شناسایی پل‌های با ریسک زیاد خرابی با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی (مطالعه موردی: پل‌های بتنی جاده‌ای استان زنجان)

علی مدقالچی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
پوریا رشوند*، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
علی دلنواز، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

Email: poorya_rashvand@qiau.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۰/۰۸/۰٤ – پذیرش: ۱٤۰۲/۰۳/۰۱

چکیده

انجام مطالعات ارزیابی پل‌های مورد استفاده در سطح جاده‌ها یکی از فرآیندهای بسیار مهم و البته زمان‌بر و پُرهزینه، به ویژه با لحاظ کردن شمارگان زیاد پل‌های کشور، یعنی بالغ بر ۳۵ هزار دستگاه در کشور و ۸٦۵۸ دستگاه در استان زنجان، می‌باشد. زمان و هزینه این مطالعات از سوی دیگر می‌تواند باعث ایجاد تأخیر در انجام مطالعه برای تمامی پل‌ها و ایجاد خسارات جبران‌ناپذیر ناشی از عدم مدیریت صحیح تعمیر و نگهداری پل‌ها شود. روش طرح آزمایش‌های تاگوچی از جمله روش‌هایی است که به کمک مدل‌های آماری و ریاضی، از طریق تعریف آرایه‌های متعامد خاص خود، به‌جای انجام تمامی گزینه‌های ممکن ارزیابی، با انجام تعداد محدودی ارزیابی، ترکیب مطلوب را پیش‌بینی می‌کند. در این پژوهش، بر مبنای روش تاگوچی، به‌جای بررسی ۸٦۵۸ پل با ۱۳ معیار مختلف، فقط ۱٦ ترکیب از مشخصات و ویژگی‌های فیزیکی پل‌ها و شرایط جوی و اقلیمی و ترافیکی مؤثر بر پل‌های بتنی جاده‌ای پنج محور اصلی استان زنجان تعیین و شاخص‌های خرابی پل‌ها با این ترکیب‌ها محاسبه گردید. نتایج پژوهش نشان داد که پل‌هایی که در محورهای با دو تا سه نوبت برف سنگین، ۹۱ الی ۱۰۰ روز یخبندان، تردد ۲٦ الی ۳۰ درصدی وسایل سنگین نسبت به کل تردد عبوری در طول سال مواجه بوده و دارای طول ۷/۱ الی ۱۲ متر می‌باشند، با میانگین تخمینی ۷٦/۲۷۲۵ برای شاخص خرابی سازه‌ای، بیشترین ریسک خرابی را دارند. در واقع، این ارقام بهترین ترکیبی است که روش تاگوچی به عنوان ترکیب تخریب‌کننده پل‌ها از میان تعداد زیادی از حالات ممکن معرفی کرده است. همچنین، مهمترین فاکتور مؤثر در خرابی پل‌ها، درصد وسایل نقلیه سنگین عبوری نسبت به کل تردد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پل‌های بتنی جاده‌ای، طراحی آزمایش، روش تاگوچی، استان زنجان، پیش‌بینی.

۱. مقدمه

بتن به عنوان مهمترین ماده مصرفی ساخته دست بشر در جهان تعبیر می‌شود. مصرف جهانی بتن در سال ۲۰۰۲ به ۲/۷ میلیارد متر مکعب رسید و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ استفاده از بتن در ساخت‌وساز ساختمان و سایر کارهای زیربنایی حدود ۷/۵ میلیارد متر مکعب افزایش خواهد یافت (یوواراج، ۲۰۲۱).

پیشرفت فناوری ذاتاً با تغییرات اقتصادی و اجتماعی مرتبط است. سرعت مشخصه فزاینده تغییراتی که رخ می‌دهد است (فورتاک، ۲۰۲۱).

کمیسیون اروپا، چالش‌های اصلی صنعت ساختمان را به شرح زیر اعلام کرده است (تورسکی و روگالا، ۲۰۲۲):

– بهبود کارایی در ساختمان‌ها و بازسازی‌های سازه-های موجود،

– بهبود آموزش‌های تخصصی و جذاب‌تر کردن بخش، به‌ویژه برای کارگران حرفه‌ای، دانشکده‌های فنی و دانشگاه‌ها،

– جذب فعال‌تر فناوری‌های جدید،

– کارایی و تغییرات آب‌وهوایی.

پل‌ها به‌عنوان یکی از مهمترین و گران‌ترین زیرساخت‌های شبکه راه نیز از این چالش‌ها به دور نیستند. لذا، صرفه‌جویی اقتصادی در نگهداری پل یکی از موضوعات بسیار حائز اهمیت بوده و نگهداری درازمدت و حفظ ظرفیت باربری سازه از اهداف و برنامه‌ها می‌باشد.

برای سال‌های متمادی، رویکردهای مدیریت پل و ارزیابی‌های وضعیت آنها بر اساس گزارش‌های دست-نویس و اطلاعاتی است که از بازرسان و مهندسان در محل نگهداری می‌شود (رشیدی و همکاران، ۲۰۲۰). این رویکردها عمدتاً مبتنی بر کاغذ بوده و به طور قابل توجهی امکان اشتراک آنها را با مدیران جهت بودجه‌بندی و ثبت و ضبط مدارک محدود می‌کنند. با این حال، توسعه مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) در سال‌های اخیر، منجر به تحولی در دیجیتالی شدن دارایی‌ها و اطلاعات آن‌ها در قالب یک نرم‌افزارو بانک اطلاعات پایه دیجیتالی شده است. البته در زمینه مهندسی پل، به مدل‌سازی اطلاعات پل یا همان پایگاه داده‌های پل‌ها مربوط می‌شود (کاوونروئن و همکاران، ۲۰۲۰؛ سمرارو و همکاران، ۲۰۲۱؛ پرنو و همکاران، ۲۰۲۲).

استفاده از سیستم مدیریت پل (BMS) مدیران را قادر می‌سازد تا دارایی‌ها خود را به صورت سلسله مراتبی و با توجه به شرایط یا اهمیت آنها و همچنین نیازهای نگهداری یا تعمیر آنها سازماندهی کنند. نتایج BMS مبنایی مناسب برای اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها از نظر فنی و اقتصادی در اختیار مدیران مالی قرار می‌دهد (کالورت و همکاران، ۲۰۲۰؛ آلونسو مدینا و همکاران، ۲۰۲۲).

سیستم مدیریت پل‌ها یکی از سیستم‌های مدیریتی می‌باشد که سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور از سال ۱۳۹۵ در راستای اهداف عالی خود در دستور کار قرار داده است. از آنجایی که اکثر مطالعات انجام شده در حوزه بررسی کارایی و ارزیابی پل‌های جاده‌ای با استفاده از روش‌های پارامتریک بوده است، پژوهش حاضر درصدد برآمده تا با استفاده از روشی غیرپارامتری به سنجش کارایی پل‌ها به عنوان ابزار سیستم مدیریت پل‌ها در تغییر روند آسیب‌های پل‌ها بپردازد.

از آنجا که در حال حاظر، دولت ایران با کمبود اعتبار عمرانی دست به گریبان بوده، مشکلات و نارسایی‌های سیستم مدیریت پل موجود باعث کاهش کارایی دستگاه-های اجرایی در امر نگهداری و افزایش هزینه‌های نگهداری پل‌ها شده که در نتیجه آن از بین رفتن سرمایه-های ملی ناشی از ویرانی و خرابی پل‌ها را طی سال‌های آتی شاهد خواهیم بود. از سوی دیگر، انتخاب و یا ایجاد یک سیستم مناسب، بدون لحاظ کردن شرایط حاکم بر کشور و اقلیم مناطق، عملاً منجر به بهبود مدیریت پل نخواهد شد.

روش تاگوچی یکی از روش‌های آماری شناخته شده برای به دست آوردن شرایط بهینه و شناسایی پارامترهای مهم مؤثر بر فرآیندها است (آیتا و همکاران ، ۲۰۲۰؛ مصطفی و همکاران، ۲۰۲۱). این روش، به طور گسترده‌ای به عنوان یک طراحی آزمایش‌های قابل اعتماد برای دستیابی به شرایط پردازش بهینه و شناسایی پارامترهای پردازش حیاتی در بسیاری از فرآیندهای تولید استفاده می‌شود.

با این وجود، روش تاگوچی به بهینه‌سازی تنها یک مشخصه کیفی محدود می‌شود. بنابراین، استفاده از آن برای بهینه‌سازی فرآیند با بیش از یک ویژگی کیفی دشوار است. یک رویکرد برای پرداختن به این مشکل، ادغام روش تاگوچی با تجزیه و تحلیل GRA[1] است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

در طرح‌ریزی آزمایش‌ها و استراتژی توسعه، برای ایجاد کلیه ترکیب‌های ممکن از فاکتورها به همراه محدوده‌های قابل قبول در هرکدام از فاکتورهای مربوطه، معمولاً منطق ساده‌ای به‌کار گرفته می‌شود. اما در پروژه‌های مهندسی که دارای تعداد زیادی از فاکتورهای مؤثر هستند، تعداد ترکیب‌های ممکن خیلی زیاد می‌باشد. به‌علاوه، در پروژه‌های خاص ممکن است نیاز باشد تا تداخلات بین فاکتورهای تأثیرگذار هم بررسی شوند. روش مرسوم در کاهش تعداد ترکیب‌های آزمایش، استفاده از آزمایش‌های فاکتوریل جزئی است. تاگوچی، مجموعه ویژه‌ای از طرح‌های کلی برای آزمایش‌های فاکتوریلی ایجاد کرده است که اغلب کاربردها را پوشش می‌دهد. آرایه‌های متعامد[2]، جزئی از این مجموعه طراحی‌ها می‌باشند. استفاده از این آرایه‌ها ما را در تعیین کمترین تعداد آزمایش مورد نیاز برای مجموعه‌ای از فاکتورها یاری می‌کند (آنتونی، ۲۰۰۳).

در روش‌های آماری سنتی، میانگین‌ها برای مقایسه نتایج و انحراف از معیار برای توانایی ادعای وجود اختلاف مشخص بین دو گروه استفاده می‌شوند. در روش تاگوچی، نسبت سیگنال به نویز برای مقایسه نتایج به‌کار می‌رود. مقوله‌ی نسبت سیگنال به نویز کاملاً در ارتباط با توانا بودن طراحی یک محصول است. استحکام طراحی به توانایی محصول برای مقابله با تغییرات بستگی دارد و بر مبنای این ایده است که کیفیت، تابع طراحی مناسب است. یک طراحی بدون عیب یا یک محصول خوب دارای سیگنال قوی است که کارایی مورد نظر را داشته باشد و با تغییرات نویزهای داخلی و خارجی مقابله کند (روی، ۲۰۱۱).

در این پژوهش، از روش طراحی آزمایش‌ها به منظور محدود کردن تعداد پل‌های مورد بررسی، با هدف تعیین ترتیبی از عوامل و عناصر مؤثر در خرابی پل‌های بتنی، استفاده شده است. شمارگان زیاد پل‌های مورد مطالعه در این پژوهش (استان زنجان، بالغ بر ۸۶۰۰ دستگاه) و محدودیت زمانی و مالی بررسی تک تک پل‌ها از یک سو و از سوی دیگر ضرورت اولویت‌بندی پل‌های با ریسک زیاد خرابی ناشی از قرارگیری در شرایط حاد، مزایای روش تاگوچی را نمایان می‌سازد. با استفاده از این روش، به‌جای بررسی تمامی پل‌ها، کافیست تعداد محدودی پل، بر اساس ترتیبات خاص پیشنهادی آرایه‌های متعامد تاگوچی، شناسایی و شاخص‌های خرابی سازه‌ای و بهره‌برداری این نمونه‌ها تعیین شود. خروجی محاسبات تاگوچی به ما این امکان را خواهد داد تا ترکیب عناصر فیزیکی و عوامل جوی و ترافیکی که باعث بیشترین مقادیر شاخص خرابی می‌شوند شناسایی شوند. این ترکیب در حقیقت ترکیبی است که برای تمامی پل‌های مورد بررسی می‌تواند بیشترین خرابی را به‌دنبال داشته باشد.

[1]- Grey Relational Analysis

[2]- Orthogonal Arrays

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی

روش تاگوچی یکی از روش‌های طراحی بر مبنای آزمایش‌های DOE است که جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها، زمان و مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش، خصوصیات عملکرد سیستم را با تنظیم پارامترها و کاهش حساسیت عملکرد سیستم بهینه می‌کند (بهارالدین و همکاران، ۲۰۱۲).

روش تاگوچی به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش دارای مزیت‌های زیادی است؛ از جمله این موارد می‌توان به بهینه‌سازی همزمان چندین عامل و تعیین تأثیر عامل‌ها از طریق تعداد آزمایش‌ها اشاره کرد (لیو و همکاران، ۲۰۱۰).

روش تاگوچی، که به عنوان روش مهندسی کیفیت مد نظر قرار می‌گیرد، تکنیکی آماری است که به منظور بهبود کالاهای تولید شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش بر تفاوت بین مقدار هدف و اصلی تأکید دارد (هونگ، ۲۰۱۲).

۲-۱-۱. اساس طرح آزمایش‌های تاگوچی

روش بهینه‌سازی تاگوچی به عنوان یک تکنیک قوی در بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند بتن‌ریزی و آزمایش‌های بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد (ناترایان و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، روش تاگوچی تنها در بهینه‌سازی عملکرد منفرد مؤثر است. برای بهینه‌سازی چندعملکردی، معمولاً از تحلیل GRG استفاده می‌شود (سینگ و سینگ، ۲۰۲۱؛ سوجی و همکاران، ۲۰۲۱).

در روش طرح تاگوچی از آرایه‌های متعامد برای تعیین تعداد آزمایش‌ها و تحلیل بهینه‌سازی نتایج استفاده می‌شود. تعداد فاکتورهای کنترل در انتخاب آرایه‌های مناسب مؤثر است. برخی از متغیرها که مستقیماً بر عملکرد تأثیرگذار می‌باشند را می‌توان با استفاده از طرح تاگوچی تخمین زد. برای طرح با سه پارامتر و چهار سطح، تعداد آزمایش لازم ٦٤ مورد خواهد بود، که این تعداد آزمایش با به‌کارگیری L16 OA به ١٦ عدد کاهش خواهد یافت. در این تحقیق، با توجه به تعداد طرح‌ها و حجم زیاد ساخت نمونه‌ها، برای بهینه‌سازی مقاومت فشاری، کششی و خمشی، از روش تاگوچی استفاده شده است. استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها رویکرد مؤثری برای تعیین شرایط بهینه ایجاد می‌کند (تاگوچی، ١٩٨٦).

روش تاگوچی یک رویکرد آماری برای طراحی تجربی است که اغلب برای بهینه‌سازی عملکرد یک فرآیند یا محصول استفاده می‌شود. این شامل استفاده از یک آزمایش طراحی شده برای شناسایی عواملی است که بر یک معیار عملکرد خاص تأثیر می‌گذارند و سپس آنها را برای بهینه‌سازی عملکرد تنظیم می‌کند. یکی از مزایای اصلی آن این است که امکان بهینه‌سازی را فراهم می‌کند و در عین حال تعداد آزمایش‌های مورد نیاز را به حداقل می‌رساند. آرایه متعامد در روش تاگوچی برای تنظیم میانگین و کاهش تغییرات استفاده می‌شود. با کاهش تعداد آزمایش‌ها، روش تاگوچی منجر به کاهش هزینه-های ساخت می‌شود (رانجیت و روی، ۲۰۱۰؛ کومار و همکاران، ٢٠١٤؛ حکمت و همکاران، ۲۰۲۱؛ اوگبونا و همکاران، ۲۰۲۳).

۲-۱-۲. کاربرد نسبت S/N

هدف اصلی بهینه‌سازی در این مطالعه به‌دست آوردن حداکثر راندمان حذف است. نسبت S/N یک شاخص بدون بعد است که تفاوت بین پاسخ و مقدار مورد نظر را اندازه‌گیری می‌کند (تن و همکاران، ۲۰۱۷؛ یوسف، ۲۰۱۹).

تاگوچی از نقطه نظر کیفیت، مشخصه‌های کیفی مطلوب را به سه دسته زیر تقسیم‌بندی کرده است. نسبت سطح عملکرد و اثر فاکتور اغتشاش بر عملکرد را اندازه-گیری کرده و به صورت ارزیابی ثبات یک خروجی می‌باشد. معیارهای مختلفی برای ارزیابی پاسخ وجود

دارد مانند به نرمال نزدیک‌تر بهتر، بزرگتر بهتر و کوچکتر بهتر (نورالدین و بایوآجی، ۲۰۰۹).

در اجرای یک آزمایش به روش تاگوچی، مراحل مشخصی به ترتیب زیر دنبال می‌شود (روی، ۲۰۱۱). از آنجا که موفقیت هر آزمایش به درک کاملی از طبیعت مسئله وابسته است، ابتدا باید مسئله فرمول‌بندی شود.

۱- مشخص کردن هدف اصلی مسئله و پاسخی که باید بهینه شود.

۲- مشخص کردن فاکتورهای کنترلی، فاکتورهای اغتشاش و فاکتورهای سیگنال (اگر وجود داشته باشد). هر چیزی که به نظر می‌رسد بر نتیجه آزمایش‌ها اثرگذار باشد به عنوان فاکتور در نظر گرفته می‌شود.

۳- زمان باید در نظر گرفته شود.

٤- طراحی یک آرایه متعامد مناسب.

۵- سیگنال. مطابق ترکیب موجود در آرایه، آزمایش‌ها حداقل یک بار انجام می‌شود و در صورت امکان برای حداقل کردن خطای ناشی از اغتشاش‌ها، آزمایش‌ها دو تا سه بار تکرار می‌شوند.

٦- تحلیل آماری و تفسیر نتایج آنها و در نهایت به دست آوردن شرایط بهینه

۷- انجام یک آزمایش جهت تأیید نتایج بهینه.

۲-۲. سیستم مدیریت پل‌ها

هدف اصلی از مدیریت پل، محافظت از سرمایه‌های کلان به‌کار گرفته شده در پل‌ها با کمترین هزینه اجرایی می‌باشد. برنامه‌ریزی اقتصادی منطبق با زمان و برنامه‌ریزی برای نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی یا حتی جایگزینی پل با کمترین اثرات برای ترافیک، وابسته به بازرسی‌های سیستماتیک پل‌ها، ارزیابی تخصصی از اطلاعات و برنامه‌های مؤثر، مدیریت پل می‌باشد (ریال و همکاران، ۲۰۰۰).

سیستم مدیریت پل (BMS) سیستمی است که برای بهینه‌سازی استفاده از منابع موجود جهت بازرسی، نگهداری، بازسازی و تعمیر و تعویض پل‌ها طراحی شده است. هدف از ایجاد BMS مجهز کردن ادارات نگهداری (سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور) به وسیله‌ای است که آنها را قادر می‌سازد تا حداقل دو مورد زیر را در مقاطع مختلف زمانی مشخص کند (تونیاس، ۱۹۹۵):

الف – وضعیت کلی هر پل در شبکه راه‌ها

ب– وضعیت هر جزء مشخص از یک پل

علاوه بر دو مورد اصولی فوق‌الذکر (ارزیابی وضعیت یک پل یا گروهی از پل‌ها)، یک BMS باید با استفاده از روش‌های تحلیلی و یا آماری دو مورد زیر را نیز مشخص نماید:

ج – برنامه‌های نگهداری و بازسازی امکان‌پذیر

د– هزینه‌های مربوط به این برنامه‌ها

واضح است که نیل به اهداف فوق کار ساده‌ای نمی‌باشد. دو عاملی که ایجاد و توسعه BMS را پیچیده می‌کند یکی بزرگی و پیچیدگی بانک اطلاعاتی است که وضعیت سازه‌ها را مشخص نموده و دیگری طبیعت متغیر سازه‌ها از نظر نوع سیستم طراحی و مصالح به‌کار رفته می‌باشد. از این‌رو، بدون وجود یک سیستم مناسب مدیریت پل‌ها، در تصمیم‌گیری‌های مربوط به بازرسی و تعمیر و نگهداری پل‌ها حالت مدیریت بحرانی حاصل می‌شود و تخصیص بودجه‌ها براساس وضعیت هر پل بدون در نظر گرفتن مجموعه پل‌های یک شبکه و تأثیر آن در شبکه مزبور انجام می‌گیرد.

استقرار یک سیستم BMS سنتی مبنی بر بازرسی، مستلزم اجرای بازرسی‌های دوره‌ای پل با هدف شناسایی پل‌هایی است که ممکن است نیاز به تعمیر یا بازسازی داشته باشند. با این حال، اطلاعات جمع‌آوری شده از بازرسی‌ها، یک پایگاه داده معتبر را تشکیل می‌دهد که می‌تواند برای درک چگونگی خراب شدن پل‌ها تحت شرایط محیطی و یا ترافیک مورد استفاده قرار گیرد (مهندسین مشاور کووی، ۲۰۰٤).

۲-۳. مدول‌های BMS

BMS را می‌توان به راحتی با روال‌های خاص و نیازهای خاص یک سازمان خاص در هر کشوری تطبیق داد زیرا BMSیک سیستم ماژولار با انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان زیاد است. به طور کلی، BMS شامل ۹ ماژول زیر است (فرانگوپول و همکاران، ۲۰۱۷):

ثبت فرم‌های اطلاعاتی (گواهی فنی پل‌ها)، بازرسی اولیه (سطحی)، بازرسی اصلی و ارزیابی شرایط، بازرسی ویژه، ظرفیت حمل و ارزیابی وسایل نقلیه، تهیه استراتژی نگهداری، اولویت‌بندی پروژه‌ها از نظر فنی و اقتصادی، بودجه‌بندی کارهای تعمیر و نگهداری و مدیریت حمل و نقل بارهای سنگین و فوق سنگین ترافیکی.

۲-٤. سیستم مدیریت پل مورد استفاده در ایران

نسخه بومی مدیریت پل‌های جاده‌ای کشور که از سال ۱۳۹۷ در دستور کار سازمان راهداری و حمل و جاده‌ای قرار گرفته است در دو مرحله تکمیل فرم اطلاعات پل و بارگذاری در نرم‌افزار تحت وب که اجرایی شده و در مرحله دوم ثبت اطلاعات آسیب‌ها و وضعیت خرابی پل و بارگذاری اطلاعات و تصاویر در سامانه یاد شده می‌باشد. در نهایت، جهت اولویت‌بندی پل‌ها بر مبنای روش امتیازبندی (وزن داده نشده)، نمره شاخص آسیب‌دیدگی سازه‌ای کل پل، شاخص آسیب‌دیدگی بهره‌برداری کل پل و رتبه‌بندی وضعیت کلی پل تعیین می‌شود. مدل‌های به‌کار رفته در این نسخه به شرح زیر است (شکل ۱):

الف- مدل شناسنامه

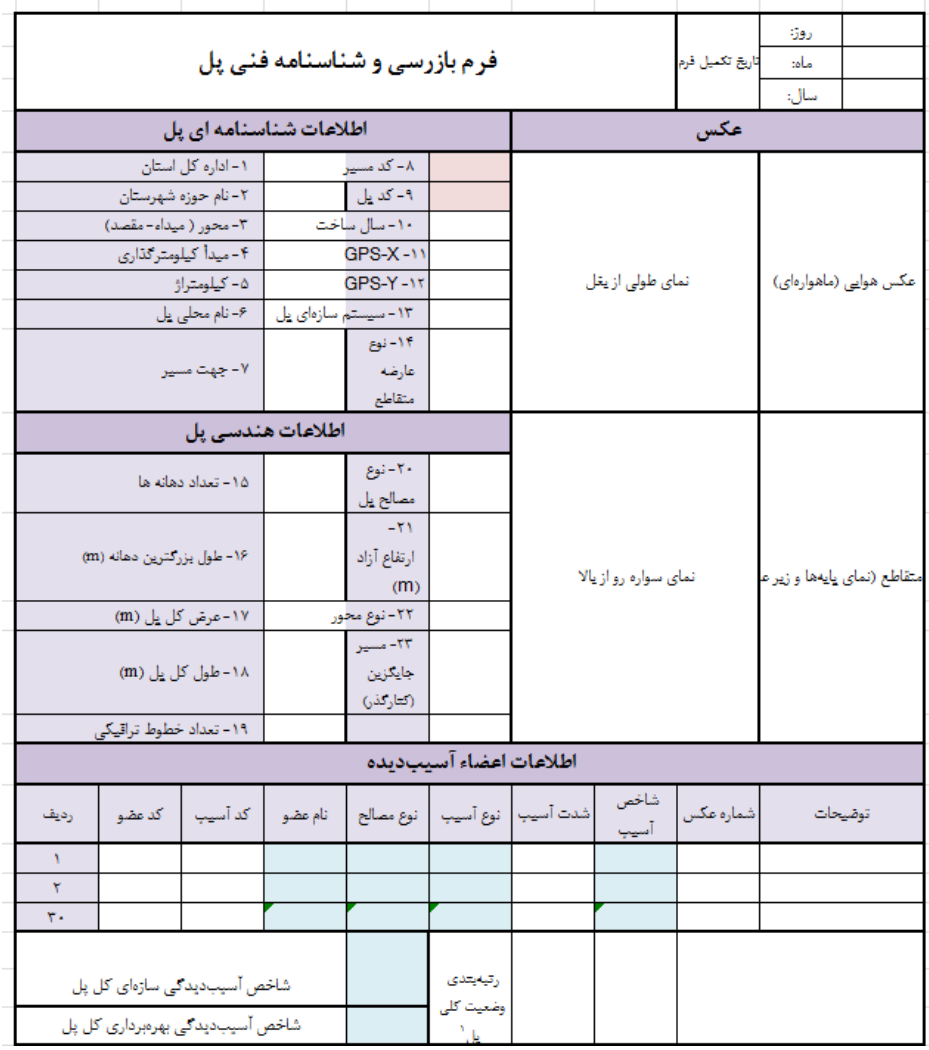
۱- داده‌های اداری: سازمان (۳ عنوان)

۲- داده‌های فنی: داده‌های هندسی، مختصات جهانی، دهانه‌ها، طراحی (١٤ عنوان)

ب- مدول بازرسی عمومی: بازدید عمومی، گزارش خرابی‌ها (۱ عنوان)

ج- مدول بازرسی اصلی: انجام بازرسی اصلی، انجام دید کلی، ثبت خرابی‌ها، لیست کنترل مسئول، ارزیابی اعضا و تهیه گزارش (نمره شاخص آسیب‌دیدگی سازه‌ای کل پل، شاخص آسیب‌دیدگی بهره‌برداری کل پل و رتبه‌بندی وضعیت کلی پل).

در این مدل، بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده ناشی از روش مشاهده عینی، دو شاخص سازه‌ای پل‌ها و شاخص بهره‌برداری پل‌ها تعیین شده است. برای محاسبه این شاخص‌ها، لیست خرابی‌های پل مشخص و برای هر یک ضریبی تعیین گردیده است. شاخص سازه‌ای و بهره‌برداری، جمع مقادیر تمامی اعضای یک پل حاصل‌ضرب ضریب عضو پل در ضرایب نوع خرابی، میزان خرابی، طول و ارتفاع پل، نوع راه و نوع عارضه متقاطع می‌باشد. برای خرابی زهکشی، رویه، حفاظ، نرده، پیاده‌رو و قرنیز شاخص بهره‌برداری محاسبه می‌شود. در سایر اعضای پل، شاخص سازه‌ای محاسبه می‌شود.



فرم بازرسی و شناسنامه فنی پل		تاریخ تکمیل فرم	روز:	
			ماه:	
			سال:	

عکس		اطلاعات شناسنامه ای پل			
عکس هوایی (ماهواره‌ای)	نمای طولی از یخل		۸- کد مسیر		۱- اداره کل استان
			۹- کد پل		۲- نام حوزه شهرستان
			۱۰- سال ساخت		۳- محور (میداء- مقصد)
			GPS-X -۱۱		۴- میداً کیلومترگذاری
			GPS-Y -۱۲		۵- کیلومتراژ
			۱۳- سیستم سازه‌ای پل		۶- نام محلی پل
			۱۴- نوع عارضه متقاطع		۷- جهت مسیر
متقاطع (نمای پایه‌ها و زیر عـ	نمای سواره رو از بالا	اطلاعات هندسی پل			
			۲۰- نوع مصالح پل		۱۵- تعداد دهانه ها
			۲۱- ارتفاع آزاد (m)		۱۶- طول بزرگترین دهانه (m)
			۲۲- نوع محور		۱۷- عرض کل پل (m)
			۲۳- مسیر جایگزین (کنارگذر)		۱۸- طول کل پل (m)
					۱۹- تعداد خطوط ترافیکی

اطلاعات اعضاء آسیب‌دیده									
توضیحات	شماره عکس	شاخص آسیب	شدت آسیب	نوع آسیب	نوع مصالح	نام عضو	کد آسیب	کد عضو	ردیف
									۱
									۲
									۳۰
				رتبه‌بندی وضعیت کلی پل ۱		شاخص آسیب‌دیدگی سازه‌ای کل پل			
						شاخص آسیب‌دیدگی بهره‌برداری کل پل			

شکل ۱. فرم ورود اطلاعات

۲-۵. روش تحقیق

۲-۵-۱. اهداف تحقیق

هدف اصلی

پیش‌بینی پل‌های با ریسک زیاد خرابی بر اساس عناصر مخرب تأثیرگذار

اهداف فرعی

- ایجاد امکان تعمیم ارزیابی تعداد محدودی پل به کل پل‌های مورد مطالعه
- برآورد شرایط بهینه بر اساس عناصر و عوامل مؤثر در بروز خرابی
- اولویت‌بندی عناصر و عوامل مؤثر در بروز خرابی

۲-۵-۲. جامعه آماری

جامعه آماری این تحقیق شامل کلیه پل‌های بتنی جاده‌ای استان زنجان شامل ۸۶۸۰ پل می‌باشد.

۲-۵-۳. روش گردآوری اطلاعات

در پژوهش حاضر، با توجه به نوع، هدف و موضوع مورد مطالعه و خصوصیات جامعه آماری برای گردآوری اطلاعات از پایگاه‌های داده و بانک‌های اطلاعاتی سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای استان و سالنامه آماری سازمان هواشناسی برای سال ۱۳۹۸ استفاده شده است.

در این پژوهش، اطلاعات مورد نیاز از جمله اطلاعات مربوط به مشخصه‌های فیزیکی پل‌ها و شرایط جوی و اقلیمی و ترافیکی که پل طی یک سال با آن مواجه بوده است از طریق فرم‌های ویژه‌ای که به کمک روش مشاهده عینی و توسط کارشناسان آموزش دیده تکمیل شده، استخراج شده است. پل‌هایی که مشخصه-های مشخص شده توسط روش تاگوچی بر اساس تعداد فاکتورها و سطوح با مشخصه‌های آنها مطابقت دارد، شاخص خرابی سازه‌ای و بهره‌برداری بر اساس مباحث عنوان شده قبل (مدل ایرانی BMS) محاسبه انجام شده است.

۲-۵-٤. روش تجزیه و تحلیل اطلاعات

در این پژوهش، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و شرایط جوی، اقلیمی و ترافیکی که پل‌های مورد مطالعه با آنها مواجه است شناسایی و شاخص‌های مورد قضاوت جهت سنجش وضعیت سلامت پل‌ها که در اینجا شاخص‌های خرابی سازه‌ای و بهره‌برداری است، شناسایی و در جدول ۱ به صورت ورودی‌ها و خروجی‌ها نمایش داده شده است. در مرحله بعد، بر اساس آرایه‌های متعامد، ترکیب متعامد بر اساس تعداد فاکتورها و سطوح تعیین و شاخص خرابی برای این نمونه‌های انتخابی تعیین می‌شود. در نهایت، براساس این ورودی‌ها و خروجی‌ها، مقدار سیگنال s-n بر اساس فرمول"خروجی بزرگتر بهتر" با کمک نرم افزار minitab محاسبه و ترکیبی که بیشترین میزان سیگنال را ایجاد کند به عنوان ترکیب ایجاد کننده بیشترین خرابی به‌دست خواهد آمد.

جدول ۱. نهاده‌ها و ستاده‌های پل‌های بتنی جاده‌ای

	خروجی‌ها	شرح		کد	شرح		کد
		شاخص خرابی سازه‌ای		O1	شاخص خرابی بهره‌برداری		O2
ورودی‌ها		شرح	کد	شرح	کد	شرح	کد
	هواشناسی	تعداد دفعات برف‌محوری	I1	تعداد دفعات باران‌محوری	I2	میزان بارش (ml)	I3
		تعداد روزهای یخبندان	I4	تعداد روزهای بارش برف	I5	میانگین بارش (ml)	I6
						میانگین اختلاف دما	I7
	ترافیکی	متوسط تردد روزانه (ADT)	I8	درصد وسیله نقلیه سنگین	I9	سرعت متوسط (km/h)	I10
	فیزیکی	طول پل	I11	طول بزرگترین دهانه پل	I12	ارتفاع پل	I13
						تعداد دهانه	

۲-۵-۵. آرایه‌های متعامد

بر اساس تعداد عوامل فیزیکی، اقلیمی و ترافیکی پل‌های مد نظر این پژوهش، تعداد فاکتورها بر اساس جدول ۱، ۱۳ می‌باشد. اطلاعات هر عامل (فاکتورها) هم بر اساس روش تنظیم دامنه به سه دسته تقسیم شده‌اند؛ یعنی عوامل یا همان فاکتورها همگی سه سطح دارند. روش تاگوچی برای این تعداد فاکتور و سطح، بر اساس محاسبات نرم-افزار (جدول ۲) آرایه متعامد L27 را پیشنهاد داده است.

در واقع، کافیست به‌جای ۸۶۸۵ دستگاه پل، فقط ۱۶ پل با ترکیب پیشنهادی را تجزیه و تحلیل کرد. در جدول ۳، ترکیب سطوح داده‌های ورودی برای ۲۷ طرح پیشنهادی تاگوچی قابل مشاهده می‌باشد. اعداد داخل جدول، سطح مد نظر برای هر فاکتور می‌باشند. برای مثال، طرح ۱، پلی است که تمامی سطوح فاکنورهای آن (در اینجا مشخصه-های فیزیکی و شرایط جوی و ترافیکی) برابر ۱ می‌باشند.

جدول ۲. خروجی محاسبات آرایه‌های متعامد تاگوچی L27

Taguchi Design

Taguchi Orthogonal Array Design

L27(3**13)

Factors: 13
Runs: 27

Columns of L27(3**13) Array

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

جدول ۳. آرایه‌های متعامد تاگوچی برای L27

طرح	ورودی‌ها													خروجی‌ها	
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	O1	O2
طرح ۱	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
طرح ۲	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
طرح ۳	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
طرح ٤	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3		
طرح ٥	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1		
طرح ٦	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2		
طرح ۷	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2		
طرح ۸	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3		
طرح ۹	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1		
طرح ۱۰	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
طرح ۱۱	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
طرح ۱۲	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
طرح ۱۳	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2		
طرح ١٤	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3		
طرح ١٥	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1		
طرح ١٦	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1		
طرح ۱۷	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2		

طرح ۱۸	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
طرح ۱۹	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
طرح ۲۰	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
طرح ۲۱	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
طرح ۲۲	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
طرح ۲۳	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
طرح ۲٤	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
طرح ۲۵	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
طرح ۲٦	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
طرح ۲۷	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

۲-۵-٦. انجام آزمایش

با توجه به تعداد زیاد پل‌ها و محدودیت‌های این پژوهش، نمونه آماری به پل‌های پنج محور اصلی استان زنجان (محورهای آزادراه زنجان- قزوین با کد ۱، آزادراه زنجان- تبریز با کد ۲، ترانزیت زنجان- قزوین با کد ۳، ترانزیت زنجان- تبریز با کد ٦ و اصلی زنجان- بیجار با کد ۱۰) و دهانه بالای ۵ متر محدود شد. به این ترتیب، ۳۸٤ دستگاه پل مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین، مشخصه‌های ورودی به چهار فاکتور مهم طول پل، درصد وسیله سنگین عبوری از پل، تعداد روزهای یخبندان و تعداد دفعات بارش برف در محور در سال (جدول ٤) محدود شد. بر اساس چهار فاکتور و چهار سطح جدید (جدول ۵)، تعداد آرایه متعامد مطابق جدول ٦، L16 خواهد بود. ترکیب جدید در جدول ۷ قابل مشاهده است. بر اساس ترکیب طرح‌ها، پل‌های منطبق شناسایی و بر اساس مدل ایرانی BMS، شاخص خرابی سازه‌ای و بهره‌برداری برای این ۱٦ ترکیب محاسبه گردید (جدول ۸). لازم به ذکر است که در طرح‌هایی که بیش از یک پل را نمایندگی می‌کردند محاسبات به روش میانگین‌گیری انجام شد.

جدول ٤. شاخص‌های ورودی و خروجی مدل پل‌های بتنی جاده‌ای

ستاده‌ها		شرح	کد	شرح	کد
		شاخص خرابی سازه‌ای	O1	شاخص خرابی بهره‌برداری	O2
نهاده‌ها	هواشناسی	تعداد دفعات برف‌محوری	I1	تعداد روزهای یخبندان	I4
	ترافیکی	طول پل	I11	درصد وسیله نقلیه سنگین عبوری	I9

جدول ۵. سطح‌بندی فاکتورها

فاکتور	طول پل	درصد وسیله سنگین	تعداد روزهای یخبندان	برف محوری
Code	I11	I9	I4	I1
Factor	D	C	B	A
Level 1	4-5	۹-۲۲	80-90	2-3
Level 2	5.1-7	۲۳-۲۵	91-100	4-7
Level 3	7.1-12	۲٦-۳۰	101-115	8-14
Level 4	13-136	۳۱-٤۰	116-120	15-19

جدول ٦. آرایه متعامد L16

Taguchi Design

Taguchi Orthogonal Array Design

L16 (44)**

Factors: 4
Runs: 16

Columns of L16 (45) Array**

1 2 3 4

جدول ۷. آرایه‌های متعامد تاگوچی برای L16

ترکیب	شاخص‌های فیزیکی، اقلیمی و ترافیکی				ترکیب	شاخص‌های فیزیکی، اقلیمی و ترافیکی			
	I1	I4	I9	I11		I1	I4	I9	I11
طرح ۱	1	1	1	1	طرح ۹	۳	۱	۳	٤
طرح ۲	1	2	2	2	طرح ۱۰	۳	۲	٤	۳
طرح ۳	1	3	3	3	طرح ۱۱	۳	۳	۱	۲
طرح ٤	1	4	4	4	طرح ۱۲	۳	٤	۲	۱
طرح ٥	2	1	2	3	طرح ۱۳	٤	۱	٤	۲
طرح ٦	2	2	1	4	طرح ۱٤	٤	۲	۳	۱
طرح ۷	2	3	4	1	طرح ۱٥	٤	۳	۲	٤
طرح ۸	2	4	3	2	طرح ۱٦	٤	٤	۱	۳

جدول ۸. نتایج شاخص‌های خرابی سازه‌ای و بهره‌برداری پل‌های منتخب

ردیف	طرح	O1	O1میانگین	O2	O2 میانگین	فاصله	کد محور	عرض	I1	I4	I9	I11
۱	1	5.53	12	0.52	0.68	77	4	39	3	80	9.5	20.5
۲	1	5.51		0.56		79	6	41	2	80	9.5	33
۳	1	4.05		0.54		18	1	0	2	80	9.5	46
٤	1	32.94		1.08		78	1	40	3	80	21.5	32
٥	2	28.19	28.19	0.26	0.26	73	6	32	2	91	24.6	5
٦	3	82.94	82.94	0.31	0.31	10	1	44	3	112	27	9
۷	4	15.42	15.42	0	0	22	2	45.5	2	116	39	14
۸	5	11.34	11.5	1.08	1.04	6	1	28	6	80	24.6	5.5
۹	5	11.66		0.99		56	6	62	6	80	24.6	7
۱۰	6	12.1	12.1	0	0	19	6	13	7	91	21.5	8

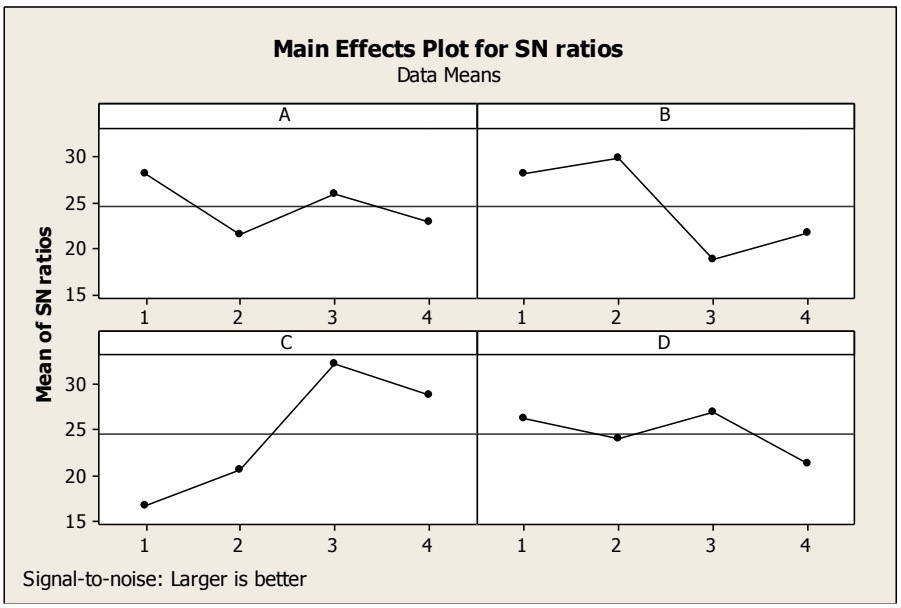
۱۱	7	3.89	11.95	0	0.12	28	4	12	6	112	31.4	5
۱۲	7	15.98		0.35		62	4	31	7	112	39	5
۱۳	7	15.98		0		65	4	22	7	110	39	5
۱٤	8	12.1	12.1	0.13	0.13	72	4	11	6	116	27	7
۱٥	9	49.9	49.9	0	0	74	1	95	14	80	31.4	37
۱٦	10	48.38	48.38	5.53	2.77	83	2	35	14	91	31.4	38
۱۷	10	48.38		0		24	2	55.3	11	91	31.4	41.5
۱۸	11	3.02	3.02	0	0	34	10	36	8	112	9.5	6
۱۹	12	16.56	21.67	0	0	12	2	39	10	116	24.6	5
۲۰	12	26.78		0		8	2	37	10	116	24.6	5
۲۱	13	57.46	63.55	2.59	1.45	15	4	27	15	80	31.4	14
۲۲	13	43.92		1.8		30	1	34.5	15	80	31.4	23.5
۲۳	13	39.31		1.38		4	1	19	15	80	31.4	34
۲٤	13	113.53		0		74	1	11	15	80	39	20
۲٥	14	10.22	55.86	0.35	0.28	64	2	13	16	91	27	5
۲٦	14	97.46		0.62		24	1	41	16	91	27	5
۲۷	14	98.51		0		69	1	12	18	91	27	5
۲۸	14	17.28		0.13		5	1	42	17	91	30	5
۲۹	15	1.51	1.96	0	0	12	6	55	18	112	24.6	8
۳۰	15	2.38		0		4	10	27	16	110	24.6	12
۳۱	16	6.22	5.18	0.83	0.24	31	2	30	15	116	9.5	8
۳۲	16	4.86		0.13		29	2	60	17	116	9.5	8
۳۳	16	4.86		0		9	4	46	17	116	9.5	10
۳٤	16	4.79		0		12	4	54	16	116	9.5	12

۳. تجزیه و تحلیل داده‌ها

در روش تاگوچی، به منظور شناسایی ترکیب بهینه، از معیار SN استفاده می‌شود. در این مثال، روش تحلیل، پیدا کردن ترکیبی است که بیشترین مقدار شاخص‌های خرابی سازه‌ای و بهره‌برداری را ارائه می‌دهد. ترکیبی که معیار SN آن بیشتر باشد، بهترین ترکیب است. مشاهده می‌شود که بهترین ترکیبی که بیشترین مقدار شاخص خرابی سازه‌ای را می‌تواند ایجاد کند ۳-۳-۲-۱ می‌باشد (شکل ۲). ترتیب اهمیت فاکتورها هم بر اساس جدول ۹ به صورت I9),B(I4),A(I1),D(I11) است. اگر این ترکیب پیشنهادی را در بخش پیش‌بینی نتایج تاگوچی وارد کنیم، مشاهده می‌شود که برای این ترکیب، اعداد شاخص خرابی سازه‌ای (جدول ۱۰) برای SN، مقدار ٤۳/۲۷۲۹ و برای میانگین، ۷٦/۲۷۲٥ خواهد بود.

متأسفانه، انجام محاسبات SN برای شاخص خرابی
بهره‌برداری (O2) به علت اشکال در داده‌های فاکتور D،
یا همان طول پل، ممکن نشد (جدول ۱۱).

شکل ۲. Main Effects Plot for SN Ratios for O1



جدول ۹. آنالیز طرح اختلاط خروجی O1

Taguchi Analysis: O1 versus A; B; C; D
Taguchi Analysis: C5 versus A; B; C; D

Response Table for Signal to Noise Ratios
Larger is better

Level	A	B	C	D
1	28.18	28.21	16.78	26.20
2	21.52	29.82	20.69	24.08
3	25.99	18.84	32.23	26.89
4	22.78	21.61	28.77	21.31
Delta	6.66	10.98	15.45	5.59
Rank	3	2	1	4

Response Table for Means

Level	A	B	C	D
1	34.637	34.237	8.075	25.370
2	11.913	36.133	15.830	26.715
3	30.743	24.967	50.200	37.000
4	31.637	13.592	34.825	19.845
Delta	22.725	22.540	42.125	17.155
Rank	2	3	1	4

جدول ۱۰. پیش‌بینی مقدار SN طرح منتخب خروجی O1

Main Effects Plot for SN ratios

Taguchi Analysis: C5 versus A; B; C; D

Predicted values

*** NOTE * The response labeled "Ln(StDev)" contains all missing values. No predictions will be computed or stored for this response.**

*** NOTE * The response labeled "StDev" contains all missing values. No predictions will be computed or stored for this response.**

S/N Ratio	Mean
43.2729	76.2725

Factor levels for predictions

A	B	C	D
3	2	1	4

جدول ۱۱. آنالیز طرح اختلاط خروجی O2

Taguchi Analysis: O2 versus A; B; C; D

Taguchi Analysis: C6 versus A; B; C; D

Response Table for Signal to Noise Ratios
Larger is better
*** ERROR * Factor D is highly correlated with other terms. No calculations were done.**

٤. نتیجه‌گیری

الف) روش تاگوچی یکی از انواع طراحی آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل جزیی است که با استفاده از آرایه‌های متعامد، تعداد آزمایش‌های لازم برای بهینه‌سازی شرایط تولید، به تعداد معدودی قابل کاهش است و زمانی عملکرد کاملاً صحیحی دارد که حداقل تداخل بین فاکتورها وجود داشته باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، دستگاه‌های متولی تعمیر و نگهداری پل‌ها هر ساله مبالغ بسیار زیادی جهت تعمیر و به‌روزرسانی پل‌ها با شمارگان بسیار هزینه می‌کنند. از سوی دیگر، شناسایی مشخصات فیزیکی و تعیین شاخص‌های خرابی برای پل‌ها نیز بسیار پُرزحمت، پُرخرج و زمان‌بر است. در این پژوهش، به کمک مزایای روش طرح آزمایش‌های تاگوچی، به‌جای انجام آزمایش، نمونه‌گیری و بررسی وضعیت موجود ۳۸٤ پل مورد مطالعه با چهار معیار مختلف و هر کدام در چهار سطح که در حقیقت ۲۵٦ ترکیب مختلف می‌شود،

۳٤ پل (با ١٦ ترکیب) مورد بررسی و تعیین شاخص‌ها قرار گرفتند و بر اساس این حجم نمونه، ترکیبی از سطوح فاکتورهای مورد بررسی که بیشترین میزان شاخص خرابی را ایجاد می‌کنند محاسبه شد. این ترکیب در حقیقت ترکیبی از فاکتورهایی است که بیشترین ریسک خرابی را بر پل‌ها تحمیل می‌کند.

در حال حاضر، ادارات راهداری کشور برای بررسی وضعیت پل‌ها و تعیین وضعیت خرابی آنها می‌بایست از کلیه پل‌های موجود بازدید به عمل آورند و از طریق تکمیل پرسشنامه ویژه توسط کارشناسان، عدد خرابی سازه‌ای و یا خرابی بهره‌برداری بر اساس یک سری جداول محاسبه گشته و در نهایت بر اساس عدد خرابی پل‌ها، پل‌های در وضعیت بحرانی جهت انجام فرآیند تعمیر و نگهداری انتخاب شوند. این فرایند، زمانی که می‌بایست حداقل هر سال یک بار برای همه پل‌ها مجدداً انجام شود، بسیار سخت‌تر و پُرهزینه و زمان‌بر خواهد بود. در روش تاگوچی، بر اساس تعداد معیارها و سطوح هر معیار، ترکیب‌هایی از معیارها و سطوح آنها تعیین می‌شود. کافی است پل‌هایی که با ترکیب‌های پیشنهادی تاگوچی مطابقت دارند انتخاب و فرآیند ارزیابی و تعیین عدد شاخص خرابی برای این پل‌ها، که در این مثال ۳٤ دستگاه پل بودند، انجام شود. نتایج حاصل در الگوریتم تاگوچی که یک تحلیل واریانسی چندگانه می‌باشد وارد می‌شود و در نتیجه‌ی تحلیل، ترکیبی از معیارها و سطوح که می‌تواند بیشترین شاخص خرابی سازه‌ای را در پی داشته باشد پیشنهاد می‌گردد. خروجی روش تاگوچی برای پروژه‌های تعمیر و نگهداری از این‌رو مهم است که با استفاده از این روش می‌توان وضعیت‌هایی را که اگر یک سازه (در این پژوهش یک پل) در معرض آن قرار گیرد می‌تواند منجر به بروز خرابی در آن شود را پیش‌بینی کرد و بودجه‌بندی تعمیر و نگهداری را نه بر اساس ارقام حاصل از محاسبه زمان‌بر و گران شاخص خرابی همه سازه‌ها، بلکه بر اساس سازه‌هایی که در معرض وضعیت پُرریسک قرار دارند متمرکز کرد و با کاهش اثرات عوامل مخرب (استفاده از روش‌های پیشگیرانه) و یا تعمیر اضطراری، اجازه قرار گرفتن سازه‌ها در وضعیت بحرانی را نداد. در حقیقت، این روش یک روش پویش‌گرایانه[1] است که در مقابل روش واکنش‌گرایانه[2] پیشنهاد می‌شود.

در این مقاله، جهت اثبات امکان استفاده از روش تاگوچی، پل‌های بتنی جاده‌ای پنج محور اصلی استان زنجان بررسی شد و شاخص خرابی برای ۳٤ پل با ترکیب پیشنهادی در مدل قرار داده شد. نتیجه تحلیل، ترکیب ۳-۳-۲-۱ را به عنوان ترکیبی با بیشترین پتانسیل خرابی زیاد پیشنهاد داد. این نسبت در حقیقت بیان می‌کند که پل‌هایی که در محورهای با ۲ تا ۳ نوبت برف سنگین، ۹۱ الی ۱۰۰ روز یخبندان، و تردد ۲٦ الی ۳۰ درصدی وسایل سنگین نسبت به کل تردد عبوری در طول سال مواجه بوده و دارای طول ۷/۱ الی۱۲ متر می‌باشند، با میانگین تخمینی ۷٦/۲۷۲۵ برای شاخص خرابی سازه‌ای، بیشترین ریسک خرابی را دارا می‌باشند. همچنین، در میان چهار فاکتور مؤثر در خرابی سازه‌ای پل، شاخص درصد ترافیک سنگین مهمترین عامل و شاخص طول پل کم-اهمیت‌ترین می‌باشد. شاخص تعداد روزهای یخزدگی و تعداد روزهای بارش برف در طول محور در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند.

ب) روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، یک روش ریاضی مبتنی بر تحلیل واریانس اثبات شده و پُرکاربرد برای تعمیم آزمایش محدود با ترکیب خاص پیشنهادی به‌جای کل ترکیب‌های ممکن است. در این پژوهش، اگرچه آزمایش‌ها فقط برای چهار فاکتور انجام شدند ولی به‌راحتی می‌توان ۱۳ یا حتی بیشتر فاکتور مؤثر در بروز خرابی در پل‌ها را وارد مسأله کرده و ترکیب‌های باعث ریسک زیاد را شناسایی و آنها را اولویت‌بندی کرد. لذا، اگرچه این روش نمی‌تواند رافی انجام و استقرار یک

[1]- Pro action

[2]- Reactionary

سیستم جامع مدیریت پل باشد، ولی می‌تواند به عنوان یک روش کمکی و زودبازده و کم‌هزینه برای شناسایی و رتبه‌بندی ریسک‌های پل‌ها به‌کار رود.

همچنین، پیشنهاد می‌گردد برای بالا بردن دقت کار، دسته‌بندی‌های مختلفی، مثل پل‌های واقع در محور اصلی، محورهای فرعی، مناطق کوهستانی سرد و... انجام داده و آزمایش‌ها را برای هر گروه تکرار کرد. روش تاگوچی، به‌راحتی برای کل پل‌های کشور هم قابل تعمیم است و مدیران استانی می‌توانند به‌راحتی و به سرعت درک مناسبی از وضعیت پل‌های تحت مدیریت خود داشته و تخصیص بودجه را انجام دهند، به‌خصوص زمانی که محدودیت زمانی بسیار مهم است.

۵. مراجع

Aita, C. A. G., Goss, I. C., Rosendo, T. S., Tier, M. D., Wiedenheoft, A. and Reguly, A. 2020. "Shear strength optimization for FSSW AA6060-T5 joints by Taguchi and full factorial design". J. Mater. Res. Technol., 9: 16072e9. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.062

Alonso Medina, P., León González, F. J. and Todisco, L. 2022. "Data-driven prediction of long-term deterioration of RC bridges". Constr. Build. Mater. 317: 125790. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125790

Antony, J. 2003. "Design of experiments for engineers and scientists". Elsevier Science & Technology Books.

Baharudin, B. T. H. T., Ibrahim, M. R., Ismail, N., Leman, Z., Ariffin, M. K. A. and Majid, D. L. 2012. "Experimental investigation of HSS face milling to AL6061 using Taguchi method". Proc. Eng., 50: 933-941.

Calvert, G., Neves, L., Andrews, J. and Hamer, M. 2020. "Multi-defect modeling of bridge deterioration using truncated inspection records". Reliab. Eng. Syst. Safe., 200: 106962. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106962

COWI Consultant Engineers. 2004. "Bridge management system". Technical Report.

Frangopol, D. M., Dong, Y. and Sabatino, S. 2017. "Bridge life-cycle performance and cost: Analysis, prediction, optimisation and decision-making". Struct. Infrastruct. Eng., 13(10): 1239-1257. https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1267772

Furtak, K. 2021. "Contemporary challenges of science and technology– selected reflections". Cement Wapno Beton, 26(5): 413-430.

Hikmat, M., Rostam, S. and Ahmed, Y. M. 2021. "Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology". Res. Eng., 11: 100264. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100264

Hong, C. W. 2012. "Using the Taguchi method for effective market segmentation". Exp. Syst. Appl., 39: 5451-5459.

Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J. and Zhou, Z. 2020. "Sustainability-based lifecycle management for bridge infrastructure using 6D BIM". Sustain., 12(6): 2436. https://doi.org/10.3390/su12062436

Kumar, R., Kumar, K. and Bhowmik, S. 2014. "Optimization of mechanical properties of epoxy based wood dust reinforced green composite using Taguchi method". Proc. Mater. Sci. 5: 688-696. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.316

Lyu, S. R., Wu, W. T., Hou, C. C. and Hsieh, W. H. 2010. "Study of cryopreservation of particular chondrocytes using the Taguchi method". Cryobiol., 60: 165-176.

Mustapha, A. N., Zhang, Y., Zhang, Z., Ding, Y., Yuan, Q. and Li, Y. 2021. "Taguchi and ANOVA analysis for the optimization of the microencapsulation of a volatile phase change material". J. Mater. Res. Technol., 11: 667e80. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.02518

Natrayan, L., Anand, R. and Santhosh Kumar, S. 2020. "Optimization of process parameters in TIG welding of AISI 4140 stainless steel using Taguchi technique". Mater.: Proc.. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.150

Nuruddin, M. and Bayuaji, R. 2009. "Application of Taguchi's approach in the optimization of mix proportion for microwave incinerated rice husk ash foamed concrete". IJCEE, 9: 121-129.

Ogbonna, O. S., Akinlabi, S. A., Madushele, N., Fatoba, O. S. and Akinlabi, E. T. 2023. "Grey-based Taguchi method for multi-weld quality optimization of gas metal arc dissimilar joining of mild steel and 316 stainless steel". Results Eng., 100963.

Perno, M., Hvam, L. and Haug, A. 2022. “Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers”. Comput. Ind., 134: 103558. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558

Ranjit, K. and Roy, A. 2010. “Primer on the Taguchi method”. Second ed., Society of Manufacturing Engineers.

Rashidi, M., Hoshyar, A. N., Smith, L., Bijan, S. and Siddique, R. 2020. “A comprehensive taxonomy for structure and material deficiencies, preventions and remedies of timber bridges”. J. Build. Eng. 34: 101624. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101624

Roy, R. K. 2011. “Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement”. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 369-402.

Ryall, M. J., Parke, G. A. R. and Harding, J. E. 2000. “Bridge management: Inspection, maintenance, assessment & Repair”. Department of Civil Engineering, University of Surrey, UK.

Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. and Dassisti, M. 2021. “Digital twin paradigm: A systematic literature review”. Comput. Ind., 130: 103469. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469

Singh, M. and Singh, S. 2021. “Multiple response optimization of ultrasonic assisted electric discharge Machining of Nimonic 75: A Taguchi-Grey relational analysis approach”. Mater.: Proc., 173: 1-6. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.173

Suji, D., Adesina, A. and Mirdula, R. 2021. “Optimization of self-compacting composite composition using Taguchi-Grey relational analysis”. Materialia, B, 15. https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101027

Taguchi, G. 1986. “Introduction to quality engineering”. Asian Productivity Organization/UNIPUB, White Plains.

Tan, Y. H., Abdullah, M. O., Nolasco-hipolito, C. and Zauzil, N. A. 2017. “Application of RSM and Taguchi methods for optimizing the transesterification of waste cooking oil catalyzed by solid ostrich and chicken-eggshell derived CaO”. Renew. Energy 114: 437-447.

Tonias, D. E. 1995. “Bridge Engineering: Design, rehabilitation and maintenance of modern highway bridges". McGraw-Hill, N. Y.

Turski, R. and Rogala, W. 2022. “Current situation and further development of AAC in Europe”. Cement Wapno Beton, 27(3): 154-165.

Yusuff, A. S. 2019. “Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by Leucaena leucocephala seed pod activated carbon: Equilibrium kinetic and thermodynamic studies”. Arab J. Basic Appl. Sci. 26(1): 89-102. https://doi.org/10.1080/25765299.2019.1567656.

Yuvaraj Ramesh, K. 2021. “Experimental investigation on strength properties of concrete incorporating ground pond ash”. Cement Wapno Beton, 26: 253-262.

Zhang, M., Zhao, H., Fan, L. and Yi, J. 2022. “Dynamic modulus prediction model and analysis of factors influencing asphalt mixtures using gray relational analysis methods”. J. Mater. Res. Technol., 19: 1312e21. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.120