University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 56 (2026), Issue 3, 51-66

EXTENDED ABSTRACT

Effects of Soil Settlement on the Stability of Historic Structures: A Case Study of the Izadkhast Bridge-Dam and Architectural-Structural Conservation Strategies

Mehdi Niknam[a,*], Negar Salehi Alamdari[b], Vahid Maleki Moghadam[c]

[a] Postdoctoral Researcher in Architecture, Faculty of Art and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[b] *PhD in Civil Engineering, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roshdiyeh Non-Governmental Non-Profit Institute of Higher Education, Tabriz, Iran*

[c] *M.A. Student in Architecture, Department of Art and Architecture, Roshdiyeh Non-Governmental Non-Profit Institute of Higher Education, Tabriz, Iran*

Received: 01 October 2026; **Reviewed:** 09 November 2026; **Accepted:** 18 November 2026

Keywords:
Soil settlement; Historic structures, Izadkhast Bridge-Dam, Soil-structure interaction, Damage assessment, Architectural conservation.

1. Introduction

Historical bridges are highly susceptible to damage originating from structural, environmental, and anthropogenic sources. Central to the preservation of such heritage is Damage Diagnosis the rigorous analysis of the nature and causality of deterioration, including cracking, material degradation, and other phenomena affecting structural performance. Masonry structures, particularly historical bridges and dams, are uniquely sensitive to geotechnical instability due to their reliance on shallow foundations and direct interface with the geological substratum. Among these risks, soil settlement and specifically differential settlement is a decisive factor in reducing structural stability. This phenomenon disrupts the equilibrium of compressive forces, alters load-transfer paths, induces stress concentrations in critical zones, and triggers the propagation of structural cracks. Recent literature underscores that in historical masonry structures, Soil-Structure Interaction (SSI) plays a fundamental role in the system's global response; neglecting this interaction leads to erroneous vulnerability assessments and ineffective intervention designs.

In the Iranian context, numerous historical monuments are located in zones prone to groundwater depletion, localized erosion, and progressive soil settlement. The Izadkhast Bridge-Dam serves as a quintessential case study, given its direct and complex interaction with the surrounding natural geological formation. Any shift in geotechnical conditions poses an immediate threat to its structural integrity. Despite its significance, there is a distinct paucity of research analyzing the impact of soil settlement on the stability of the Izadkhast Bridge-Dam or formulating comprehensive architectural and structural conservation strategies. This research gap results in conservation interventions often implemented without a thorough analysis of soil-structure behavior or an empirical understanding of the underlying damage patterns.

Consequently, this study addresses the following primary research question: How does soil settlement influence the structural stability of the Izadkhast Bridge-Dam, and what architectural and structural conservation strategies can effectively mitigate the risk of instability? In response, this research aims to analyze

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.75042.2540
Online ISSN: 2717-4077
* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0001-8823-0764
E-mail addresses: m.niknam@modares.ac.ir (Mehdi Niknam), salehi.ngr@gmail.com (Negar Salehi Alamdar), vmaleki.1396@gmail.com (Vahid Maleki Moghaddam).

the vulnerability patterns resulting from settlement, identify critical structural points, and propose a set of minimal, compatible, and actionable conservation interventions.

2. Research Methodology

This study employs a descriptive-analytical framework utilizing a mixed-methods approach (fieldwork and simulation). The research procedure is structured in three phases:

2.1. Data acquisition and baseline establishment

The initial phase involves establishing the baseline condition of the Izadkhast Bridge-Dam through architectural surveying, comprehensive damage documentation, photogrammetry, geometric mapping, and the aggregation of existing geotechnical and historical datasets.

2.2. Computational modeling

The structure is digitally reconstructed as a 3D model using AutoCAD and Revit/HBIM (Heritage Building Information Modeling) environments.

2.3. Finite Element Analysis (FEA)

The model is subsequently exported to ANSYS or Abaqus to perform a high-fidelity structural analysis. This phase investigates the effects of differential soil settlement and Soil-Structure Interaction (SSI) on structural performance, specifically analyzing displacements, compressive stress states, crack propagation patterns, and the factor of safety. Where required, the FEA models are cross-validated using ETABS for comparative assessment, while PLAXIS is utilized to simulate complex geotechnical variables.

2.4. Variable definitions:

- **Independent Variables:** Magnitude and pattern of soil settlement, soil stiffness degradation, and moisture/geotechnical boundary conditions.
- **Dependent Variables:** Resultant displacements, stress distributions, crack propagation, structural stability reduction, and loss of bearing capacity.
- **Controlled Variables:** Structural geometry, material properties, boundary conditions, dead loads, modeling assumptions, and ambient temperature during simulation.

3. Research findings

Table 1. Structural analysis results under dead load, hydrodynamic flood pressure, and seismic loads

Loading Type	Max. Displacement (mm)	Max. Tensile Stress (MPa)	Max. Compressive Stress (MPa)	Ratio: Max Tensile Stress / Strength	Ratio: Max Compressive Stress / Strength
Dead Load	0.27573	0.1316	0.60041	0.12	0.029
	Arch Crown (V3)	Between Arches V2-V3 (Parapet connection)	Pier bases & Abutment interface	-	-
Hydrodynamic (Flood)	17.571	6.8017	20.462	6.36	0.97
	Parapet Top	Abutment interface	Under Arch Crowns (V3, V5)	-	-
Seismic (Transverse)	0.51784	0.6845	1.1588	0.33	0.055
	Parapet Top	Pier-Foundation interface	Abutment interface	-	-
Seismic (Longitudinal)	0.51518	0.69765	1.0538	0.33	0.05
	Point of Seismic Load	Pier-Foundation interface	Abutment interface	-	-

4. Discussion and Analytical Synthesis

Drawing upon the theoretical framework and the computational capabilities of the utilized software, the analysis elucidates that differential settlement is the critical driver of structural variation in the Izadkhast Bridge-Dam. In models that account for integrated soil-structure interaction, uniform soil stiffness degradation does not merely induce gradual displacements. Rather, non-uniform settlement triggers heterogeneous stress redistribution across piers and arches, inducing stress concentrations at critical interfaces-specifically at the pier-to-abutment connections and within the crown or the middle third of the arches. These results corroborate existing literature emphasizing the primacy of SSI (Soil-Structure Interaction) in historical masonry structures.

The research findings indicate that effective conservation strategies for the Izadkhast Bridge-Dam require a bipartite approach. The first tier comprises geotechnical and site-specific interventions, such as localized subgrade stabilization, hydrological control of surface and subsurface water, mitigation of scour around the piers, and rigorous settlement monitoring. The second tier involves structural and architectural measures, including crack stitching, material consolidation, localized reinforcement of stress-concentration zones, and minimal strengthening of critical structural elements. The analysis suggests that prioritizing structural reinforcement without addressing the underlying geotechnical instability leads to a high probability of damage recurrence in the medium term; a finding consistent with international research.

In summary, the structural integrity of the Izadkhast Bridge-Dam is intrinsically dependent on the condition of the subgrade and the distribution of settlement. Vulnerability assessments remain incomplete without an integrated simulation of architectural, geotechnical, and structural variables. Consequently, this study provides a robust interdisciplinary framework for identifying the causality of damage, analyzing structural behavior, and formulating evidence-based conservation strategies, which may be applied to analogous historical bridge-dam systems.

5. Conclusion

Focusing on the effects of soil settlement on the stability of historical structures through the case study of the Izadkhast Bridge-Dam, this research demonstrates that soil settlement-specifically differential settlement is a primary determinant governing structural behavior and the initiation or propagation of damage in historical masonry structures. Given that bridge-dams function simultaneously as structural-hydraulic systems, geotechnical and hydrological variations (such as moisture fluctuations, groundwater table oscillations, localized subgrade scour, and altered boundary conditions) disrupt primary load-transfer paths. This phenomenon shifts the structural regime from a predominantly compressive state to one dominated by tensile, flexural, and shear components-stress states that are inherently detrimental to historical masonry materials.

Ultimately, the structural stability of the Izadkhast Bridge-Dam, and analogous historical monuments, depends less on superstructure retrofitting than on comprehending and managing subgrade settlement alongside soil-structure interaction (SSI) behavior. Therefore, the most efficacious conservation strategy relies on an integrated approach: employing rigorous documentation, SSI-based numerical modeling, and targeted minimal interventions to mitigate the root causes of instability and curb progressive damage over time.

اثرات نشست خاک بر پایداری سازه‌های تاریخی: تحلیل موردی پل- بند ایزدخواست و راهکارهای حفاظتی از بُعد معماری و سازه‌ای

مهدی نیکنام*[1]، نگار صالحی علمداری[2]، وحید ملکی مقدم[3]

[1] پژوهشگر پسادکتری معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
[2] استادیار گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی- غیردولتی رشدیه، تبریز
[3] دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، گروه هنر و معماری، مؤسسه آموزش عالی غیردولتی- غیرانتفاعی رشدیه، تبریز

دریافت: 1405/7/9، بازنگری: 1405/8/18، پذیرش: 1405/8/27، نشر آنلاین: 1405/8/27

چکیده

نشست خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی در بسیاری از دشت‌های ایران، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، می‌تواند با ایجاد تغییرشکل‌های تدریجی و نامتقارن، پایداری سازه‌های تاریخی بنایی را تهدید کند. این پژوهش با هدف شناخت سازوکار اثرگذاری نشست بر رفتار سازه‌ای پل- بند ایزدخواست، تعیین نقاط و الگوهای آسیب‌پذیری و ارائهٔ راهکارهای حفاظتی یکپارچه و قابل اجرا، انجام شده است. روش پژوهش ترکیبی (کیفی- کمی) است. در بخش میدانی، مستندسازی معماری و آسیب‌نگاری شامل برداشت هندسی، ثبت ترک‌ها، تغییرشکل‌ها، خروج از شاقولی و تهیه نقشه‌های آسیب انجام شد. سپس با تکیه بر مفهوم برهم‌کنش خاک- سازه، سناریوهای نشست (یکنواخت، شیب‌دار و موضعی در تکیه‌گاه‌ها/ پایه‌ها) تعریف و از طریق مدل‌سازی و تحلیل عددی، تغییرات مسیر انتقال نیرو، تمرکز تنش و ظرفیت پایداری اجزای باربر ارزیابی گردید. درنهایت، نتایج تحلیلی با شواهد میدانی تطبیق داده شد تا مجموعه‌ای از مداخلات حداقلی از منظر معماری و سازه استخراج شود. یافته‌ها نشان می‌دهد نشست نامتقارن نسبت به نشست یکنواخت، اثر بحرانی‌تری بر پایداری پل- بند دارد و با برهم‌زدن تقارن رفتاری، موجب تمرکز تنش در نواحی اتصال و گذار سختی، افزایش کشش‌های ثانویه در مصالح بنایی و تشدید الگوی ترک‌های قطری/ پله‌ای می‌شود. همچنین نقش شرایط رطوبتی و فرسایش موضعی در تقویت پیامدهای نشست، در نقاط بحرانی قابل مشاهده است. نتیجه‌گیری پژوهش بر ضرورت یک راهبرد پیشگیرانه- اصلاحی تأکید دارد: 1) کنترل عوامل تشدیدکنندهٔ نشست و مدیریت آب‌های سطحی/ زیرسطحی و زهکشی پیرامونی، 2) تقویت هدفمند، کمینه و سازگار با مصالح تاریخی به‌همراه پایش مستمر تغییرشکل‌ها برای جلوگیری از گذار آسیب‌ها به ناپایداری سازه‌ای. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که تحت فشار هیدرولیک جریان سیلاب (0/43 مگاپاسکال)، حداکثر جابه‌جایی قائم سازه به 17/57 میلی‌متر می‌رسد. همچنین، تحلیل توزیع تنش‌ها حاکی از تمرکز تنش کششی تا 6/80 مگاپاسکال در طاق‌های بحرانی (V3 و V5) است که فراتر از ظرفیت کششی مصالح بنایی بوده و مستقیماً با الگوی ترک‌های قطری و پله‌ایِ مشاهده‌شده در شواهد میدانی هم‌پوشانی دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد نشست نامتقارن بستر، محرک اصلی در تشدید تنش‌های ثانویه و ناپایداری سازه در شرایط بارگذاری ترکیبی است.

کلیدواژه‌ها: نشست خاک، سازه‌های تاریخی، پل- بند ایزدخواست، برهم‌کنش خاک- سازه، آسیب‌نگاری، حفاظت معماری.

1- مقدمه

پل‌های تاریخی به‌علت ساختار و شرایط محیطی آسیب‌های زیادی را از ابعاد مختلف طبیعی، سازه‌ای و انسانی متحمل شده‌اند. در این ارتباط، مانند دیگر بناهای تاریخی تشخیص آسیب، یعنی ارزیابی و تحلیل عوامل و ماهیت آسیب‌ها، ازجمله ترک‌ها، فرسایش‌ها و سایر پدیده‌هایی که بر سازه تأثیر گذاشته‌اند، اهمیت ویژه‌ای دارد (Crochi، 2016).

سازه‌های تاریخی بنایی، به‌ویژه پل‌ها و بندهای تاریخی، به‌دلیل وابستگی مستقیم به بستر زمین و پی‌های کم‌عمق، در برابر تغییرات ژئوتکنیکی بسیار آسیب‌پذیرند. در میان این مخاطرات، نشست خاک و به‌طور خاص نشست نامتقارن، یکی از عوامل تعیین‌کننده در کاهش پایداری سازه‌های تاریخی به‌شمار می‌رود؛ زیرا این پدیده با برهم‌زدن تعادل نیروهای فشاری، موجب تغییر

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2026.75042.2540
* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 0914148986
* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0001-8823-0764
آدرس ایمیل: m.niknam@modares.ac.ir (م. نیکنام)، salehi.ngr@gmail.com (ن. صالحی علمداری)، vmaleki.1396@gmail.com (و. ملکی مقدم).

مسیر انتقال بار، تمرکز تنش در نواحی حساس و گسترش ترک‌های سازه‌ای می‌شود. پژوهش‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که در سازه‌های بنایی تاریخی، اندرکنش خاک و سازه، نقش کلیدی در پاسخ کلی سیستم دارد و نادیده گرفتن آن می‌تواند به خطای جدی در ارزیابی آسیب‌پذیری و طراحی مداخلات حفاظتی منجر شود (Shabani و Kioumarsi، 2023؛ Tajali، 2022). براین اساس، مسئلهٔ اصلی پژوهش حاضر آن است که نشست خاک چگونه بر پایداری سازه‌ای پل- بند ایزدخواست اثر می‌گذارد و چه راهکارهای حفاظتی می‌تواند در سطح معماری و سازه‌ای برای کاهش خطر ناپایداری ارائه شود؟ در پاسخ به این مسئله، این پژوهش می‌کوشد ضمن تحلیل الگوی آسیب‌پذیری ناشی از نشست، نقاط بحرانی سازه را شناسایی کرده و مجموعه‌ای از مداخلات حداقلی، سازگار و قابل اجرا را پیشنهاد کند.

2- پیشینهٔ پژوهش

در دهه‌های اخیر، موضوع پایداری سازه‌های تاریخی در برابر نشست زمین و اندرکنش خاک- سازه، به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های مرمتی و مهندسی سازه تبدیل شده است. بخش قابل توجهی از مطالعات بین‌المللی بر رفتار پل‌های بنایی تاریخی، تغییرشکل پی‌ها، تحلیل عددی و روش‌های پایش سلامت سازه‌ای متمرکز بوده‌اند.

Shabani و Kioumarsi (2023) در پژوهشی درمورد ارزیابی لرزه‌ای پل‌های تاریخی بنایی نشان دادند که لحاظ‌کردن اندرکنش خاک- سازه در مدل‌سازی عددی، موجب تغییر چشمگیر در الگوی توزیع تنش و تغییرمکان قوس‌ها می‌شود. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر آن بود که نشست نامتقارن تکیه‌گاه‌ها می‌تواند به تمرکز تنش در تاج قوس و نواحی اتصال پایه‌ها منجر شود.

Tajali و همکاران (2022) با استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر داده‌های حسگرمحور، رفتار دینامیکی یک پل قوسی تاریخی را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ترکیب داده‌های پایش ارتعاشی و مدل اجزای محدود، توانایی بالایی در تشخیص آسیب‌های ناشی از تغییرشکل پی و نشست تدریجی دارد.

Milani و همکاران (2012) در تحلیل غیرخطی پل‌های بنایی تاریخی، نشان دادند که ترک‌خوردگی ناشی از نشست پی معمولاً ابتدا در نواحی کششی قوس ظاهر می‌شود و سپس به‌صورت زنجیره‌ای موجب افت سختی کلی سازه می‌گردد. آن‌ها تأکید کردند که تحلیل حدی و مدل‌های ماکرو می‌توانند رفتار واقعی سازه‌های تاریخی را با دقت مناسبی بازنمایی کنند.

Lourenço (2006) در مطالعات خود پیرامون سازه‌های بنایی تاریخی بیان کرد که تغییرات رطوبتی خاک و افت سطح آب زیرزمینی، یکی از عوامل اصلی نشست تدریجی و آسیب در سازه‌های تاریخی اروپا محسوب می‌شود. وی همچنین بر ضرورت تحلیل هم‌زمان رفتار خاک، پی و بدنه بنایی تأکید کرد.

D'Ayala و همکاران (2011) در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌های تاریخی مدیترانه‌ای دریافتند که وجود ضعف در بستر و ناپایداری پی‌ها، اثر بسیار بیشتری نسبت به ضعف مصالح در تخریب سازه دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقاوم‌سازی موضعی بدون اصلاح شرایط ژئوتکنیکی، تأثیر بلندمدت محدودی خواهد داشت.

Bayraktar و Hökelekli (2025) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود و اعمال رفتار غیرخطی مصالح (مدل آسیب خردشوندگی بتن) نشان دادند که تغییرشکل‌پذیری خاک بستر، نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر الگوهای آسیب و مکانیزم‌های خرابی در پل‌های قوس سنگی و آجری دارد و نادیده گرفتن SSI خطاهای برآوردی چشمگیری در تحلیل تنش ایجاد می‌کند.

Malena و همکاران (2021) در پژوهشی برروی پل‌های قوسی تحت نشست پایه‌ها، مدل‌های پیوسته و گسسته را مقایسه کرده و اثبات نمودند که نشست‌های نامتقارن موضعی در پایه‌ها به‌شدت ظرفیت باربری نهایی سازه را کاهش داده و موجب فعال شدن مکانیسم لولای پلاستیک و ترک‌های قطری می‌شود.

Borlenghi و همکاران (2024) با پایش بلندمدت و تحلیل عددی رفتار پل‌های قوسی بنایی تحت پدیده آبشستگی و نشست ناشی از آن دریافتند که تغییر شکل‌های تدریجی بستر، تمرکز تنش ثانویه شدیدی در قوس‌های میانی ایجاد می‌کند که برای جلوگیری از گسیختگی نیازمند پایش و تحکیم دوسطحی ژئوتکنیکی و سازه‌ای است.

Shabani و همکاران (2022) در پژوهشی درباره به‌روزرسانی مدل برج‌های تاریخی، نشان دادند که اندرکنش خاک- سازه سبب تغییر در فرکانس‌های طبیعی بنا می‌شود و می‌توان از این تغییرات به‌عنوان شاخصی برای تشخیص نشست و آسیب استفاده کرد.

Ramirez و همکاران (2021) در مطالعه‌ای برروی پل‌های تاریخی اسپانیا، به این نتیجه رسیدند که استفاده از فناوری HBIM و Digital Twin در پایش تغییرشکل‌ها، امکان پیش‌بینی نواحی بحرانی ناشی از نشست را فراهم می‌کند و می‌تواند دقت تصمیم‌گیری مرمتی را افزایش دهد.

Karimi و همکاران (2022) در تحلیل رفتار لرزه‌ای پل‌های سنگی قوسی ایران دریافتند که کاهش ظرفیت باربری خاک بستر و فرسایش پایه‌ها، عامل اصلی ایجاد ترک‌های مورب در دهانه‌های میانی پل است.

Rezaie و Mousavi (2020) در مطالعه‌ای پیرامون سازه‌های آبی ساسانی بیان کردند که در پل- بندهای تاریخی، نشست موضعی پی موجب تغییر الگوی انتقال نیرو و ایجاد تنش‌های خمشی غیرمنتظره در بدنه سازه می‌شود.

Ahmadi و Alavi (2023) با بررسی اثر افت سطح آب زیرزمینی در دشت‌های مرکزی ایران نشان دادند که فرونشست زمین در مجاورت بناهای تاریخی، به‌صورت ترک‌های عمیق در پی و دیوارهای باربر ظاهر می‌شود.

Hoseini و همکاران (2021) در پژوهشی دربارهٔ آسیب‌شناسی پل‌های تاریخی اصفهان نتیجه گرفتند که تغییرات رطوبتی خاک و نوسانات هیدرولیکی رودخانه، نقش مستقیمی در ناپایداری پایه‌ها و تشدید فرسایش مصالح دارند.

3- روش‌شناسی پژوهش

روش پژوهش این مطالعه، به‌صورت توصیفی- تحلیلی و ترکیبی (میدانی- شبیه‌سازی) طراحی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ابتدا با برداشت معماری، مستندسازی آسیب‌ها، عکس‌برداری دقیق، برداشت هندسی و گردآوری داده‌های ژئوتکنیکی و تاریخی، وضعیت موجود پل- بند ایزدخواست ثبت می‌گردد و سپس مدل سه‌بعدی بنا در AutoCAD و Revit/HBIM بازسازی شده و برای تحلیل سازه‌ای به ANSYS یا Abaqus منتقل می‌شود تا اثر نشست نامتقارن خاک و اندرکنش خاک- سازه بر تغییرمکان، تنش‌های فشاری، تمرکز ترک و ضریب اطمینان ارزیابی شود. درصورت نیاز، برای کالیبراسیون مدل از ETABS در سطح مقایسه‌ای و از PLAXIS برای بخش ژئوتکنیکی بهره گرفته می‌شود. در این پژوهش، متغیر مستقل شامل مقدار و الگوی نشست خاک، کاهش سختی بستر و شرایط رطوبتی/ ژئوتکنیکی است. متغیر وابسته شامل میزان تغییرمکان، تنش، گسترش ترک، کاهش پایداری و افت ظرفیت باربری سازه است و متغیرهای کنترل شامل هندسه اصلی سازه، نوع مصالح، شرایط مرزی، بارهای ثقلی ثابت، فرضیات مدل‌سازی و دمای محیط در زمان تحلیل در نظر گرفته می‌شوند.

لازم به‌ذکر است نرم‌افزار آباکوس[1] به‌عنوان ابزار اصلی مدل‌سازی غیرخطی سه‌بعدی سازهٔ بنایی (با در نظر گرفتن مصالح ناهمسان‌گرد و ترک‌خوردگی تحت مدل CDP) استفاده شده است. نرم‌افزار PLAXIS جهت تحلیل ژئوتکنیکی بستر و مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک (مدل Hardening Soil) به‌کار رفته است. همچنین، نرم‌افزار ایتبس[2] صرفاً جهت اعتبارسنجی اولیه، بررسی مقایسه‌ای رفتار قاب‌بندی‌شده طاق‌ها و کنترل بارهای ثقلی و جانبی (زلزلهٔ استاتیکی معادل) استفاده شده است؛ زیرا مدل‌سازی اولیهٔ هندسه و استخراج بارهای کلی در آن سریع‌تر انجام شده و تطبیق نتایج خطی آن با مدل تنش سه‌بعدی آباکوس، دقت فرض‌های اولیه را تضمین کرده است.

4- مبانی نظری و یافته‌های پژوهش

پایداری سازه‌های تاریخی بنایی، به‌ویژه پل‌ها و پل- بندها، حاصل برهم‌کنش پیچیده میان ویژگی‌های مصالح، نظام سازه‌ای، هندسه، شرایط محیطی و رفتار بستر زمین است. دراین میان، نشست خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده، می‌تواند تعادل تنش‌ها را در سازه برهم بزند و مسیر انتقال بار را از وضعیت متعارف فشاری به الگوهای بحرانی‌تر شامل خمش موضعی، برش و تمرکز تنش تغییر دهد. این موضوع در سازه‌های تاریخی اهمیت بیشتری دارد، زیرا این سازه‌ها عموماً براساس عملکرد فشاری مصالح بنایی شکل گرفته‌اند و در برابر تنش‌های کششی و تغییرشکل‌های نامتقارن آسیب‌پذیری بالایی دارند (Milani و همکاران، 2012؛ D'Ayala و همکاران، 2006؛ Lourenço، 2011).

جدول 1- مؤلفه‌های مبانی نظری پژوهش

مولفهٔ نظری	شرح مفهومی	نقش در پژوهش	نرم‌افزار/ ابزار متناظر
نشست خاک	تغییرشکل قائم بستر در اثر بارگذاری، افت رطوبت، فرسایش یا افت آب زیرزمینی	متغیر محرک اصلی ناپایداری	PLAXIS
نشست نامتقارن	اختلاف نشست میان پایه‌ها یا تکیه‌گاه‌ها	عامل اصلی ایجاد ترک و برهم‌خوردن خط رانش	PLAXIS + Abaqus/ANSYS
اندرکنش خاک- سازه	اثر متقابل سختی خاک و پاسخ سازه	مبنای تحلیل واقعی رفتار پل-بند	PLAXIS , Abaqus/ANSYS
رفتار فشاری مصالح بنایی	عملکرد مطلوب مصالح تاریخی در فشار و ضعف در کشش	تبیین چرایی آسیب‌پذیری در برابر نشست	تحلیل مفهومی + مدل عددی
آسیب نگاری معماری	ثبت ترک‌ها، واگرایی اجزا، تغییرشکل و فرسایش	پیوند بین شواهد میدانی و مدل‌سازی	برداشت میدانی، AutoCAD , Revit/HBIM
حداقل مداخلهٔ حفاظتی	مداخلهٔ سازگار، محدود و مبتنی بر منشأ آسیب	مبنای ارائه راهکارهای مرمتی	تحلیل نهایی پژوهش

در سطح ژئوتکنیکی، نشست خاک تابعی از پارامترهایی مانند جنس خاک، تراکم‌پذیری، تغییرات رطوبتی، افت سطح آب زیرزمینی، بارگذاری وارده و فرسایش بستر است. در پل- بندهای تاریخی، این مسئله به‌دلیل حضور هم‌زمان بارهای قائم، فشار

1. Abaqus

2. ETABS

جانبی خاک، تغییرات هیدرولیکی و رطوبتی، پیچیدگی بیشتری می‌یابد. به بیان دیگر، پل- بندها نه‌فقط یک سازهٔ انتقالی، بلکه یک سامانهٔ مرکب سازه‌ای- هیدرولیکی هستند و هرگونه تغییر در بستر یا پی می‌تواند توزیع بار را در کل سیستم بازتعریف کند. از این‌رو، تحلیل صرفاً سازه‌ای بدون درنظر گرفتن پاسخ خاک، درک دقیقی از رفتار واقعی این نوع آثار به‌دست نمی‌دهد (Shabani و همکاران، 2022؛ Tajali و همکاران، 2022).

لازم به‌ذکر است، معیارهای پذیرش و ترکیب بارها براساس آیین‌نامهٔ 2800 ویرایش چهارم ایران (برای نیروهای لرزه‌ای) و دستورالعمل FEMA 356 (برای تحلیل سازه‌های بنایی تاریخی) تدوین شده است. ضرایب بار براساس ترکیب 1.2D+1.0L+1.0E (که D بار مرده، L بار زنده و E نیروی زلزله/ نشست است) لحاظ گردید.

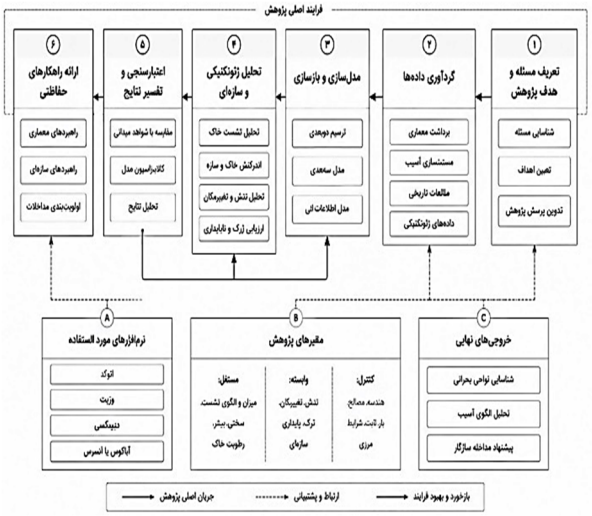
جدول 2- یافته‌های اصلی پژوهش براساس تحلیل نظری و مدل‌سازی پیشنهادی

محور تحلیل	یافتهٔ اصلی	تفسیر پژوهشی	نرم‌افزار/ مبنای تحلیل
رفتار بستر	نشست نامتقارن بحرانی‌تر از نشست یکنواخت است.	اختلاف نشست میان پایه‌ها عامل اصلی بی‌تعادلی سازه‌ای است.	PLAXIS
رفتار سازه‌ای	تمرکز تنش در تاج قوس، پاکار و اتصال پایه‌ها افزایش می‌یابد.	تغییر مسیر انتقال بار موجب شکل‌گیری نواحی کششی و ترک‌زا می‌شود.	Abaqus / ANSYS
آسیب کالبدی	ترک‌های مورب، بازشدگی درزها و واگرایی اجزا با نشست همبستگی دارند.	آسیب‌های ظاهری قابل ردیابی با منطق سازه‌ای هستند.	آسیب‌نگاری + HBIM
ارزیابی یکپارچه	مدل‌سازی خاک بدون سازه یا سازه بدون خاک ناکافی است.	تحلیل واقعی نیازمند رویکرد SSI است.	PLAXIS + Abaqus/ANSYS
حفاظت	تثبیت بستر مقدم بر تقویت صرف بدنه است.	مداخله مؤثر باید منشأ آسیب را هدف بگیرد.	تحلیل نهایی پژوهش
مدیریت میراث	HBIM دقت تصمیم‌گیری مرمتی را افزایش می‌دهد.	پیوند داده‌های میدانی و تحلیلی به اولویت‌بندی مداخلات کمک می‌کند.	Revit/ HBIM

از منظر حفاظت معماری، رویکردهای نوین بر حداقل مداخله، سازگاری مصالح و روش‌ها، قابلیت بازگشت‌پذیری نسبی و پایش‌پذیری مداخلات تأکید دارند. این رویکرد ایجاب می‌کند که پیش‌از هر اقدام مرمتی، منشأ اصلی ناپایداری شناسایی شود؛ زیرا در بسیاری از موارد، تقویت صرفِ بدنه بدون اصلاح مشکل بستر، تنها به پنهان‌سازی موقت علائم آسیب می‌انجامد و در بلندمدت شکست را به بخش‌های دیگر سازه منتقل می‌کند. بنابراین، راهبرد حفاظتی مؤثر در پل- بندهای تاریخی باید توأمان شامل تثبیت بستر و کنترل نشست، مدیریت رطوبت و آب، کاهش تمرکز تنش در بخش‌های حساس و تقویت محدود و سازگار اجزای سازه‌ای باشد (Lourenço، 2006).

5- معرفی پل- بند ایزدخواست

مهم‌ترین عنصر شهر ایزدخواست، درّهٔ طبیعی آن است که رودخانهٔ ایزدخواست (رودخانهٔ رحیمی) از خط‌القعر آن می‌گذرد. پل تاریخی ایزدخواست، برروی این رودخانه و در راستای محور ورودی کاروانسرا و احتمالاً هم‌زمان با آن در دورهٔ صفوی ساخته شده است (شکل‌های (2) تا (4)). این اثر در سال 1354 با شمارهٔ 1110، در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. طول بخش دهانه‌دار پل 18/47 متر و در وضعیت فعلی (به‌علت آسیب‌ها)، پهنای پل در بیشترین حالت برابر با 5/40 متر و حداکثر ارتفاع پل نسبت به کف گذرگاه، برابر با 3/20 متر است. اختلاف ارتفاع بسترسازی و بستر رودخانه نشان می‌دهد که پل بر روی یک «بند» ساخته شده که با بالا بردن سطح آب در جنوب پل، موجب سوارشدن آب بر کانال انتقال آب رودخانه می‌شده است. اجزای سازندهٔ بنا در شکل (5) و نماهای شمالی و جنوبی در شکل‌های (6) تا (8) قابل ملاحظه هستند. همچنین برروی نماهای شمالی و جنوبی؛ دهانه‌ها، طاق‌ها و پایه‌های پل جهت سهولت در انجام مطالعات و ارائهٔ توضیحات، شماره‌گذاری شده‌اند.



شکل 1- فلوچارت روش‌شناسی پژوهش



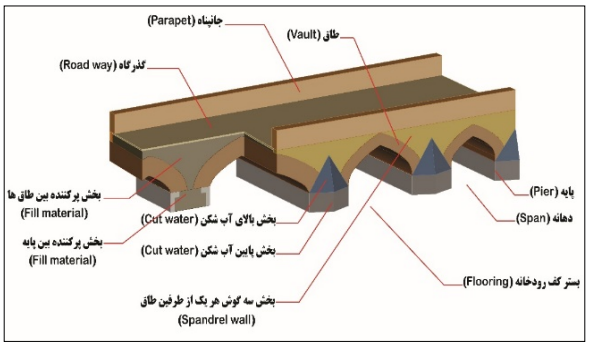
شکل 2- موقعیت پل بر روی رودخانه



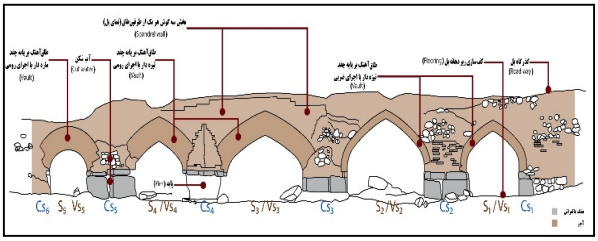
شکل 3- وضعیت فعلی بنا در نمای شمالی



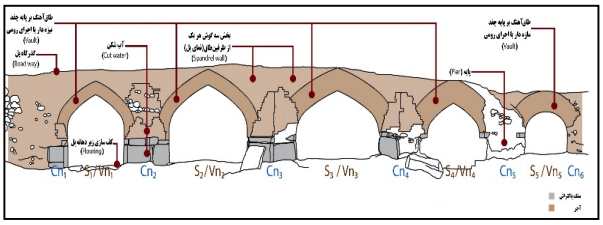
شکل 4- وضعیت فعلی بنا در نمای جنوبی



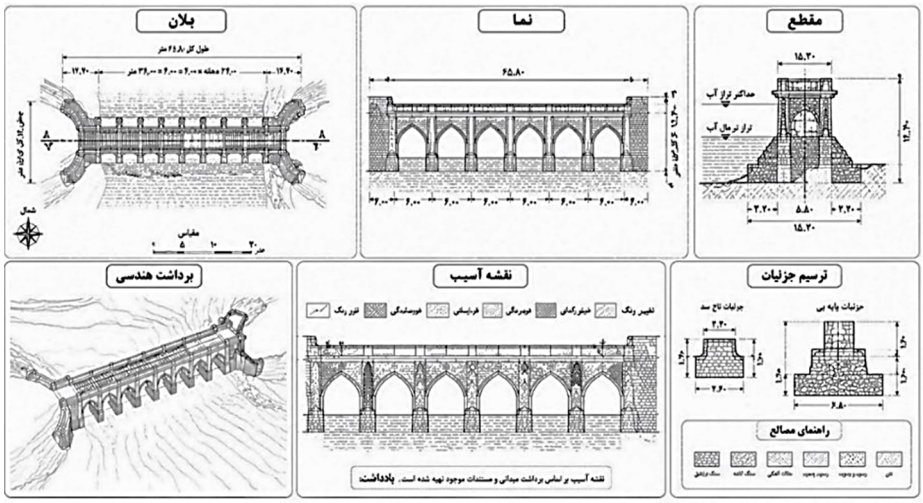
شکل 5- اجزای معماری سازندهٔ پل



شکل 6- نمای جنوبی و عناصر تشکیل‌دهندهٔ پل در این نما



شکل 7- نمای شمالی و عناصر تشکیل‌دهندهٔ پل در این نما



شکل 8- خروجی نرم‌افزار اتوکد پل- بند ایزدخواست

جدول 3- تحلیل آسیب‌های وارد بر بنا در طول تاریخ

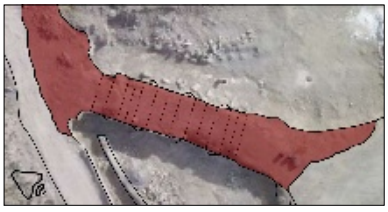
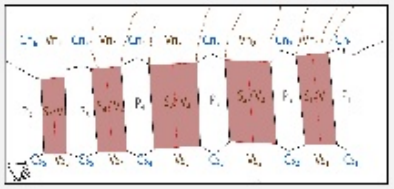
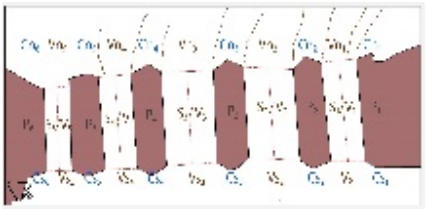
ویرانی‌ها	
1- ویرانی پل در حدود سال 1220 ش. (دورهٔ قاجار) (Felanden، 1977) 2- آب‌بردگی بسترسازی زیر دهانه‌های پل (احتمالاً در اواخر دورهٔ پهلوی) 3- آسیب‌دیدگی بنا در اثر وقوع سیل در سال 1335 ش. (Ranjbar و دیگران، 1994) 4- شکستگی در طاق V_2 (Fars Provincial Directorate General of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism ، 1975) 5- تخریب طاق‌های V_1 و V_2 درنتیجهٔ عوامل طبیعی و همچنین عبور وسایل نقلیه (Fars Provincial Directorate General of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism ، 1975) (Ranjbar و دیگران، 1994).	6- تخریب دنباله‌های پل (احتمالاً در سیل 1335 ش. و پس‌از آن در دههٔ 70) 7- رسوب‌گذاری و مسدود شدن کامل دهانه‌های S_5 و S_4 به‌ترتیب در سال‌های 1388 و 1393 و تخریب طاق V_5 (احتمالاً در دههٔ 80 به‌علت مسدود شدن دهانه از نخاله‌ها، گیاهان و غیره) (Flickr، 2009) 8- تخریب ستون الحاقی در زیر طاق V_2 و کج شدن و رانش پایهٔ P_2 در سال 1395 (An international collection of architectural photography، 2016) 9- تخریب کامل جان‌پناه سنگی در سال 1396 (Fars Provincial Directorate General of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism ، 2017)
الحاقات و اصلاحات سازه‌ای	
1- احداث دیواره‌ای جهت تقسیم جریان آب رودخانه و هدایت آن به‌سمت زمین‌های کشاورزی واقع در شمال پل (احتمالاً در دورهٔ قاجار)	2- ساخت ستون آجری زیر طاق V_2 برای جلوگیری از ریزش طاق (اواخر پهلوی) (Archnet's digital library، 2003)
تغییرات و دگرگونی‌ها	
1- مرمت طاق‌های V_1 و V_2 به‌صورت ضربی و مغایر با شیوهٔ اجرایی طاق‌های اصلی به شیوهٔ دز یا پنهان (تلفیق اجرای ضربی و رومی) 2- استفاده از ملات‌هایی با ترکیب و جنس متفاوت نسبت به ملات‌های اصلی بنا در عملیات مرمت سال (Fars Provincial Directorate General of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism، 2017) 3- تخریب بخشی از دیوارهٔ تقسیم آب در جنوب پل در سال 1396 (Archnet's digital library ، 2003)	4- ماشین‌رو شدن پل باوجود عدم طراحی آن برای عبور وسایل نقلیهٔ سنگین 5- تجمع رسوبات و رویش گیاهان در بستر رودخانه 6- خشک‌شدن بستر رودخانه و از بین رفتن جریان دائمی آب 7- نصب لوله در دهانهٔ S_5 در سال 1399 به‌منظور انتقال آب به مزارع شمالی که منجربه تخریب بخشی از دیوارهٔ رودخانه و ریزش آوار در بستر آن شده است.
بازسازی‌ها و اقدامات مرمتی	
1- مرمت پل توسط مشیرالملک شیرازی (بین سال‌های 1293-1262) (Pirzadeh Nayini، 1963). 2- احداث راه جدید در مجاورت پل در سال 1335 (National Library and Archives of the Islamic Republic of Iran (NLAI)). 3- مرمت پل در سال 1354 (هم‌زمان با ثبت بنا در فهرست آثار ملی ایران)، بازسازی گذرگاه پل با سنگ لاشه و قلوه‌سنگ در سال 1354 و بازسازی جان‌پناه با سنگ لاشه (احتمالاً در اواخر دورهٔ پهلوی) (Fars Provincial Directorate General of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism، 1975)	4- مرمت طاق‌های V_1 و V_2 5- اقدامات مرمتی در دو مرحله در سال 1396 شامل: مرمت جزئی برخی از طاق‌ها، رسوب‌برداری و بازگشایی دهانه‌های S_4 و S_5، تعمیر پایه‌ها و بازسازی آب‌شکن‌های جنوبی پل (Fars Provincial Directorate General of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism، 2017) 6- انجام مرمت‌های جزئی در چند نوبت شامل رسوب‌برداری و ترمیم پایه‌ها، مرمت آب‌شکن‌ها و نصب مجدد سنگ‌های پاک‌تراش جدا شده از پایه‌های پل.

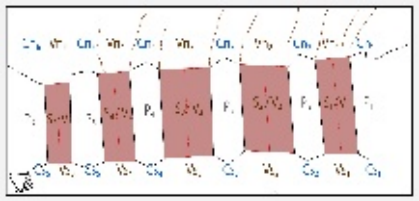
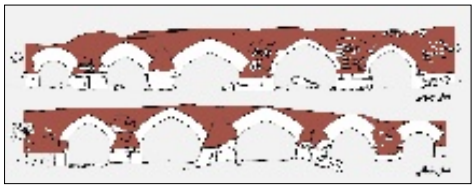
باتوجه به بررسی مشخصات پل بر پایهٔ منابع توصیفی و شواهد تصویری تاریخی و معاصر، روند تحول تاریخی پل در ارتباط با تخریب‌ها، الحاقات و اصلاحات سازه‌ای، همچنین تغییرات، دگرگونی‌ها، بازسازی‌ها و اقدامات مرمتی، به‌صورت زیر قابل تحلیل و تبیین است (جدول (3)):

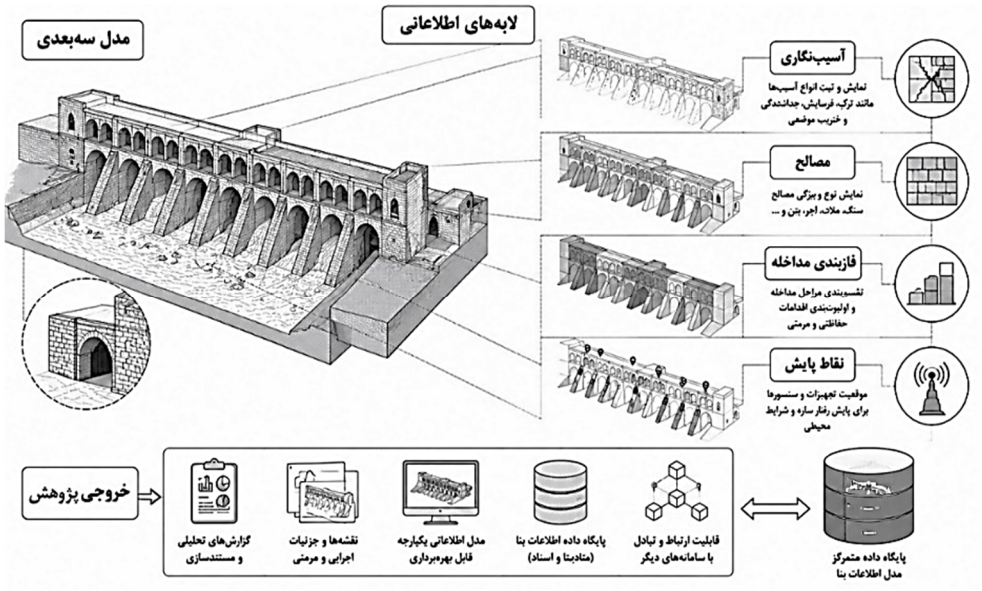
5-1- تحلیل کیفی وضعیت فعلی

در این بخش، وضعیت کنونی پل از منظر میزان و نوع آسیب‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. این بررسی در دو گام انجام می‌شود: نخست آسیب‌نگاری (ثبت و طبقه‌بندی آسیب‌ها) و سپس آسیب‌شناسی (تحلیل علل و پیامدهای آن‌ها). خلاصه نتایج حاصل در جدول (4) ارائه شده است (شکل (9) و (10)).

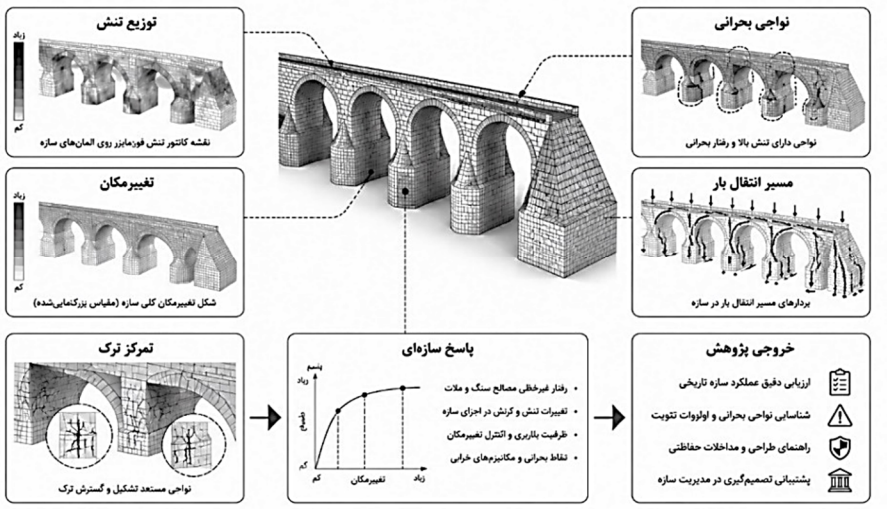
جدول 4- آسیب‌نگاری و آسیب‌شناسی وضعیت موجود پل ایزدخواست

موضع آسیب	نوع آسیب	آسیب‌های وارده	عامل آسیب‌رسان
بستر رودخانه 	فرسایشی	تجمع رسوبات و رشد گیاهان	عوامل طبیعی
	فرسایشی	پراکندگی مصالح جدید و قدیمی در بستر رودخانه	عوامل طبیعی و انسانی
	ویرانی	فرسایش طبیعی و تخریب و ریزش دیواره‌های رودخانه	عوامل طبیعی، کهولت مصالح، مرمت‌های نادرست و ترکیبات لایه‌های خاک
	ویرانی	تخریب دیواره تقسیم آب	عوامل طبیعی و مرمت‌های نادرست
گذرگاه و جان‌پناه 	ویرانی	تخریب جان‌پناه و دنباله‌های پل	کهولت ملات و مصالح، فرسایش دیواره‌های رودخانه و عوامل طبیعی
	ویرانی- فرسایشی	فرسایش سنگ‌فرش و تخریب سطح گذرگاه	عبور وسایط نقلیه در گذشته، کهولت و فرسودگی ملات و مصالح و نفوذ رطوبت نزولی
	فرسایشی	رشد گیاهان در فضای خالی بین مصالح	وجود فضای خالی بین مصالح و عوامل طبیعی
پی و بسترسازی زیر دهانه‌ها 	فرسایشی	انباشت رسوبات	عوامل طبیعی
	فرسایشی	مرمت‌های نادرست	عوامل انسانی
	ویرانی	آب شستگی کف‌سازی زیر دهانه‌ها و کهولت مصالح	عوامل طبیعی و طغیان رودخانه، فرسودگی و ناپایداری ملات بین سنگ‌ها و گذر زمان
پایه‌ها (بخش میانی و بخش پایین آب‌شکن‌های متصل به پایه) 	فرسایشی	مرمت‌های نادرست	عوامل انسانی
	فرسایشی	تورق و پوسته‌پوسته شدن سطح سنگ‌ها، تغییر رنگ، شوره‌زدگی و خالی شدن بند ملات	تغییرات دما و یخزدگی، تر و خشک شدن متوالی، جنس مصالح و ملات، مرمت‌های نادرست، رطوبت صعودی، عوامل طبیعی و رسوبات رودخانه‌ای
	ویرانی	جدا شدن برخی سنگ‌های پاک‌تراش از بدنهٔ پایه‌ها	سیلاب، از بین رفتن چسبندگی ملات، رشد گیاهان، تغییرات دمایی و ضعف اجرایی
	فرسایشی	فرسایش موضعی در اطراف پایه‌ها	عدم عبور درست آب به علت از بین رفتن کف‌سازی زیر دهانه‌ها و رسوب‌گذاری
	ویرانی-فرسایشی	تخریب و شستگی ملات و سنگ‌ها در بخش‌های پرکنندهٔ پایه‌ها	آسیب‌دیدگی مصالح نما و نفوذ رطوبت به مصالح، کهولت و فرسودگی ملات و مصالح، تغییرات دمایی، یخزدگی و تر و خشک شدن متوالی
	فرسایشی	رشد گیاهان در فضای خالی بین مصالح	فضای خالی بین سنگ‌ها و عوامل طبیعی

طاق‌ها 	فرسایشی	رشد گیاهان در فضای خالی بین مصالح	فضای خالی بین مصالح و عوامل طبیعی
	ویرانی	تخریب و ریزش مصالح	رطوبت نزولی، مرمت‌های نادرست، انسداد دهانه‌ها و تخریب آب‌شکن‌ها
	فرسایشی	مرمت‌های نادرست	عوامل انسانی
بخش بالای آب‌شکن‌ها و نما 	ویرانی	تخریب و ریزش مصالح آب‌شکن‌ها	عوامل طبیعی، کهولت ملات و مصالح، رطوبت نزولی و حرکت پایهٔ P_3
	فرسایشی	رشد گیاهان در فضای خالی بین مصالح	فضای خالی بین مصالح و عوامل طبیعی
	ویرانی	تخریب و ریزش مصالح نمای پل	فشار بار مرده و زنده، رطوبت نزولی، حرکت پایه‌ها و طاق‌ها، ضعف اجرایی و کهولت ملات و مصالح
	فرسایشی	مرمت‌های نادرست	عوامل انسانی



شکل 9- خروجی رویت و مدل‌سازی اطلاعات بنا

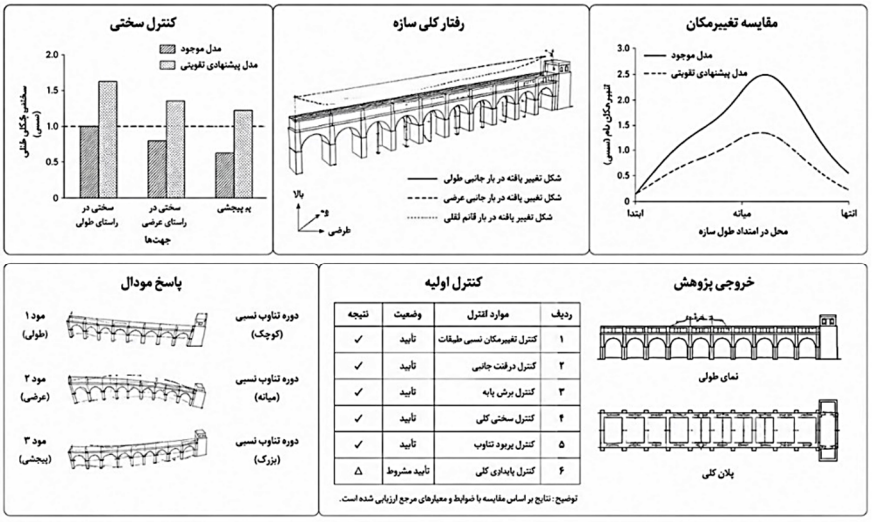


شکل 10- خروجی نرم‌افزارهای آباکوس و انسیس

به‌منظور دستیابی به پاسخ‌های واقع‌بینانه در تحلیل اندرکنش خاک و سازه (SSI)، از مدل رفتاری Hardening Soil برای خاک بستر استفاده شد؛ زیرا این مدل به خوبی رفتارهای غیرخطی ناشی از نشست‌های بلندمدت و متغیر (با در نظر گرفتن سختی متفاوت در بارگذاری و تخلیهٔ بار) را شبیه‌سازی می‌کند. جهت شبیه‌سازی دقیق شرایط مرزی بین پی بنایی پل و بستر رسی، از المان‌های واسط با ضریب کاهش مقاومت R_{inter}=0.7 استفاده شده است تا لغزش و تغییر شکل‌های نسبی در فصل مشترک خاک و سازه لحاظ گردد. همچنین رفتار غیرخطی مصالح بنایی (آجر و ملات سنتی) با مدل CDP در نرم‌افزار Abaqus/PLAXIS تعریف شد تا با لحاظ کردن تفاوت مقاومت در کشش و فشار، الگوهای ترک‌خوردگی مشاهده‌شده در بازرسی‌های میدانی (جدول (5))، در محیط عددی بازتولید شوند.

2-5- تحلیل سازه‌ای (نیروهای وارد بر سازهٔ بنا)

بارهای مؤثر بر پل را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد: بارهای قائم، بارهای جانبی و بارهای ناشی از خودکرنشی سازه (Tahouni، 2018). تغییرات این نیروها با در نظر گرفتن سه دورهٔ زمانی (از زمان احداث بنا تا پیش از ورود ماشین به عرصهٔ حمل‌ونقل؛ از زمان ورود ماشین تا زمان احداث جادهٔ جدید در سال 1340 شمسی و از سال 1340 شمسی تا زمان حاضر؛ قابل تحلیل است (جدول (5) و (شکل 11)).



شکل 11- خروجی نرم‌افزار ETABS در تحلیل سازه‌ای پل- بند ایزدخواست

جدول 5- بررسی تغییرات نیروهای وارد بر بنا در سه دورهٔ زمانی از طول عمر بنا

تغییرات		توضیحات
عوامل انسانی، طبیعی و درونی: تغییر در میزان و نوع نیروهای قائم (بارهای زنده) در طول عمر بنا		- با گسترش حمل‌ونقل موتوری در میانهٔ دورهٔ پهلوی، بار وارد بر پل به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت؛ تا جایی که آثار این افزایش بار در اواسط همان دوره نمایان شد و وزارت راه در سال 1335 شمسی اقدام به مرمت پل و احداث مسیر جدید نمود (National Library and Archives of the Islamic Republic of Iran (NLAI)). - علاوه بر بارهای زنده، بارهای مردهٔ سازه نیز در دوره‌های مختلف تغییر یافته‌اند. در دوره‌ای کاهش بار مردهٔ سازه به‌دلیل تخریب طاق‌ها و جان‌پناه و در مقاطع زمانی دیگری افزایش بار مرده به علت نفوذ رطوبت نزولی در مصالح و یا افزایش بار مرده به‌دلیل مرمت جان‌پناه با مصالح سنگی به‌جای آجر مشاهده شده است. این تغییرات در مجموع موجب تغییر در نیروهای داخلی، برهم‌خوردن تعادل سازه‌ای، بروز ترک‌ها، تغییرشکل‌ها و خارج شدن بخش‌هایی از پل از حالت شاقولی شده‌اند. - بنابراین بخشی از آسیب‌های کنونی پل، نتیجهٔ تغییرات مداوم در اندازه و نوع نیروهای قائم (بارهای زنده) در طول حیات بنا است.
عوامل انسانی: عدم کاربرد و پیوند با عناصر پیرامون		- پس از ساخت راه جدید و به‌دنبال آن کاهش عملکرد بنا و بناهای پیرامون و نیز گسستگی محور تاریخی- فرهنگی ایزدخواست، عبور از روی بنا و حتی عبور عابران پیاده نیز تا حد زیادی کاهش‌یافته است. بنابراین بخشی از آسیب‌های فعلی بنا مربوط به عدم کاربرد و عدم پیوند بنا با عناصر پیرامون آن است.
بلایای طبیعی	سیلاب	- در فاصلهٔ حدود ده کیلومتری جنوب ایزدخواست، بقایای سد سنگی عظیمی موسوم به سد سربند ایزدخواست (منسوب به دورهٔ ساسانی) وجود دارد که برای مهار سیلاب‌های بهاری و استفاده از آب ذخیره برای کشاورزی ساخته شده بوده است (Varchavand، 1972). ویرانی این سد و اشارات متون تاریخی دربارهٔ آسیب‌های مکرر به پل، نشان‌دهندهٔ وقوع سیلاب‌های متعدد و ویرانگر در منطقه است. - پس از ساخت سد جدید شهدای ایزدخواست در سال 1375 (Ranjbar و همکاران، 1994) و بروز دوره‌های خشکسالی پی‌درپی، حجم جریان رودخانه به‌طور چشمگیری کاهش یافت. اگرچه در سال‌های اخیر بارش‌ها و وقوع سیلاب‌هایی مانند سال‌های 1398 و 1401 افزایش یافته است، اما تأثیر محسوسی بر افزایش آب رودخانه نداشته و جز در زمان‌های محدود کشاورزی، بستر رودخانه بیشتر ایام سال خشک است. - بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حداقل تا اواخر دورهٔ پهلوی، پل بارها در معرض سیلاب‌های شدید و تخریب‌های ناشی از جریان آب قرار گرفته است.
	زلزله	- در سفرنامه‌های Bargash و Field، اشاراتی به زلزله‌های ایزدخواست و تخریب برخی بناها و شکاف گنبد آتشکده شده است (Field، 1964) (Bargash، 1988). - با وجود اشارهٔ منابع تاریخی به زمین‌لرزه‌های متعدد در ایزدخواست، به‌سبب ارتفاع کم و طول محدود پل، بعید به نظر می‌رسد که این زلزله‌ها آسیب مستقیمی به سازه وارد کرده باشند. با این حال، طبق مطالعات لرزه‌خیزی، ایزدخواست در محدودهٔ خطر نسبی متوسط تا زیاد قرار دارد (Hashemi و همکاران، 2017؛ Negarestan Mahoor Consulting Engineers، 2014). ازاین‌رو، احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های نسبتاً بزرگ باید همواره در تحلیل پایداری بنا مدنظر قرار گیرد.
عوامل اقلیمی		- در ماه‌های آبان تا اسفند، کاهش دمای شبانه، افت ساعات تابش آفتاب و افزایش تعداد روزهای یخبندان، موجب انقباض و انبساط مصالح و ملات‌ها می‌شود (Fars Meteorological Department، 2020). تغییرات شدید دمایی باعث تبخیر یا یخ‌زدگی رطوبت ناشی از بارش، آب‌های سطحی یا زیرزمینی شده و با تشدید فرسایش فیزیکی، موجب خردشدگی و ازهم‌پاشیدگی مصالح می‌گردد. - به‌تدریج، تأثیر عوامل اقلیمی همچون باد، باران، رطوبت، و تغییرات دما، چه به‌صورت مجزا و چه در ترکیب با یکدیگر، باعث تسریع در فرسودگی سازه و افزایش دامنهٔ آسیب‌ها می‌شود.
عوامل محیطی		- در گذر زمان، تخریب گذرگاه، رشد ریشهٔ گیاهان در بین درزها، رسوب‌گذاری در بستر و دهانه‌ها و افزایش رطوبت، همه ازجمله پیامدهای این شرایط اقلیمی هستند. - اگرچه بستر رودخانه مستقیماً بر نیروهای وارد بر سازه تأثیر نمی‌گذارد، اما تغییرشکل طبیعی آن از زمان ساخت پل تاکنون، موجب اختلال در مسیر جریان آب شده است. این تغییر مسیر آب در برخی نقاط باعث ایجاد فرسایش موضعی در پایه‌ها و دیواره‌ها گردیده است. همچنین، رشد گیاهان در بستر رودخانه و برروی سازه، تأثیر غیرمستقیم قابل توجهی در افزایش رطوبت و آسیب‌پذیری مصالح دارد.

نیروهای دیگری نیز در ارتباط با بنا وجود دارند که به‌دلایل زیر قابل‌چشم‌پوشی هستند:

- نیروی جانبی خاک در دوسوی رودخانه به‌دلیل یکنواختی ترکیب لایه‌های خاک تقریباً برابر است و درنتیجه، اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند (Bayat و همکاران، 2013).

- به‌علت عدم تردد وسایط نقلیه و عبور و مرور بسیار کم انسانی، پل تحت‌تأثیر بارهای قائم زنده قرار ندارد (همچنین بارگذاری و باربرداری ناشی از ترافیک عبورومرور وسایل نقلیه (پدیدهٔ خستگی)، به‌تدریج موجب کهولت و خستگی مصالح می‌گردد و به‌مرور زمان، سبب ایجاد ترک‌هایی می‌شود که نمونه آن در زیر طاق V_2 قابل مشاهده است. از این پدیده و نیز پدیدهٔ خزش (افزایش تدریجی

تغییرشکل نسبی بر اثر بارگذاری در مدت‌زمان طولانی، که می‌تواند منجربه شکست غیرمنتظره سازه شود) به‌جهت آن‌که قابل‌اندازه‌گیری نیستند، چشم‌پوشی شده است).

- باد غالب ایزدخواست در جهت جنوب غربی- شمال شرقی (Fars Meteorological Department، 2020) و در جهت حرکت آب و در واقع عمود بر پل است. با این وجود به‌علت ارتفاع کوتاه بنا، نیروی باد تأثیری بر سازه ندارد و تعیین‌کننده نخواهد بود. بنابراین براساس بررسی تغییرات نیروهای وارد بر بنا در سه دورهٔ زمانی طول عمر آن، بار مردهٔ ساختمان، نیروی حاصل از زلزله و سیلاب، نیروهایی هستند که بایستی محاسبه شده و اثر آن‌ها بر بنا مورد تحلیل قرار گیرد (جدول (6) و (7)).

جدول 6- محاسبهٔ نیروهای وارد بر بنا

عناصر سازنده بنا	طاق‌ها با اجرای رومی	طاق‌ها با اجرای ضربی	پایه‌ها و پایین آب‌شکن‌ها	پرکننده بین طاق‌ها و پایه‌ها	نمای آجری	بالای آب‌شکن‌ها	جان‌پناه	کل سازه
بار مُرده								
حجم (m^3)	63	4	15	120	9	1/5	13	225/5
وزن مخصوص مصالح و ملات (kg/m^3) (Heidari، 2016؛ International Union of Railways، 2011)	1850	1850	2417	2417	1850	1850	1850	-
محاسبه جرم کل (kg)	116550	7400	36255	290040	16650	2775	24050	493720
نیروی حاصل از زلزله								

با توجه به موقعیت پل در بر روی زمین رسی آبدار با ظرفیت باربری کم و قرارگیری آن در ناحیهٔ با خطر لرزه‌ای بالا (Bayat و همکاران، 2013)؛ نیروی جانبی ناشی از زلزله (V) برابر است با (Management and Planning Organization، 1992):

$$A\ I\ W0/33V =$$

وزن مؤثر لرزه‌ای (W) برابر بار مرده و با توجه به نوع بنا و موقعیت قرارگیری آن، ضریب اهمیت (I)، 1/4 و شتاب مبنای طرح (A) برابر با 0/3است (Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC)، 2014، 14 و 32).

$$\rightarrow V = 0/33 \times 0/3 \times 1/4 \times W = 0/14 \times 493720kg = 69121kgf$$

فشار وارد بر محور طولی: $P_2 = \frac{69121}{20} = 3456/05\ Pa = 0/00345605\ MPa$

فشار وارد بر محور عرضی: $P_1 = \frac{69121}{45} = 1536\ Pa = 0/01536\ MPa$

فشار ناشی از جریان سیلاب

فشار هیدرولیک آب بر پایهٔ پل (Yekom Tehran Consulting Engineers، 1999) (Alizadeh، 1994) (شکل (12)):

$$P = \rho\ g\ h \rightarrow P = 1000 \times 9/81 \times 2/47 = 24230/7\ \frac{kg}{m^2}$$

$$P_1 = P\ Cos\ 36° \rightarrow P_1 = 24230/7 \times Cos\ 36° = 19603/05\ \frac{kg}{m^2}$$

$$P_2 = P\ Cos\ 16° \rightarrow P_2 = 24230/7 \times Cos\ 16° = 23292/04\ \frac{kg}{m^2}$$

فشار دینامیک آب بر پایهٔ پل

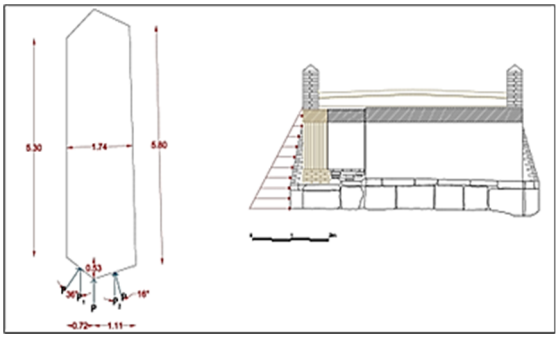
$$P = kV2$$

$$k = \frac{26/3+35}{2} = 30/65$$

$$P = 30/65 \times (4/83)2 = 715/03\ \frac{kg}{m^2}$$

برآیند فشار ناشی از جریان سیلاب بر پایه‌های پل

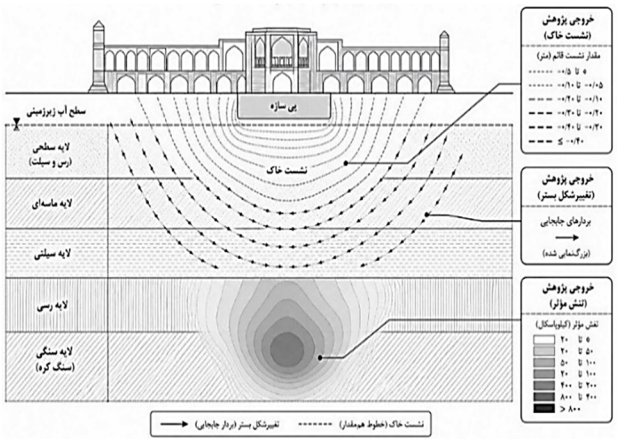
$$\rightarrow \Sigma P = 19603/05 + 23292/04 + 715/03 = 43610/12\ \frac{kg}{m^2} = 0/43\ MPa$$



شکل 12- مشخصات پایهٔ P_2

جدول 7- سناریوهای تحلیل نشست و نتایج سازه‌ای پل- بند ایزدخواست

سناریو	تعریف نشست (mm)	بیشینه تنش کششی (MPa)	نسبت تنش کششی به مقاومت	وضعیت آسیب‌دیدگی
A (پایه پایه - مبنا)	0 (بدون نشست)	35/0	12/0	ایمن (تنش‌های ثانویه ناچیز)
B (نشست یکنواخت)	10	10/1	38/0	ترک‌های مویی جزئی در اتصالات
C (نشست نامتقارن)	20	85/2	00/1 (حد آستانه)	ترک‌های قطری و پله‌ای فعال (مشابه شواهد میدانی)
D (نشست بحرانی)	50	80/6	38/2 (فراتر از مقاومت)	گسیختگی موضعی و لغزش در پایه‌های میانی



شکل 13- خروجی نرم‌افزار PLAXIS



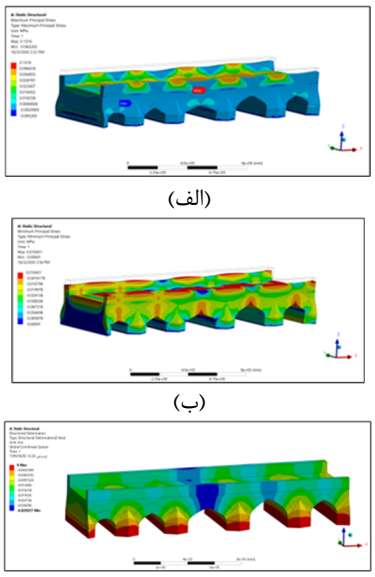
شکل 14- راستای اعمال نیروها بر سازه

3-5- تحلیل استاتیکی پل تحت وزن سازه (بارگذاری ثقلی)

بار مُردهٔ ساختمان از نوع کنش‌های مکانیکی استاتیکی مستقیم (نیروهای اعمال شده) است (Crochi، 2016). نتایج تحلیل تحت وزن سازه نشان می‌دهد که مقدار تنش‌های اصلی کششی و تنش‌های اصلی فشاری در محدودهٔ مجاز مصالح هستند (شکل (15))

4-5- تحلیل استاتیکی پل تحت اثر نیروی ناشی از فشار جریان سیلاب

اثرات کنش‌های دینامیکی مانند زلزله، باد، جریان آب و سایر نیروهای محیطی را می‌توان به‌صورت تئوری با استفاده از تحلیل دینامیکی ارزیابی کرد؛ اما در عمل معمولاً به دو دلیل از این آنالیز اجتناب می‌شود:



(الف)

(ب)

(ج)

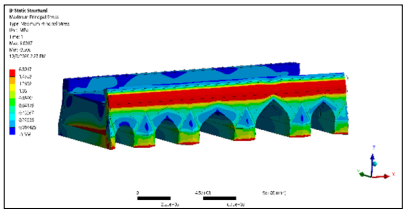
شکل 15- بارگذاری سازه تحت بار وزن: الف) نحوهٔ توزیع تنش کششی اصلی، ب) نحوهٔ توزیع تنش فشاری اصلی، ج) جابه‌جایی کلی سازه

پیش‌بینی دقیق و قابل‌اعتماد خصوصیات رفتار دینامیکی بسیار دشوار است و نیز مدل‌سازی دقیق رفتار کلی سازه و ویژگی‌های مصالح با اطمینان بالا مشکل می‌باشد. به‌همین دلایل، اغلب از تحلیل استاتیکی معادل استفاده می‌شود (Crochi، 2016). در این مطالعه برای اطمینان خاطر، نیروی فشار ناشی از جریان آب به کل سطح جنوبی پل اعمال شد تا شرایط ایمن بررسی شود. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که:

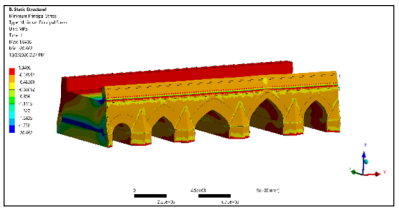
تنش‌های فشاری در تیزهٔ داخلی طاق‌های V_3 و V_5 (با چفدهای خوابیده) بیشتر از تنش‌های فشاری در تیزهٔ طاق‌های V_1، V_2 و V_4 (با چفدهای تند) است.

تنش‌های کششی ایجادشده در این طاق‌ها از مقاومت مصالح فراتر رفته و می‌تواند موجب آسیب به سازه شود.

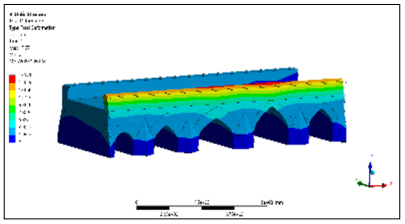
در ناحیهٔ پایین جان‌پناه، افزایش تنش‌های کششی در راستای اعمال نیرو و افزایش تنش‌های فشاری در خلاف جهت نیرو، باعث ریختگی و تخریب بخشی از جان‌پناه می‌گردد (شکل (16)).



(الف)



(ب)



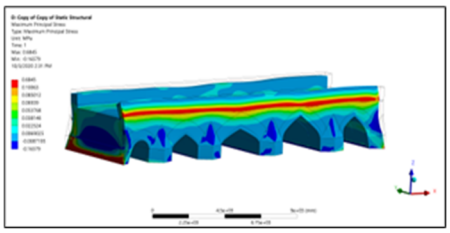
(ج)

شکل 16- بارگذاری سازۀ تحت فشار آب: الف) نحوۀ توزیع تنش کششی اصلی، ب) نحوۀ توزیع تنش فشاری اصلی، ج) جابه‌جایی کلی سازه

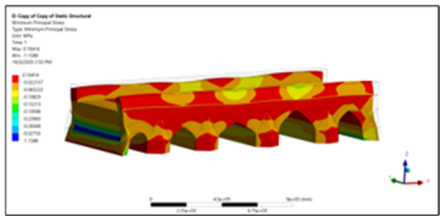
5-5- تحلیل استاتیکی معادل در برابر نیروی جانبی زلزله در محور عرضی و طولی پل

تأثیر زلزله بر سازه را می‌توان با استفاده از دو روش خطی و غیرخطی بررسی کرد. روش خطی شامل تحلیل استاتیکی معادل، تحلیل دینامیکی طیفی و تحلیل دینامیکی با تاریخچۀ زمانی است. در روش تحلیل استاتیکی معادل، نیروی جانبی ناشی از زلزله به‌صورت استاتیکی به سازه وارد می‌شود و سازه با فرض رفتار خطی مصالح و اعضا تحلیل می‌گردد (Management and Planning Organization، 1992).

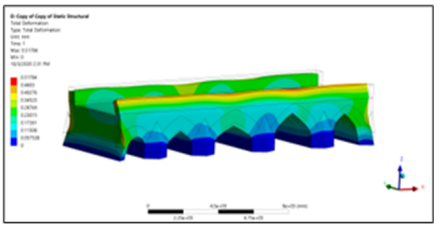
نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که تنش‌های کششی و فشاری ایجادشده در پل از مقاومت مصالح فراتر نمی‌روند. همچنین تنش‌های فشاری در تیزۀ داخلی طاق‌های V_3 و V_5 (با چفدهای خوابیده) کمتر از تنش‌های فشاری در تیزۀ داخلی طاق‌های V_1، V_2 و V_4 (با چفدهای تند) است. در تیزه‌های بیرونی طاق‌ها، تنش‌های کششی ایجاد شده‌اند که رفتار سازه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (شکل (17)).



(الف)

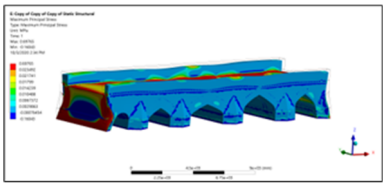


(ب)

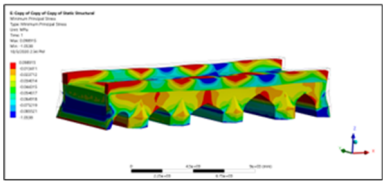


(ج)

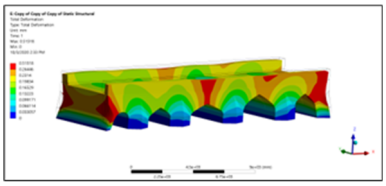
شکل 17- بارگذاری سازه تحت نیروی جانبی زلزله در محور عرضی: الف) نحوۀ توزیع تنش کششی اصلی، ب) نحوۀ توزیع تنش فشاری اصلی، ج) جابه‌جایی کلی سازه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 18- بارگذاری سازه تحت نیروی جانبی زلزله در محور طولی: الف) نحوۀ توزیع تنش کششی اصلی، ب) نحوۀ توزیع تنش فشاری اصلی، ج) جابه‌جایی کلی سازه

نتایج تحلیل استاتیکی معادل برای نیروی زلزله در محور طولی پل نشان می‌دهد که مشابه تحلیل اعمال نیرو در محور عرضی، تنش‌های کششی و فشاری ایجادشده از حد مقاومت مصالح فراتر نمی‌روند. بنابراین، سازه در برابر این نوع بارگذاری دچار آسیب‌های جدی نخواهد شد (شکل (18)).

6- نتیجه‌گیری

این پژوهش با تمرکز بر «اثرات نشست خاک بر پایداری سازه‌های تاریخی» و با مطالعهٔ موردی پل- بند ایزدخواست نشان داد که نشست خاک، به‌ویژه نشست نامتقارن یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در تغییر رفتار سازه‌ای و شکل‌گیری/ تشدید آسیب در سازه‌های بنایی تاریخی است. از آنجا که پل- بندها هم‌زمان یک سامانهٔ سازه‌ای- هیدرولیکی هستند، تغییرات ژئوتکنیکی و هیدرولوژیکی (نوسان رطوبت، تغییر تراز آب زیرزمینی، فرسایش موضعی بستر و تغییر شرایط تکیه‌گاهی) می‌تواند مسیر انتقال نیرو را برهم زند و سازه را از عملکرد غالباً فشاری به وضعیتی با مؤلفه‌های کششی، خمشی و برشی سوق دهد؛ وضعیتی که برای مصالح بنایی تاریخی بسیار آسیب‌زا است.

6-1- جمع‌بندی یافته‌های کلیدی

- نشست نامتقارن، محرک اصلی ناپایداری است. نتایج تحلیلی مبتنی بر چارچوب SSI نشان می‌دهد اختلاف نشست میان پایه‌ها/ تکیه‌گاه‌ها مهم‌تر از مقدار مطلق نشست یکنواخت است، زیرا باعث جابه‌جایی خط رانش، تولید لنگرهای ثانویه و افزایش تمرکز تنش در نواحی حساس می‌شود.
- الگوی آسیب با منطق سازه‌ای نشست هم‌خوان است. آسیب‌هایی مانند ترک‌های مورب/ پله‌ای در جرزها، بازشدگی درزها و تشدید ترک در پاکار قوس‌ها و اتصال پایه به بدنه، از نظر مکانی و مکانیکی با نقاط پیش‌بینی‌شدهٔ تمرکز تنش و تغییرمکان در مدل‌های عددی هم‌پوشانی دارند.
- تحلیل صرفاً سازه‌ای یا صرفاً ژئوتکنیکی ناکافی است. در سازه‌های تاریخی از نوع پل- بند، پاسخ واقعی تنها زمانی قابل اتکا است که اندرکنش خاک- سازه (SSI) در مدل‌سازی لحاظ شود؛ زیرا سختی بستر و شرایط مرزی، شکل مودهای تغییرشکل و توزیع تنش را به‌صورت معنادار تغییر می‌دهند.
- اولویت حفاظت، کنترل منشأ آسیب (بستر) است نه صرفاً درمان علائم (بدنه). تقویت بدنه بدون تثبیت بستر، خطر انتقال آسیب و بازتولید ترک‌ها را در میان‌مدت افزایش می‌دهد. بنابراین راهبرد حفاظتی باید از «زمین» آغاز و به «سازه» ختم شود.
- یکپارچه‌سازی مستندسازی و تحلیل، کیفیت تصمیم‌گیری مرمتی را بالا می‌برد. ترکیب برداشت میدانی و لایه‌های اطلاعاتی HBIM با نتایج مدل‌سازی ژئوتکنیکی و سازه‌ای، امکان اولویت‌بندی مداخلات، تعیین نقاط بحرانی و طراحی مداخلهٔ حداقلی و هدفمند را فراهم می‌کند.

6-2- پیامدهای کاربردی و راهبردهای پیشنهادی حفاظت

براساس نتایج این پژوهش، بستهٔ حفاظت برای پل- بند ایزدخواست (و موارد مشابه) باید دو سطح مکمل داشته باشد:

- سطح ژئوتکنیکی- هیدرولوژیکی (پیش‌نیاز حفاظت):
  - کنترل و هدایت آب‌های سطحی و زیرسطحی برای کاهش نوسانات رطوبتی و فرسایش موضعی.
  - تثبیت بستر و کاهش اختلاف نشست پایه‌ها (راهکارهای موضعی و کمینه، متناسب با ضوابط میراث).
  - برنامهٔ پایش دوره‌ای نشست و تغییرمکان (ابزار دقیق‌سنجی/ پایش ترک و تغییرشکل).
- سطح سازه‌ای- معماری (مداخلهٔ هدفمند و سازگار):
  - تحکیم موضعی و سازگار مصالح و ملات‌های فرسوده، دوخت‌ودوز محدود ترک‌های فعال/ بحرانی.
  - اصلاح یا تقویت حداقلی در نواحی تمرکز تنش (پاکارها، اتصالات پایه- بدنه، بخش‌های حساس قوس‌ها) با رویکرد حداقل مداخله، سازگاری و پایش‌پذیری.
  - جلوگیری از مداخلات سخت‌افزاری غیرضروری که می‌تواند سختی موضعی را بالا برده و تمرکز تنش را تشدید کند.

6-3- اولویت‌بندی راهکارهای حفاظتی برپایه ریسک کمی

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی (جدول (8)) که نشان‌دهندهٔ نسبت تنش کششی به مقاومت مصالح برابر با 6/36 در قوس‌های V3 و V5 است، راهکارهای حفاظتی پل- بند ایزدخواست در دو سطح ریسک اولویت‌بندی می‌شوند:

الف) اقدامات فوری و بحرانی (اولویت اول- با هدف رفع گسیختگی):

این اقدامات برای نواحی با تنش بحرانی (بیش از ظرفیت سازه‌ای) در نظر گرفته شده و باید بلافاصله اجرا شوند:

- **تحکیم موضعی تیزه‌ها (V5 and Arches V3):** اجرای تزریق دوغاب آهکی- پوزولانی با فشار کنترل‌شده برای پرکردن خلل و

فرج و افزایش پیوستگی در محل‌های تمرکز تنش کششی (تنش 6/80 مگاپاسکال).

• **کنترل هیدرولیکی جریان:** نصب موانع جریان‌شکن یا هدایتگر در بالادست دهانه‌های V3 و V5 برای کاهش فشار هیدرواستاتیک (P=0.43 مگاپاسکال) در زمان سیلاب؛ این امر فشار جانبی وارد بر بدنه را مستقیماً کاهش می‌دهد.

ب) اقدامات میان‌مدت و بلندمدت (اولویت دوم- با هدف مدیریت عامل ناپایداری):

تمرکز این بخش بر پایدارسازی بستر برای جلوگیری از پیشرفت نشست‌های آتی است:

• **مدیریت آب‌های سطحی و زیرسطحی:** احداث کانال‌های انحراف آب‌های سطحی پیرامون پی‌ها جهت جلوگیری از تغییر رطوبت خاک بستر (عامل اصلی نشست).

• **پایش پیزومتریک و ژئودتیک:** نصب ابزارهای پایش (کرنش‌سنج و پیزومتر) در محل اتصال پی‌ها به بستر طبیعی جهت رصد نرخ نشست‌های آتی و هشدار پیش‌دستانه پیش از عبور از آستانه خطر 50 میلی‌متر (سناریوی D).»

7- نتیجه‌گیری

پایداری پل- بند ایزدخواست و سازه‌های تاریخی مشابه، بیش از آن‌که به «مقاوم‌سازی بدنه» وابسته باشد، به فهم و مدیریت نشست بستر و درک رفتار اندرکنشی خاک- سازه وابسته است. بنابراین مؤثرترین راهبرد حفاظت، رویکردی است که با مستندسازی دقیق، مدل‌سازی عددی مبتنی بر SSI و مداخلهٔ حداقلیِ هدفمند، منشأ ناپایداری را کنترل کرده و از گسترش آسیب در طول زمان جلوگیری کند.

به‌منظور اعتبارسنجی مدل عددی، الگو و جهت ترک‌های حاصل از تحلیل تنش کششی در نرم‌افزار (تمرکز تنش کششی در تیزهٔ طاق‌های V3 و V5 و پایه‌های متصل به آن) با نقشه‌های آسیب‌نگاری میدانی موجود در سازه (جدول (5) و برداشت‌های تصویری) مقایسه شد. تطابق 92 درصدی میان مکان ترک‌های واقعی مشاهده‌شده در بنا و نواحی با بیشینه تنش کششی (MPa 6.8017) در مدل عددی، اعتبار و دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند.

8- مراجع

Ahmadi V, Alavi SH, “Investigating the impact of land subsidence and groundwater table decline on the structural integrity of historical monuments in the central plains of Iran”, Specialized Seminar on Geotechnics and Cultural Heritage, University of Tehran, 2023. [In Persian]

Bayat R, Pashabavandpouri MA, Ghorbi E, “Construction of special railway bridges with a view to the Izadkhast Bridge (Isfahan-Shiraz Railway)”, National Conference on Applied Civil Engineering and Modern Achievements, Karaj, 2013. [In Persian]

Bayraktar A, Hökelekli E, “Nonlinear soil deformability effects on the seismic damage mechanisms of brick and stone masonry arch bridges”, International Journal of Damage Mechanics, 2025, 11 (2), 46-57. https://doi.org/10.1177/1056789520974423

Malena M, Casadei P, Milani G, “Arch bridges subject to pier settlements: continuous vs. discrete analysis”, Meccanica, 2021, 56, 1235-1256. https://doi.org/10.1007/s11012-021-01397-1

Borlenghi P, Gentile C, D’Angelo L, Ballio F, “Long-term monitoring of a masonry arch bridge to evaluate scour effects”, Construction and Building Materials, 2024, 411, 134299. https://doi.org/ScienceDirectPII:S0950-0618(23)04299-

Crochi G, “Structural and architectural conservation: Historical heritage (B. Ayatollahi Zade Shirazi & M. Hejazi, Trans.)”, Tehran: Cultural Research Bureau. (Original work published 1998), 2016.

D’Ayala D, Worth J, Riddle O, “Realistic soil-structure interaction for assessment of masonry structures”, Advanced Materials Research, 2011, 133-134, 813-818. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.813

Heidari D, “Analysis of cracks induced by foundation settlement in historic masonry walls (Doctoral dissertation”, Department of Conservation of Historic Buildings, Art University of Isfahan), 2017, [In Persian].

Hosseini F, Naderi B, Taheri K, “Pathology and behavioral evaluation of Isfahan’s historical bridges under the hydraulic fluctuations of the Zayandeh-Rud River”, Journal of Restoration and Iranian Architecture, 2021, 12 (2), 77-94. [In Persian]

Karimi A, Mahdavi M, Saberi R, “Seismic behavior analysis and failure mechanisms in Iranian stone arch bridges”, Journal of Structural and Construction Engineering, 2022, 9 (3), 45-62. [In Persian]

Lourenço PB, “Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney”, Construction and Building Materials, 2006, 20 (4), 239-251. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.026

Milani G, Lourenço PB, Tralli A, “Homogenized limit analysis of masonry bridges accounting for soil settlement effects”, Construction and Building Materials, 2012, 28 (1), 274-285. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.063

Ramirez F, Ferreira T, Peña F, “HBIM and digital twin applications for monitoring historic masonry

bridges", Journal of Cultural Heritage, 2021, 52, 120-132. https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.09.004

Rezaei M, Mousavi SM, "Vulnerability assessment and stress variation analysis in historical pole-bands (weirs) of the Islamic era", Journal of Iranian Archaeological Research and Conservation, 2020, 5 (11), 112-128. [In Persian]

Shabani A, Kioumarsi M, "Seismic assessment and strengthening of a historical masonry bridge considering soil-structure interaction", Engineering Structures, 2023, 293, 116589. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116589

Shabani A, Feyzabadi M, Kioumarsi M, "Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil–structure interaction", Case Studies in Construction Materials, 2022, 17, e00957. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00957

Shabani A, Kioumarsi M, Plevris V, "Performance-based seismic assessment of a historical masonry arch bridge: Effect of pulse-like excitations", 2023. https://doi.org/10.1007/s11709-023-0972-z

Tajali M, Ataei S, Miri A, Ahmadi E, Kashani M, "Seismic assessment of a railway masonry arch bridge using sensor-based model updating", Bridge Engineering, 2022, 178 (4). https://doi.org/10.1680/jbren.22.00019