

تاب آوری لرزه ای شبکه حمل و نقل شهری در فاز بازیابی کامل

یاسر حسینی^۱

دانشجوی دکتری زلزله دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران

hosseini@email.kntu.ac.ir

رضا کرمی محمدی

دانشیار گروه مهندسی زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران

rkarami@kntu.ac.ir

چکیده

تاب آوری لرزه ای شبکه حمل و نقل شهری نقش مهمی در تاب آوری جامعه پس از وقوع زلزله ایفا می کند. تاب آوری شبکه حمل و نقل در دو فاز واکنش اضطراری و فاز بازیابی کامل مورد بررسی قرار می گیرد. در تاب آوری فاز واکنش اضطراری هدف رفع انسداد شبکه برای اجرای عملیات امداد و نجات می باشد و در فاز بازیابی کامل، بازگشت شبکه به عملکرد نرمال مطرح است. پلها به عنوان اصلی ترین و آسیب پذیر ترین المان ها هستند که برای بازگشت شبکه به وضعیت قبل از رخداد مخرب لرزه ای باید بازیابی شوند. بنابراین در فاز بازیابی کامل بازگشت شبکه پلها به وضعیت عادی مورد بررسی قرار می گیرد. در این پژوهش به معرفی مفاهیم مرتبط با تاب آوری لرزه ای و پارامترهای موثر بر آن پرداخته شده است و اندیس تاب آوری بر اساس سطح نمودار عملکردی سیستم در مواجهه با عامل مخرب و فرایند بازیابی معرفی شده است. سپس تاریخچه ای از عملکرد سیستم حمل و نقل درون شهری و آسیب های وارده بر پلها در زلزله های تاریخی گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت به مرور پژوهش های صورت گرفته در زمینه تاب آوری شبکه حمل و نقل شهری در فاز بازیابی کامل پرداخته شده است. و در نهایت زمان سفر شبکه به عنوان مهم ترین شاخص عملکردی شبکه در بهینه سازی عملیات بازیابی معرفی شده است.

واژه های کلیدی: تاب آوری شبکه حمل و نقل، بازیابی شبکه پل، زلزله، زمان سفر شبکه.

^۱ - نویسنده مسئول

۱- تاب آوری لرزه ای

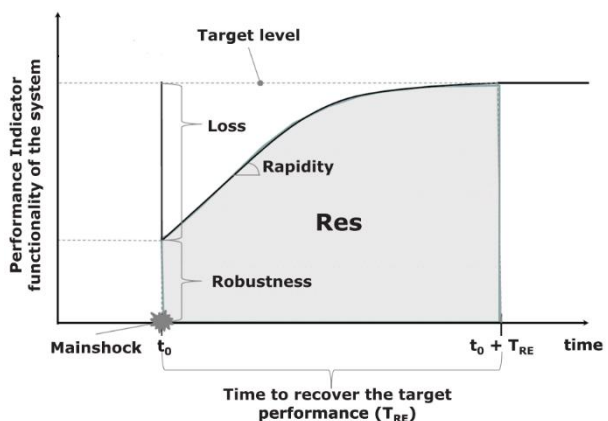
همانطور که اشاره شد، در ادبیات فنی چهار ویژگی زیر را در تعیین میزان تاب آوری لرزه ای در انواع سیستم ها اعم از سازه ای، زیرساختی و اجتماعی موثر دانسته اند:

- **استحکام (Robustness):** میزان مقاومت سیستم در برابر عامل مخرب و یا گسترش خرابی می باشد.
- **سرعت پذیری (Rapidity):** میزان سرعت سیستم در بازگشت به وضعیت نرمال قبل از رویداد مخرب می باشد.
- **غنا منابع (Resourcefulness):** میزان توانایی در تامین منابع مورد نیاز جهت بازیابی عملکرد سیستم را بیان می کند.
- **افزونگی (Redundancy):** ظرفیت مازاد سیستم که کمک می کند تا عملکرد سیستم در شرایط بحرانی حفظ شود.

این چهار ویژگی که به اختصار 4R's خوانده می شوند، در چهار سطح فنی، سازمانی، اجتماعی و اقتصادی قابل بررسی هستند.

بعد فنی تاب آوری اشاره دارد به پاسخ و عملکرد سیستم ها زمانی که تحت نیروهای مخرب واقع می شوند. بعد سازمانی به ظرفیت و قابلیت سازمانها برای پاسخ دادن به حالات اضطراری و انجام اقدامات حیاتی اشاره دارد. بعد اجتماعی به ظرفیت کاهش پیامدهای منفی اجتماعی ناشی از فقدان سرویس های حیاتی در دوران پس از رویداد مخرب، می پردازد. و در نهایت بعد اقتصادی تاب آوری به توانایی کاهش خسارت های مستقیم و غیر مستقیم اقتصادی ناشی از زلزله های مخرب معطوف است. مطابق تعریف تاب آور بودن یک زیر ساخت تحت زلزله با سه هدف دنبال می شود: (۱) حداقل احتمال شکست، (۲) حداقل خسارت های ناشی از شکست و (۳) حداقل زمان بازگشت به حالت اولیه. در ادبیات

تاب آوری لرزه ای به عنوان توانایی یک سیستم (سازه ای یا زیر ساختی) در بازگشت سریع به عملکرد نرمال در کمترین زمان بعد از زلزله تعریف می شود. استحکام، افزونگی، غنا منابع و سرعت پذیری چهار پارامتر موثر در ارزیابی تاب آوری لرزه ای یک سیستم می باشد. در شکل ۱ مفهوم تاب آوری بصورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۱). نمای شماتیک از عملکرد یک سیستم در مواجهه با رویداد مخرب لرزه ای

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است در لحظه t_0 رویداد مخرب لرزه ای روی سیستم اثر می گذارد و عملکرد آن را دچار افت می کند. و بلافاصله عملیات بازیابی استارت می خورد و عملکرد سیستم تحت تاثیر عملیات بازیابی افزایش یافته و در نهایت در لحظه $t_0 + T_{RE}$ به عملکرد نرمال (قبل از رویداد مخرب) می رسد. ناحیه هاشور خورده در شکل ۱ به ناحیه تاب آوری معروف است در نتیجه هرچه سطح زیر منحنی عملکرد بیشتر باشد سیستم از تاب آوری بیشتری برخوردار است.

۲- تاریخچه ای از عملکرد سیستم حمل و نقل درون شهری و آسیب های وارده بر پلها در زلزله های تاریخی گذشته

در این بخش چند نمونه تاریخی از آسیب های مشاهده شده در عملکرد شبکه حمل و نقل پس از وقوع زلزله در ایالات متحده و ژاپن و کشورهای که زیرساخت های حمل نقل توسعه یافته و خطر لرزه خیزی بالایی دارند، ارائه می شود.

۱-۲- زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن

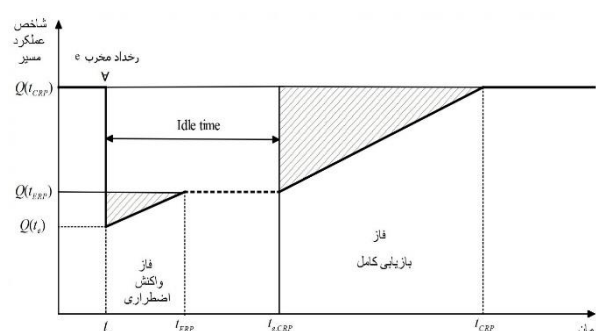
زلزله کوبه با بزرگی ۶٫۹ ریشتر در ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۵ در کشور ژاپن رخ داد. در اثر این زلزله خسارات شدیدی به سیستم حمل و نقل این کشور وارد شد. بیشتر این خسارات مربوط به پلهای بزرگراهی بود. به دلیل وقوع زلزله در ساعات آغازین صبح و کم بودن حجم ترافیک بزرگراهها، مترو و راه آهن باعث شد که تلفات انسانی در مسیرهای حمل و نقل به حداقل برسد. ولی شدت زلزله باعث بوجود آمدن خسارات متوسط تا شدیدی به پلهای بزرگراهی و روسازی راه ها شد. بسیاری از راه ها به دلیل نشست زمین و ریزش آوار مسدود گردید، این امر باعث اختلال در امر امداد رسانی و افزایش زمان سفر شد. آزاد راه ها در منطقه هانشین در مقیاس وسیعی آسیب دیدند. پس از زلزله ترافیک در ۸۵۰ کیلومتر از شبکه آزاد راهی پیشین، چوگوکو و دیگر آزاد راه های ملی و در حدود ۲۰۰ کیلومتر از آزاد راه های هانشین مسدود گردید. از آنجایی که این مسیرها بخشی از شبکه حمل و نقل ملی ژاپن می باشد، آسیب های وارده باعث گسترش خسارت در سطح ملی و فراتر از آن شد. پل بزرگراه هانشین به دلیل برش و پیچش در طول ۲۰ کیلومتر

فنی، رابطه ۱ بر اساس سطح زیر منحنی عملکرد به عنوان اندیس تاب آوری ارائه شده است (Bocchini et al. 2014, Ahmadian et al. 2020)

$$Resilience = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T_{ER}} Q(t)dt}{T_{ER}} \quad (1)$$

که در آن $Q(t)$ تابع عملکرد سیستم، t_0 لحظه وقوع رخداد مخرب و T_{ER} طول دوره بازیابی می باشد.

تاب آوری شبکه راه های شهری از دو دیدگاه تاب آوری در فاز واکنش اضطراری^۲ (ERP) و تاب آوری در فاز بازیابی کامل^۳ (CRP) قابل دسته بندی می باشد. در تاب آوری فاز واکنش اضطراری رفع انسداد و باز کردن مسیرها برای عملیات امداد و نجات و تخلیه اضطراری باید مورد بررسی قرار گیرد. و در فاز بازیابی کامل بازگشت شبکه حمل و نقل به عملکرد نرمال مطرح است در نتیجه بازیابی پلها در این مرحله مورد نظر است. نمای شماتیک بازیابی در دو فاز مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲). بازیابی شبکه حمل و نقل شهری در فاز واکنش اضطراری و فاز بازیابی کامل.

³ Comprehensive Restoration Phase

² Emergency Response Phase

بزرگراهی در زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا، برنامه های برای مقاوم سازی سازه های مرتفع مانند پلها، پیاده روها و روگذرها که طراحی مناسبی نداشتند، توسط دپارتمان حمل و نقل کالیفرنیا (Caltrans) تنظیم شد، با توجه به بررسیهای صورت گرفته ۸۶۰ سازه نیاز به مقاوم سازی داشت که ۴۵۶ سازه در منطقه لس آنجلس قرار داشت. در زمان زلزله نورتریچ مقاوم سازی ۱۲۲ سازه به تمام رسیده بود و ۴۳ پل در حال مقاوم سازی بود و پیشینی شده بود تا سال ۱۹۹۵ برنامه مقاوم سازی به تمام برسد. هیچ یک از ۱۲۲ سازه مقاوم سازی شده در زلزله نورتریچ آسیب ندیده بودند (Chang and Nojima, 1998, Chang, 2010)

۲-۳- زلزله ۲۰۰۸ ون جوان

در میان زلزله های اخیر در نقاط مختلف جهان، زلزله ۲۰۰۸ ون جوان (چین) از معدود مواردی است که میزان آسیب دیدگی پلها در آن به صورت کمی تحلیل آماری شده است. نتایج بررسی های انجام شده روی ۱۶۵۷ پل در مناطق با آسیب دیدگی شدید در این زلزله نشان دادند که ۸۳ درصد این پلها سالم یا با خسارت جزئی بودند و تنها ۱٫۱ درصد کاملاً تخریب شدند. پل ها با آسیب دیدگی متوسط ۹ درصد و پل های با خسارات جدی ۷ درصد بوده اند. آمار خسارات برای ۱۳۳۷ پل با دهانه ساده مشابه آمار کل پلها بود است. از ۳۳ عدد پل های با شاه تیر های پیوسته ۷۳ درصد سالم یا با خسارت جزئی، ۱۲ درصد با آسیب دیدگی متوسط، ۹ درصد با خسارات جدی بوده اند و ۶ درصد کاملاً تخریب شده اند. از ۲۸۶ عدد پل های قوسی ۸۸ درصد سالم یا با خسارت جزئی، ۷ درصد با آسیب دیدگی متوسط، ۴ درصد با خسارات جدی بوده اند و ۱ درصد کاملاً تخریب شده اند.

تخریب شد. خرابی های مشابهی در مسیر بزرگراه ها در نقاط مختلفی بوجود آمد و در مقطعی از بزرگراه هانشتین حدود ۵۰۰ متر واژگونی در پل رخ داد. در این زلزله حدود نیمی از ۱۱۷۵ ستون پلهای بزرگراهی آسیبهایی کم تا زیاد دیدند. خرابیها بیشتر در محل تکیه گاه های غلتکی و مفصلی مشاهده گردید. در بعضی مکان ها تکیه گاه ها تخریب شده باعث گردیدند تا سطح جاده از چند سانتیمتر تا بیش از یک متر فرو افتند. این خرابیها به علت وارد آمدن نیروهای بیشتر از مقادیر فرض شده در طراحی، بوجود آمده بودند. این نیروها خود به علت جابجایی طولی و عرضی بسیار بزرگ بوجود آمدند (Chang and Nojima, 2001 Yasunori et al. 2000)

۲-۲- زلزله ۱۹۹۴ نورتریچ

زلزله نورتریچ در ۳۰ کیلومتری لس آنجلس با بزرگی ۶٫۸ در ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴ رخ داد. بر اساس گزارشات موجود، بیشترین شتاب قائم زمین در این زلزله ۱٫۸۲g و بیشترین شتاب افقی ۰٫۹۱g ثبت شد. بیشترین خسارت وارد شده مربوط به خرابی ایجاد شده در بزرگراههای منطقه می باشد. در این زلزله تعداد زیادی از پلها به طور کامل تخریب شد بود. زلزله نورتریچ باعث خرابی ۲۸۶ پل ایالتی شد به طوریکه ۷ عدد از آنها بطور کامل تخریب شد. به طوریکه بیش از یک ماه پس از زلزله دارای اختلال در ترافیک بودند. حرکات شدید زمین و تغییر شکل دائمی زمین باعث ایجاد خرابی در سطح آسفالت و بتن شد و در بعضی نقاط ترافیک محلی تا زمان تعمیر این نقاط دارای اختلال شدید بود. سایر خرابی های وارد بر پلهای شهر شامل نشست دسترسها، ترک برداشتن روسازه، خرابیهای برشی، خرابی در تکیه گاه های غلتکی و خرابیهای معماری بود. پس از زلزله حجم ترافیک وسایل نقلیه در جاده ها حدود ۶۰ درصد کاهش یافت. پس از خرابی گسترده در سازه های

۳- تاب آوری لرزه ای شبکه راه و پلهای شهری

تاب آوری لرزه ای شبکه حمل و نقل از موضوعات نسبتاً جدید در مهندسی عمران می باشد. در سال های اخیر مطالعات و پژوهش های متعددی در این زمینه صورت گرفته که هر کدام جنبه ای از این موضوع را مورد توجه قرار داده اند. در جدول ۱ خلاصه از کارهای صورت گرفته گزارش شده است.

جدول ۱. خلاصه ای از پژوهش های صورت گرفته در زمینه تاب آوری شبکه حمل و نقل شهری

منبع	روش ها و نوآوری ها
(Kilanitis and Sextos, 2018)	معرفی اندیس تاب آوری بر اساس هزینه های مستقیم سازه ای و هزینه های غیر مستقیم شامل پیامد های زلزله بر اقتصاد جامعه، پیامدهای عدم دسترسی به مراکز حساس مانند بیمارستان، نیروگاهها و مراکز اداری، پیامد زیست محیطی ناشی از افزایش زمان سفر.
	ارائه چهارچوب احتمالاتی برای ارزیابی عملکرد شبکه پل-بیمارستان. مطالعه اثر همبستگی پارامتر شدت لرزه ای در سایت های مختلف در ارزیابی آسیب پذیری شبکه. معرفی زمان سفر اضافی و زمان انتظار بیماران به عنوان شاخص عملکرد سیستم.
(Dong and Frangopol, 2017)	ارائه چهارچوب احتمالاتی برای ارزیابی عملکرد شبکه پل-بیمارستان. مطالعه اثر همبستگی پارامتر شدت لرزه ای در سایت های مختلف در ارزیابی آسیب پذیری شبکه. معرفی زمان سفر اضافی و زمان انتظار بیماران به عنوان شاخص عملکرد سیستم.
	ارزیابی اثرات چرخه عمر ناشی از خوردگی در محیط های کلراید بر آسیب پذیری و تاب آوری شبکه پلهای کالیفرنیا. بررسی پیامد های اقتصادی-اجتماعی گسترده اختلال در شبکه حمل و نقل.
(Alipour. et al, 2010, 2011)	ارزیابی اثرات چرخه عمر ناشی از خوردگی در محیط های کلراید بر آسیب پذیری و تاب آوری شبکه پلهای کالیفرنیا. بررسی پیامد های اقتصادی-اجتماعی گسترده اختلال در شبکه حمل و نقل.

(Ouyang, et al, 2012)	یک چهارچوب سه مرحله ای برای تحلیل تاب آوری زیر ساخت های شهری در سه مرحله مقاومت ذاتی، ظرفیت جذب، پیامدهای خطر و ظرفیت بازیابی ارائه کردند.
(Faturechi and Miller-hooks, 2014)	در این پژوهش مقاومت ذاتی، مقاوم سازی، توسعه، در دسترس بودن منابع و پاسخ به عنوان پنج عامل تاثیر گذار بر تاب آوری شبکه معرفی شده است.
(Setos and Kilanitis, 2018)	گسترش چهارچوب کلی برای ارزیابی هزینه و تاب آوری متناظر با اثرات زلزله بر سازه و المان های ژئوتکنیکی شبکه
(Banerjee and Chandrasekaran, 2015)	بررسی بهینه مقاوم سازی پل با لحاظ کردن هزینه مقاوم سازی و تاب آوری پلها تحت خطرات چندگانه شامل زلزله و فرسایش ناشی از سیلاب.
(Frangopol and Bochini, 2012)	ارائه چهارچوب بهینه سازی برای فعالیت های بازیابی شبکه پلهای شهری. تابع هدف این پژوهش پیشینه سازی تاب آوری شبکه، کمینه سازی زمان بازیابی، کمینه سازی هزینه کل بازیابی.
(Twumasi and Boakye, 2019)	ارزیابی تاب آوری شبکه حمل و نقل بر اساس مدل سازی سناریو و نرم افزار GIS. در این پژوهش فاصله و زمان سفر به عنوان شاخص عملکرد شبکه در نظر گرفته شده است.
(Vishwanath and Benerjee, 2019)	معرفی چهارچوبی برای ارزیابی تاب آوری لرزه ای پلهای بتن مسلح با در نظر گرفتن اثرات چرخه عمر. در این پژوهش برای چهار حالت مختلف خرابی پلها از چهار فرایند بازیابی متفاوت استفاده شده است.

$$f_k^{uv} \geq 0 : \forall k, u, v \quad (5)$$

$$x_q \geq 0, q \in Q \quad (6)$$

که در این روابط پارامترها به شرح زیر است:

S : تابع هدف (مجموع زمان سفر کلیه مسیرها)

k : نشان دهنده مسیر k ام

x_q : جریان تعادلی در لینک q

t_q : زمان سفر در لینک q

f_k^{uv} : جریان در مسیر k ام از زوج مبدا-مقصد $u-v$

q_{uv} : نرخ سفر بین مبدا u و مقصد v

Q : مجموعه لینک های شبکه

$\delta_{q,k}^{uv}$: برابر یک است اگر لینک q متعلق به مسیر k باشد

در غیر اینصورت صفر می باشد.

میانگین زمان سفر برای هر لینک طبق رابطه BPR^v محاسبه

می شود:

$$t_q(x_q) = ft_q \left(1 + \alpha \left(\frac{x_q}{c_q} \right)^\beta \right) \quad (7)$$

که در آن ft_q زمان سفر جریان آزاد در لینک q در واحد

زمان می باشد، x_q حجم وسایل نقلیه که سعی در استفاده از

لینک q دارند، c_q ظرفیت در لینک q و $t_q(x_q)$ میانگین

زمان سفر برای وسایل نقلیه در لینک q می باشد. α و β

ضرایب ثابت هستند که معمولاً به ترتیب برابر با 0.15 و 4

در نظر گرفته می شوند.

شاخص عملکرد شبکه معمولاً بر اساس نسبت زمان سفر کل

(TTT) شبکه قبل و بعد از رویداد مخرب لرزه ای تعریف

می شود:

۴- شاخص عملکرد شبکه حمل نقل

مهم ترین شاخص عملکردی شبکه حمل و نقل در فاز بازیابی کامل، زمان سفر کل شبکه^۴ می باشد. افزایش زمان سفر شبکه در طولانی مدت باعث ایجاد خساراً ثانویه از جمله اتلاف وقت استفاده کنندگان، افزایش مصرف سوخت، آلودگی هوا و... می شود. فاز بازیابی کامل شبکه مدت زمان طولانی طول خواهد کشید. در نتیجه استراتژی های بازیابی باید بصورت باشد که زمان سفر کل شبکه در طول دوره بازیابی همراه کمینه شود. مدل های تقاضا در حمل و نقل شامل چهار مرحله شامل ۱- تولید سفر ۲- توزیع سفر ۳- انتخاب مدل و ۴- تخصیص سفر می شوند. معمولاً در مدل های تخصیص ترافیک برای محاسبه زمان سفر در شبکه از معادلات تعادل کاربر^۵ استفاده می شود. تخصیص ترافیک با استفاده از معادلات کاربر براساس اصل اول واردارپ^۶ می باشد. طبق این اصل هنگامی که شبکه در حالت تعادل قرار دارد هیچ کاربری نمیتواند با تغییر مسیر زمان سفر خود را کاهش دهد. مسئله تخصیص ترافیک در شرایط تعادل استفاده کننده بر اساس برنامه بهینه سازی غیر خطی زیر مدل می شود (Twumasi-Boakye and O. Sobanjo, 2018):

$$\text{minimize } S = \sum_q \int_0^{x_q} t_q(x_q) dx \quad (2)$$

$$\text{Subject to } \sum_k f_k^{uv} = q_{uv} : \forall u, v \quad (3)$$

$$x_q = \sum_u \sum_v \sum_k \delta_{q,k}^{uv} f_k^{uv} : \forall q \quad (4)$$

⁶ Wardrop's principle

⁷ Bureau of Public Roads

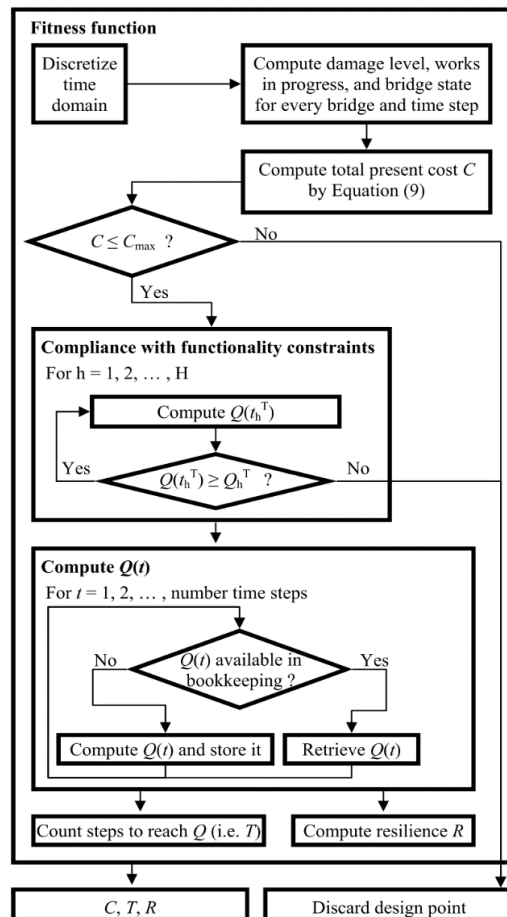
⁴ Total travel time

⁵ User equilibrium

پلها خارج از سرویس باشند Γ^0 در نظر گرفته می شود. بر اساس این دو تعریف، عملکرد شبکه نرمالیزه می شود و بصورت زیر بیان می شود:

$$Q(t) = \frac{\Gamma(t) - \Gamma^0}{\Gamma^{100} - \Gamma^0} \quad (12)$$

در این مطالعه یک چهارچوبی بهینه سازی برای بهینه کردن تاب آوری (R) و کمینه سازی زمان بازیابی (T) و هزینه بازیابی (C) شبکه پلهای شهری بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. شکل (۳) نشان دهنده این الگوریتم بهینه سازی می باشد.



شکل (۳). فلوچارت توابع هدف (Bocchini and Frangopol, 2012).

$$Q(t) = \frac{TTT(t)_{after shock}}{TTT_{before shock}} \quad (8)$$

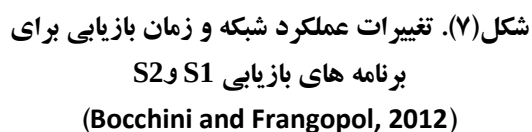
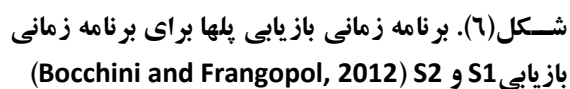
Bocchini و Frangopol در سال ۲۰۱۲ شاخص عملکرد شبکه حمل و نقل را بر اساس زمان سفر کل و مسافت سفر کل طبق رابطه (۹) تعریف کردند:

$$\Gamma(t) = \frac{1}{\gamma_T \cdot TTT(t) + \gamma_D \cdot TTD(t)} \quad (9)$$

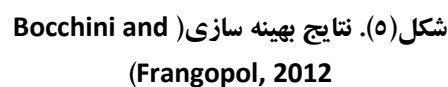
$$TTT(t) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} \cdot c_{ij}(f_{ij}) \quad (10)$$

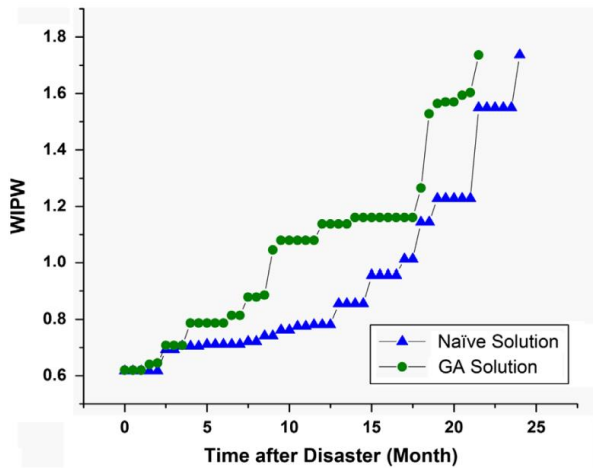
$$TTD(t) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[f_{ij}(t) \cdot d_{ij} + \sum_{b \in i,j} f_{ij} \cdot s_{b,ij} \cdot d_b^d \right] \quad (11)$$

که در آن $TTT(t)$ زمان سفر کل و $TTD(t)$ مسافت سفر کل شبکه می باشد. γ_T ضریب وزنی متناظر با زمان سفر شده توسط کاربران شبکه و γ_D ضریب وزنی متناظر با مسافت طی شده توسط کاربران شبکه می باشد. I مجموعه گره های شبکه و J مجموعه زیر گره های متصل شده با گره i می باشند. $f_{ij}(t)$ جریان ترافیکی از گره i به گره j می باشد. $c_{ij}(f_{ij})$ زمان لازم برای طی کردن لینک $i - j$ با جریان $f_{ij}(t)$ می باشد. d_{ij} طول لینک $i - j$ و b نشان دهنده پلهای موجود در لینک می باشد. $s_{b,ij}$ ضریبی از سفرهایی که از مسیرهای انحرافی جایگزین پل استفاده می کنند و d_b^d طول مسیر انحرافی که توسط FHWA, 2009 ارائه شده است. معادلات (۹-۱۱) برای ارزیابی عملکرد شبکه مورد استفاده قرار می گیرند. در مورد خاص هنگامی که کلیه پلها در سرویس هستند Γ^{100} و هنگامی که کلیه



Map of Santa Barbara, CA, showing the study area. The map includes labels for Goleta (CA), Santa Barbara (CA), and the Pacific Ocean. A legend indicates that circles represent nodes, diamonds represent bridges, and yellow lines represent road segments. Various roads are labeled, including Route 101, Route 102, and Route 325. Specific nodes are labeled with letters A through S.

 $\wedge$



شکل (۹). باز یابی شبکه با برنامه ریزی های مختلف (Zhang et al. 2017).

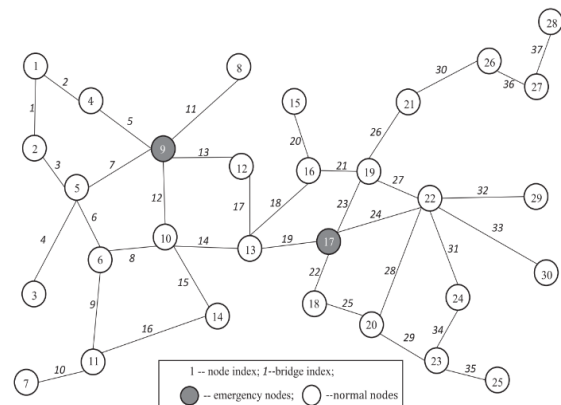
۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به معرفی و مرور مفاهیم مرتبط با تاب آوری لرزه ای پرداخته شد. استحکام، افزونگی، غنای منابع و سرعت پذیری به عنوان مهم ترین پارامترهای تاثیر گذار بر تاب آوری معرفی گردید. سپس نمودار عملکردی باز یابی شبکه حمل و نقل شهری در فاز واکنش اضطراری و فاز باز یابی کامل ارائه گردید. به مرور تجربیات زلزله های تاریخی گذشته و آسیب های وارده به شبکه حمل و نقل و تاثیرات مخرب آن پرداخته شد. همچنین خلاصه ای از پژوهش های صورت گرفته در زمینه تاب آواری شبکه حمل و نقل ارائه گردید و در نهایت شاخص های عملکردی شبکه حمل و نقل معرفی گردید و چند نمونه از مطالعات صورت گرفته در زمینه بهینه سازی عملیات باز یابی شبکه پلها بر اساس مفهوم تاب آواری مورد بررسی قرار گرفت.

Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۷ شاخص عملکرد جدیدی برای بهینه سازی باز یابی پلهای شهری بعد از زلزله ارائه کردند. شاخص عملکرد ارائه شده در این پژوهش بر مبنای سه پارامتر افزونگی شبکه، قابلیت اطمینان کاربری پل های شبکه بعد از زلزله و اهمیت ترافیکی پل در شبکه تعریف شده است. رابطه (۱۳) این شاخص عملکردی را نشان می دهد.

$$WIPW(G) = R(G) = \sum_{i=1}^n w_i \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=0}^{k(i,j)} w_k(i,j) \cdot R_k(i,j) \quad (13)$$

که در آن $k(i,j)$ تعداد کل مسیر های مستقل مابین گره i و j و $P_k(i,j)$ نشان دهنده k امین مسیر مستقل بین گره i و j می باشد. $R_k(i,j)$ قابلیت اطمینان سالم بودن مسیر $P_k(i,j)$ و w_k ضریب وزنی تابعی از ترافیک روزانه و طول مسیر می باشد. چهار چوب معرفی شده در این پژوهش بر روی یک شبکه فرضی مطابق با شکل (۸) پیاده شده است. و شکل (۹) نشان دهنده نتیجه بهینه سازی برنامه باز یابی می باشد.



شکل (۸). شبکه حمل و نقل فرضی (Zhang et al, 2017).



11th International Conference on Sustainable Development & Urban Construction

منابع

bridges under multihazard scenario. Journal of Structural Engineering, 142(8), C4015012.

Dong, Y, D.M. Frangopol .2017. Probabilistic assessment of an interdependent healthcare–bridge network system under seismic hazard. Structure and Infrastructure Engineering, 13(1), 160-170.

Faturechi, R., E. Miller-Hooks .2014. A mathematical framework for quantifying and optimizing protective actions for civil infrastructure systems. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 29(8), 572-589.

Kilanitis, I, Sextos, A .2019. Integrated seismic risk and resilience assessment of roadway networks in earthquake prone areas. Bulletin of Earthquake Engineering, 17(1), 181-210.

Kilanitis, I., A. Sextos .2019. Impact of earthquake-induced bridge damage and time evolving traffic demand on the road network resilience. Journal of traffic and transportation engineering (English edition), 6(1), 35-48.

Ouyang, M., L. Dueñas-Osorio, X. Min .2012. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. Structural safety, 36, 23-31.

Twumasi-Boakye, R., J.O. Sobanjo .2018. Resilience of regional transportation networks subjected to hazard-induced bridge damages. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 144(10), 04018062.

Vishwanath, B.S., S. Banerjee .2019. Life-Cycle Resilience of Aging Bridges under Earthquakes. Journal of Bridge Engineering, 24(11), 04019106.

Yasunori, I., F. Kurauchi, H. Shimada .2000. Traffic management system against major earthquakes. IATSS research, 24(2), 6-17.

Zhang, W., N. Wang, C. Nicholson. 2017. Resilience-based post-disaster recovery

Ahmadian, N., G.L. Lim, J, J, Cho, S, Borac .2020. A quantitative approach for assessment and improvement of network resilience, Reliability Engineering and System Safety, 106977.

Alipour, A., B. Shafei, M. Shinozuka .2000. Performance evaluation of deteriorating highway bridges located in high seismic areas. Journal of Bridge Engineering, 16(5), 597-611.

Alipour, A., B. Shafei .2016. Seismic resilience of transportation networks with deteriorating components. Journal of Structural Engineering, 142(8), C4015015.

Bocchini, P., D.M. Frangopol, T, mmenhofer, T, Zinke. 2014. Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach, Journal of Infrastructure Systems, 20(2).

Bocchini, P., D.M. Frangopol .2012. Restoration of bridge networks after an earthquake: Multicriteria intervention optimization. Earthquake Spectra, 28(2), 427-455.

Chang, S.E., N. Nojima .2001. Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective. Transportation research part A: policy and practice, 35(6), 475-494.

Chang, S. and N. Nojima .1998. Measuring lifeline system performance: Highway transportation systems in recent earthquakes. in Proceedings of the 6 th National Earthquake Conference on Earthquake Engineering.

Chang, L. 2010. Transportation system modeling and applications in earthquake engineering.

Chandrasekaran, S., S. Banerjee .2015. Retrofit optimization for resilience enhancement of



strategies for road-bridge networks. Structure and Infrastructure Engineering, 13(11), 1404-1413.

Abstract

Seismic resilience of the urban transportation network plays an important role in the resilience of society after an earthquake. Transport network resilience is investigated in two phases, the emergency response and complete recovery phase. In the resilience of the emergency response, the aim is to remove the network blockage to carry out rescue operations, and in the complete recovery phase, the return of the network to normal operation is considered. Bridges are the main and most vulnerable elements that must be recovered to return the network to its pre-seismic state. Therefore, in the complete recovery phase, the return of the bridge network to normal is investigated. In this research, the concepts related to seismic resilience and the parameters affecting it have been introduced and the resilience index based on the level of system performance diagram in the face of destructive factor and recovery process has been discussed. Then, a history of the performance of the urban transportation system and the damage to bridges in past historical earthquakes has been examined. Finally, the researches on the resilience of the urban transportation network have been reviewed. Finally, network travel time has been introduced as the most important network performance indicator in optimizing restoration scheduling.

Keywords: transport network resilience, bridge network recovery, earthquake, network travel time