صنعت باید کالایی به مقدار کافی تولید کند تا بتواند علاوه بر پاسخ گویی به تقاضای سایر بخش‌های مرتبط، (از صنایع دیگر در گروه) تقاضای خارجی (مانند اقتصاد خارجی و صنایع خارج از گروه) را نیز پاسخ گو باشد.

رابطه بین خروجی کل بخش i (x_i) و تقاضای نهایی آن (c_i) و جریان کالا در تمام بخش‌ها در رابطه (۱) بیان شده است. این رابطه نتیجه جمع سطر i ام جدول (۱) است.

$$(1)$$

$$x_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{in} + c_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} + c_i$$

نسبت ورودی z_{ij} به خروجی x_j ، ضریب تکنیکی نامیده می‌شود (a_{ij}).

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \Rightarrow z_{ij} = a_{ij}x_j \quad (2)$$

حال با استفاده از ضرایب تکنیکی رابطه (۲)، رابطه (۱) را می‌توان به شکل رابطه (۳) بازنویسی کرد.

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + c_i \quad (3)$$

اگر برای تمام بخش‌های اقتصاد رابطه (۳) نوشته شود، فرم ماتریسی آن به صورت رابطه (۴) حاصل می‌شود که در آن X ماتریس خروجی کل، A ماتریس ضرایب تکنیکی و C ماتریس تقاضا کل است. در سراسر مقاله ماتریس‌ها و بردارها با حروف ضخیم^۱ نمایش داده شده اند.

$$X = AX + C \quad (4)$$

رابطه (۴) مدل اقتصادی داده-ستانده اولیه را نشان می‌دهد که رابطه‌ی داد و ستد مالی بین بخش‌های مختلف اقتصاد برقرار کرده است.

۳-۲- مدل عدم عملکرد دینامیکی داده-ستانده

باوجود نیاز مشاهده شده به مدل‌سازی زمان احیا بعد از زلزله و اندازه‌گیری اثرگذاری استراتژی‌های مدیریت ریسک روی زمان احیا، تلاش‌های کمی برای استفاده از مدل‌های داده-ستانده دینامیک برای مدل‌سازی احیا^۲ پس از زلزله انجام شده است. مدل عدم عملکرد دینامیکی داده-ستانده (DIIM^۳) که بحث آن در [19 and 20] یافت می‌شود در رابطه (۵) ارائه شده است.

$$q(t) = K[A^*q(t) + C^*(t) - q(t)] \quad (5)$$

در این رابطه، $q(t)$ و $C^*(t)$ به ترتیب نشان دهنده بردار عدم عملکرد و اختلال در تقاضا برای یک زمان مشخص (t) هستند.

1 Bold

2 Recovery

3 Dynamic Inoperability Input Output Model

دینامیکی عدم عملکرد داده-ستانده^۱ (U-DIIM)، استراتژی بهینه ای را انتخاب می‌کند که در آن تابع حساسیت کمینه شود. در واقع، حساسیت خسارت کل نسبت به پارامترهای وابستگی‌های متقابل بخش‌های مختلف شریان‌ها، یک منبع بالقوه‌ی خطا در مدل‌سازی است. عدم قطعیت بررسی شده در این پژوهش مرتبط با انتخاب دقیق پارامترهای مدل وابستگی متقابل در سیستم است. در روش پیشنهادی کمینه‌سازی حساسیت مدل یکی از هدف‌های فرآیند بهینه‌سازی است.

محاسبه‌ی شاخص حساسیت، φ_Z ، مطابق رابطه (۹)، حساسیت ضرر اقتصادی کل را به تغییر در جریان کالا منعکس می‌کند [22].

$$\varphi_Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial Q}{\partial z_{ij}} \right]^2 \quad (9)$$

با فرض $h(0)$ به عنوان هزینه اجرای استراتژی، مدل با هدف کمینه‌کردن خسارت اقتصادی (Q) حساسیت به خسارت اقتصادی (φ_Z) و هزینه اجرا استراتژی $h(0)$ شکل می‌گیرد. انجام این مهم با کمینه‌کردن متغیرهای تصمیم‌گیری $\mathbf{C}^*(t)$ ، $\mathbf{q}(0)$ و \mathbf{T} (یک بردار n در ۱ که زمان احیا را نشان می‌دهد) صورت می‌پذیرد.

تابع هدف در رابطه (۱۰) ارائه شده است. همچنین فرآیند استفاده از مدل پیشنهادی به منظور مقایسه استراتژی‌های مقاوم-سازی در شکل (۱) آمده است. در رابطه (۱۰) ترم‌های اول، دوم و سوم در تابع هدف به ترتیب مربوط به خسارت اقتصادی غیرمستقیم مربوط به شریان‌ها، حساسیت و هزینه مقاوم‌سازی شریان‌ها است. که برای استراتژی‌های مختلف محاسبه می‌شود و از بین آن‌ها استراتژی بهینه معرفی می‌شود.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- کلیات

در این پژوهش با توجه به اهمیت تهران به عنوان مرکز سیاسی و اقتصادی کشور و همچنین خطرپذیری بالای وقوع زلزله در آن، به بررسی خسارات غیرمستقیم وارد شده بر شریان‌های

K ماتریس قطری برگشت پذیری با ضرایب بازگشت پذیری k_1, \dots, k_n در قطر است. ضریب k_i توانایی بخش i را برای برگشت به شرایط مطلوب به دنبال یک اختلال نشان می‌دهد، که در اینجا مقادیر بزرگتر k_i نشان دهنده پاسخ سریع تر توسط بخش i است که چگونگی محاسبه آن در رابطه (۶) نشان داده شده است [22].

$$K_i = \frac{\ln \left[\frac{q_i(0)}{q_i(T_i)} \right]}{T_i} \quad (6)$$

که در این رابطه $q_i(0)$ عدم عملکرد اولیه شریان i و $q_i(T_i)$ عدم عملکرد شریان i در زمان T_i است.

همچنین ماتریس \mathbf{A}^* ماتریس وابستگی‌های متقابل نرمال شده است که میزان وابستگی‌های متقابل اقتصادی بین بخش‌ها اقتصاد را تشریح می‌کند این ماتریس از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$\mathbf{A}^* = [\text{diag}(\mathbf{X})]^{-1} \quad (7)$$

یکی از موارد رایج در استفاده از تحلیل DIIM، خسارت اقتصادی کل در طول زمان است که این خسارت در حقیقت در اثر عدم عملکرد بخش‌های مختلف در دوره زمانی مورد نظر به وجود آمده است. لیان و همیز در سال ۲۰۰۶ محاسبه خسارت اقتصادی کل (Q) را معرفی کردند [20]. خسارت اقتصادی کل از مجموع خسارات اقتصادی برای زیر بازه‌های زمانی مرتبط با زمان کل بدست می‌آید. خسارت اقتصادی نشان دهنده‌ی مجموع خسارات کل بخش‌های مختلف اقتصادی در اثر عدم عملکرد آن‌ها است. خسارت اقتصادی کل از رابطه (۸) قابل محاسبه است.

$$Q = (\mathbf{X})^T \sum_{j=1}^T \mathbf{q}(j) \quad (8)$$

۳-۳- تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای ماتریس وابستگی متقابل

بارکر و همیز یک راهبرد برای ارزیابی عدم قطعیت در مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل شریانی توسط DIIM ارائه کرده اند. این راهکار تحت عنوان تحلیل عدم قطعیت در مدل

حیاتی شهر تهران در اثر زلزله و مقایسه استراتژی‌های مقاوم-سازی در برابر آن به منظور تشریح روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

با توجه به مطالعات موجود در خصوص گسل های تهران و سناریوهای مختلف زلزله در این شهر مانند مطالعات جایکا به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی در انتخاب استراتژی‌ها و اولویت بندی شریان‌ها در بازسازی، زلزله ۷/۲ ریشتری گسل شمال تهران به عنوان سناریوی زلزله در نظر گرفته شده است [24]. لازم به ذکر است بر اساس مطالعات تاکادا گسل شمال تهران دارای بیشترین پتانسیل خطر در بین گسل های شهر تهران است [25].

به دلیل گسترش و پیچیدگی شریان‌های حیاتی و عدم دسترسی به اطلاعات مربوط به تمام شریان‌ها، در این پژوهش تنها شریان‌های آب، برق، حمل‌ونقل، گاز و مخابرات بررسی شدند. این شریان‌ها در مواجهه با زلزله دچار آسیب دیدگی خواهند شد و نیازمند مقاوم‌سازی هستند. برای بدست آوردن سطوح

خسارت و زمان احیا برای هر شریان با توجه به عدم وجود آیین نامه بومی از مرجع [12] استفاده شده است. هر شریان دارای تعریف سطوح خسارت مخصوص به خود است. منحنی احیا برای هر سطح خسارت مشخص تابعی پیوسته است و زمان احیا یک متغیر تصادفی است که از توزیع نرمال تبعیت می‌کند [12].

شریان‌ها در وضعیت موجود در برابر زلزله مقداری مقاومت اولیه دارند. در صورت بروز زلزله سناریو هر کدام از شریان‌ها مقداری از عملکرد خود را از دست می‌دهند. این عدم عملکرد، عدم عملکرد در وضعیت موجود نامیده می‌شود و در واقع وضعیت شریان‌ها بعد از زلزله را در صورت انجام ندادن هیچ-گونه مقاوم‌سازی نشان می‌دهد. جدول (۲) عدم عملکرد شریان‌ها در وضعیت موجود (بر اساس نظر خبرگان و مطالعات جایکا) و رابطه اقتصادی شریان‌های آب، حمل و نقل، گاز، برق و مخابرات را نشان می‌دهد [24-26].

(۱۰)

$$\min_{q(0), T, c^*(t)} \left[\sum_{i,j \in S} \left[\frac{\partial}{\partial z_{ij}} (\mathbf{X})^T \sum_{t=1}^{\tau} \left[\{\mathbf{I} + \mathbf{K}[\text{diag}(\mathbf{X})]^{-1} \mathbf{Z} - \mathbf{K}\}^t \mathbf{q}(0) + \sum_{l=1}^{t-1} \{\mathbf{I} + \mathbf{K}[\text{diag}(\mathbf{X})]^{-1} \mathbf{Z} - \mathbf{K}\}^l \mathbf{K} \mathbf{C}^*(t-1-l)\} \right]^2 \right. \right. \\ \left. \left. h\{\mathbf{q}(0), T, c^*(0), c^*(1), \dots, c^*(\tau-1)\} \right] \right]$$

جدول ۲. عدم عملکرد شریان‌ها در سناریو وضعیت موجود و میزان وابستگی شریان‌های به یکدیگر از نظر اقتصادی [27].

Reduction in the initial performance $q_i(0)$	Economic interaction - million Rials per day					infrastructures
	Comunication	Transportation	Water	Gas	Electricity	
0.78	576.0438	72.25479	108.6329	89.09863	2655.419	Electricity
0.35	60.79452	35.88493	26.05479	2118.693	2191.348	Gas
0.56	11.70411	2.410959	195.1014	2.134247	0.871233	Water
0.60	1283/767	1488.97	7.268493	91.38082	21.89863	Transportation
0.80	30846.91	58.2274	20.63836	61.05479	23.34521	Comunication

Table 2. The inoperability of the infrastructures in the do nothin scenario and the degree of dependence of the infrastructures to each other economically [27].

شکل ۱. فرآیند استفاده از مدل DIIM به منظور مقایسه استراتژی های بودجه بندی

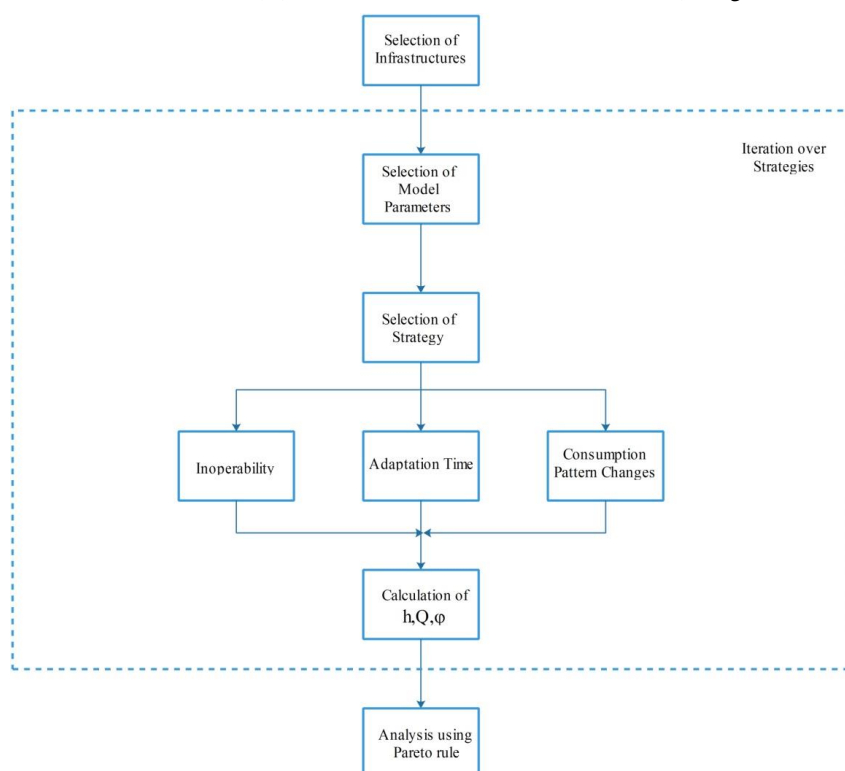


Fig. 2. The process of using the DIIM model to compare budgeting strategies

۴-۲- مقایسه استراتژی های مقاوم سازی

همان گونه که اشاره شد، پس از وقوع زلزله شریان ها مقداری از عملکرد خود را از دست می دهند که این مقدار را عدم عملکرد شریان می نامیم. میزان عدم عملکرد شریان ها در اثر وقوع زلزله در وضعیت موجود (بدون مقاوم سازی) در جدول (۳) ارائه شده است. وضعیت موجود به عنوان سناریو ۱ فرض می شود.

شکل ۲. منحنی وضعیت هزینه مقاوم سازی شریان آب نسبت به هزینه

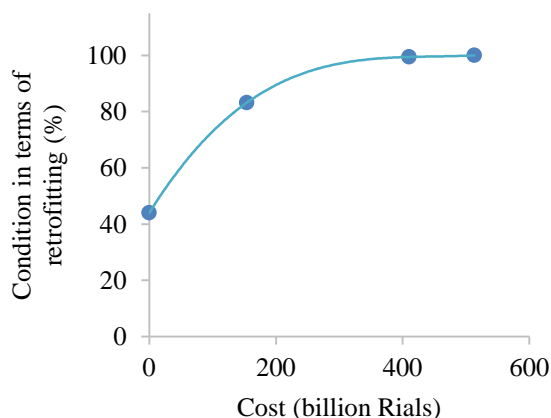


Fig. 2. The curve of the cost of retrofitting the water infrastructure

هزینه مورد نیاز برای مقاوم سازی شریان ها با استفاده از نظر کارشناسان و هزینه های ساخت اجزای شریان محاسبه شده است. این هزینه برای شریان آب موجود است [24]. هزینه مقاوم سازی کامل هر شریان، با انجام مصاحبه با کارشناسان مربوطه و تحلیل و بررسی اصول مقام سازی و تجهیزات اضطراری به دست آمده است. باید توجه داشت که درصد مقاوم سازی به صورت خطی متناظر با درصد هزینه کرد برای مقام سازی نیست. به این معنا که در صورت مقاوم سازی ۳۰ درصدی یک شریان، هزینه مقاوم سازی برابر ۳۰ درصد هزینه مقاوم سازی ۱۰۰ درصدی نیست. با استناد به اصل پارتو نیز می توان چنین انتظار داشت که با ۳۰٪ هزینه مقاوم سازی، می توان به ۷۰٪ مقاوم سازی دست یافت. مدل بکار گرفته شده برای تهیه منحنی وضعیت مقاوم سازی-هزینه مقاوم سازی در این پژوهش، از قانون ۷۰ به ۳۰ تبعیت می کند. برای نمونه مدل سازی هزینه بر اساس درصد مقاوم سازی - عملکرد شریان آب در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۳. مقادیر عدم عملکرد اولیه شریان‌ها در استراتژی‌ها پنجگانه مقاوم‌سازی

Cost of retrofitting (billion Rials)	The inoperability of infrastructures					Strategy
	Transportation	Communication	Gas	Electricity	Water	
-	%60	%80	%35	%78	%56	1
6850	%45	%58	%28	%57	%42	2
15060	%30	%36	%21	%36	%28	3
32380	%5	%5	%5	%5	%5	4
47146	%1	%1	%1	%1	%1	5

Table 3. The initial inoperability of the infrastructures in the retrofitting strategies

برای محاسبه C^* یا تغییر تقاضای مصرف، از معادله تقاضای نهایی واقعی - تقاضای نهایی برنامه ریزی شده $C^* = \frac{\text{تقاضای نهایی واقعی} - \text{تقاضای نهایی برنامه ریزی شده}}{\text{سطح تولیدات برنامه ریزی شده}}$ در مطالعات بارکر استفاده شده است که الگوی تغییر کاهش تقاضای مصرف را به صورت نزولی در نظر می‌گیرد. به عبارت دیگر، اغتشاش در تقاضایی که بعد از زلزله در سیستم وجود دارد، به صورت نزولی کم می‌شود تا از بین برود [22].

جدول (۴) داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل را نشان می‌دهد. این داده‌ها شامل عدم عملکرد اولیه $q_i(0)$ ، زمان احیا T_i و اختلال در تقاضا C^* است.

نتایج تحلیل این سناریوها شامل خسارات اقتصادی و شاخص حساسیت با استفاده از مدل ارائه شده به روش داده-ستانده دینامیک (DIIM) در جدول (۵) نشان داده شده است. برای تحلیل نتایج مدل از شاخص‌های کاهش خسارت نسبت به هزینه استراتژی و کاهش حساسیت نسبت به هزینه استراتژی که به ترتیب بر اساس روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند و از تحلیل پارتو که در مسائل بهینه سازی چند متغیره کاربرد دارد، استفاده شده است.

$$(14) \quad \text{کاهش خسارت نسبت به هزینه استراتژی} =$$

$$\frac{\text{خسارت وضعیت موجود} - \text{خسارت استراتژی}}{\text{هزینه استراتژی}}$$

$$(15) \quad \text{کاهش حساسیت نسبت به هزینه استراتژی} =$$

$$\frac{\text{حساسیت وضعیت موجود} - \text{حساسیت استراتژی}}{\text{هزینه استراتژی}}$$

شاخص‌های کاهش خسارت نسبت به هزینه استراتژی و کاهش حساسیت نسبت به هزینه استراتژی برای استراتژی‌های

این سناریو با کمک کارشناسان مربوط به هر شریان بررسی شده و عدم عملکرد شریان‌ها به طور جداگانه به دست آمده است. در استراتژی ۲ فرض بر این است که به میزان ۲۵ درصد عملکرد هر شریان نسبت به وضعیت موجود بهبود می‌یابد. بدین معنا که با انجام اقداماتی در استراتژی ۲ شریان‌ها به میزان ۲۵ درصد نسبت به وضعیت موجود، در برابر زلزله مقاوم سازی می‌شوند. همچنین در استراتژی ۳ فرض بر بهبود ۵۰ درصدی عملکرد شریان‌ها نسبت به استراتژی ۱ (وضعیت موجود) است. در استراتژی ۴ وضعیت مقاوم‌سازی به گونه‌ای فرض می‌شود که تمامی شریان‌ها به میزان ۵ درصد از عملکرد خود را در اثر زلزله از دست می‌دهند. در استراتژی ۵ به منظور برآورد جامعی از خسارات وارد شده و هزینه انجام استراتژی، فرض می‌شود که کلیه شریان‌ها به گونه‌ای مقاوم‌سازی شده‌اند که به هنگام وقوع زمین لرزه، تا ۹۹٪ عملکرد طبیعی خود را حفظ می‌کنند، به این معنا که در اثر زلزله تنها ۱ درصد از عملکرد خود را از دست می‌دهند. مقادیر عدم عملکرد اولیه (میزان از دست دادن عملکرد پس از وقوع زلزله) برای شریان‌های آب، گاز، حمل و نقل، برق و مخابرات در استراتژی‌های ذکر شده و هزینه اجرای هر استراتژی با استفاده از مدل‌سازی هزینه تشریح شده در جدول (۳) ارائه شده است.

برای به دست آوردن اختلال در تقاضای مردم در استفاده از شریان‌ها پس از زلزله، فرض می‌شود که در مدت احیای شریان، این تقاضا به صورت پله‌ای و در سه بازه زمانی ۱ تا ۳۵ روز بعد از زلزله، ۳۶ تا ۷۵ روز و در نهایت ۷۶ تا ۱۰۵ روز بعد از زلزله تغییر یابد.

۱ تا ۵ در جدول (۵) ارائه شده‌اند. با توجه به این شاخص‌ها استراتژی ۲ بهینه‌ترین حالت مقاوم سازی در مقابل زلزله در بین ۵ استراتژی بررسی می‌شود.

جدول ۴. عدم عملکرد شریان‌ها و مدت احیا در استان تهران

Demand perturbation			Recovery Time	Reduction in the initial performance	Infrastructure	Strategy
C* (76)... C* (105)	C* (36)... C* (75)	C* (0)... C* (35)	T _i (day)	q _i (0)		
0.1	0.2	0.35	60	0.78	Electricity	۱
0.08	0.1	0.23	20	0.35	Gas	
0.1	0.2	0.38	55	0.56	Water	
0.2	0.3	0.4	90	0.6	Transportation	
0.24	0.3	0.42	105	0.8	Comunication	
0.05	0.15	0.29	20	0.53	Electricity	۲
0.03	0.14	0.2	15	0.25	Gas	
0.03	0.19	0.28	15	0.39	Water	
0	0.008	0.37	80	0.41	Transportation	
0.1	0.2	0.35	80	0.55	Comunication	
0.08	0.1	0.25	7	0.29	Electricity	۳
0.03	0.13	0.19	5	0.15	Gas	
0.05	0.11	0.23	10	0.22	Water	
0.1	0.19	0.32	10	0.23	Transportation	
0.09	0.11	0.3	10	0.30	Comunication	
0.01	0.08	0.15	5	0.05	Electricity	۴
0.01	0.08	0.12	5	0.05	Gas	
0.02	0.09	0.15	5	0.05	Water	
0.01	0.09	0.16	5	0.05	Transportation	
0.02	0.09	0.16	5	0.05	Comunication	
0.01	0.08	0.15	0.5	0.01	Electricity	۵
0.01	0.08	0.12	0.5	0.01	Gas	
0.02	0.09	0.15	0.5	0.01	Water	
0.02	0.09	0.16	0.5	0.01	Transportation	
0.02	0.09	0.16	0.5	0.01	Comunication	

Table 4. The inoperability and recovery time of the infrastructures

جدول ۵. خسارات اقتصادی غیر مستقیم و شاخص حساسیت در استراتژی های پنجگانه

Reduction of economic losses to retrofitting costs	Reduction of sensivity index to retrofitting costs	Sensivity index	Economic loss (Billion Rials)	Strategy
-	-	48293	8510	1
3.66	0.3996	23195	5773	2
2.15	0.3089	15847	3859	3
1.35	0.1977	4558	2109	4
1.02	0.1766	0	184	5

Table 5. The indirect loss and sensitivity index in the retrofitting strategies

شکل ۳. نمودار پارتو برای مقایسه استراتژی های مقاوم سازی شریان ها در برابر زلزله

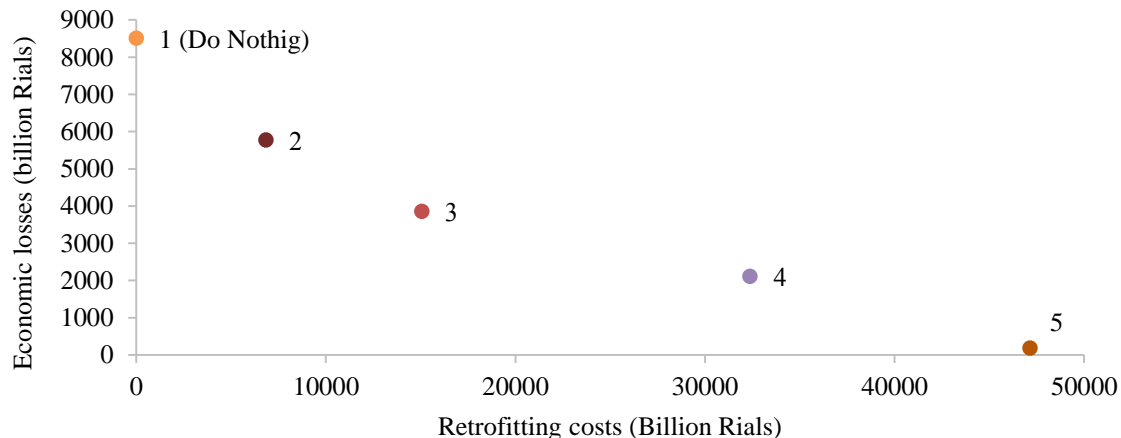


Fig 3. The pareto diagram for comparison of the seismic retrofitting strategies

استراتژی منتخب از دیدگاه اقتصادی برگزیده شد. مطالعه موردی صورت گرفته در این مقاله برای نشان دادن قابلیت‌ها، کاربردها، فرآیندها و معرفی لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در متدولوژی پیشنهادی مورد تحلیل قرار گرفته است. روش پیشنهادی می‌تواند در فراهم نمودن بستر تصمیم‌سازی در کنار روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و چند هدفه با لحاظ نمودن سایر ابعاد خسارت نظیر خسارات اجتماعی و زیست محیطی کاربرد بنیادی داشته باشد.

در روش پارتو استراتژی‌ها بر اساس دو متغیر با یکدیگر مقایسه می‌شوند و استراتژی که به مبدا نزدیک‌تر باشد، استراتژی بهینه است. در این روش انتخاب متغیرها براساس نیاز تصمیم‌گیران صورت می‌گیرد. شکل (۳) نمودار پارتو برای متغیرهای خسارت اقتصادی و هزینه مقاوم‌سازی را نشان می‌دهد. بر این اساس نیز استراتژی ۲ کمترین فاصله را با مبدا دارد. پس استراتژی شماره ۲ استراتژی بهینه در بین ۵ استراتژی بررسی می‌شود.

References

- [1] Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability engineering & System safety*, 121, 43-60.
- [2] Tavakoli Sani M. S. (2011). Study of interdependency between lifeline networks using Graph Theory and I-O Leontief Matrix, A Thesis submitted for the degree of Master of Science in Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran (in Persian).
- [3] Hojjati Malekshah M. (2010). Seismic Performance Analysis of Critical Infrastructures considering Interaction Effects, A Thesis submitted for the degree of Master of Science in Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran (in Persian).
- [4] Naeimi, M. (2010). Application of Fault Tree and Shortest Path Method Algorithm in Studying seismic interaction of lifelines, case study: power and water

۶- مراجع

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل داده-ستانده دینامیکی و آنالیز عدم قطعیت و حساسیت با کمینه سازی هزینه اجرای استراتژی، خسارات غیر مستقیم ناشی از زلزله و حساسیت گزینه بهینه به منظور مقاوم‌سازی شریان‌ها حیاتی با در نظر گرفتن اندرکنش آن‌ها انتخاب شد. برای مقایسه این استراتژی‌ها از دو روش محاسبه کاهش خسارت اقتصادی نسبت به هزینه اجرای آن استراتژی و کاهش حساسیت نسبت به هزینه استراتژی و روش پارتو استفاده شده است. بر این اساس استراتژی ۲ که نشان دهنده مقاوم سازی ۲۵ درصدی شریان‌ها نسبت به شرایط وضعیت موجود آن‌ها است به عنوان

- Review of Economics and Statistics, 18(3): 105-125.
- [17] Leontief, W. W. (1966). Input-output economics, Oxford University Press, New York.
- [18] Haimes, Y.Y., and Jiang, P. (2001). Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures, ASCE Journal of Infrastructure Systems, 7(1): 1-12.
- [19] Haimes, Y. Y., Horowitz, B. M., Lambert, J. H., Santos, J. R., Crowther, K., and Lian, C. (2005). "Inoperability input-output model for interdependent infrastructure sectors. I: Theory and methodology." J. Infrastruct. Syst., 11_2_, 67-92.
- [20] Lian, C., and Haimes, Y. Y. (2006). "Managing the risk of terrorism to interdependent infrastructure systems through the dynamic inoperability input-output model." Syst. Eng., 9_3_, 241-258.
- [21] Anderson, C.W., J.R. Santos, and Y.Y. Haimes; A risk-based input-output methodology for measuring the effects of the August, (2003) Northeast Blackout; Economic Systems Research; 19(2), 2007, 183-204.
- [22] Barker, K. A. (2009). Uncertainty Analysis of Interdependencies in Dynamic Infrastructure Recovery: Applications in Risk-Based Decision Making . JOURNAL OF INFRASTRUCTURE SYSTEMS , ©ASCE.
- [23] Dorfman, R.(1973). "Wassily Leontief's contribution to economics." Swed. J. Econ., 75_4_, 430-449.
- [24] JICA, C. (2000). The study on seismic microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran. Pacific Consultants International Report, OYO Cooperation, Japan.
- [25] TAKADA, S (2004) .DISLOCATION AND STRONG GROUND MOTION ZONING UNDER SCENARIO FAULTS FOR LIFELINES .13th World Conference on Earthquake Engineering) ,Paper no.12, Vancouver.
- [26] Moghimi S. (2010). Optimal Selection of Recovery Strategies after Earthquakes considering the Interdependencies of Infrastructure Using Dynamic Leontief Input Output Model, A Thesis submitted for the degree of Master of Science in Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran (in Persian).
- [27] Central Bank of the Islamic Republic of Tehran (2014). Input-Output Tables of Iran Economy in 2004, Economic Research and Policy Department (in Persian).
- networks, A Thesis submitted for the degree of Master of Science in Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran (in Persian).
- [5] Haimes, Y.Y., (2009). Risk Modeling, Assessment, and Management. 3rd Edition. John Wiley & Sons.
- [6] Haimes et al., Y. (2007). Analysis of Interdependencies and Risk in Oil & Gas Infrastructure Systems. Virginia: Cebter for Risk Management of Engineering Systems.
- [7] Panzieri, S., Setola, R., and Ulivi, G. (2005). An approach to Model Complex Interdependent Infrastructures. 16th IFAC World Congress, Czech Republic.
- [8] Omidvar, B., Hojjati Malekshah, M. H., & Omidvar, H. (2014). Failure risk assessment of interdependent infrastructures against earthquake, a Petri net approach: case study—power and water distribution networks. Natural hazards, 71(3), 1971-1993.
- [9] Eskandari, M., Omidvar, B., Tavakoli Sani, M. S. (2015), Loss estimation of interdependent infrastructures in targeted attacks, Journal of Emergency Management, 3(93) , 19-30(in Persian).
- [10] Naeimi, M., & Omidvar, B. (2013), Calculation of electric power effect on water network, Journal of Emergency Management, 1(2) , 17-33 (in Persian).
- [11] Rose, Adam; Benavides, J; Chang S.E.; Szczesniak, P and Lim,D. (1997). The regional Economic Impact of an Earthquake: Direct and Indirect Effects of Electricity Lifeline Disruptions. Journal of Regional Science. 37(3): 437-458.
- [12] Federal Emergency Management Agency (1999). HAZUS 99 Technical Manual. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- [13] Chang, S.E.; Shinozuka, Masanobu and Moore, James E. II (2000). Probabilistic earthquake scenarios: extending risk analysis methodologies to spatially distributed systems. Earthquake Spectra .16(3): 557-572.
- [14] Shinozuka, M.; Rose, A. and Eguchi, R.T. (1998). Engineering and Socioeconomic Impact of Earthquake – an analysis of electricity lifeline disruptions in the New Madrid area- (MCEER Monograph Series 2). Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- [15] Percoco .(2006) .A note on the inoperability input-output model .Risk Analysis.
- [16] Leontief, W. (1936). Quantitative input and output relations in the economic system of the United States,

Optimal Selection of Seismic Retrofitting Strategy of Interdependent Infrastructures using Uncertainty Dynamic Inoperability Input-Output Model

B. Omidvar¹, S. Moghimi^{2*}, S. Kakaie²

1- Associate Prof., Faculty of Environment, University of Tehran

2- M.Sc. of Natural Disaster Management., Faculty of Environment., University of Tehran

*bomidvar@ut.ac.ir

Abstract:

Optimal financial resource allocation to the seismic retrofitting of the infrastructures and specifying their priority are considered as prominent issues in the macro scale decision making process. As the optimum strategy is adopted and the budget allocation is performed with the appropriate priority, it is expected that a significant loss reduction is achieved. When the financial resources are limited, allocating based on the proper priority seems to be more vital.

Urban development has been rapidly progressing in Tehran without the development of proper disaster prevention systems against potential earthquakes. It is urgently necessary to prepare a regional/urban earthquake disaster prevention plan in order to mitigate possible seismic damages in Tehran. The purpose of the study was to understand how the failure of one infrastructure or any of its elements propagates to other infrastructures in order to implement management policies that can mitigate the consequences. In this work, Tehran is initially introduced in aspects of its active faults zone around the city, and its probable earthquake scenarios.

In this work, the optimum strategy for retrofitting the infrastructure networks as the water, transportation, communication, gas, and power infrastructures is investigated using Uncertainty Dynamic Inoperability Input-Output Model (U-DIIM). This optimum strategy is adopted against the earthquake impacts in terms of the indirect economic losses, sensitivity to the parameters of the commodity flow matrix and cost of retrofitting strategy.

According to the current situations of infrastructures in Tehran, the inoperability of the lifelines, were gathered from the lifeline documents with the help of Tehran Disaster Mitigation and Management Organization- Tehran Municipality, based on the North Tehran fault earthquake scenario. Strategy 1, referred as the "Do Nothing" strategy in this work which indicates the current situation of lifelines in Tehran Province. In summary, strategies are based on different levels of the reinforcement of the structures and hardening strategies for infrastructures. The cost of implementation, recovery time, and perturbation after earthquakes calculated for each strategy. By minimizing the total economic loss, sensitivity to economic loss parameters and cost of implementation of strategies, the best scenario is selected for the recovery strategy.

Therefore, the indices employed in this research include reducing the economic losses and also the sensitivity with respect to the costs associated with the conduction of the strategy. The Pareto method is also used in this work to select the optimal retrofitting strategy. The results reveal that increasing the seismic performance of the infrastructures by 25% is the optimum retrofitting strategy from the economic point of view. Following this strategy, the ratio of economic loss reduction to the strategy implementation costs and also the ratio of the sensitivity reduction to the strategy implementation costs are 0.3996 and 3.66, respectively. It is worthwhile to note that all economic interactions between the infrastructures are taken into account in the research.

Keywords: Infrastructure, Earthquake, Retrofitting, U-DIIM, Prioritizing retrofitting strategy.