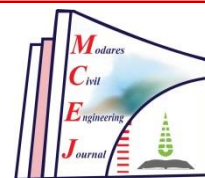




دانشگاه تربیت مدرس

دو ماهنامه

مهندسی عمران مدرّس



دوره ۲۶، شماره ۵، سال ۱۴۰۵ (شماره پیاپی: ۹۱)

نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

صاحب امتیاز: دانشگاه تربیت مدرس

مدیر مسئول: فرهاد دانشجو

- ریزگردها در ایران: تحلیل چالش‌ها و ارائه راهکارهای مدیریتی
علیرضا اصلمند، فائزه برهانی
- بلوک‌های موجود روی سازه‌ی تونلی و تأثیر آن‌ها بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B
وادی محمدوادی، علی خوش‌فطرت، موسی حبیب‌جاسم، نیلوفر سالمی
- ارزیابی عملکرد الگوریتم ارتعاش معکوس در تشخیص خرابی در مدل دو بعدی برشی در سکوی دریایی میرا
روح‌الله نجفی، محمدعلی لطف‌اللهی یقین، علیرضا مجتهدی
- بررسی فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود با استفاده از شکل مودهای POD و معیار انعطاف‌پذیری
سلمان رحیمیان، موسی محمودی صاحبی، مجتبی کریمایی طبرستانی، علی نبی زاده
- عملکرد بتن خودمتراکم کم‌سیمان با استفاده از لجن سنگ به‌عنوان جایگزین ماسه
علی محمدصالحی، داود مستوفی نژاد
- تحلیل چرخه حیات سنتز و کاربرد فتوکاتالیستی نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی در حذف رنگ رودامین‌بی با رویکرد پایداری محیط‌زیستی
افسانه شهبازی
- بررسی بتن خود ترمیم شونده با استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس
کمیل مومنی، طاهره ثمری ماسوله، سجاد غلامرضایی سرولات

نشانی: تقاطع بزرگراه جلال آل احمد و شهید چمران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست،

دفتر نشریه علمی مهندسی عمران مدرّس

نشریه علمی مهندسی عمران مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

صاحب امتیاز:
مدیر مسئول:
سر دبیر:
مدیر داخلی:

دانشگاه تربیت مدرس
دکتر فرهاد دانشجو (استاد مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر مسعود قدسیان (استاد مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس)
زهرا خوئینی ها

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر محمد تقی	احمدی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر علی اکبر	آقا کوچک	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر بیتا	آیتی	دانشیار	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر عباسعلی	تسنیمی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر فرهاد	دانشجو	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر سید علی اکبر	صالحی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر محمود	صفارزاده	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر مسعود	قدسیان	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر امیر	کاوسی	عضو هیئت علمی	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر علی	فاخر	دانشیار	دانشگاه تهران
دکتر محمد	قائمیان	استاد	دانشگاه شریف
دکتر محمد حسن	بازیار	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر غلامرضا	قدرتی امیری	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر پرویز	قدوسی	استاد	دانشگاه علم و صنعت

**اعضای هیئت تحریریه
مشورتی:**

پروفسور علی	فخیمی	استاد	دانشگاه نیومکزیکو
پروفسور جمال	رستمی	استاد	دانشگاه کلرادو
دکتر گودرز	احمدی	عضو هیئت علمی	دانشگاه کارلستون آمریکا
دکتر بهمن	غیاثی	عضو هیئت علمی	دانشگاه بیرمنگام
پروفسور ناصر	خاجی	عضو هیئت علمی	دانشگاه هیروشیما
دکتر محمد	حیدرزاده	عضو هیئت علمی	دانشگاه انگلستان

**هیأت داوران این
شماره:**

آقا کوچک، علی اکبر	دانشگاه تربیت مدرس	فخیمی، احمد	دانشگاه تربیت مدرس
احمدی، مرتضی	دانشگاه تربیت مدرس	قاری قرآن، علیرضا	دانشگاه اصفهان
پاک، علی	دانشگاه شریف	قدرتی امیری، غلامرضا	دانشگاه علم و صنعت
خاجی، ناصر	دانشگاه تربیت مدرس	قزوینیان، عبدالهادی	دانشگاه تربیت مدرس
دردایی، صادق	دانشگاه تربیت مدرس	قنبری، علی	دانشگاه خوارزمی
زهرایی، سید مهدی	دانشگاه تهران	کاوسی، امیر	دانشگاه تربیت مدرس
شاه بیگ، شریف	دانشگاه تربیت مدرس	کاهونی، شاهپور	دانشگاه امیر کبیر
شکیب، حمزه	دانشگاه تربیت مدرس	کوکبی، مهرداد	دانشگاه تربیت مدرس
عامری، محمودرضا	دانشگاه شیراز	ملکی، شروین	دانشگاه شریف
عرب زاده، ابو الفضل	دانشگاه تربیت مدرس	وائقی امیری، جواد	دانشگاه نوشیروانی بابل
عسگریان، بهروز	دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی	هادیانفرد، محمد علی	دانشگاه صنعتی شیراز
علیایی، محمد نوروز	دانشگاه تربیت مدرس	یثربی، شهاب الدین	دانشگاه تربیت مدرس

ویراستار ادبی و فنی: زهرا عزیزی
ویراستار انگلیسی: فاطمه ترابی
کارشناس اجرایی: زهرا خوئینی ها
طراح جلد، حروف چین و صفحه آرا: مسعود سروری

نشانی دفتر مجله:

تهران، تقاطع بزرگراه شهید چمران و آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
دفتر مجله علمی مهندسی عمران مدرس

صندوق پستی: ۳۹۷-۱۴۱۵، تلفن و دورنگار: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۹۵۰، رایانامه: civiljournal@modares.ac.ir

این نشریه در پایگاه‌های علمی ISC و جهاد دانشگاهی SID نمایه می‌شود.

به نام آن که جان را فکرت آموخت.



مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۵، سال ۱۴۰۵

اعتبار علمی - پژوهشی

اعتبار مجله علمی مهندسی عمران مدرس در جلسه مورخ ۱۳۸۸/۱۰/۰۹ کمیسیون نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری مورد ارزیابی قرار گرفت و با درجه علمی - پژوهشی به تأیید رسید و طی نامه شماره ۳/۱۱/۱۶۳۴ به معاونت پژوهشی این دانشگاه ابلاغ گردید. همچنین به موجب قانون مطبوعات، وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، پروانه انتشار این مجله را به شماره ۸۸/۱۴۲۹۸ در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۱۰ صادر کرده است.

راهنمای تهیه و تدوین مقالات

از مؤلفان گرامی تقاضا می‌شود در ارسال مقالات به نکات زیر توجه فرمایند:

۱- زبان رسمی مجله، فارسی است.

۲- مقالات باید پژوهشی و حاصل تحقیق نویسنده یا نویسندگان در زمینه مهندسی عمران و محیط زیست (سازه، زلزله، سازه‌های هیدرولیکی، سازه‌های دریایی، خاک و پی، راه و ترابری، برنامه‌ریزی حمل و نقل، آب و محیط زیست) بوده و قبلاً چاپ نشده یا به طور همزمان به مجلات دیگر ارسال نشده باشد.

۳- مقالات قابل چاپ در مجله به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف- مقالات کامل پژوهشی: مقالات علمی- پژوهشی با حداقل حجم ۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ کلمه (یا معادل آن) حداکثر در ۱۲ صفحه (تعداد صفحات مقاله، عدد زوج باشد).

ب- یادداشت‌های کوتاه پژوهشی: مقالات علمی پژوهشی با حداکثر ۲۵۰۰ کلمه (یا معادل آن) حداکثر در ۱۰ صفحه (تعداد صفحات مقاله، عدد زوج باشد).

تبصره ۱: مقالات مروری (Review Article)، از نویسندگان مجرب و صاحب مقالات پژوهشی در زمینه مورد بحث پذیرفته خواهد شد.

تبصره ۲: مقالات ترجمه، پذیرفته نمی‌شود.

۴- مقالات ارسالی باید دارای بخش‌های زیر باشند:

الف- نام نویسنده یا نویسندگان، نام نویسنده مسئول مکاتبات با ستاره مشخص شود؛ نام مؤسسه متناظر هر یک از نویسندگان، نشانی کامل نویسنده مسئول مکاتبات شامل نشانی پستی، شماره فکس و رایانامه.

ب- عنوان کامل مقاله به فارسی، چکیده فارسی، کلید واژگان فارسی، عنوان کامل مقاله به لاتین، نام و نشانی نگارندگان به زبان انگلیسی، چکیده لاتین، کلید واژگان لاتین.

ج- مقدمه، بدنه مقاله (شامل شرح مسأله، روش حل، تفسیر، تحلیل و نتایج)، نتیجه‌گیری، سپاسگزاری، فهرست مراجع.

د- چکیده مقاله (Extended Abstract) حاوی حداکثر یک صفحه و در حداقل ۵۰۰ کلمه ارائه شود.

۵- اصلاحات خارجی با معادلی دقیق و رسا در زبان فارسی باشد و عبارات اختصاری به کار رفته در متن به زیرنویس ارجاع شود.

۶- محل ارجاع عکس‌ها و جدول‌ها، شکل‌ها و نمودارها به طور دقیق ضمن رعایت ترتیب آن‌ها در متن معین شده، ارسال اصل جدول‌ها و شکل‌ها با کیفیت ۳۰۰dpi به صورت سیاه و سفید در محیط اکسل ضروری است. برای جدول‌ها و شکل‌ها، به ترتیب عناوین فارسی و معادل انگلیسی آن‌ها (بلافاصله) در بالا و زیر آن‌ها قرار گیرد. در شکل‌ها و جدول‌ها از خطوط افقی و عمودی (grid) استفاده نشود. جدول‌ها و شکل‌ها بدون کادر و شکل‌های حاوی نمودار فقط دارای محور عمودی و افقی باشند.

- ۷- تعیین محل دقیق مراجع در متن و فهرست نمودن مراجع به ترتیب ظهور در متن مقاله ضروری است. عنوان قسمت مراجع به انگلیسی (References) نیز نوشته شود.
- ۸- شیوه نگارش مشخصات مراجع به شرح زیر است:
- الف. کتاب: نام خانوادگی، نام نویسنده یا نویسندگان، نام کتاب، نام مترجم، محل نشر، نام ناشر، تاریخ انتشار، شماره صفحات.
- ب. مقاله: نام خانوادگی، نام نویسنده یا نویسندگان، عنوان مقاله، نام نشریه، دوره (جلد)، سال انتشار، شماره صفحات.
- ۹- مقالات باید در صفحه A4 با حاشیه چپ و راست ۱/۵ cm در دو ستون با فاصله ۱ cm از هم (به جز برای تصاویر و جداول بزرگ) و با فاصله میان سطور Single با قلم B Lotus نازک ۱۲ برای محتویات فارسی و قلم Times New Roman نازک ۱۰ برای محتویات انگلیسی و استفاده از استایل Normal و شماره گذاری دستی عناوین بخش ها و قسمت ها به همراه Bold کردن سطر مرتبط، تحت نرم افزار Word ۲۰۱۰ تایپ شود؛ و نویسنده مقاله پس از ثبت نام در سامانه نشریات سایت دانشگاه تربیت مدرس به آدرس زیر این صفحه مراجعه و کلیه مراحل ثبت و ارسال مقاله را سپری و با حفظ کد مقاله خود برای پیگیری های بعدی، از طریق سامانه نشریات اقدام نمایند.
- ۱۰- مقالات برگرفته از پایان نامه و رساله دانشجویان دکتری با نام استاد(ان) راهنما، مشاور(ان) و دانشجو به صورت تئام منتشر می شود؛ لذا استاد راهنما عهده دار مسئولیت و نویسنده رابط خواهند بود.
- ۱۱- مسئولیت صحت و سقم مطالب بر عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود.
- ۱۲- مجله علمی مهندسی عمران مدرس حق رد یا قبول مقالات را برای خود محفوظ می دارد.

نشانی دفتر مجله:

تهران، تقاطع بزرگراه شهید چمران و آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

دفتر مجله علمی مهندسی عمران مدرس

صندوق پستی: ۱۴۳-۱۴۱۵، تلفن و نمابر: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۹۵۰

آدرس سامانه نشریه: <http://civil.journals.modares.ac.ir>

پست الکترونیکی: civiljournal@modares.ac.ir

این نشریه در پایگاه های اطلاعات علمی ISC و جهاد دانشگاهی SID نمایه می شود.

صفحه	عنوان مقاله و نام نویسندگان
۷	ریزگردها در ایران: تحلیل چالش‌ها و ارائه راهکارهای مدیریتی علیرضا اصلمند، فائزه برهانی
۲۱	بلوک‌های موجود روی سازه‌ی تونلی و تأثیر آن‌ها بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B وادی محمدوادی، علی خوش‌فطرت، موسی حبیب‌جاسم، نیلوفر سالمی
۳۵	ارزیابی عملکرد الگوریتم ارتعاش معکوس در تشخیص خرابی در مدل دو بعدی برشی در سکوی دریایی میرا روح الله نجفی، محمدعلی لطف الهی یقین، علیرضا مجتهدی
۴۷	بررسی فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود با استفاده از شکل مودهای POD و معیار انعطاف‌پذیری سلمان رحیمیان، موسی محمودی صاحبی، مجتبی کریمایی طبرستانی، علی نبی زاده
۶۳	عملکرد بتن خودمتراکم کم‌سیمان با استفاده از لجن سنگ به‌عنوان جایگزین ماسه علی محمدصالحی، داود مستوفی نژاد
۸۱	تحلیل چرخه حیات سنتز و کاربرد فتوکاتالیستی نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی در حذف رنگ رودامین‌بی با رویکرد پایداری محیط‌زیستی افسانه شهبازی
۹۷	بررسی بتن خود ترمیم شونده با استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس کمیل مومنی، طاهره ثمری ماسوله، سجاد غلامرضایی سرولات

Haze Storms in Iran: Analyzing Challenges and Providing Management Solutions

Alireza Aslemand¹, Faezeh Borhani^{2*} 

1. Ph.D., Department of Applied Geomatics, Faculty of Human Sciences, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada.
2. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Introduction: There are several sources for the production of these particles that the most important of them is incomplete combustion of hydrocarbon compounds which come from anthropogenic sources, and Dust Storm, and Wildfires in natural sources. In global scale, Natural dust contribution into the atmosphere is mostly from arid and semiarid regions. In the Middle East that has a large area of the dry belt, the main sources of particles, are dust storms. Thick dust that comes over Iran from western and southwestern neighboring countries passes through the southern, western and central of Iran and even Tehran. Haze and dust storms in recent years cause to poor air quality conditions in many cities, especially in large cities like Tehran and Ahvaz. According to our investigations, Zabol and Ahvaz are the most polluted major cities in the Iran in terms of particulate matters.

Methods: There are many factors that play a role in the management of haze phenomenon such as monitoring and analyzing observation stations, satellite images and numerical simulations. Monitoring and measurement haze in Iran is still relies on the use of air quality urban monitoring stations. These stations are strongly influenced by particle emissions from transport and industrial processes and only if there is on line monitoring in urban area the dust effects on environment can be assessed. Then application of satellite images has been discussed. MODIS images have many applications in the study of climate issues. MODIS received data from the TERRA and AQUA satellites, these images give the optical depth of aerosols. Also, by using MODIS natural color images start and moving of dust storms are visible. In this study we used EUMETSAT images, which provide monitoring dust storms on earth. These satellites help meteorologist and environmental experts to determine dust trajectories and sources. Next, we used numerical models including SKIRON, AEMET and HYSPLIT for dust storms management. Models enables accurate simulation of motion of dust, the main wind direction, changes in boundary layer height and show how moving dust. After that we applied HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). HYSPLIT model is a complete system for computing simple air parcel trajectories to complex dispersion and deposition simulations. At last wind erosion control strategies described. Some of the strategies for controlling wind erosion and dust emissions are reducing wind speed at ground level to be less than the emission threshold velocity and factors such as moisture and integrity of the Earth's tectonic.

Results And Conclusion: Undoubtedly haze and its harmful effect is one of the dramatic environmental problems especially in arid region including our country. According to the health organization, four-city in Iran are highly polluted cities in the world in terms of particulate matter, this represents a very critical situation in the country. In this paper, Tools used in air quality management are monitoring stations, satellite imagery and numerical models discussed. These tools used to predict how and where the dust initiate and spread. the methods of controlling wind erosion and dust emission was assigned to work in a fundamental way to avoid the haze problems. At the end, the main approaches to control wind erosion and dust emissions such as the proper use of land, control soil moisture, vegetation or artificial barriers downwind (wind break) described.

Review History

Received: Aug 10, 2025

Revised: Sep 30, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Haze

Air quality management

Modeling

Satellite images

Wind erosion control

* Corresponding Author Email: f.borhani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0003-2686-6702

ریزگردها در ایران: تحلیل چالش‌ها و ارائه راهکارهای مدیریتی

علیرضا اصلمند^۱، فائزه برهانی^{۲*} 

۱. دکتری تخصصی، گروه سنجش از دور، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه شریروک، شریروک، کبک، کانادا.
۲. استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

با گسترش جمعیت شهری و رشد بی‌رویه صنایع در محدوده‌های شهری، شهرهای بزرگ با مشکل آلودگی محیط‌زیست و به خصوص آلودگی هوا مواجه‌اند. در ایران نیز با توجه به روند رو به رشد صنعتی شدن کشور، این مشکل در سال‌های اخیر نمود بیشتری پیدا کرده است. مشکلی که با توجه به جنگ‌های غرب آسیا و بمباران‌های وسیع و نابسامانی‌های آن در عراق، عدم رسیدگی به آبخیزداری و اصول پیشگیری در کشورهای عربی منطقه و همچنین تشدید پدیده گرمایش جهانی و کاهش بارندگی‌ها بروز نموده، انتشار ریزگردها در کشورهای منطقه غرب آسیا و از جمله ایران می‌باشد. با توجه به مشکل جدید ریزگردها، ضرورت دارد که سازمان‌های محیط زیستی به عنوان متولیان این امر، آغازگر حرکت‌های منسجم در تدوین راهکارهای مدیریتی سیستماتیک و واقع‌گرایانه و نهادینه کردن آن از طریق مراجع قانونی باشند. در این مقاله، ابتدا به بررسی علل بروز و انتشار طوفان‌های گرد و غباری و اهمیت آثار آن بر وضعیت منطقه‌ای و محیط‌زیستی پرداخته شده است. سپس رویکردها و ابزارهای مدیریت کیفیت هوا از جمله پایش و نمونه برداری ریزگردها، ابزار تصاویر ماهواره‌ای (MODIS و EUMETSAT) و مدل‌سازی عددی (کاربرد مدل‌های HYSPLIT و SKIRON) مورد بحث قرار گرفت و در پایان رویکردهای اساسی کنترل فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار همچون استفاده صحیح از زمین، حفظ رطوبت خاک، استقرار پوشش گیاهی و یا مصنوعی و ایجاد موانع در مسیر باد (بادشکن) بیان شد.

کلمات کلیدی

ریزگردها

مدیریت کیفیت هوا

مدل‌سازی

تصاویر ماهواره‌ای

کنترل فرسایش بادی

۱- مقدمه

منابع مختلفی برای تولید این ذرات وجود دارد که از مهمترین

آن‌ها می‌توان به احتراق ناقص ترکیبات هیدروکربنی از منابع انسان‌ساخت و طوفان‌های گرد و غبار (Dust Storms) و آتش‌سوزی جنگل‌ها (Wildfires) در منابع طبیعی اشاره کرد [2]. در مقیاس جهانی سهم عمده گرد و غبار طبیعی، از مناطق خشک و نیمه خشک وارد هوا می‌شوند. در منطقه غرب آسیا نیز که مساحت زیادی از آن در کمربند خشک جهان قرار دارد، منابع اصلی انتشار طبیعی ذرات، طوفان‌های گرد و غبار هستند [3].

به طور کلی ذرات معلق در هوا به مجموعه گسترده‌ای از ذرات گفته می‌شود که زیر مجموعه‌های آن در بسیاری از خواص تفاوت دارند. دود، گرد و غبار، غبار، مایعات ذره‌ای، مه، دوده و خاکستر همگی در خانواده ذرات معلق در هوا قرار می‌گیرند. بسته به اینکه ذرات ریز معلق از کدامیک از حالات و منابع در هوا پخش شوند، خواص مربوط به جنس، هندسه و حالت فیزیکی آن‌ها متفاوت است [1].

* رایانامه نویسنده مسئول: f.borhani@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0003-2686-6702

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



طوفان‌های گرد و غباری، مختصری از وضع موجود و راهکارهای مدیریت و بررسی گرد و غبار با استفاده از پایش و اندازه‌گیری، تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های نرم‌افزاری می‌باشد. در پایان نیز پیرامون روش‌های کنترل فرسایش بادی مواردی ذکر شده است. در مطالعه پیش‌رو از تصاویر EUMETSAT، MODIS و HYSPLIT و SKIRON برای بررسی گرد و غبار استفاده شده است.

۲- علل بروز و پیش‌زمینه‌های لازم

در ایجاد فرسایش بادی و انتقال گرد و غبار ناشی از آن به جو، پیش‌زمینه جغرافیایی منطقه و سیستم‌های جوی نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در ادامه به بررسی این عوامل پرداخته شده است.

۲-۱- عوامل جغرافیایی

فرایندهای رودخانه‌ای در تولید ذرات ریز با جدا کردن آن‌ها از ماتریس خاک و حمل آن‌ها به حوضه رسوب و یا دشت‌های آبرفتی مؤثر است. فعالیت‌های رودخانه‌ای (حضور رودخانه‌ها، جریان‌های فصلی و زودگذر، آبرفت‌ها، دریاچه‌های نمک و مخروط افکنه‌ها و گودهای نهشتی) در مناطقی که منبع گرد و غبارند، مشهود است. مخروط افکنه‌ها نیز از رسوبات ناشی از فرسایش آبی در دامنه کوه تشکیل می‌شوند که قسمت بالایی آن‌ها شامل رسوبات درشت و قسمت پایینی شامل رسوبات ریز است. گود نهشتی (جلگه قلیایی)، یک بستر دریاچه خشک است که شامل رسوبات نمک‌های قلیایی ریز دانه می‌باشد. ارتباط دائمی بین منابع گرد و غبار با گودهای نهشتی اثبات شده است. الگوی جهانی خشکی توسط گردش عمومی جو تعیین می‌شود و خشک‌ترین مناطق جهان در پای کوه‌های بلند هستند زیرا هنگامی که جریان هوا به نزدیکی رشته کوهی می‌رسد یا باید از آن بالا رفته و یا باید منحرف شده تا از اطراف آن عبور کند. با بالا رفتن بسته‌ی هوا، آن بسته متراکم شده و با بارش رطوبتش را از دست می‌دهد، و وقتی از کوه پایین می‌آید، گرمایش بی‌دررو در حرکت رو به پایین، مانع تراکم و بارش است در نتیجه تولید جریان هوای گرم و خشک می‌کند که به گرم باد^۲ معروف است. در ارتباط با فرسایش بادی این فرآیند دارای سه نتیجه مهم است [7]:

گرد و غبار غلیظی که از کشورهای غربی و جنوب غربی ایران منشأ می‌گیرد، از مناطق جنوبی، غربی و مرکزی ایران عبور می‌کند و به تهران و حتی مناطق شرقی کشور می‌رسد. وقوع گرد و غبار و ریزگردها در طی چند سال اخیر بارها سبب وضعیت نامطلوب کیفیت هوا در بسیاری از شهرهای کشور و بخصوص کلان‌شهرهایی چون تهران و اهواز شد، به گونه‌ای که بارها تعطیلی این شهرها را سبب شد.

در مناطق مستعد گرد و غبار بسته به سرعت باد، زبری عناصر سطح، رطوبت خاک، اندازه دانه‌ها، پوشش گیاهی، بافت خاک، چسبندگی خاک و پستی و بلندی‌های زمین، ذرات ریز وارد جریان‌های جوی شده، تولید گرد و غبار می‌کنند. روش‌های انتقال ذرات به جو شامل معلق شدن، جهش ناگهانی و خزش می‌باشد [4,5].

این نوع گرد و غبار را که بر اثر فرسایش بادی تولید می‌شود، بر اساس تاثیر بر میدان دید و شدت گرد و غبار به سه دسته طبقه بندی می‌کنند، که به ترتیب شامل طوفان گرد و غبار، گرد و غبار وزنده و گرد و غبار معلق هستند. طوفان گرد و غباری مقادیر قابل توجهی گرد و غبار و شن را به وسیله بادهای قوی به بالا حمل کرده و ممکن است میدان دید را تا حد صفر کاهش دهد. گرد و غبار وزنده از لحاظ شدت در بین پدیده‌های گرد و غبار حد متوسط می‌باشد، این پدیده به وسیله بادهای با ارتفاع زیاد ایجاد می‌شود. گرد و غبار معلق پدیده‌ای با حداقل شدت است که در آن گرد و غبار ریز در بخش زیرین تروپوسفر معلق می‌ماند [6].

در زمینه گرد و غبار در جهان و به‌ویژه در کشورهای شرق آسیا، اسپانیا و آمریکا مطالعات فراوانی انجام شده است که در آن شناسایی منابع، مسیرهای حرکت توده‌ها، تعیین غلظت، سهم منابع مختلف در غلظت، روند طوفان‌های گرد و غبار و تحلیل ویژگی‌های گرد و غبار (شیمیایی و فیزیکی) با استفاده از مدل‌سازی عددی، تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور و پایش مورد نظر بوده است [3, 6]. در ایران تحقیقات کمی در این مورد گرد و غبار صورت گرفته که اغلب آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مانند TOMS^۱ به تحلیل فصلی و سالانه گرد و غبار و شناسایی منابع پرداخته شده است و از مدل‌سازی رایانه‌ای کمتر استفاده شده است. هدف تحقیق حاضر بررسی عوامل بروز

² Foehn wind

¹ Total Ozone Mapping Spectrometer

- باد نزدیک به سطح قوی برای بلند کردن ذرات ماسه و گرد و غبار از سطح خاک
- آشفته‌گی یا همرفت قوی برای پراکنده کردن ذرات به سطوح بالا
- بادهای قوی برای حمل و نقل افقی ذرات در مسافت‌های طولانی

نکته قابل توجه آن که سیستم‌های جوی تولیدکننده طوفان‌های گرد و غباری در نقاط مختلف جهان کاملاً متفاوت است. در اینجا به تشریح سه سیستم اصلی پرداخته می‌شود.

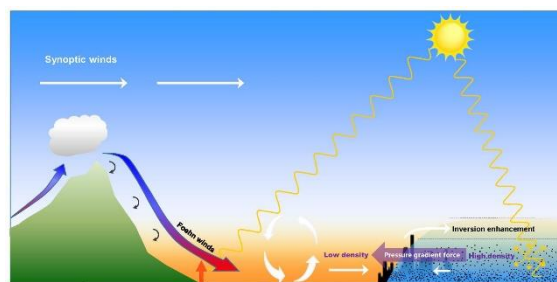
۲-۱-۲-۲- بادهای موسمی

در شمال آفریقا، غرب آسیا و جنوب شرقی آسیا طوفان‌های گرد و غباری اغلب توسط بادهای موسمی تولید می‌شوند. هارمتان^۱ (بادی شمالی جنوبی که خشک و داغ است و در سطح پایین می‌وزد) در شمال آفریقا و باد شمال^۲ در غرب آسیا از مثال‌های معروف این نوع بادهای هستند. الگوی باد و بارش در شمال آفریقا شدیداً تابع بادهای موسمی منظم و پیوسته‌ای است، که در دوره‌ای سالانه، در مناطق ۲ درجه شمالی در ژانویه و ۲۵ درجه شمالی در اگوست می‌وزند. شکل (۲) تصویری از دیواره‌ی طوفان گرد و غبار را نشان داده است. در غرب آسیا، باد شمال بین ماه‌های ژوئن و سپتامبر تقریباً هر روز می‌وزد. این باد ممکن است سبب ایجاد طوفان گرد و غبار بر روی عراق، کویت و شبهه جزیره عربستان شود.

هنگامی که باد شمال از بالای دشت‌های آبرفتی دجله و فرات می‌گذرد، مقادیر بسیار زیادی از گرد و غبار را به هوا بلند می‌کند که از روی کویت، شمال خلیج فارس و مناطقی از ایران گذر می‌کند. طوفان‌های گرد و غباری ناشی از باد شمال به صورت دیواره‌ای از گرد و غبار که دارای ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر بلندی و ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلومتر ضخامت هستند، حرکت می‌کنند. در درون این دیواره، میدان دید تقریباً "به صفر می‌رسد".

۲-۲-۲- چرخندها و سیستم‌های جبهه‌ای

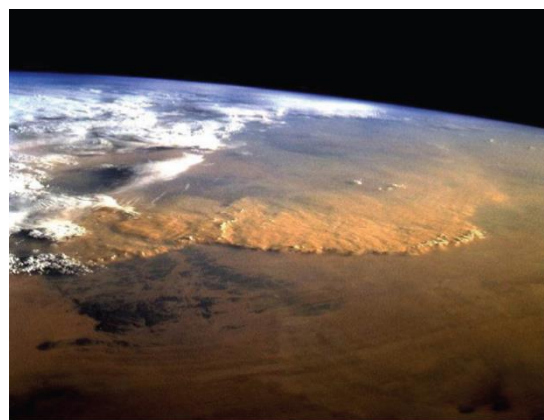
این عوامل سبب ایجاد طوفان‌های گرد و غباری در مقیاس بزرگ می‌شوند، بیشتر طوفان‌های گرد و غباری در شمال شرقی



شکل ۱. اثر عوامل جغرافیایی، کوه‌های بلند و باد فوهن در فرسایش بادی و

ایجاد طوفان‌های گرد و غباری [8]

Fig. 1. Effect of geographical factors, high mountains, and Föhn winds in creating dust storms through wind erosion



شکل ۲. تصویری از دیواره‌ی طوفان‌ی صحرای آفریقا [7]

Fig. 2. Image of a dust storm in the Sahara Desert showing a dust wall

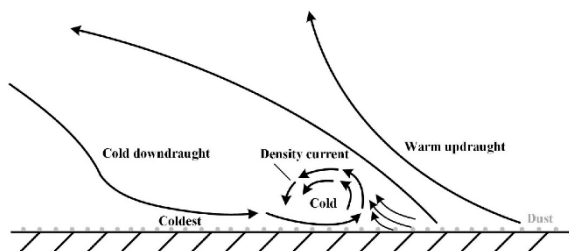
- در پای کوه، سایه خشک گسترش می‌یابد.
 - افزایش بارش در دامنه‌های کوهستانی که سبب فعالیت رودخانه‌ای و حمل و نقل رسوبات از دامنه کوه به دشت‌های مجاور می‌شود.
 - الگوی جریان‌های پیچیده در مناطق اطراف رشته کوه‌ها که بر انتقال گرد و غبار اثر می‌گذارد.
- چگونگی تأثیر عامل جغرافیایی و اثر گرم باد در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۲-۲- عوامل جوی

طوفان‌های گرد و غباری سنگین اغلب توسط سیستم‌های آب و هوایی شدید مثل بادهای موسمی، چرخندها و جبهه‌ها و طوفان‌های تندری به وجود می‌آیند. در این سیستم‌ها شرایط لازم هواشناسی برای شکل‌گیری طوفان‌های گرد و غباری حضور دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به سه مورد زیر اشاره کرد [7]:

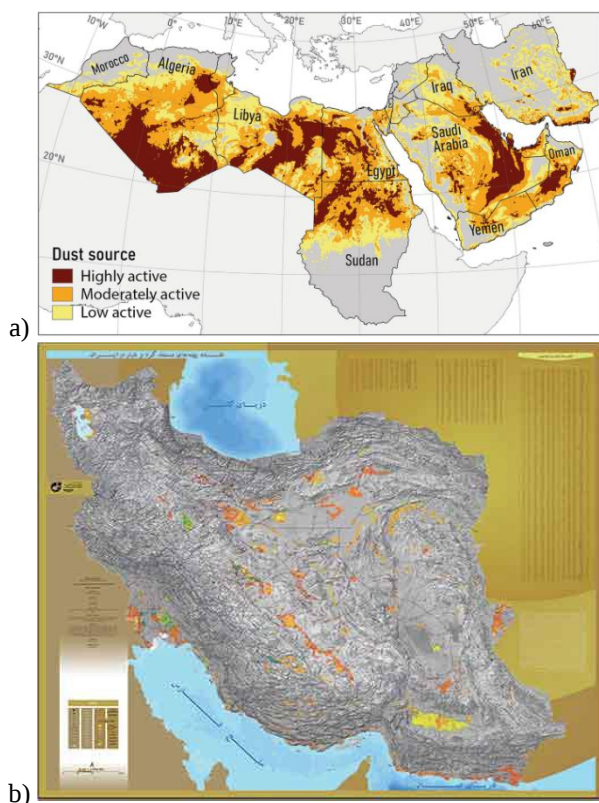
¹ Harmattan

² Shamal



شکل ۳. چگونگی ایجاد طوفان شن توسط چرخندها [7]

Fig. 3. How cyclones generate sandstorms [7]



شکل ۴. (a) کمربند گرد و غبار [15]، (b) نقشه پهنه های مستعد تولید گرد و

غبار در ایران (<https://data.gov.ir/dataset>)

Fig. 4. a) Dust belt [15], b) Map of dust-prone areas in Iran

استان‌های خوزستان، ایلام، سیستان و بلوچستان، کرمانشاه، کردستان، بوشهر، قم و حتی تهران بیش از سایر نقاط با ریزگردها درگیر هستند. برای نمونه، در سال ۲۰۲۳، بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا، میانگین غلظت ذرات معلق PM_{10} در زابل به ۳۲۰ میکروگرم بر مترمکعب و در اهواز به ۲۶۰ رسید. این در حالی است که حد استاندارد سازمان جهانی بهداشت برای PM_{10} تنها ۵۰ میکروگرم بر مترمکعب است. همچنین در برخی روزها، میزان حداکثری این ذرات از ۱۵۰۰ میکروگرم نیز فراتر رفت. در تهران نیز با وجود فاصله از کانون‌های اصلی،

آسیا و استرالیا بر اثر همین طوفان‌هاست. برای مثال، چرخندهایی که از فلات مغولستان سرچشمه می‌گیرند با عبور از صحرای گبی در شمال شرق آسیا سبب طوفان گرد و غبار می‌شوند، هم‌چنین حوادث گرد و غباری مهم در استرالیا بیشتر به علت جبهه‌های هوای سرد جنوبی است که از جنوب غربی به شمال شرقی گسترده می‌شود. در شکل (۳) چگونگی ایجاد طوفان شن توسط چرخندها نمایش داده شده است [7].

۲-۳-۲- طوفان‌های تندری

این طوفان‌ها با گردبادهایی با سرعت باد سطحی بسیار بالا، که به آن‌ها خطوط طوفانی می‌گویند، همراه می‌شوند. در تابستان روی برخی بیابان‌های جنوب صحرای آفریقا، در جنوب غرب آمریکا و بقیه مناطق خشک جهان همراهی این خطوط طوفانی با طوفان‌های گرد و غباری به صورت مداوم مشاهده است. در جلوی این نوع طوفان‌ها، هوای گرم و شناور ارتفاع گرفته و پس از متراکم شدن سبب ایجاد باران سنگین می‌شود، هوای خشک که در سطح بالا به طوفان می‌رسد به وسیله تبخیر قطرات بارش خنک شده، هنگامی که نزول می‌کند و به زمین برخورد می‌کند، شکسته و منحرف می‌شود و به عنوان تک‌های جدا شده از ابر به جلو حرکت کرده و تشکیل دیواره گرد و غبار می‌دهد. مشاهدات نشان می‌دهد که سرعت این بسته هوای جدا شده ممکن است از ۵۰ متر بر ثانیه بیشتر باشد ولی معمولاً سرعت در حدود ۲۰ متر بر ثانیه است [7].

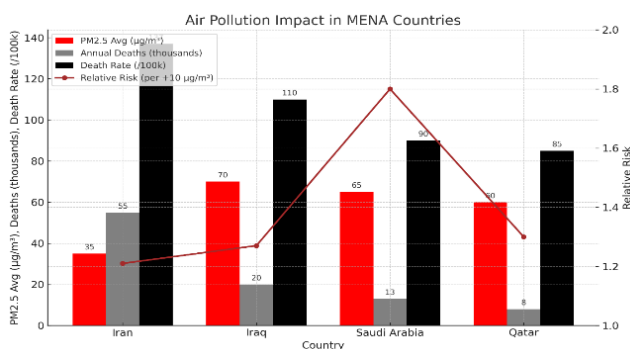
۲-۳-۲- وضعیت منطقه‌ای ایران در بحث ریزگردها

ایران که در کمربند گرد و غبار شکل (۴) قرار دارد در سال‌های اخیر شاهد افزایش کم‌سابقه در تعداد، شدت و گستره طوفان‌های گردوغبار بوده است. این طوفان‌ها در بسیاری از موارد منشأ فرامرزی دارند. بیابان‌های خشک عراق، سوریه، عربستان و افغانستان از جمله منابع خارجی اصلی گردوغبار هستند که با ورود به مرزهای غربی، جنوب‌غربی، جنوب و شرق ایران، بخش بزرگی از کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از سوی دیگر، کانون‌های داخلی گردوغبار نیز به دلیل خشکسالی‌های مکرر، کاهش پوشش گیاهی، خشک شدن تالاب‌ها (همچون هورالعظیم، جازموریان و هامون) و حکمرانی ناپایدار منابع طبیعی، فعال‌تر شده‌اند.

افزایشی به خود گرفته است، مشکلی که با توجه به جنگ‌های غرب آسیا و بمباران‌های وسیع و نابسامانی‌های بعد از آن در عراق، عدم رسیدگی به آبخیزداری و اصول پیشگیری در کشورهای عربی منطقه و همچنین تشدید پدیده گرمایش جهانی و کاهش بارندگی‌ها تشدید شده است.

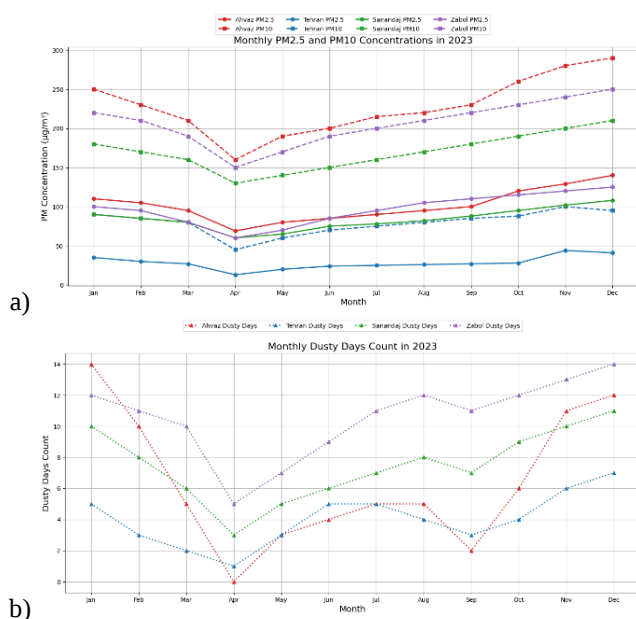
۴- ابزارهای حکمرانی کیفیت هوا در رویدادهای گرد و غباری

در حکمرانی پدیده ریزگردها عوامل بسیاری برای بهبود مدیریت ایفای نقش می‌کنند که می‌توان به پایش و تحلیل داده‌های زمینی، تصاویر ماهواره‌ای و شبیه‌سازی رایانه‌ای اشاره کرد.



شکل ۵. غلظت سالانه میانگین و تعداد و نرخ مرگ و میر در غرب آسیا [16] WHO

Fig. 5. Annual average PM_{2.5} concentrations and related mortality rates in the Middle East region.



شکل ۶. a) وضعیت میانگین غلظت ذرات در روزهای گرد و غباری و b) تعداد این روزها در سال ۲۰۲۳ (منبع: نویسنده)

Fig. 6. a) Average of concentration and b) number of dusty days in the 4 cities during the year 2023

میانگین PM_{2.5} به ۳۷ میکروگرم رسید و در بعضی روزها شاخص کیفیت هوا در محدوده ناسالم برای عموم قرار گرفت [9].

تعداد روزهای گردوغبار در این سال نیز به شکل چشم‌گیری بالا بود؛ زابل با بیش از ۱۱۵ روز، اهواز با حدود ۸۰ روز و آبادان با ۵۸ روز گردوغبار، از آلوده‌ترین نقاط کشور به شمار آمدند. شدت پدیده نیز به گونه‌ای بود که برخی پروازها لغو و مدارس در چندین استان تعطیل شدند.

۲-۴- وضعیت منطقه غرب آسیا

ریزگردها محدود به مرزهای ایران نیستند. کشورهای عراق، عربستان، کویت، سوریه، قطر و افغانستان نیز با شدت‌های مشابهی از این پدیده درگیر هستند. برای نمونه، در سال ۲۰۲۳، بغداد، کویت‌سیتی، ریاض و کابل جزو ۱۰۰ شهر اول جهان از نظر آلودگی ذرات معلق قرار گرفتند. وقوع طوفان‌های خاک به‌ویژه در بهار و تابستان، در این کشورها با کاهش دید، اختلال در حمل‌ونقل، آسیب به دستگاه‌های صنعتی و تهدید سلامت عمومی همراه بوده است [10].

۳- آثار بهداشتی و محیط زیستی

ریزگردها به ویژه ذرات ریز PM_{2.5} دارای آثار مخرب بر سلامت انسان هستند. این ذرات به عمق ریه نفوذ کرده و می‌توانند از سد تنفسی عبور کرده، وارد جریان خون شوند و موجب تشدید بیماری‌های قلبی-عروقی، آسم، برونشیت، سرطان ریه و حتی مرگ زودرس شوند [11, 12, 13, 14]. بر اساس گزارش مطالعه بار جهانی بیماری‌ها (GBD)، سالانه بیش از ۵۵ هزار مورد مرگ زودرس در ایران به آلودگی هوا نسبت داده می‌شود. علاوه بر آن، ریزگردها باعث آسیب به محصولات کشاورزی، آلودگی منابع آب، کاهش عملکرد تجهیزات صنعتی و تضعیف اکوسیستم‌ها می‌شوند. افزایش فرسایش خاک، رسوب‌گذاری در مخازن، و کاهش توان تولیدی اراضی کشاورزی از دیگر پیامدهای آن است.

شکل (۵) غلظت سالانه میانگین و تعداد و نرخ مرگ و میر در غرب آسیا و شکل (۶) وضعیت میانگین غلظت ذرات در روزهای گرد و غباری و تعداد این روزها در سال ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد.

علاوه بر وضعیت بحرانی غلظت گرد و غبار، تناوب بروز، شدت گرد و غبار و در نتیجه آثار آن در سال‌های اخیر روند

انتهایی برج پایش به ترتیب در فاصله های ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۹، ۱۳، ۱۷، ۲۱، ۲۵، ۲۹، ۳۳، ۳۴، ۴۱، ۴۵ و ۴۹ متر بالاتر از سطح زمین قرار گرفته‌اند. مقدار برداشت و جابه جایی ذرات درشت که از طریق خزشی و یا جهشی جابه جا می شوند به طور همزمان توسط تله‌های رسوبگیر دیگری که در سطح زمین و در اطراف برج پایش نصب شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شوند. پارامترهای سرعت و جهت باد نیز به طور همزمان و در ارتفاع‌های پانزده گانه به روش الکترونیکی ثبت می‌شوند. نمونه‌ای از این ایستگاه‌های پایش در شکل (۸) دیده می‌شوند [17].

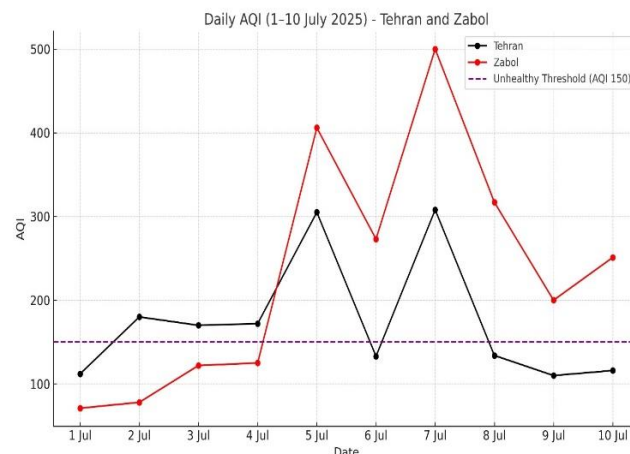
۲-۴- تصاویر ماهواره MODIS

تصاویر MODIS کاربردهای فراوانی در مطالعه مباحث اقلیم‌شناسی دارند، در بحث گرد و غبار نیز تاکنون مقالات فراوانی پیرامون کاربرد این تصاویر در شناسایی منابع و تحلیل مسیرهای حرکتی طوفان‌های گرد و غباری به چاپ رسیده است. MODIS اطلاعات خود را از ماهواره‌های TERRA و AQUA دریافت می‌کند که این تصاویر عمق اپتیکی را در تمام سطح کره زمین در مدت زمان یک تا دو روز به دست می‌دهد.

همچنین با استفاده از تصاویر گرفته شده از MODIS تصاویر واقعی گرد و غبار، شروع و حرکت آن قابل مشاهده است. ارزیابی توزیع اندازه هواویزها نیز به وسیله مقایسه نسبت‌های کانال یک (مرئی) و کانال دو (مادون قرمز نزدیک) و بازتاب تشعشعی سنجنده‌های MODIS و AVHRR امکان‌پذیر است. در زیر نمونه‌ای از تصاویر کاربردی این ماهواره برای بررسی پهنه گرد و غبار مشاهده می‌شود [18].

۳-۴- تصاویر EUMETSAT

این ماهواره اروپایی، امکان پایش طوفان‌های گرد و غباری روی زمین را فراهم می‌کند. گرد و غبار در این ترکیب^۱ RGB به صورت رنگ‌های صورتی و قرمز، ابرهای ضخیم و در ارتفاع بالا به رنگ قهوه‌ای و ابرهای نازک و در ارتفاع پایین به رنگ سیاه مشاهده می‌شوند. این ترکیب RGB+ به صورت ساعتی و با کانال‌های اشعه مادون قرمز تولید می‌شوند این ماهواره به کارشناسان هواشناسی و محیط‌زیست امکان مسیریابی و تعیین منابع انتشار ریزگردها را می‌دهد، که می‌تواند در مدیریت مخاطرات آن کمک شایانی کند [20].



شکل ۷. شاخص روزانه ایستگاه‌های زابل و تهران در طوفان گرد و غبار جولای

۲۰۲۵ (منبع: نویسنده)

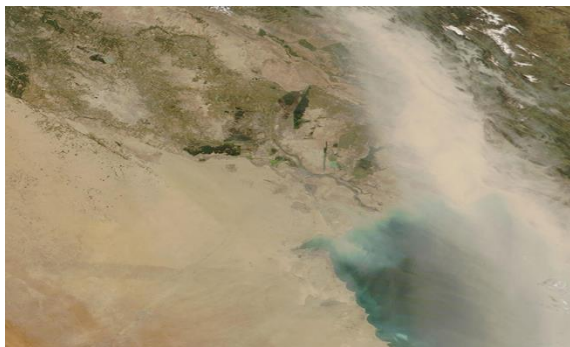
Fig 7. Daily AQI in Zabol and Tehran during a dust storm in July 2025

۱-۴- پایش و اندازه‌گیری گرد و غبار

پایش و اندازه‌گیری ریزگردها در ایران همچنان به کاربرد ایستگاه‌های پایش شهری متکی است و تنها در صورت وجود پایش بر خط در محیط شهری می‌توان آثار غلظتی گرد و غبار را بر محیط بررسی نمود. این ایستگاه‌ها بشدت تحت تأثیر آلاینده‌های ذره‌ای ناشی از حمل و نقل و دودکش‌های صنعتی بوده شکل (۷) شاخص روزانه ایستگاه‌های شهری زابل و تهران در طوفان گرد و غباری جولای ۲۰۲۵ نشان می‌دهد.

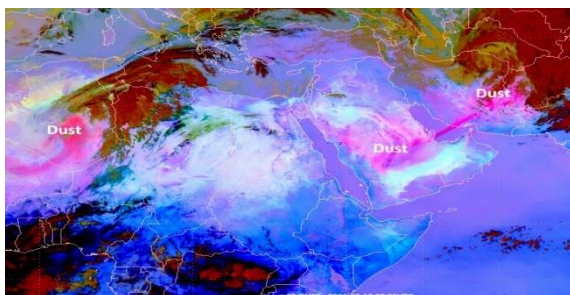
کشورهای توسعه یافته‌تر که در معرض آثار زیانبار گرد و غبار هستند، نسبت به احداث ایستگاه‌های تخصصی و تدوین سیستم پایش متمرکز ریزگردها متمرکز شده‌اند. این سیستم‌ها به نوعی کامل‌کننده پایش شهری بوده و می‌توان داده‌های کاملی از مناطق انتشار، جنس و غلظت ریزگردها بدست آورد و مسیرهای حرکتی آن‌ها را تخمین زد. کشور چین سیستم پایش متمرکز ریزگردها از طریق احداث دکل‌های مرتفع به ارتفاع ۵۰ متر و مجهز به تجهیزات خودکار در نوار بیابانی شمال غرب این کشور ایجاد کرده است. یک شبکه منسجم از ایستگاه‌های پایش گرد و غبار برای مطالعه و شناخت چگونگی حمل و جابه جایی ریزگردها در اقصی نقاط مناطق مستعد انتشار شمال غرب چین احداث شده است. در طول ارتفاع ۵۰ متری برج‌های پایش گرد و غبار، تعداد ۱۵ نقطه ثبت باد و رسوب‌های گرد و غبار تعبیه شده است و فاصله تله‌های رسوب گیر افقی و عمودی و بادسنج‌ها از سطح زمین تا نقطه

¹ RED-GREEN-BLUE



شکل ۹. تصاویر ماهواره‌ای MODIS از طوفان‌های گرد و غباری در ۱۷ آوریل ۲۰۲۵ [19]

Fig. 9. MODIS satellite image showing a dust storm on April 17, 2025



شکل ۱۰. تصاویر ماهواره‌ای گرد و غبار در EUMETSAT [21]

Fig. 10. EUMETSAT satellite image showing a large dust plume over eastern Africa and the Middle East [21]

۴-۴-۴ مدل SKIRON

مدل SKIRON یک مدل عددی پیش‌بینی جوی است که توسط دانشگاه آتن (University of Athens) به‌طور ویژه برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی انتقال و انتشار گرد و غبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به ویژه در حوضه مدیترانه، شمال آفریقا و غرب آسیا توسعه یافته است.

۴-۴-۱ ویژگی‌های کلیدی مدل

- محدوده پوشش جغرافیایی: بیشتر برای نواحی شمال آفریقا، غرب آسیا، و دریای مدیترانه استفاده می‌شود؛ یعنی نواحی منبع گرد و غبار و مسیرهای انتقال آن.
- پارامترهای ورودی: شامل شرایط اولیه و مرزی از مدل‌های جهانی (مانند ECMWF یا GFS).
- داده‌های سطحی مانند خاک، رطوبت، باد، و دمای سطح.
- مدل‌سازی فیزیکی گرد و غبار: مدل SKIRON فرآیندهای برخاست گرد و غبار (dust uplift)، انتقال (transport)، ته‌نشینی گرانشی (gravitational settling) و ته‌نشینی با بارش (wet deposition) را لحاظ می‌کند.



شکل ۸. پایلوت مونه برداری از ریزگردها و طوفان‌های گرد و غبار در کشور چین [17]

Fig. 8. Example of a dust monitoring pilot station in China using vertical dust samplers and sensors [17]

شکل (۱۰) نمونه‌ای از این تصاویر را برای منطقه شرق آفریقا و غرب آسیا نشان می‌دهد، رنگ‌های قرمز در مرزهای غرب و جنوب غربی ایران به وضوح توده گرد و غبار را نشان می‌دهند.

۴-۵-۲- الگوریتم محاسبه انتشار PM_{10}

در الگوریتم محاسبه انتشار PM_{10} شار توده عمودی گرد و غبار برابر است با:

$$F = K \frac{\rho}{g} u_* (u_*^2 - u_{*t}^2) \quad (1)$$

که در آن u_* سرعت اصطکاکی، u_{*t} سرعت اصطکاکی حد آستانه مورد نیاز برای شروع انتشار گرد و غبار و ضریب K با واحد ثانیه بر متر که به سطح بافت خاک منتشر کننده گرد و غبار مربوط است، می‌باشند. نمادهای ρ و g نشان دهنده چگالی هوا و شتاب گرانش است. سرعت اصطکاکی در مکان و زمان متفاوت است، زیرا هر دو به شرایط محلی هواشناسی و کلاس زبری سطح بستگی دارد. در حالی که، سرعت حد آستانه و ضریب بافت خاک فقط در مکان متفاوت است و می‌توان آن را به ویژگی‌های کلاس زبری سطحی، خاک و ویژگی‌های کاربری زمین مرتبط ساخت [24].

طبق الگوریتم مذکور هنگامی که سرعت باد از سرعت اصطکاکی محل بالاتر رود، ذرات PM_{10} بلند خواهند شد و سرعت اصطکاکی محل به صورت زیر تعریف می‌شود:

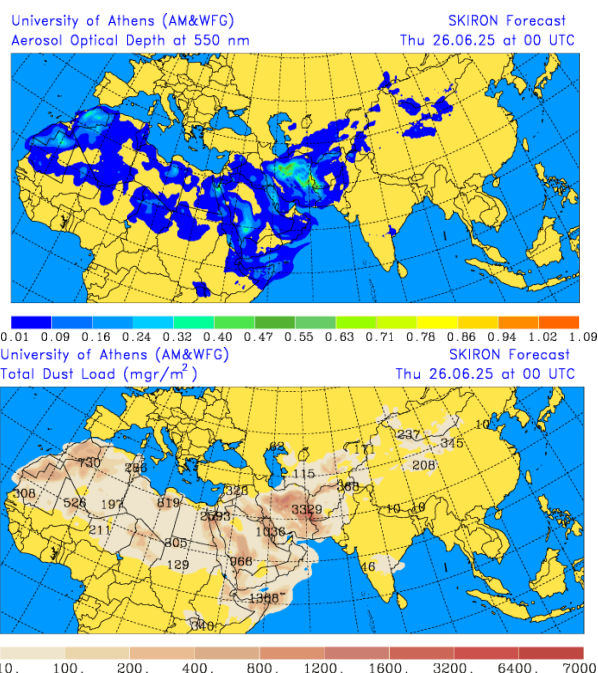
$$U_t = \frac{u_{*t}}{k} \ln \frac{z}{z_{0ns}} \quad (2)$$

که در آن z_{0ns} طول زبری آیرودینامیک خاک برای شرایطی است که خاک دچار فرسایش آبی نشده باشد، z ارتفاع اندازه گیری باد است و k ثابت وون کارمن است که برابر 0.4 فرض می‌شوند [29].

شکل (۱۲) نمونه‌ای از شبیه‌سازی انتشار و پخش توده گرد و غبار در تاریخ ۲۳ ژوئن ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد، منابع انتشار در مناطق مرزی عراق و سوریه واقع شده‌اند و جهت حرکت ریزگردها به سمت جنوب شرقی است.

۴-۵-۳- زیربخش خط سیر مدل

این مدل از رویکرد لاگرانژی استفاده کرده و با در نظر گرفتن توده ذرات به صورت یک بسته هوا قابلیت شبیه‌سازی مسیرهای حرکتی را در دو جهت رو به جلو (Foreword Trajectory) و رو به عقب (Backward Trajectory) دارد. در زیربخش خط سیر، اگر فرض شود که مسیر حرکت ذرات در مسیر باد است، مسیر حرکت با استفاده از انتگرال‌گیری در زمان مشخص t به دست می‌آید، در این حالت موقعیت نهایی ذره با استفاده از سرعت متوسط ذره V در مکان نهایی P و مکان ابتدایی حدسی P' به صورت زیر به دست می‌آید.



شکل ۱۱. نمونه‌ای از مدل SKIRON برای به ترتیب (a) عمق اپتیکی و (b)

بارگذاری گرد و غبار در ۲۶ June سال ۲۰۲۵ [23]

Fig. 11. SKIRON model output: a) Optical depth and b) dust loading on June 26, 2025.

- ریزساختار ذرات: شامل اندازه‌های مختلف ذرات گرد و غبار (fractionated size bins) برای دقت بیشتر در برآورد انتقال و توزیع فضایی آن است [22].

۴-۵-۵- مدل HYSPLIT

۴-۵-۱- معرفی مدل پخش و پراکنش HYSPLIT

مدل HYSPLIT، مدلی دوگانه^۱ برای محاسبات خط سیر حرکت گرد و غبار، پراکندگی و شبیه‌سازی ته‌نشینی آن با استفاده از رویکردهای پف و ذرات است. در این مدل محاسبه مسیر و غلظت آلاینده با استفاده از کمترین پارامترهای هواشناسی انجام می‌گیرد. روش محاسبه مدل، ترکیبی میان دیدگاه‌های لاگرانژی (مجموع غلظت ذرات در هر شبکه در طول مسیر حرکت تعیین می‌شود) و اویلری (غلظت ذرات برای هر شبکه با استفاده از پخش و انتقال ذرات انجام می‌شود) است و به همین دلیل HYSPLIT را مدلی دوگانه می‌نامند [24, 25].

برای استفاده از مدل در شبیه‌سازی گرد و غبار می‌توان از ماژول خط سیر و الگوریتم محاسبه منابع و انتشار PM_{10} توسط HYSPLIT استفاده کرد [26, 27, 28].

¹ Hybrid

$$P'(t+\Delta t) = P(t) + V(P,t) \Delta t \quad (3)$$

$$P(t+\Delta t) = P(t) + 0.5[V(P,t) + V(P',t+\Delta t)] \Delta t \quad (4)$$

خط سیر رو به عقب حرکت توده در ۲۴ می ۲۰۲۵ از شهرهای تهران و اهواز در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در صورت مشخص بودن منبع انتشار استفاده از خط سیر رو به جلو و در غیر این صورت استفاده از خط سیر رو به عقب از شهرهای پذیرنده می‌تواند برای مسیریابی گرد و غبار موفق باشد.

محاسبه خط سیر در مدل به سرعت باد در سه جهت، دما، فشار سطحی و عمق اختلاط برای محاسبات نیاز دارد و مناسب‌تر است داده‌های ورودی مدل به صورت میدان‌های پیوسته وارد شود تا تخمین بهتری از حرکت توده ذرات در جهت‌های افقی و قائم به دست آید [25, 29].

۴-۶- مدل AEMET

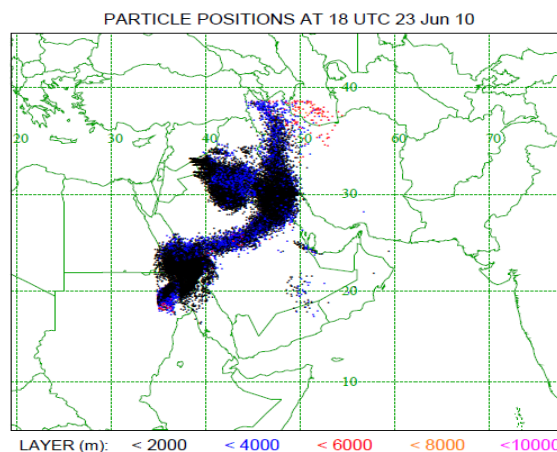
مدل AEMET که توسط سازمان هواشناسی اسپانیا توسعه یافته، یک مدل عددی برای پایش و پیش‌بینی گرد و غبار جوی به‌ویژه از صحرای آفریقا به سمت اروپا است. این مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی، شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های ماهواره‌ای، میزان و مسیر انتقال گرد و غبار را پیش‌بینی می‌کند.

خروجی‌های آن شامل نقشه‌های غلظت گرد و غبار، ارتفاع لایه‌های گرد و غباری و مسیرهای انتقال در بازه‌های زمانی مختلف است. مدل AEMET در ترکیب با دیگر مدل‌های منطقه‌ای مانند BSC-DREAM و SKIRON برای افزایش دقت و پایش بهتر رویدادهای گرد و غباری به‌کار می‌رود [30].

۵- راهکارهای کنترل فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار

مقدار فرسایش بادی و انتشار ریزگردها به سرعت باد و ویژگی‌های زمین‌ساختی مرتبط است بنابراین برای راهکارهای مبارزه با فرسایش بادی دو روش اساسی وجود دارد:

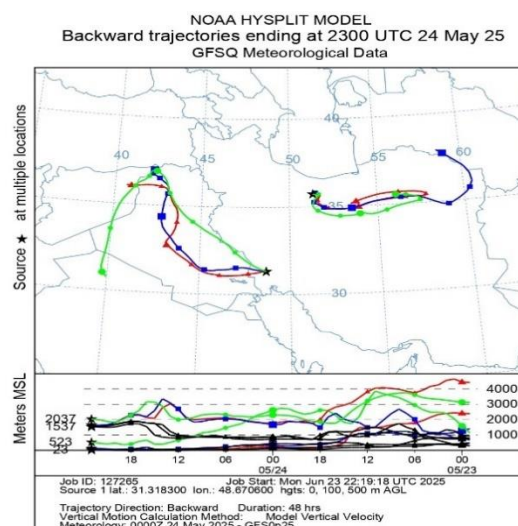
- کاهش سرعت باد در سطح زمین که از سرعت آستانه انتشار کمتر شود.
 - کنترل عوامل زمین‌ساختی مانند رطوبت و یکپارچگی.
- به همین منظور رویکردهای زیر می‌تواند در کنترل فرسایش بادی و انتشار ذرات موثر باشند:



شکل ۱۲. نمونه‌ای از شبیه‌سازی انتشار و پخش توده گرد و غبار در تاریخ ۲۳

ژوئن ۲۰۱۰ [26]

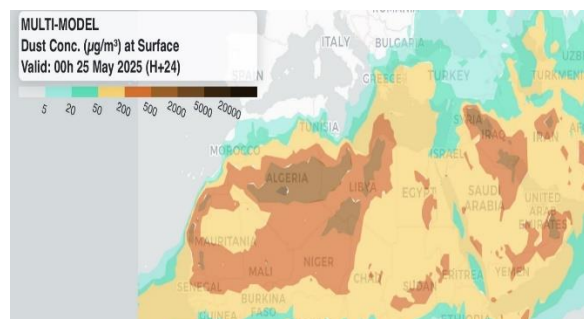
Fig. 12. Simulation of PM₁₀ emission and dispersion using HYSPLIT on June 23, 2010 [26]



شکل ۱۳. شبیه‌سازی خط سیر رو به عقب حرکت توده در تاریخ ۲۴ می ۲۰۲۵

(منبع: نویسنده)

Fig. 13. Backward trajectory simulation of dust movement toward Ahvaz and Tehran on July 24, 2025.



شکل ۱۴. نمونه‌ای از مدل AEMET برای غلظت سطحی گرد و غبار در ۲۵

می ۲۰۲۵ [31]

Fig. 14. AEMET model output showing surface dust concentration forecast for July 25, 2025.

لازم است موارد زیر بررسی شود:

- ۱- تعیین جهت، سرعت و دوره باد
- ۲- مقدار بارندگی و چگونگی توزیع آن
- ۳- مطالعات گیاه‌شناسی و اکولوژیکی منطقه به منظور یافتن گیاهان بومی مناسب
- ۴- بررسی وضعیت سطح آب زیرزمینی
- ۵- اطلاع از خواص ماسه‌های منطقه (با توجه به تفاوت ماسه‌ها در مناطق مختلف)

۴-۵- استقرار پوشش‌های مصنوعی

برای افزایش پایداری سطح خاک علاوه بر پوشش گیاهی می‌توان از پوشش‌های مصنوعی استفاده کرد که این امر در سال‌های اخیر رشد چشمگیری یافته و تحقیقات فراوانی پیرامون آن صورت گرفته است. این پوشش‌ها دارای طیف گسترده‌ای از بعد تهیه مواد و روش کاربرد می‌شوند که به طور نمونه می‌توان به شن‌های درشت و سنگریزه، فیبرهای جاذب، مالچ‌های نفتی، مالچ‌های سرباره صنایع فولاد و کوره‌های بلند، امولسیون‌های رزینی، پلیمرهای جاذب و سوپر جاذب سنتزی اشاره کرد. کلمه مالچ در انگلیسی به معنی پوشش است، این پوشش سطح خاک را از گزند عوامل مختلف چون باد و باران مصون می‌دارد. مالچ‌ها به طور کلی به دو گروه مالچ‌های نفتی و غیر نفتی تقسیم می‌شوند. مالچ‌های غیرنفتی شامل مالچ‌های آلی (کاه و کلش، برگ‌های گیاهان، خاک اره، کودهای حیوانی و ...) و مالچ‌های مصنوعی (پشم شیشه، صفحات فلزی، لایه‌های نازک پلیمری و پلاستیکی و سایر جاذب‌های سنتزی) می‌شوند.

منظور از مالچ‌های نفتی مواد سنگین نفتی حاصل از پالایشگاه‌ها می‌باشد که بعد از جنگ جهانی دوم با توجه به نتایج مثبت آزمایش مالچ‌های نفتی آن‌ها به طور وسیعی در کشورهای تونس، الجزایر، مراکش، لیبی، استرالیا و سایر کشورها برای تثبیت به کار رفتند. مالچ‌های نفتی به دو دسته مالچ‌های تثبیت‌شن و امولسیونه (امولسیون‌های آسفالتی) تقسیم می‌شوند. شکل‌های (۱۶ و ۱۷) نمونه‌هایی از عملیات پاشش مالچ برای مالچ‌های نفتی و پلیمری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. استقرار پوشش گیاهی برای کنترل خاک [29]

Fig. 15. Establishing vegetation cover for wind erosion control.

۱-۵- استفاده صحیح از زمین

استفاده ناصحیح از زمین سبب اصلی فرسایش بادی است بنابراین باید اصل اساسی در کنترل فرسایش بادی را این مورد دانست. نمونه از این امر پیدایش یک کاسه غبار در دشت‌های مرکزی ایالات متحده آمریکا است [29].

۲-۵- حفظ رطوبت خاک

افزایش رطوبت خاک اثر زیادی بر مقاومت خاک در مقابل باد دارد. این رطوبت چسبندگی و وزن ذرات را افزایش داده و سبب می‌شود بادهای شدیدتری برای بلندکردن و حرکت دادن ذرات لازم باشد.

سرعت انتقال ذرات رسی با ۱۰ درصد رطوبت برابر پنج متر بر ثانیه و سرعت انتقال ذرات با بیست درصد رطوبت به دوازده متر بر ثانیه می‌رسد. همچنین افزایش سطح رطوبت سبب ازدیاد محصولات کشاورزی و رشد گیاهان شده که خود عاملی مثبت در کنترل فرسایش است [32].

۳-۵- استقرار پوشش گیاهی

کمبود پوشش گیاهی زمین موجب می‌شود که بادهای شدید، خاک بدون حفاظت را جابه‌جا کنند؛ ازاین‌رو، مؤثرترین و کم‌هزینه‌ترین راهکار برای کاهش فرسایش بادی، پوشاندن سطح زمین با پوشش گیاهی مناسب است. پوشش گیاهی با دو راهکار کاهش سرعت باد در سطح و به هم پیوسته کردن ذرات خاک توسط ریشه حساسیت به فرسایش را کاهش می‌دهد [29]. قبل از اقدام به تثبیت شن‌های روان به وسیله پوشش گیاهی

هنگامی که عمود بر باد غالب باشد موثرتر است. به علت شرایط سخت اکولوژیکی معمولاً استفاده از بادشکن زنده (درختی و بوته‌ای) میسر نیست و در هر منطقه با توجه به امکانات و شرایط محلی باید نسبت به ایجاد بادشکن‌های مصنوعی (سنگی، فلزی و ...) مبادرت ورزید [35, 36].

شکل (۱۸) بادشکن کوتاه و مصنوعی را نشان می‌دهد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بی‌شک مقوله ریزگردها و آثار زیانبار آن یکی از مهمترین معضلات محیط‌زیستی مناطق خشک و بیابانی از جمله کشورمان ایران است. با توجه به همسایگی ایران با مناطق مستعد برای انتشار ریزگردها (عراق، سوریه، اردن، شبه جزیره عربستان و ...)، نیاز به مدیریت صحیح و سریع هم در پیش‌بینی انتشار و حرکت توده‌ها، اطلاع‌رسانی سریع و مدیریت بحران و هم در کنترل انتشار در مبدا (جلوگیری بنیادی از فرسایش بادی و به کارگیری پوشش‌های گیاهی و مصنوعی) بیش از پیش از احساس می‌شود.

پژوهش حاضر در بخش نخست عوامل جغرافیایی و جوی را به منظور ایجاد شرایط مستعد برای شروع انتشار و پراکنش بیان کرده و در بخش دوم آثار زیانبار ریزگردها بر ایران مورد بررسی قرار گرفته‌است. طبق آمارهای سازمان بهداشت جهانی چهار شهر غرب ایران (اهواز، سنندج، کرمانشاه و یاسوج) در میان شهرهای بسیار آلوده جهان از منظر کیفیت هوا با شاخص ذرات معلق هستند که این خود نشان‌دهنده وضعیت بسیار بحرانی کشور است.

بخش سوم به ابزارهای مدیریتی کیفیت هوا در رویدادهای گرد و غباری اشاره داشته‌است. از جمله این ابزارها می‌توان به روش‌های پایش زمینی و فیزیکی گرد و غبار (شامل ایستگاه‌های تخصصی پایش ریزگردها و سنسورهای آلاینده‌های ذرات شهری) اشاره شد، همچنین می‌توان با به کاربردن تصاویر ماهواره‌ای (در تحقیق حاضر تصاویر MODIS، EUMETSAT) از مسیرهای حرکتی ریزگردها مطلع شد.

استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز انتشار و پخش و پراکنش گرد و غبار (در تحقیق حاضر مدل‌های HYSPLIT و SKIRON و AEMET) نیز راهکاری مناسب برای پیش‌بینی انتشار و چگونگی حرکت ریزگردها برای مدیریت بحران و انجام اقدامات پاسخ سریع می‌باشد. همچنین تحلیل منابع انتشار با استفاده از مدل‌سازی



شکل ۱۶. استقرار پوشش‌های مصنوعی از نوع مالچ نفتی برای کنترل فرسایش بادی [33]

Fig. 16. Use of oil-based mulch for creating artificial protective cover



شکل ۱۷. استقرار پوشش‌های مصنوعی از نوع مالچ پلیمری برای کنترل فرسایش بادی [33]

Fig. 17. Use of polymer-based mulch as an artificial cover for wind erosion control.



شکل ۱۸. نمونه‌ای از بادشکن‌های مصنوعی [17]

Fig. 18. Example of an artificial windbreak barrier [17]

۵-۵- ایجاد موانع در مسیر باد (بادشکن)

میزان فرسایش و انتشار در یک زمین وسیع به تدریج تشدید می‌شود بنابراین برای کاهش آن باید طول زمین را با ایجاد موانعی کوتاه کرد و هرچه ارتفاع موانع مذکور بیشتر باشد طول منطقه حفاظت شده آن بیشتر است [34]. یک مانع در حمایت از زمین

امنیت زیست محیطی کشور دست یافت.

قدردانی نویسندگان

مؤلفان از آزمایشگاه سنجش از دور دانشگاه تربیت مدرس در تهران، ایران، برای کمک مؤثر در ارائه پایگاه داده این مطالعه تشکر می کنند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافع ندارند.

نقش نویسندگان

علیرضا اصلمند ۴۰٪ و فائزه برهانی ۶۰٪ در فرایند انجام این پژوهش نقش داشته اند.

منابع مالی

در انجام این پژوهش از منابع مالی هیچ نهاد یا شخص دیگری استفاده نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

به منظور شناسایی کانون های مولد گرد و غبار می تواند با مشخص کردن این کانون ها، کمک شایانی به توسعه پایدار کشاورزی و جلوگیری از فرسایش بادی در مناطق مستعد کند.

بخش پایانی به روش های کنترل فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار اختصاص یافت که به نوعی راه کار اصلی و بنیادی برای جلوگیری از معضل ریزگردها می باشد. منابع انتشار اصلی ریزگردهای مؤثر بر ایران دارای دو ویژگی است، اولاً "بیشتر آنها در خارج از مرزهای کشور بوده و دوم دارای وسعت بسیار زیاد است. به علت ویژگی های ذکر شده، انجام پروژه های بیابان زدایی، جلوگیری از فرسایش بادی و احیای خاک نیازمند به زمان، هزینه بسیار زیاد و رایزنی ها و همکاری های گسترده در ابعاد منطقه ای و جهانی می باشد و از این رو تلفیقی از ابزارهای مدیریت بحران و کنترل از مبدا برای تعدیل آثار منفی گرد و غبار لازم به نظر می رسد.

ریزگردها پدیده ای چندبعدی و فرامرزی اند که مقابله با آن تنها با مدیریت جامع، هماهنگی بین سازمانی، همکاری منطقه ای و مشارکت جوامع محلی امکان پذیر است. در صورت اجرای سیاست های اصولی و پایدار، می توان ضمن کاهش پیامدهای این پدیده، به احیای زیست بوم ها، ارتقای سلامت عمومی و افزایش

Berlin: Springer.

References

- [1] Friedlander, S.K., 2000. *Smoke, dust, and haze: Fundamentals of aerosol dynamics*. 2nd ed. New York: Oxford University Press.
- [2] Mousavi, S.M., Mobarghaee Dinan, N., Ansarifard, S., Darvishi, G., Borhani, F. and Naghibi, A., 2024. Assessing the impact of global carbon dioxide changes on atmospheric fluctuations in Iran through satellite data analysis. *Journal of Water and Climate Change*, 15(6), pp.2774-2791.
- [3] Prospero, J., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.N. and Gill, T., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), pp.1-31. doi: 10.1029/2000RG000095.
- [4] Engelstaedter, S., Tegen, I. and Washington, R., 2006. North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), pp.73-100.
- [5] Xuan, J., Sokolik, I.N., Hao, J., Guo, F., Mao, H. and Yang, G., 2004. Identification and characterization of sources of atmospheric mineral dust in East Asia. *Atmospheric Environment*, 38(38), pp.6239-6252.
- [6] Wang, S., Yuan, Y. and Shang, K., 2006. The impacts of different kinds of dust events on PM₁₀ pollution in northern China. *Atmospheric Environment*, 40(40), pp.75-79.
- [7] Shao, Y., 2008. *Physics and modeling of wind erosion*. Berlin: Springer.
- [8] Lee, Y.C., Yang, X. and Wenig, M., 2010. Transport of dusts from East Asian and non-East Asian sources to Hong Kong during dust storm related events 1996-2007. *Atmospheric Environment*, 44(29), pp.3728-3738.
- [9] Department of Environment of Iran, n.d. *Department of Environment of Iran data*. (In Persian).
- [10] 10] AEMET, n.d. *Model plots: Daily dust products*. WMO Barcelona Dust Regional Center.
- [11] Borhani, F., Shafiepour Motlagh, M., Ehsani, A.H. and Rashidi, Y., 2022. Evaluation of short-lived atmospheric fine particles in Tehran, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(16), p.1398.
- [12] Borhani, F., Mirmohammadi, M. and Aslemand, A., 2017. Experimental study of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) concentrations in the air pollution of Tehran, Iran. *Journal of Research in Environmental Health*, 3(2), pp.105-115.
- [13] Cheraghi, A. and Borhani, F., 2016. Assessing the effects of air pollution on four methods of pavement by using four methods of multi-criteria decision in Iran. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(1), pp.59-71.
- [14] Cheraghi, A. and Borhani, F., 2016. Evaluation of environmental and sustainable development of four pavements in Iran by four method of multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(2),

- pp.51-62.
- [15] Darvishi Boloorani, A., Nasiri, N., Soleimani, M., Papi, R., Neysani Samany, N., Amiri, F. and Al-Hemoud, A., 2024. Climate change, dust storms, and air pollution in the MENA region. In: Al-Quraishi, A., Negm, A. and Benzougagh, B. (eds.) *Climate change and environmental degradation in the MENA region*. Vol. 136. Cham: Springer, pp.327-343. doi: [10.1007/978-2024-1144](https://doi.org/10.1007/978-2024-1144).
- [16] World Health Organization, n.d. *Outdoor air pollution databases*. Available at: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/database/en/ (Accessed: 23 August 2026).
- [17] Khosroshahi, M., 2012. *Report on the visit of Dr. Mohammad Khosroshahi (Faculty Member of the Research Institute of Forests and Rangelands) as part of an educational-research workshop to desert regions of China*. Available at: <http://khosromk.blogfa.com/post/436> (Accessed: 23 August 2026). (In Persian).
- [18] MODIS, 2010. *MODIS satellite description*. Available at: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/> (Accessed: 23 August 2026).
- [19] MODIS, 2025. *MODIS satellite images – Dust storm, 17 April 2025*. Available at: https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2025-04-17 (Accessed: 23 August 2026).
- [20] EUMETSAT, n.d. *Product generation description for RGB dust*. Available at: http://oiswww.eumetsat.int/~ids/html/product_description.html (Accessed: 23 August 2026).
- [21] EUMETSAT, 2021. *Major dust outbreaks in Africa, Middle East and China*. Available at: <https://user.eumetsat.int/resources/case-studies/major-dust-outbreaks-africa-middle-east-and-china> (Accessed: 23 August 2026).
- [22] SKIRON, n.d. *SKIRON model description*. Available at: <https://forecast.uoa.gr/en/group> (Accessed: 23 August 2026).
- [23] SKIRON, 2025. *SKIRON dust forecast plots: Mediterranean – Europe, North Atlantic*. Available at: <https://forecast.uoa.gr/en/group> (Accessed: 23 August 2026).
- [24] Marticorena, B., Bergametti, G., Gillette, D. and Belnap, J., 1997. Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D19), pp.23277-23287.
- [25] Draxler, R.R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A. and Taylor, A., 2009. *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories (HYSPLIT) user's guide*. NOAA Technical Memorandum ERL-ARL.
- [26] Aslemand, A., 2012. *Simulation of dust storm trajectories over Iran*. Master's thesis, Faculty of Environment, University of Tehran. (In Persian).
- [27] Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemand, A. and Ghader, S., 2014. Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), p.9. doi: [10.1186/2052-336X-12-9](https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-9).
- [28] Aslemand, A., Anvari, M. and Yarizadeh, B., 2014. Simulation of atmospheric conditions and trajectories for dust storms in the Middle East. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2(4), pp.150-154.
- [29] Draxler, R.R., Gillette, D.A., Kirkpatrick, S. and Heller, J., 2001. Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. *Atmospheric Environment*, 35(26), pp.4315-4330.
- [30] AEMET, n.d. *AEMET model description*. Available at: <https://dust.aemet.es/products/overview/user-guide/@@download> (Accessed: 23 August 2026).
- [31] Borhani, F., Pourezat, A.A. and Ehsani, A.H., 2024. Spatial distribution of particulate matter in Iran from internal factors to the role of western adjacent countries from political governance to environmental governance. *Earth Systems and Environment*, 8(1), pp.135-164.
- [32] Bisal, F. and Nielsen, K.F., 1966. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Science*, 102(2), pp.143-146.
- [33] So Cal Sandbags Inc., 2010. *Hydroseed mulch polymer*. Available at: <http://www.socalsandbags.com/Hydroseed%20Mulch%20Polymer.htm> (Accessed: 23 August 2026).
- [34] Rafahi, H., 1999. *Wind erosion and its control*. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- [35] Gu, Z., He, Y., Zhang, Y., Su, J., Zhang, R., Yu, C.W. and Zhang, D., 2021. An overview of triggering mechanisms and characteristics of local strong sandstorms in China and haboobs. *Atmosphere*, 12(6), p.752.
- [36] Li, J., Sun, Z., Lenschow, D.H., Zhou, M., Dou, Y., Cheng, Z., Wang, Y. and Li, Q., 2020. A foehn-induced haze front in Beijing: observations and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(24), pp.15793-15809.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Aslemand, A. and Borhani, F., 2026. Haze Storms in Iran: Analyzing Challenges and Providing Management Solutions. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.7-20.



Blocks on the tunnel structure and their effect on flow energy dissipation in a type B rectangular piano key weir (PKW)

Wadi Mohammed Wadi¹, Ali Khoshfetrat^{1*} , Musa Habib Jasim², Niloofar Salemi¹

1. Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Karbala, Karbala, Iraq.

Abstract

Piano key weirs (PKWs) are a type of non-linear, long-crested weir characterized by their plan forms, which can be rectangular, triangular, or trapezoidal. They are categorized into four main types based on their overhang configuration: Type A features overhangs on both the upstream and downstream sides; Type B has only an upstream overhang; Type C has only a downstream overhang; and Type D has no overhangs at all. A key advantage of PKWs is their ability to significantly increase discharge capacity—typically by three to four times—within the same channel width compared to traditional weirs. First implemented at the Goulours dam in France, their efficient design requires a lighter foundation, making them suitable for a wide range of applications beyond dams, including agricultural, drainage, and irrigation canals. As an evolved and highly efficient form of nonlinear weir, PKWs warrant investigation into their flow energy dissipation and methods for its enhancement. This study introduces, for the first time, the use of blocks with varying geometries—specifically rectangular, trapezoidal, and circular shapes—placed within the outlet keys of a rectangular Type B PKW. The experimental setup involved three weir models with heights of 0.20 m, 0.18 m, and 0.15 m, tested under four different flow rates ranging from 0.02 to 0.05 m³/s. The research was conducted in a level (zero-slope), rectangular flume measuring 10 m in length, 0.8 m in width, and 1 m in height. Water, with a temperature varying between 8°C and 13°C, was circulated by a pump from a 10 m³ underground reservoir, with the flow rate regulated by a monitor. The study employed three rectangular Type B PKWs with identical geometries but differing heights of 0.15 m, 0.18 m, and 0.20 m. The consistent parameters for all weirs were an inlet and outlet key width (W_i and W_o) of 0.145 m, a sidewall length (B^*) of 0.40 m, an upstream overhang (B_i) of 0.13 m, a total crest length (L) of 3.27 m, and a wall thickness (T_s) of 0.01 m. A tunnel structure was positioned at the outlet keys of the 0.20 m high weir. In this tunnel, blocks with a height of 0.06 m, featuring rectangular, circular, and trapezoidal cross-sections, were arranged in a zigzag pattern. The cross-sectional area of each block was 0.025 x 0.025 m. Fabricated from compressed plastic the blocks were affixed downstream of the weir using a waterproof adhesive. Investigating energy dissipation in PKWs is crucial due to their high hydraulic efficiency. To ensure the applicability of the findings, dimensional analysis was employed, allowing the results to be scaled and extended to other weir sizes and PKW types used in channel applications. The results indicate a clear relationship between weir height and hydraulic performance. Compared to the shortest weir, an increase in height led to an 11.2% reduction in the discharge coefficient and an 18.8% increase in flow energy loss (energy dissipation). On average, the blocks installed in the outlet keys functioned as a flow barrier, increasing energy dissipation by 2.3%. Furthermore, the study found that flow energy loss decreases as the dimensionless ratio H_u/P and L/P increase. The tunnel structure causes more flow energy loss, and the highest flow energy loss was observed in the weir with rectangular, trapezoidal, and circular blocks, respectively.

Review History

Received: Sep 24, 2025
Revised: Oct 27, 2025
Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Piano key weir
Weir height
Relative energy
Outlet keys
Type B

* Corresponding Author Email: ali.khoshfetrat@iau.ac.ir - ORCID: 0000-0002-011-35287



بلوک‌های موجود روی سازه‌ی تونلی و تأثیر آن‌ها بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B

وادی محمودادی^۱، علی خوش فطرت^{۱*} , موسی حبیب‌جاسم^۲، نیلوفر سالمی^۱

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کربلا، کربلا، عراق.

چکیده

تاریخچه داوری

سرریزهای کلیدپیانویی، به عنوان نوعی سرریز کنگره‌ای تکامل یافته و به صورت غیرخطی، به دلیل بازدهی بالای عبور جریان، مورد توجه هستند. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی میزان اتلاف انرژی و راهکارهای افزایش آن با استفاده از بلوک‌هایی با اشکال هندسی متفاوت است که روی سازه تونلی نصب شده در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۱ متر انجام شد. سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد. سه ارتفاع مختلف سرریز (۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متر) و سه شکل بلوک (مستطیلی، دایره‌ای و دوزنقه‌ای) مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که بیشترین اتلاف انرژی به ترتیب مربوط به بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای است. با افزایش ۱/۱۱ و ۱/۳۳ برابری ارتفاع سرریز نسبت به کمترین ارتفاع، اتلاف انرژی به میزان ۶/۸ و ۱۸/۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی کاهش پیدا می‌کند. مقایسه نتایج نشان داد که وجود سازه تونلی در مقایسه با حالت بدون آن، منجر به اتلاف انرژی بسیار بیشتری می‌شود. در پایان، از تحلیل ابعادی برای محاسبه اتلاف انرژی در سرریزهای با و بدون بلوک استفاده شد.

کلمات کلیدی

سرریز کلیدپیانویی

ارتفاع سرریز

انرژی نسبی جریان

کلیدهای خروجی

نوع B

۱- مقدمه

تاج طویل قرار می‌گیرند که ویژگی بارز آن‌ها، توانایی عبور دادن دبی جریان به مراتب بیشتر (حدود سه تا چهار برابر) در مقایسه با سرریزهای خطی با عرضی مشابه است [2]. اولین نمونه از این سرریزها روی کانال جانبی سد گولورز (Goulours) در فرانسه احداث شد [3]. از مزایای مهم این سازه‌ها، نیاز به پی و فونداسیون سبک وزن است که امکان کاربرد آن‌ها را علاوه بر سدها، در شبکه‌های آبیاری، کانال‌های زهکشی و انتقال آب کشاورزی نیز فراهم می‌کند [4]. با توجه به کارایی بالای این سرریزها در انتقال جریان، مطالعه میزان اتلاف انرژی و ارائه راهکارهایی به منظور

سرریزهای کلیدپیانویی بر اساس طرح کلی (پلان) به سه دسته مستطیلی، مثلثی و دوزنقه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. این سرریزها در چهار گروه اصلی A، B، C و D معرفی شده‌اند. ویژگی‌های این تیپ‌ها به این شرح است: نوع A در هر دو سمت بالادست و پایین دست دارای لبه آویزان است. نوع B تنها در سمت بالادست دارای این لبه است، در حالی که نوع C لبه آویزان را فقط در سمت پایین دست دارد. سرریز نوع D نیز فاقد هر گونه لبه آویزان در هر دو طرف است [1]. این سرریزها در دسته سرریزهای غیرخطی با

* رایانامه نویسنده مسئول: ali.khoshfetrat@iaui.ac.ir - ORCID: 0000-0002-011-35287

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



افزایش این تلفات، از اهمیت مهندسی بالایی برخوردار است. در این راستا، پژوهش‌های مختلفی انجام شده که برخی روی پارامترهای هیدرولیکی مانند سرعت و دبی جریان متمرکز بوده‌اند و برخی دیگر اثر عوامل هندسی یا استفاده از سازه‌های الحاقی را روی اتلاف انرژی مورد بررسی قرار داده‌اند. پژوهش‌های اولیه در زمینه پارامترهای هیدرولیکی و اثر آن‌ها بر تلفات انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی توسط محققانی از جمله خان و همکاران، پیستر و همکاران، پیتو و همکاران و ترابی و همکاران انجام شد [5-8]. الشکور و الخفاجی (۲۰۱۸) به مطالعه تأثیر زوایای متفاوت کلیدهای خروجی در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B بر میزان اتلاف انرژی پرداختند [9]. کریمی و همکاران علاوه بر بررسی اتلاف انرژی، افزایش کارایی هوادهی در این سرریزها را نیز مورد تحلیل قرار دادند [10]. در ادامه، کریمی و همکاران در پژوهشی ترکیبی (تجربی-عددی)، ویژگی‌های جریان روی سرریز کلیدپیانویی با کلیدهای دارای زاویه را بررسی کردند [11]. اسلینگر و کروکستون نیز در یک مطالعه آزمایشگاهی، اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی نوع A را ارزیابی نموده و دو رابطه تجربی مبتنی بر نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی و نیز نسبت هد کل به ارتفاع سرریز ارائه دادند [12]. در یک مطالعه آزمایشگاهی، سینگ و کومار میزان اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی را مورد تحلیل قرار دادند [13]. همچنین، سینگ و کومار به همراه بنصل و همکارانش در پژوهش‌های مستقل دیگری، به ارزیابی اتلاف انرژی و راهکارهای افزایش آن در این نوع سرریزها پرداختند. آن‌ها اثر نسبت عرض کلیدهای ورودی به کلیدهای خروجی را در سرریزهای نوع A بر روی اتلاف انرژی بررسی کرده و دو رابطه تجربی با ضرایب همبستگی قابل توجه ارائه نمودند [14، 15]. از سوی دیگر، شن و اورتل در تحقیقات خود در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳، تأثیر هندسه متفاوت تاج سرریز و نیز تغییر ابعاد کلیدها را روی اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی با طرح دوزنقه‌ای و مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند [16، 17]. بر اساس مطالعه رضیوی و همکاران (۲۰۲۴)، مقایسه بین سرریزهای کلیدپیانویی تیپ B و C نشان داد که نوع C اتلاف انرژی بیشتری ایجاد می‌کند. این برتری ناشی از وجود لبه آویزان در قسمت پایین دست سرریز نوع C عنوان شده است [18]. فتحی و همکاران با احداث پله در کلیدهای خروجی سرریز به این نتیجه

رسیدند که مدل دارای ده پله، در مقایسه با مدل‌های فاقد پله، پنج پله و پانزده پله، منجر به بیشترین میزان اتلاف انرژی می‌شود [19، 20]. در پژوهش عبدی چوپلو و همکاران (۲۰۲۴)، استفاده از بافل در کلیدهای سرریزهای مستطیلی و دوزنقه‌ای نوع A منجر به افزایش قابل ملاحظه اتلاف انرژی در قیاس با حالت بدون بافل شد [21]. میرخورلی و همکاران با بررسی سرریزهای نوع D مشخص کردند که بیشترین اتلاف انرژی زمانی حاصل می‌شود که نسبت عرض کلیدهای ورودی به خروجی (W_i/W_o) برابر $0/6$ بوده و سه پله در کلیدهای خروجی وجود داشته باشد [22]. فتحی و همکاران (۲۰۲۵) در تحقیق روی سرریز دوزنقه‌ای نوع B دریافتند که افزایش تراکم پوشش گیاهی صلب در پایین دست سرریز، باعث افزایش تلفات انرژی می‌شود. در این مطالعه آثار فاصله‌گذاری طولی و عرضی این پوشش‌های گیاهی بر میزان اتلاف انرژی نیز تحلیل شد [23]. وادی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از هندسه متفاوت بلوک‌ها در کلیدهای خروجی سرریزهای کلیدپیانویی نوع C دریافتند که بلوک‌های مستطیلی نسبت به بلوک‌های دوزنقه‌ای و دایره‌ای بهترین عملکرد را در افزایش اتلاف انرژی نشان دادند [24].

چنان که پیش‌تر اشاره شد، سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان نمونه‌های پیشرفته‌ی سرریزهای غیرخطی، از بازدهی بالایی برخوردارند. بنابراین، مطالعه سازوکار اتلاف انرژی و ارائه راهکارهایی به منظور بهبود آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر برای نخستین بار به کارگیری سازه تونلی و بلوک‌هایی با اشکال هندسی گوناگون (مستطیل، دوزنقه و دایره) را روی آن و واقع در کلیدهای خروجی یک سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B مورد بررسی قرار می‌دهد. این مطالعه با سه ارتفاع سرریز (۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متر) و در محدوده دبی ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه انجام شده است. از جمله مفروضات اصلی این تحقیق می‌توان به دائمی بودن جریان و ثابت بودن ضریب تصحیح انرژی جنبشی اشاره کرد. از سوی دیگر، حضور آشغال و رسوبات در جریان‌های سیلابی و اثر آن بر انسداد ورودی سازه تونلی، از محدودیت‌های این پژوهش محسوب شده که نیاز مانیتورینگ سازه‌ها را در بر دارد و لازم است در مطالعات آتی به‌طور مجزا تحلیل شود. در نهایت، از تحلیل ابعادی برای ارائه یک رابطه با ضریب همبستگی بالا برای محاسبه اتلاف انرژی

جریان استفاده شد.

۲- آنالیز ابعادی

شکل (۱) همراه با رابطه (۱)، متغیرهای مؤثر در محاسبه اتلاف انرژی را در شرایطی که یک سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B به همراه بلوک موجود روی سازه تونلی در کلیدهای خروجی آن قرار دارد، نمایش می‌دهند. در این رابطه، E_L اتلاف انرژی جریان، H_u هد کل جریان در بالادست سرریز، P ارتفاع سرریز، V_1 سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز، μ لزجت دینامیکی، σ ضریب کشش سطحی، ρ چگالی جریان هستند. اتلاف انرژی جریان نیز از رابطه $(E_L = (E_1 - E_2)/E_1)$ به دست می‌آید [25]. با توجه به شکل (۱) و رابطه اتلاف انرژی جریان، E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، V_2 سرعت متوسط جریان در پایین‌دست سرریز، h عمق جریان در بالادست سرریز، y عمق جریان در پایین‌دست سرریز و g نیروی گرانش هستند. انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز از رابطه $(E_1 = P + h + (V_1^2/2g) = P + H_u)$ و انرژی مخصوص جریان در پایین‌دست سرریز از رابطه $(E_2 = y + V_2^2/2g)$ محاسبه می‌شود. در رابطه (۱)، پارامتر Type نشانگر هندسه و چیدمان متفاوت بلوک‌ها (مستطیلی، دوزنقه‌ای با دایره‌ای) و وجود و عدم وجود سازه‌ی تونلی است. به دلیل وجود نیروی گرانش در پارامتر اتلاف انرژی جریان و هد کل جریان؛ پس از حضور مستقیم آن در آنالیز ابعادی صرف نظر شده است [19].

$$E_L = f(H_u, P, V_1, \mu, \sigma, \rho, \text{Type}) \quad (1)$$

با استفاده از تئوری π باکینگهام و در نظر گرفتن سه پارامتر تکراری هد کل جریان، سرعت متوسط در بالادست سرریز و چگالی جریان، می‌توان نتیجه گرفت که اتلاف انرژی در یک

سرریز کلیدپیانویی مجهز به بلوک روی سازه‌ی تونلی، مطابق با رابطه (۲) مدل‌سازی می‌شود. در این رابطه Re عدد رینولدز جریان است که از رابطه $(V_1 \rho H_u / \mu)$ و We عدد وبر است که از رابطه $(V_1^2 \rho H_u / \sigma)$ محاسبه می‌شوند.

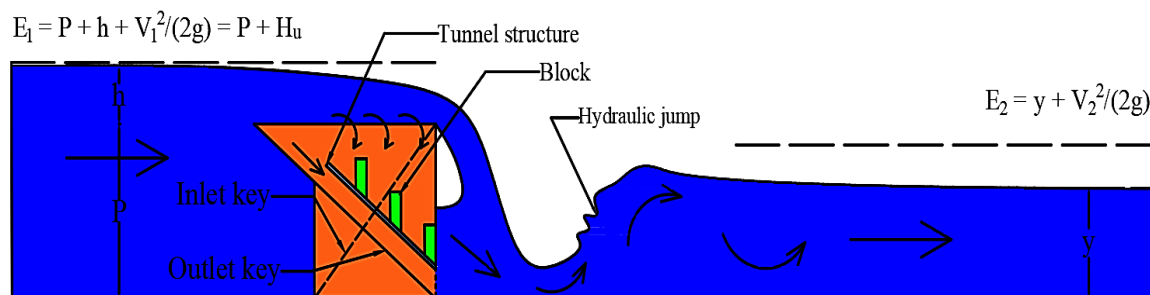
$$E_L = f\left(\frac{H_u}{P}, We, Re, \text{Type}\right) \quad (2)$$

با توجه به اغتشاش شدید جریان و مقادیر عدد رینولدز بالاتر از ۲۰۰۰ در این مطالعه، اثر این پارامتر و همچنین به دلیل عمق قابل توجه جریان در بالادست سرریز (بیش از ۰/۳ متر)، اثر عدد وبر در تحلیل‌ها نادیده گرفته شد [4]. بنابراین، اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B همراه با بلوک و سازه تونلی در کلیدهای خروجی آن تابع رابطه (۳) خواهد شد.

$$E_L = f\left(\frac{H_u}{P}, \text{Type}\right) \quad (3)$$

۳- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال با ابعاد ۱۰ متر طول، ۰/۸ متر عرض و ۱ متر ارتفاع انجام گرفت. شیب این کانال در حالت صفر قرار داشت. دامنه دمای آب مورد استفاده نیز بین ۸ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد در نوسان بود. جریان آب به کمک یک پمپ و یک مخزن زیرزمینی با حجم ۱۰ متر مکعب تأمین و سپس توسط یک مانیتور به داخل مخزن هدایت می‌شد. میزان خطای پمپ ۰/۰۱ درصد گزارش شده است. پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در فواصل ۳/۵، ۴/۰ و ۴/۵ متری از ابتدای کانال بر یکدیگر منطبق بودند و بر همین مبنا، سرریز در فاصله ۵/۵ متری از ابتدای کانال نصب شد [26]. در این آزمایش‌ها از چهار دبی متفاوت استفاده شد. مقادیر دبی توسط دستگاه PLC و از طریق مانیتور قابل تنظیم هستند.



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر اتلاف انرژی جریان در سرریز کلیدپیانویی همراه با بلوک و سازه تونلی

Fig. 1. Parameters affecting flow energy loss in a piano key weir with a block and tunnel structure

از ۰/۰۳ متر بود تا امکان صرف نظر کردن از اثر ضریب کشش سطحی فراهم شود [4]. همچنین عمق جریان با یک عمق سنج نقطه‌ای دارای خطای ۰/۱ میلی متر نیز سنجیده شد. مقادیر عمق جریان اندازه‌گیری شده توسط سنسورها و عمق سنج نقطه‌ای، با اختلافی بسیار ناچیز با یکدیگر برابر بودند. جریان در پایین دست سرریز به صورت آزاد و بدون نیاز به دریچه انتهایی کانال، به داخل مخزن بازمی‌گشت. شکل (۲-الف) نمایانگر کانال آزمایشگاهی، شکل (۲-ب) مربوط به دستگاه PLC و شکل (۲-ج) نشان‌دهنده سنسورهای آلتراسونیک است.

از سه سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B با هندسه ثابت اما ارتفاع‌های متفاوت ۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متر استفاده شد. عرض کلیدهای ورودی سرریزها (W_i) ۰/۱۴۵ متر، عرض کلیدهای خروجی سرریزها (W_o) ۰/۱۴۵ متر، طول دیوارهای جانبی سرریزها (B^*) ۰/۴۰ متر، طول لبه‌های آویزان بالادست سرریزها (B_i) ۰/۱۳ متر، طول تاج سرریزها (L) ۳/۲۷ متر و ضخامت سرریزها (T_s) ۰/۰۱ متر هستند (شکل ۳). سرریزهای مورد استفاده به سه کلید خروجی، دو کلید ورودی و دو نیم‌کلید ورودی مجهز هستند.

از بلوک‌هایی با مقطع مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای با ارتفاع ۰/۰۶ متر ($0.3P$) در روی سازه‌های تونلی موجود در کلیدهای خروجی سرریز دارای ارتفاع ۰/۲۰ متر استفاده شد. سطح مقطع بلوک‌ها ۰/۰۲۵ در ۰/۰۲۵ متر است. شکل (۴) هندسه بلوک‌های استفاده شده در مطالعه حاضر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. ارتفاع بلوک‌ها به شکلی انتخاب شد که در کمترین دبی جریان (0.02 متر مکعب بر ثانیه) مستغرق هستند. جنس بلوک‌ها پلاستیک فشرده است و با چسب ضدآب در روی سازه تونلی نصب شدند. بلوک‌ها به صورت زیگزاک و پنج‌تایی روی سازه تونلی سرریز نصب شدند. مطابق شکل (۵-الف)، بلوک‌های مستطیلی، شکل (۵-ب)، بلوک‌های دوزنقه‌ای و شکل (۵-ج) بلوک‌های دایره‌ای روی سازه تونلی در کلیدهای خروجی سرریز را نشان می‌دهد.

با تنظیم دبی جریان از طریق دستگاه PLC و با در اختیار داشتن عمق جریان در بالادست سرریز و همچنین با توجه به عرض ثابت کانال، می‌توان سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز را از رابطه ($Q = V_i \cdot W \cdot h$) محاسبه کرد. در این رابطه Q



a)

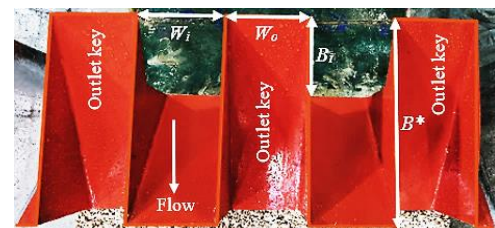


b)

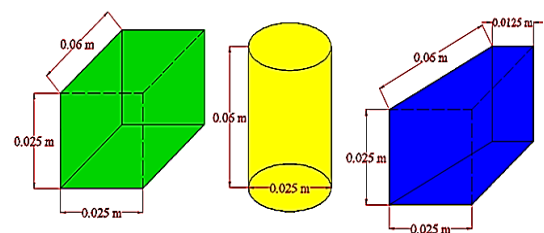


c)

شکل ۲. الف) کانال آزمایشگاهی،
ب) دستگاه PLC و ج) سنسورهای آلتراسونیک
Fig. 2. a) Laboratory channel,
b) PLC device and c) Ultrasonic sensors



شکل ۳. سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B مورد استفاده در تحقیق حاضر
Fig. 3. Type B rectangular piano key weir used in the present study



شکل ۴. هندسه متفاوت بلوک‌ها

Fig. 4. Different block geometries

مقادیر دبی در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه تغییر کردند. برای اندازه‌گیری عمق جریان از سه سنسور آلتراسونیک (فراصوت) استفاده شد. سنسور اول در فاصله ۲P بالادست سرریز نسبت به مرکز آن و سنسور دوم در فاصله ۸P پایین دست سرریز نسبت به مرکز آن، عمق جریان را ثبت می‌نمایند [14]. سنسور سوم نیز مسئولیت اندازه‌گیری عمق جریان روی تاج سرریز را بر عهده داشت. در کلیه آزمایش‌ها، عمق جریان روی تاج سرریز بیش

پایین‌دست سرریز، امکان محاسبه سرعت متوسط جریان در پایین‌دست سرریز نیز فراهم می‌شود [27, 28]. جدول (۱) پارامترهای هیدرولیکی و اتلاف انرژی جریان در سرریز همراه با بلوک روی سازه تونلی را نشان می‌دهد که در آن C_d ضریب آبگذری، E_r انرژی نسبی جریان، N سرریزهای بدون سازه تونلی، TN سرریز با سازه تونلی، NR سرریز با بلوک مستطیلی، NT سرریز با بلوک دوزنقه‌ای و NC سرریز با بلوک دایره‌ای هستند. ضریب آبگذری از رابطه عمومی سرریزها و انرژی نسبی جریان از تقسیم انرژی مخصوص در پایین‌دست سرریز به انرژی مخصوص جریان در بالادست سرریز محاسبه می‌شود [19]. همان‌طور که نتایج جدول نشان می‌دهد، در نهایت تعداد ۲۸ آزمایش برای بررسی اتلاف انرژی جریان تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف مورد استفاده قرار گرفت. فتحی و همکاران نیز تعداد ۱۶ آزمایش را به منظور مطالعه اتلاف انرژی جریان روی یک سرریز کلیدیپانوی دوزنقه‌ای نوع A با ارتفاع ثابت ۰/۲۰ متر انجام دادند [19]. بلوک‌ها و سازه‌ی تونلی به شکلی در کلیدهای خروجی سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متری نصب شدند که تأثیری بر ضریب آبگذری ندارند.

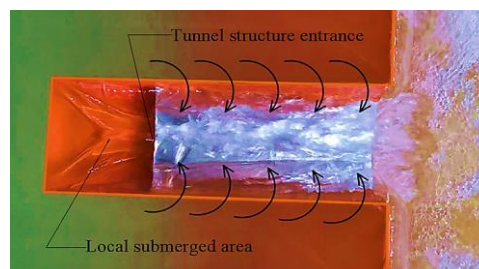
۴- نتایج و بحث

جریان به شکل جت آزاد از روی کلیدهای ورودی سرریز شده و به سمت پایین‌دست و داخل کلیدهای خروجی جاری می‌شود. این جریان به صورت یک جت مایل نیز از کلیدهای خروجی به طرف پایین‌دست انتقال می‌یابد. در انتهای کلیدهای ورودی، به دلیل عدم وجود لبه آویزان در سمت پایین‌دست سرریز، آب در نزدیکی پنجه سرریز به پایین می‌ریزد. در سمت بالادست سرریز و مجاور کلیدهای خروجی، جریان همگرا شده و یک ناحیه غوطه‌وری (استغراق) موضعی در ابتدای این کلیدها به وجود می‌آورد (شکل ۶). با افزایش دبی، این ناحیه استغراق هم از نظر طول و هم از نظر ارتفاع گسترش می‌یابد. علاوه‌براین، ریزش جریان از کلیدهای ورودی به درون کلیدهای خروجی، منجر به تشکیل گردابه‌هایی در سطح آب کنار دیواره‌های کلیدهای خروجی می‌شود. قدرت دو گردابه کناری کم بوده و به شکل سطحی به بستر پایین‌دست وارد می‌شوند. یک گردابه قوی نیز در میانه کلیدهای خروجی شکل می‌گیرد که علت اصلی تشکیل آن، ناحیه استغراق موضعی است. این گردابه با برد بیشتری در جهت پایین‌دست منتشر می‌شود [4].



شکل ۵. الف) بلوک‌های مستطیلی، ب) بلوک‌های دوزنقه‌ای و ج) بلوک‌های دایره‌ای نصب شده روی سازه‌ی تونلی

Fig. 5. a) rectangular blocks, b) trapezoidal blocks, and c) circular blocks installed on the tunnel structure



شکل ۶. ناحیه استغراق موضعی و سازه‌ی تونلی در کلید خروجی

Fig. 6. Localized submerged area and tunnel structure in the outlet key

نشان‌دهنده دبی جریان و W عرض کانال یا عرض سرریز است. علاوه‌براین، به کمک معادله پیوستگی و با دانستن عمق جریان در

جدول ۱. پارامترهای هیدرولیکی و هندسی موثر بر اتلاف انرژی جریان (N سرریز ساده، TN سرریز با سازه تونلی، NR سرریز با بلوک‌های مکعب مستطیلی، NT سرریز با بلوک‌های مکعب دوزنقه‌ای و NC سرریز با بلوک‌های استوانه‌ای)

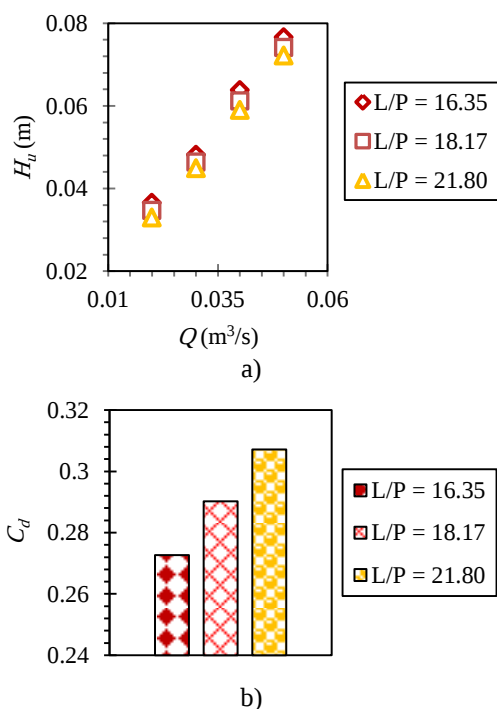
Table 1. Hydraulic and geometric parameters affecting flow energy loss (N is a simple weir, TN is a weir with a tunnel structure, NR is a weir with rectangular cube blocks, NT is a weir with trapezoidal cube blocks and NC is a weir with cylindrical blocks)

Row	Q (m ³ /s)	H _u /P	L/P	Type	Re	We	C _d	E _r	E _L
1	0.02	0.183	16.35	N	3814	452	0.296	0.320	0.680
2	0.03	0.241	16.35	N	7136	771	0.294	0.362	0.638
3	0.04	0.319	16.35	N	11832	1036	0.257	0.387	0.613
4	0.05	0.383	16.35	N	16880	1348	0.244	0.423	0.577
5	0.02	0.183	16.35	TN	3814	452	0.296	0.313	0.687
6	0.03	0.241	16.35	TN	7136	771	0.294	0.354	0.646
7	0.04	0.319	16.35	TN	11832	1036	0.257	0.381	0.619
8	0.05	0.383	16.35	TN	16880	1348	0.244	0.418	0.582
9	0.02	0.183	16.35	NR	3814	452	0.296	0.294	0.706
10	0.03	0.241	16.35	NR	7136	771	0.294	0.336	0.664
11	0.04	0.319	16.35	NR	11832	1036	0.257	0.370	0.630
12	0.05	0.383	16.35	NR	16880	1348	0.244	0.408	0.592
13	0.02	0.183	16.35	NT	3814	452	0.296	0.307	0.693
14	0.03	0.241	16.35	NT	7136	771	0.294	0.343	0.657
15	0.04	0.319	16.35	NT	11832	1036	0.257	0.375	0.625
16	0.05	0.383	16.35	NT	16880	1348	0.244	0.413	0.587
17	0.02	0.183	16.35	NC	3814	452	0.296	0.310	0.690
18	0.03	0.241	16.35	NC	7136	771	0.294	0.348	0.652
19	0.04	0.319	16.35	NC	11832	1036	0.257	0.377	0.623
20	0.05	0.383	16.35	NC	16880	1348	0.244	0.414	0.586
21	0.02	0.193	18.17	N	3972	428	0.310	0.364	0.636
22	0.03	0.258	18.17	N	7500	721	0.311	0.406	0.594
23	0.04	0.340	18.17	N	12343	972	0.273	0.428	0.572
24	0.05	0.412	18.17	N	17679	1253	0.256	0.465	0.535
25	0.02	0.220	21.80	N	4396	376	0.346	0.441	0.559
26	0.03	0.299	21.80	N	8355	622	0.326	0.483	0.517
27	0.04	0.393	21.80	N	13592	841	0.289	0.503	0.497
28	0.05	0.481	21.80	N	19495	1074	0.267	0.537	0.463

سازه تونلی و کلیدهای ورودی) در فاصله‌ای دورتر از پنجه سرریز اتفاق افتاده و موجب ایجاد گردابه‌هایی با ماهیت سطحی در جریان می‌شود. به منظور کاهش بیشتر سرعت جریان ریزشی از کلیدهای ورودی روی سازه تونلی، از بلوک‌هایی به عنوان مانع استفاده شد. این بلوک‌ها با ایجاد اصطکاک و اغتشاش، سرعت جریان را پس از برخورد کاهش می‌دهند. در ناحیه پشت بلوک‌ها، جریان چرخشی تشکیل می‌شود و با افزایش دبی، پرش جریان از روی بلوک‌ها به سمت پایین‌دست مشاهده می‌شود. با توجه به الگوی ریزش جریان از کلیدهای ورودی به کناره‌های سازه تونلی، آرایش بلوک‌ها به این صورت پیاده‌سازی شد: چهار بلوک در کناره‌ها و یک بلوک به

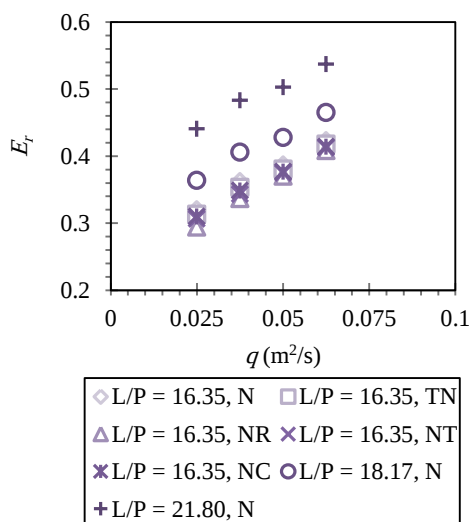
با استفاده از سازه تونلی در کلیدهای خروجی سرریز، از اختلاط جریان خروجی از این کلیدها با جریان ریزشی از کلیدهای ورودی جلوگیری به عمل آمد (شکل ۶). این جداسازی جریان، موجب حذف گردابه‌های سطحی کناری و عدم اختلاط جریان در مجاورت دیواره‌های کلیدهای خروجی شد. در این حالت، جریان‌های خروجی از کلیدهای خروجی و جریان عبوری از روی سازه تونلی، به صورت مجزا به سمت پایین‌دست هدایت می‌شوند. ریزش جریان از روی سازه تونلی در فاصله بیشتری از پنجه سرریز صورت می‌گیرد که این امر می‌تواند خطر واژگونی سرریز را کاهش دهد. اختلاط این جریان‌ها (خروجی از کلیدهای خروجی،

مقدار کمتری را نشان می‌دهد. این نتیجه حاکی از آن است که این بلوک‌ها با ایجاد اغتشاش و استهلاک انرژی، موفق شده‌اند انرژی مخصوص جریان را در پایین دست سرریز کاهش دهند. این کاهش انرژی به معنای کم شدن سرعت مخرب جریان در منطقه پایین دست است که از نظر مهندسی یک نقطه مثبت و مطلوب به



شکل ۷. الف) منحنی دبی - ارتفاع جریان و ب) ضریب آگذری نسبت به پارامتر بدون بعد L/P

Fig. 7. a) Discharge-stage curve, and b) discharge coefficient relative to dimensionless parameter L/P



شکل ۸. انرژی نسبی جریان نسبت به دبی در واحد عرض

Fig. 8. Relative flow energy versus discharge per unit width

صورت زیگزآگی در مرکز قرار گرفت. برای درک بهتر هندسه چیدمان بلوک‌ها و الگوی جریان روی آن‌ها می‌توان به شکل (۵) مراجعه کرد.

با تحلیل شکل‌های (۷-الف و ۷-ب) که به ترتیب منحنی ارتباط دبی-ارتفاع جریان (اشل) و ضریب دبی سرریز را نسبت به پارامتر بی بعد L/P نشان می‌دهند، نتایج زیر به دست می‌آید:

با افزایش دبی جریان، ارتفاع کل آب (هد) در بالادست سرریز افزایش می‌یابد که دلیل آن حضور حجم بیشتر آب در این ناحیه است. این افزایش هد، به نوبه خود باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش ارتفاع سرریز و در نتیجه افزایش پارامتر بی بعد L/P ، ارتفاع جریان در بالادست کاهش یافته و ضریب دبی افزایش می‌یابد. این پدیده نشان می‌دهد که در سرریزهای کوتاه‌تر، آب با سهولت بیشتری از روی تاج سرریز عبور می‌کند که در نهایت به افزایش ظرفیت عبور جریان منجر می‌شود. بر اساس داده‌های کمی، به‌طور میانگین در سرریزی با ارتفاع ۰/۲۰ متر در مقایسه با سرریزهای با ارتفاع ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متر، ارتفاع جریان به ترتیب ۴/۶ درصد و ۹/۱ درصد بیشتر است. این افزایش هد موجب کاهش ضریب دبی به میزان ۶/۱ درصد و ۱۱/۲ درصد به ترتیب برای دو سرریز کوتاه‌تر شده است. ذکر این نکته ضروری است که ارتفاع بلوک‌ها و سازه تونلی به گونه‌ای انتخاب و نصب شدند که تأثیری بر ضریب دبی جریان نداشته باشند. علاوه بر این، دریچه انتهایی کانال به صورت آزاد عمل می‌کرد تا از مستغرق شدن سرریز جلوگیری شود.

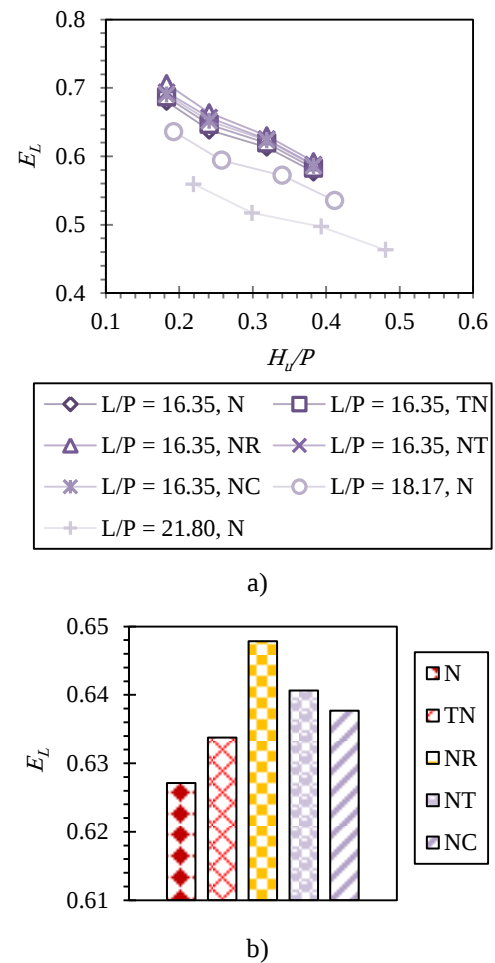
با تحلیل شکل (۸) که ارتباط بین انرژی نسبی جریان (E_r) و دبی در واحد عرض در بالادست سرریز (q) را نشان می‌دهد، نتایج زیر قابل استنباط است:

با افزایش دبی در واحد عرض، انرژی نسبی جریان نیز افزایش می‌یابد. انرژی نسبی، نسبت انرژی مخصوص جریان در پایین دست سرریز به انرژی مخصوص در بالادست آن را بیان می‌کند. با افزایش دبی، انرژی مخصوص در بالادست افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش دبی منجر به سرعت بیشتر جریان در پایین دست می‌شود که باعث می‌شود و انرژی مخصوص در پایین دست با نرخ بیشتری افزایش یابد. این امر در نهایت به افزایش انرژی نسبی منجر می‌شود. در حالتی که از بلوک‌های مستطیلی روی سازه تونلی استفاده شده است، انرژی نسبی جریان

دلیل این امر آن است که افزایش این پارامتر نشان‌دهنده سرعت بیشتر جت‌های خروجی از سرریز و در نتیجه افزایش سطح اغتشاش در جریان است. در این شرایط، جریان انرژی کمتری را در حین عبور از سرریز تلف می‌کند و انرژی جنبشی بیشتری به پایین دست منتقل می‌شود. در سرریزهای مجهز به بلوک بر روی سازه تونلی، اتلاف انرژی جریان به طور قابل توجهی بیشتر است. عملکرد بلوک‌ها به این صورت است که با کاهش سرعت جت‌های خروجی از کلیدهای خروجی و همچنین کاهش اختلاط جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی، از قدرت جت‌ها کاسته و در نتیجه باعث افزایش تلفات انرژی می‌شوند. در سرریزهای با ارتفاع بیشتر، به دلیل افزایش ارتفاع ریزش جریان و اختلاط قوی تر جریان در نزدیکی لبه سرریز (پنجه)، اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. این پدیده منجر به انتقال جریان به پایین دست با سرعت کمتری می‌شود که نشان از عملکرد مؤثر سرریزهای بلندتر در استهلاك انرژی مخرب جریان دارد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بلوک‌ها و همچنین افزایش ارتفاع سرریز می‌تواند به عنوان راهکارهایی مؤثر برای افزایش اتلاف انرژی و کاهش سرعت مخرب جریان در پایین دست مد نظر قرار گیرد.

در سرریز با ارتفاع ۰/۲۰ متر نسبت به مدل‌های ۰/۱۸ و ۰/۱۵ متری که هیچ یک مجهز به بلوک نیستند، کاهش انرژی جریان به ترتیب حدود ۶/۸ و ۱۸/۸ درصد کمتر است. در سرریز ۰/۲۰ متری که با بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای تجهیز شده، افزایش اتلاف انرژی نسبت به حالت بدون بلوک با همان ارتفاع، به ترتیب حدود ۳/۲، ۲/۱ و ۱/۶ درصد بیشتر مشاهده می‌شود. این امر ناشی از عملکرد بلوک‌ها به عنوان مانع و تشکیل پرش هیدرولیکی بلندتر در قسمت بالادست آن‌ها است.

همچنین، میزان اتلاف انرژی در سرریز دارای بلوک مستطیلی در مقایسه با انواع دوزنقه‌ای و دایره‌ای، به ترتیب حدود ۱/۱ و ۱/۶ درصد بالاتر است که دلیل آن تأثیر ترکیبی پرش هیدرولیکی و گردابه‌های تشکیل شده در اطراف بلوک‌های مستطیلی است. علاوه بر این، مقایسه سرریزهای مجهز به سازه تونلی با سرریز فاقد این سازه نشان می‌دهد که اتلاف انرژی در حالت اول حدود ۱/۱ درصد بیشتر است که به دلیل عدم اختلاط جریان خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی با یکدیگر رخ می‌دهد.



شکل ۹. الف) تأثیر پارامترهای H_w/P و L/P و ب) تأثیر Type سرریز بر اتلاف انرژی جریان

Fig. 9. a) Effect of H_w/P and L/P parameters, and b) Effect of Type weir on flow energy loss

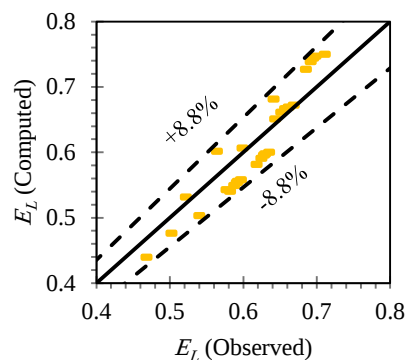
شمار می‌آید. با کاهش ارتفاع سرریز، جریان فرصت و مسیر کمتری برای از دست دادن انرژی خود قبل از رسیدن به پایین دست دارد. در نتیجه، انرژی نسبی جریان در پایین دست سرریزهای کوتاه‌تر مقدار بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. این نشان می‌دهد که سرریزهای بلندتر در استهلاك انرژی جریان کارآمدتر عمل می‌کنند. در سرریز دارای سازه تونلی نسبت به سرریز بدون سازه تونلی، انرژی نسبی مقدار کمتری دارد و افزایش اتلاف انرژی در سرریز دارای سازه تونلی به دلیل جدایش جریان در کلیدهای خروجی این سرریز است.

بر اساس تحلیل شکل‌های (۹-الف و ۹-ب) که به ترتیب تأثیر پارامترهای H_w/P و L/P و همچنین نوع سازه (Type) بر اتلاف انرژی جریان را نشان می‌دهند، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد: با افزایش پارامتر H_w/P ، میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.

مقدار اتلاف انرژی مشاهده شده را نسبت به اتلاف انرژی محاسبه شده نشان می‌دهد. همانطور که پیدا است، این رابطه با حاشیه خطای ۸/۸ درصد برای محاسبه اتلاف انرژی جریان مورد قبول و قابل اعتماد است. حاشیه خطای رابطه (۴) و ضریب همبستگی در آن، مطابق پارامترهای آماری و مطابق تحقیق خوش فطرت و همکاران محاسبه شدند [28].

$$E_L = K \left(\frac{H_u}{P} \right)^{-0.40} \left(\frac{L}{P} \right)^{0.14} \quad (4)$$

میانگین اتلاف انرژی جریان در تحقیق فتحی و همکاران (۲۰۲۳) در سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع A صفر، پنج، ده و پانزده پله‌ای به ترتیب برابر ۰/۵۹۵، ۰/۶۷۱، ۰/۶۱۷ و ۰/۶۱۷ است [19]. در بهترین حالت تحقیق حاضر (یعنی سرریز همراه با بلوک‌های مستطیلی موجود روی سازه تونلی)، اتلاف انرژی جریان نسبت به سرریز صفر پله‌ای حدود ۲۲/۵ درصد بیشتر، نسبت به سرریز پنج پله‌ای حدود ۸/۲ درصد بیشتر، نسبت به سرریز ده پله‌ای حدود ۳/۴ درصد کمتر و نسبت به سرریز پانزده پله‌ای حدود ۴/۸ درصد بیشتر است. دلیل آن جدایش جریان خروجی از کلیدهای ورودی با کلیدهای خروجی است. با این حال، اتلاف انرژی جریان در بهترین حالت تحقیق حاضر نسبت به سرریزهای ده پله‌ای کمتر است و دلیل آن زبری بیشتر سرریزهای کلیدپیانویی پلکانی نسبت به بلوک‌ها است. با پله‌های ده تایی، سرعت جریان به مراتب کاهش یافته و همین امر باعث افزایش اتلاف انرژی جریان می‌شود. میانگین اتلاف انرژی در بهترین حالت مطالعه فتحی و همکاران (۲۰۲۵) یعنی پوشش گیاهی صلب با تراکم بیشتر در پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع B برابر ۰/۶۳۴ است [23]. با این حال، میانگین اتلاف انرژی در مطالعه ایشان حدود ۲/۲ درصد کمتر از میانگین اتلاف انرژی در بهترین حالت مطالعه حاضر است. دلیل این اختلاف کم، کاهش سرعت جریان و قدرت گردابه‌ها توسط بلوک‌ها و پوشش‌های گیاهی است. حفیظی و خوش فطرت (۲۰۲۴) نیز با ایجاد هندسه متفاوت بلوک روی کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نوع C دریافتند که میانگین اتلاف انرژی در سرریزهای دارای بلوک مستطیلی (R)، دوزنقه‌ای (T) و دایره‌ای (C) به ترتیب برابر ۰/۵۹۱، ۰/۵۷۳ و ۰/۵۵۲ است [29]. با توجه به شکل (۱۱)، میانگین اتلاف انرژی در مطالعه ایشان با سرریز تونلی با بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و



شکل ۱۰. مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده اتلاف انرژی جریان

Fig. 10. Observed and calculated values of flow energy loss

جدول ۲. ضریب همبستگی و میانگین خطاهای مورد نظر

Table 2. Correlation coefficient and mean of the desired errors

Row	L/P	Type	MAE	RMSE	CC
1	16.35	N	0.0336	0.0453	0.966
2	16.35	TN	0.0310	0.0342	0.985
3	16.35	NR	0.0271	0.0370	0.952
4	16.35	NT	0.0316	0.0295	0.997
5	16.35	NC	0.0258	0.0330	0.998
6	18.17	N	0.0311	0.0374	0.983
7	21.80	N	0.0243	0.0347	0.963

رابطه (۴)، برای محاسبه اتلاف انرژی جریان در سرریز با وجود بلوک و سازه تونلی موجود در کلیدهای خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B ارائه شده است. این رابطه برای ۷۵ درصد داده‌ها ارائه و برای ۲۵ درصد دیگر داده‌ها با خطای بسیار کمی قابل اعتماد است. با توجه به تأثیر زیاد پارامتر L/P بر اتلاف انرژی جریان، این پارامتر در رابطه (۴) نیز مورد بررسی قرار گرفت. مربع ضریب همبستگی در این رابطه ۹۷/۷۸ درصد است. جدول (۲) نیز ضریب همبستگی (CC)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) را نشان می‌دهد. همچنین ضریب K در این رابطه به پارامتر L/P و Type مرتبط است. مقدار K در L/P برابر ۱۶/۳۵، ۱۸/۱۷ و ۲۱/۸۰ (سرریزهای بدون بلوک و سازه تونلی) به ترتیب ۰/۲۴۹، ۰/۲۳۵ و ۰/۲۱۳ است. مقدار K در سرریز با بلوک‌های مستطیلی (NR) برابر ۰/۲۵۷، در سرریز با بلوک‌های دوزنقه‌ای (NT) برابر ۰/۲۵۶ و در سرریز با بلوک‌های دایره‌ای (NC) برابر ۰/۲۵۵ است. همچنین مقدار K در سرریز با سازه تونلی (TN) برابر ۰/۲۵۳ است. شکل (۱۰) نیز

افزایش می‌یابد.

- به‌طور میانگین بلوک‌ها در کلیدهای خروجی سرریز مانند مانع عمل کرده و اتلاف انرژی جریان را تا ۲/۳ درصد افزایش می‌دهند.
- تشکیل گردابه‌های کم‌انرژی و پرش هیدرولیکی در اطراف بلوک‌ها، منجر به کاهش انرژی مخصوص جریان در بخش پایین‌دست می‌شود.
- با افزایش نسبت‌های H_u/P و L/P ، میزان اتلاف انرژی جریان کاهش می‌یابد.
- سازه‌ی تونلی باعث اتلاف انرژی جریان بیشتری می‌شود و به‌ترتیب در سرریز با بلوک‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای بیشترین اتلاف انرژی جریان مشاهده شد.
- در ادامه نیز رابطه‌ای با ضریب همبستگی ۹۷/۷۸ درصد برای محاسبه اتلاف انرژی جریان ارائه شد.

در این پژوهش، فرض بر جریان دائمی و ضریب اصلاح سرعت واحد بوده و تأثیر عواملی همچون رسوبات، شاخ و برگ شناور در سیلاب، و همچنین یکسان در نظر نگرفتن دهانه‌های بازشدگی، مورد بررسی قرار نگرفت؛ که توجه به این محدودیت‌ها می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات آتی باشد.

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می‌گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

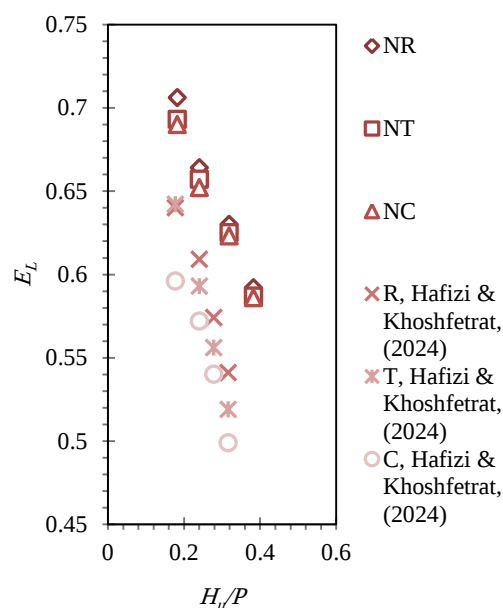
سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش‌ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر اتلاف انرژی مطالعه حاضر با مطالعه حفیظی و خوش‌فطرت (۲۰۲۴)

Fig. 11. Comparison of energy loss values of the present study with the study of Hafizi and Khoshfetrat (2024)

دایره‌ای به‌ترتیب حدود ۸/۸، ۱۰/۵ و ۱۳/۵ درصد کمتر است. دلیل اصلی آن وجود سازه تونلی و جدایش جریان‌های خروجی از کلیدهای ورودی و خروجی نسبت به مطالعه ایشان است. همچنین شرایط مرزی متفاوت بین سرریزهای کلیدپیانویی مستطیلی نوع B و دوزنقه‌ای نوع C نیز می‌تواند از عوامل موثر بر اتلاف انرژی جریان باشد.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی میزان اتلاف انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی، به دلیل کارایی بالای آن‌ها در انتقال جریان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعه حاضر، به تحلیل این پدیده در سرریز کلیدپیانویی مستطیلی نوع B، در دو حالت مجهز و فاقد بلوک روی سازه تونلی، می‌پردازد. همچنین، از تحلیل ابعادی به‌عنوان ابزاری برای محاسبه اتلاف انرژی جریان در سرریزهای کلیدپیانویی با و بدون سازه‌ی تونلی و با شکل متفاوت بلوک‌ها روی سازه تونلی استفاده شد.

۶- یافته‌های کلیدی

- با افزایش ارتفاع سرریز نسبت به سرریز کوتاه‌تر، ضریب آبگذری تا ۱۱/۲ کاهش و اتلاف انرژی جریان تا ۱۸/۸ درصد

فهرست علائم انگلیسی و یونانی

m^2/s	دبی در واحد عرض	q	m	طول دیواره‌ی جانبی سرریز	B*
m^3/s	دبی جریان	Q	m	طول لبه آویزان ورودی	B _i
-	عدد رینولدز	Re	m	انرژی جریان در بالادست سرریز	E ₁
m	ضخامت سرریز	Ts	m	انرژی جریان در پایین‌دست سرریز	E ₂
-	سرریزهای دارای سازه‌ی تونلی	TN	-	انرژی نسبی	Er
m/s	سرعت جریان در بالادست سرریز	V ₁	m/s ²	نیروی گرانشی	g
m/s	سرعت جریان در پایین‌دست سرریز	V ₂	m	عمق جریان در بالادست سرریز	h
m	عرض سرریز	W	m	هد کل جریان در بالادست سرریز	H _u
m	عرض کلید ورودی	W _i	-	مقادیر ثابت محاسبه شده در رابطه‌ها	K
m	عرض کلید خروجی	W _o	m	طول سرریز	L
-	عدد وبر	We	-	سرریز ساده	N
m	عمق جریان در پایین‌دست سرریز	y	-	سرریز با بلوک‌های استوانه‌ای	NC
Kg/(m.s)	لزجت دینامیکی	μ	-	سرریز با بلوک‌های مکعب مستطیلی	NR
Kg/m ³	چگالی آب	ρ	-	سرریز با بلوک‌های مکعب دوزنقه‌ای	NT
Kg/s ²	ضریب کشش سطحی	σ	m	ارتفاع سرریز	P

References

- [1] Bodaghi, E., Abdi-Chooplou, C. and Ghodsian, M., 2024. Experimental investigation of scour downstream of a type A trapezoidal piano key weir under free and submerged flow conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(1), pp.34-48. doi: 10.2478/johh-2023-0041.
- [2] Safarzadeh, A. and Noroozi, B., 2014. Three-dimensional hydrodynamics of arced piano key spillways. *Journal of Hydraulics*, 9(3), pp.61-79. doi: 10.30482/JHYD.2014.10176.
- [3] Crookston, B.M., Erpicum, S., Tullis, B.P. and Laugier, F., 2019. Hydraulics of labyrinth and piano key weirs: 100 years of prototype structures, advancements, and future research needs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(12), p.02519004. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001646.
- [4] Fathi, A., Khoshfetrat, A. and Alavi, S.H., 2025a. Downstream local scour of PKW with different shapes and numbers of flow splitters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 151(4), p.04025015. doi: 10.1061/JHEND8.HYENG-1414.
- [5] Khanh, M.H.T., Hien, T.C. and Quat, D.S., n.d. *Study and construction of PK weirs in Vietnam (2004 to 2011)*.
- [6] Pfister, M., Jüstrich, S. and Schleiss, A.J., 2017. Toe-scour formation at piano key weirs. In: *Labyrinth and Piano Key Weirs III*. Boca Raton: CRC Press, pp.147-156.
- [7] Pinto, M., Matos, J.D.S.G. and dos Santos Viseu, M.T.F., 2017. *Energy dissipation on stepped spillways with a piano key weir: experimental study*. Lisbon: Instituto Superior Técnico, pp.1-11. (In Portuguese).
- [8] Torabi, H., Parsaie, A., Yonesi, H. and Mozafari, E., 2018. Energy dissipation on rough stepped spillways. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 42, pp.325-330. doi: 10.1007/s40996-018-0092-5.
- [9] Al-Shukur, A.H.K. and Al-Khafaji, G.H., 2018. Experimental study of the hydraulic performance of piano key weir. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), pp.63-70.
- [10] Karimi, M., Attari, J., Saneie, M. and Jalili Ghazizadeh, M.R., 2018. Side weir flow characteristics: comparison of piano key, labyrinth, and linear types. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), p.04018075. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001539.
- [11] Karimi, M., Jalili Ghazizadeh, M., Saneie, M. and Attari, J., 2020. Experimental and numerical study of a piano key side weir with oblique keys. *Water and Environment Journal*, 34, pp.444-453. doi: 10.1111/wej.12544.
- [12] Eslinger, K.R. and Crookston, B.M., 2020. Energy dissipation of type A piano key weirs. *Water*, 12(5), p.1253. doi: 10.3390/w12051253.
- [13] Singh, D. and Kumar, M., 2022. Energy dissipation of flow over the type-B piano key weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 83, p.102109. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102109.
- [14] Singh, D. and Kumar, M., 2023. Effect of the inlet-to-outlet key width ratio of piano key weir on its hydraulic behaviour. *Flow Measurement and Instrumentation*, 91, p.102342. doi:

- 10.1016/j.flowmeasinst.2023.102342.
- [15] Bansal, N., Singh, D. and Kumar, M., 2023. Computation of energy across the type-C piano key weir using gene expression programming and extreme gradient boosting (XGBoost) algorithm. *Energy Reports*, 9, pp.310-321. doi: 10.1016/j.egy.2023.04.003.
- [16] Shen, X. and Oertel, M., 2021. Comparative study of nonsymmetrical trapezoidal and rectangular piano key weirs with varying key width ratios. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(11), p.04021045. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001942.
- [17] Shen, X. and Oertel, M., 2023. Influence of piano key weir crest shapes on flow characteristics, scale effects, and energy dissipation for in-channel application. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(6), p.04023010. doi: 10.1061/JHEND8.HYENG-13322.
- [18] Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2024. Experimental comparison of flow energy loss in type-B and C trapezoidal piano key weirs. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(1), pp.55-64. doi: 10.31272/jeasd.28.1.4.
- [19] Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M., 2023. An experimental study of flow energy loss in trapezoidal stepped piano key weirs (PKWs). *Modares Civil Engineering Journal*, 23(4), pp.163-174. doi: 10.22034/23.4.163.
- [20] Fathi, A., Abdi Chooplou, C. and Ghodsian, M., 2024. Local scour downstream of type-A trapezoidal stepped piano key weir in sand and gravel sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp.1-13. doi: 10.1080/09715010.2024.2353612.
- [21] Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M. and Latifi, M., 2024b. Baffle-enhanced scour mitigation in rectangular and trapezoidal piano key weirs: An experimental and machine learning investigation. *Water*, 16(15), p.2133. doi: 10.3390/w16152133.
- [22] Mirkhorli, P., Ghaderi, A., MohammadNezhad, H., Mohammadi, M. and Kisi, O., 2025. Hydraulic behavior and energy dissipation in piano key weirs vs. rectangular labyrinth weirs: A comparative study. *Flow Measurement and Instrumentation*, p.102830. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2025.102830.
- [23] Fathi, A., Khoshfetrat, A., Talebipour, F. and Saadat, M., 2025b. Influence of rigid vegetation on flow energy dissipation downstream of type B trapezoidal piano key weirs. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(8), pp.1-15. doi: 10.1007/s41062-025-02172-x.
- [24] Wadi, W.M., Alavi, S.H., Izadinia, E., Daneshvar, F.A. and Khoshfetrat, A., 2025. The effect of different block shapes on the downstream local scour in piano key weir. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. doi: 10.3311/PPci.41037.
- [25] Ehsanifar, A., Ghodsian, M. and Abdi Chooplou, C., 2023. The experimental study of the effect of splitter on the flow discharge piano key weir. *Journal of Hydraulics*, 18(2), pp.39-52. doi: 10.30482/JHYD.2022.330734.1591.
- [26] Babakhah, L. and Khoshfetrat, A., 2024. Investigating local scour downstream of piano key weir with riprap. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(11), pp.1-15. doi: 10.1007/s41062-024-01759-0.
- [27] Rdhaiwi, A.Q., Khoshfetrat, A. and Fathi, A., 2023. Experimental investigation of scour downstream of a C-type trapezoidal piano key weir with stilling basin. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(6), pp.688-697. doi: 10.31272/jeasd.27.6.2.
- [28] Khoshfetrat, A., Challoob Mshali, K. and Fathi, A., 2025. Experimental study of the effect of jump on the scour downstream of type-C trapezoidal piano key weir. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(11), pp.1353-1368. doi: 10.22060/CEEJ.2024.22565.7996.
- [29] Hafizi, N. and Khoshfetrat, A., 2024. Different block geometry in piano key weir and its effect on energy loss. *Iranian Water Researches Journal*, 18(3). Available at: https://iwrj.sku.ac.ir/article_11653.html?lang=en (Accessed: 25 August 2026).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Mohammed Wadi, W., Khoshfetrat, A., Habib Jasim, M. and Salemi, N., 2026. Blocks on the tunnel structure and their effect on flow energy dissipation in a type B rectangular piano key weir (PKW). *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.21-33.



Evaluation of the Performance of the Inverse Vibration Algorithm in Damage Detection of a 2D Shear Model in a Damped Offshore Platform

Roohollah Najafi¹, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin^{2*} , Alireza Mojtahedi²

1. PhD Candidate, Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Professor, Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Fixed-jacket offshore platforms are among the most complex civil engineering structures, subjected to various damaging loads throughout their operational lifespan. The failure of such structures can lead to catastrophic consequences, including significant loss of human life and severe environmental and economic damages. Given the critical importance of uninterrupted oil extraction on these platforms, continuous structural health monitoring (SHM) has become a fundamental necessity. Effective SHM requires a thorough understanding of the platform's vibrational response, which is inherently dependent on its intrinsic and dynamic properties, including stiffness, mass, damping matrices, and natural frequencies. Without access to these fundamental parameters, an accurate assessment of the dynamic behavior of the platform remains unattainable. One of the key challenges in offshore structural health monitoring is the precise identification and estimation of these dynamic parameters under real-world environmental and operational loads. Damage detection techniques rely heavily on changes in these parameters to diagnose structural deficiencies at an early stage. The inverse vibration method has emerged as a promising approach for damage detection by evaluating variations in dynamic properties and structural matrices. This method leverages modal data obtained from structural responses to irregular and environmental wave loads to identify and localize potential damage. Given that offshore platforms are subjected to complex and highly variable loading conditions, robust numerical and computational approaches are required to extract meaningful insights from vibrational data. In this study, the proportional Rayleigh damping model was employed as a method for estimating the stiffness matrices before and after structural damage. Rayleigh damping is a widely used technique in structural dynamics that considers mass and stiffness proportional damping. By implementing inverse vibration methods, this study systematically analyzed structural behavior under dynamic loading conditions. The effectiveness of this approach was evaluated through numerical simulations on simplified and constrained 2D shear models. These models served as an idealized representation of offshore platforms, enabling controlled assessment of the proposed methodology. The results of this study revealed a significant correlation between the damping ratio and the accuracy of damage detection calculations. Specifically, increasing the damping ratio within the software model led to a noticeable reduction in the precision of the damage identification process. This finding underscores the importance of carefully selecting damping parameters when implementing inverse vibration methods for real-world applications. Furthermore, the study highlights the need for refined computational techniques that can mitigate the adverse effects of high damping on damage detection accuracy. Overall, this research contributes to the advancement of offshore structural health monitoring by demonstrating the feasibility of inverse vibration methods in detecting damage through changes in dynamic properties. The study also provides valuable insights into the limitations posed by high damping ratios in numerical models and underscores the importance of refining SHM techniques for enhanced reliability. The findings presented in this work can serve as a foundation for future investigations into advanced numerical modeling approaches and experimental validations aimed at improving damage detection capabilities in offshore structures. By integrating high-fidelity simulations with field data, future research can further enhance the applicability of these methodologies in real-world offshore engineering scenarios, ultimately improving the safety and resilience of offshore platforms.

Review History

Received: Apr 5, 2025

Revised: Aug 5, 2025

Accepted: Dec 28, 2025

Keywords

Damage Detection

Damage Localization

Inverse vibration technique

Rayleigh damping

* Corresponding Author Email: lotfollahi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7935-2126



ارزیابی عملکرد الگوریتم ارتعاش معکوس در تشخیص خرابی در مدل دو بعدی برشی در سکوی دریایی میرا

روح الله نجفی^۱، محمدعلی لطف الهی یقین^{۲*} , علیرضا مجتهدی^۲

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران- گرایش سواحل، بندر و سازه های دریایی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در سال های اخیر، پایش سلامت سازه های و تشخیص خرابی در سکوهای فراساحلی به یکی از نیازهای اساسی در مهندسی سازه های دریایی تبدیل شده است. این سازه ها به طور مستمر در معرض نیروهای محیطی شدید از جمله امواج، باد، زلزله و بارهای بهره برداری قرار دارند که می تواند به آسیب های تدریجی در اجزای سازه ای منجر شود. یکی از روش های مؤثر در شناسایی آسیب در چنین سیستم هایی، الگوریتم ارتعاش معکوس است که با بهره گیری از پارامترهای مودال شامل فرکانس های طبیعی و اشکال مودی، تغییرات سختی را در سازه استخراج کرده و محل و شدت خرابی را تخمین می زند. با این حال، بیشتر مطالعات پیشین این روش را برای سیستم های بدون میرایی یا با میرایی ناچیز بررسی کرده اند و اثر میرایی، به ویژه میرایی رایلی، بر دقت عملکرد این الگوریتم به طور جامع ارزیابی نشده است. در این پژوهش، تأثیر میرایی رایلی بر دقت الگوریتم ارتعاش معکوس در شناسایی آسیب در سکوی جکت فراساحلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، یک مدل قاب دو بعدی برشی از سکوی دریایی در محیط OpenSeesPy مدل سازی شد و بارگذاری موج به صورت طیف نامنظم JONSWAP با دوره بازگشت صد

کلمات کلیدی

تشخیص خرابی
تعیین محل خرابی
الگوریتم ارتعاش معکوس
میرایی رایلی

ساله اعمال شد. میرایی رایلی در سه سطح (۳، ۵ و ۷ درصد) در مودهای اول و سوم لحاظ شد. سناریوهای خرابی با کاهش سختی تراز سوم (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) اعمال شدند و از طریق الگوریتم ارتعاش معکوس، ماتریس سختی تخمینی استخراج و با ماتریس اولیه مقایسه شد. نتایج عددی نشان داد که افزایش میزان میرایی منجر به کاهش دقت الگوریتم در تخمین محل و شدت خرابی می شود. به طور خاص، در سطح میرایی ۷ درصد، انحراف قابل توجهی بین شدت خرابی واقعی و مقدار پیش بینی شده مشاهده شد، در حالی که در میرایی ۳ درصد، هماهنگی بسیار خوبی به دست آمد. این یافته ها بیانگر آن است که میرایی یکی از پارامترهای کلیدی مؤثر بر درستی الگوریتم های ارتعاشی است و عدم در نظر گرفتن آن می تواند منجر به نتایج گمراه کننده شد.

۱- مقدمه

انواع خطرات و آسیب های محیطی و غیر محیطی خواهند بود.

عوامل آسیب، زیر ساخت ها را در دوره بهره برداری دچار تغییراتی در هندسه سازه، اتصالات و مولفه های سختی و مقاومت اجزای

سازه هایی که توسط بشر ساخته می شوند، دارای عمر محدودی هستند و از زمانی که مورد بهره برداری قرار می گیرند در معرض

* رایانامه نویسنده مسئول: lotfollahi@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7935-2126

کپی رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه ای کپی، باز نشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.



تشکیل دهنده می‌کند. این تغییرات در قالب فرآیندهایی مانند فرسایش، خستگی، بارگذاری‌های غیر استاندارد، آسیب‌های ناشی از تغییرات دما و افت کیفیت مصالح، سبب کاهش عملکرد مورد انتظار سازه‌ها و زیرساخت‌های عمرانی می‌شوند. به طور کلی آسیب‌ها و خرابی‌هایی که در سازه‌ها رخ می‌دهد باعث تغییر در مولفه و مشخصات دینامیکی سازه‌ها و کاهش سطح بهره‌وری سازه می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که با اطمینان یافتن از یکپارچگی سازه‌ها و بازرسی‌های مداوم و به موقع در شرایطی که سازه‌ها در حال سرویس‌دهی می‌باشند، می‌توان مکان‌های آسیب دیده را شناسایی و از خرابی‌های مصیبت‌بار جلوگیری کرد. عملیات پایش می‌تواند نقش اثربخشی در رسیدن به بهینه‌ترین حالت نگهداری، تعمیر و تعویض عضوهای آسیب دیده در سازه داشته باشد. سکوها فراساحلی از جمله سازه‌هایی هستند که همواره تحت اثر بارهای مختلفی قرار می‌گیرند به شکلی که می‌توانند آسیب‌های جزئی و کلی در سکو ایجاد کنند و باعث خسارات شدید در سکو و توقف بهره‌برداری آن شوند. از این رو در دهه‌های گذشته تحقیق روی سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ای (Structural Health Monitoring (SHM)) به دلیل هزینه بالای تعمیر خرابی و افت عملکرد این سازه‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه شناسایی سیستم بوده است. روش‌های سنتی پایش برای سکوها فراساحلی بیشتر نیازمند حضور فیزیکی غواصان و مهندسان است و به صورت بازرسی چشمی انجام می‌شود که به دلیل معایب و محدودیت‌های موجود در این سازه‌های پیچیده، این روش‌ها بسیار وقت‌گیر، پرهزینه و دارای خطای زیادی است. بنابراین وجود یک روش جامع و قوی به منظور به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز در امر پایش سلامت سازه در طول عمر بهره‌برداری در این نوع سازه‌ها ضروری است. استخراج مشخصات دینامیکی ذاتی سازه‌ها یکی از بخش‌های حیاتی در روند پایش سلامت سکوها دریایی می‌باشد. با توجه به بررسی این مشخصات می‌توان تمایز بین سازه آسیب دیده و سالم را برای تشخیص ویژگی‌های حساس سازه به خرابی را مشخص نمود. با توجه به این نکته که تحریک‌های محیطی را به علت ذات اتفاقی آن‌ها، نمی‌توان به شکل توابع مشخصی از زمان بیان نمود، به همین علت از الگوریتم‌های احتمالاتی به منظور تعیین آن‌ها استفاده می‌شود. بررسی خواص دینامیک سازه به کمک

تحریک محیطی، ساده‌ترین روش به منظور سنجش مشخصات دینامیکی سازه و شناسایی پاسخ آن می‌باشد. روش ترکیبی تشخیص خرابی که توسط Zhang و Ma توسعه یافته است، با ادغام اطلاعات مودهای ارتعاشی و تغییرات میرایی، امکان شناسایی دقیق‌تر خرابی‌ها را فراهم می‌کند [1].

همچنین امروزه با قدرتمند شدن فناوری‌های مربوط به هوش مصنوعی و سنسورها، پیشرفت قابل توجهی در روش‌های پایش سلامت سازه ایجاد شده است. ضریب اطمینان بالا، حساسیت زیاد نسبت به تغییرات، کم کردن زمان تشخیص آسیب و کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی تنها چند نمونه از مزایای استفاده از حسگر در حوزه پایش سازه‌های عمرانی است. در سیستم پایش ارزیابی رفتار پاسخ‌های سازه در لحظه، به ویژه بعد از تحریک‌های بحرانی مطرح است و به همین منظور برای پایش مستمر رسانه‌ها، استفاده از سنسورها و حسگرها ضروری است.

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای پیرامون بحث پایش سلامت سازه‌ها انجام شده است. بسیاری از روش‌های پایش سلامت بر اساس تغییر در فرکانس‌های تشدید [2-4] و اشکال مودی [5 و 6] و کرنش مودال [7 و 8] هستند.

در روند تشخیص آسیب استفاده از انحنای اشکال مودی نتایج قابل اطمینان‌تری در برابر کاهش سختی ناشی از آسیب می‌دهد. در روش‌های نوین تشخیص آسیب، استفاده از انحنای اشکال مودی همراه با تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک ابزار مؤثر معرفی شده است [9]. در گروهی از روش‌های پایش سلامت سازه از محاسبات ماتریسی برای انجام این فرآیند استفاده می‌شود [10]. در این روش‌ها نتایج حاصل از مدل‌ها با فرآیند بروزرسانی ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی اصلاح می‌شوند. استفاده از شبکه‌های هوش مصنوعی امکان در نظر گرفتن حالت‌های مختلف آسیب را به منظور اندازه‌گیری کرنش اعضا فراهم کرده است.

هادادارا و همکاران [11] روشی نوین مبتنی بر شبکه عصبی را برای شناسایی آسیب در سازه‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها به کمک داده‌های مودال اندازه‌گیری شده و با گسترش مدل‌های عددی در شبکه عصبی موفق به شناسایی سیستم تحت ارتعاشات محیطی شدند.

با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از کشور ما در طیف نقاط زلزله خیز قرار دارد، روش‌هایی قابلیت اطمینان بیشتری دارند که در زمان واقعی وضعیت سازه را مشخص سازند، چرا که آسیب‌های

ω_p بیانگر فرکانس زاویه‌ای بیشینه طیف می‌باشد که موقعیت آن را روی محور افقی نمایش می‌دهد و با رابطه $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$ به دست می‌آید. T_p ، دوره تناوب بیشینه طیف موج است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در حوزه آب‌های خلیج فارس و داده‌های آماری موجود و به کمک روابط تخمینی، می‌توان دوره تناوب بیشینه را به کمک ارتفاع موج عمده از معادله ۳، تخمین زد.

$$T_p = a \times H_s^b \quad (3)$$

در مورد منطقه خلیج فارس، مقدار پیشنهادی $2/94$ برای a و $0/5$ برای b مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای پیدا کردن پارامترهای مجهول دیگر در طیف جانسواپ از روابط از معادله ۴ استفاده می‌شود. در این رابطه λ شدت نمونه و A و B پارامترهای توزیع گامبل می‌باشند که با توجه به اطلاعات ثبت شده در خلیج فارس به ترتیب مقادیر $1/04$ ، $0/71$ و $2/52$ برای آن‌ها پیشنهاد شده است:

$$\gamma = \exp \left(\frac{5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}}{\frac{T_p}{\sqrt{H_s}}} \right) \quad (4)$$

for $3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5$

$$A_\gamma = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$$

$$H_{S-n} = A \left\{ -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda n} \right) \right] \right\} + B$$

با توجه به اینکه امواج، دارای ماهیتی نامنظم و تصادفی می‌باشند، منطقی است که برای تولید موج، تنها روی مشخصات فرکانسی سیگنال نامنظم با استفاده از آنالیز سری فوریه، تمرکز شود. برای تولید رکورد مصنوعی سه ساعته با استفاده از طیف منطقه مورد نظر، می‌توان از معادلات ۵ استفاده نمود:

$$S_\eta(\omega_n) d\omega = \frac{1}{2} \eta_{a_n}^2 \quad (5)$$

$$\eta_{a_i} = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega}$$

$$\eta = \sum_{i=1}^N \eta_{a_i} \cos(\omega_i t - \phi) \text{ that } N = \frac{\omega_f - \omega_0}{\Delta\omega}$$

که در آن N تعداد تقسیم بندی‌های صورت گرفته روی بازه فرکانسی و ω_0 و ω_f مقادیر ابتدایی و انتهایی بازه فرکانسی می‌باشد. همچنین Φ متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت و مقادیر بین صفر و 2π می‌باشد.

موضعی ناشی از زلزله در المان‌های مختلف سکوها پایه ثابت شابلونی می‌تواند منجر به خرابی‌های کلی در سازه شود [12]. حائری و همکاران [13] در پژوهشی گسترده، ضمن ارائه روش‌هایی برای پایش سلامت سکوها دریایی، سازه سکوی دریایی پایه ثابت SPD2 را نیز مورد ارزیابی و پایش قرار دادند. توسعه روابط به کار رفته برای مسائل معکوس ارتعاشی در مطالعات حائری، بدون در نظر گرفتن میرایی در حل معادلات مربوط به این الگوریتم بود. در این مطالعه با لحاظ کردن محاسبات میرایی رایی در انواع مدل‌های مرجع مرتبط با سکوی پایه ثابت به منظور تشخیص ترازهای آسیب دیده سکو، سعی شده است که تاثیر میرایی در سختی ترازها بعد از اعمال آسیب در مدل‌های نرم‌افزاری شناسایی شود.

۲- مواد و روش

ابتدا تئوری مورد استفاده امواج در حوزه خلیج فارس برای بارگذاری‌های دینامیکی روی سکوی مورد مطالعه با استفاده از طیف Jonswap (Hasselman و همکاران ۱۹۷۳) ارائه می‌شود. این طیف از پروژه‌های تحقیقاتی امواج دریای شمال که توسط آزمایشگاه‌های چهار کشور انجام شده، به دست آمده است. اندازه‌گیری موج و باد، با مدت تداوم کافی و وزش باد، برای تهیه مدل طیفی در آب عمیق و شرایط حدی طول بادگیر، انجام شده است. طیف حاصل به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

(۱)

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \times H_s^2 \times \omega_p^4 \times \omega^{-5} \times \exp \left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right)$$

مدل طیف موج جانسواپ برای مناطق محدود به ساحل که امواج آن‌ها توسط باد تولید می‌شوند، توصیه شده است. بنابراین با توجه به موقعیت جغرافیایی آب‌های خلیج فارس و محدود بودن آن به سواحل اطراف، می‌توان از طیف موج جانسواپ برای تولید امواج استفاده نمود. در رابطه طیف جانسواپ، H_s ارتفاع موج عمده می‌باشد که طبق تعریف برابر با میانگین ارتفاع‌های یک سوم مرتفع‌ترین امواج در بازه زمانی مشخص می‌باشد. پارامتر عرض طیف که با σ نشان داده شده است با توجه به موقعیت فرکانس نسبت به فرکانس پیک از معادله ۲ مشخص می‌شود:

$$\begin{cases} \sigma = 0.07 & \text{for } \omega \leq \omega_p \\ \sigma = 0.09 & \text{for } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2)$$

ماتریسی مرتبه دوم به شکل معادله (۶) تعریف می‌شود:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{Q(T)\} \quad (6)$$

که در آن $[M]$ ماتریس جرم، $[K]$ ماتریس سختی، $[C]$ ماتریس میرایی^۴، $\{U(t)\}$ بردار جابه‌جایی، $\{\dot{U}(t)\}$ بردار سرعت و $\{\ddot{U}(t)\}$ بردار شتاب می‌باشد. همچنین $\{Q(t)\}$ بردار تابع نیرو است.

در صورتی که رفتار سیستم مورد نظر خطی باشد آنگاه خاصیت تعامد مودهای ارتعاشی نسبت به ماتریس‌های جرم و سختی برقرار است. مدل میرایی راییلی (میرایی تناسبی) این خاصیت را در ماتریس میرایی نیز برقرار می‌کند. راییلی در مطالعات خود نشان داد که اگر ماتریس میرایی $[C]$ با ماتریس جرم و سختی دارای تناسب باشد می‌توان معادله (۷) را نوشت:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (7)$$

در رابطه (۷)، α و β ضرایب ثابت جرم و سختی هستند و دارای بعد sec^{-1} و sec هستند که با توجه به فرکانس‌های طبیعی مربوط به دو مود (ω_i) و (ω_j) و نسبت میرایی^۵ محاسبه خواهد شد. به دلیل تعامد مودها رابطه ماتریس راییلی را می‌توان به صورت معادله (۸) بازنویسی کرد:

$$\{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} = \alpha \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} + \beta \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} = M_j \\ \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} = K_j \\ \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} = C_j \end{cases} \quad (9)$$

در الگوریتم ارتعاش معکوس حالات مختلف بسط داده شده برای توسعه روند حل ماتریس‌ها معرفی می‌شود:

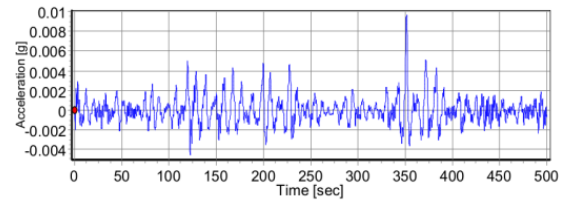
$$[K]\{\phi_i\} + \bar{\lambda}_i [C]\{\phi_i\} = -\bar{\lambda}_i^2 [M]\{\phi_i\} \quad (10)$$

$i=1, 2, \dots, N$

در رابطه (۱۰) درجات آزادی سیستم دینامیکی با N مشخص می‌شود. همچنین $\bar{\lambda}_i$ با مربع i امین فرکانس طبیعی سیستم ارتعاشی $\omega_i()$ قابل محاسبه می‌باشد و برابر i امین مقدار ویژه سیستم است.

بردار $\{\phi\}_i$ ، بیانگر i امین شکل مودی است که با ماتریس جرم خاصیت تعامد دارد و نرمال می‌باشد.

به منظور حل مسائل مقدار ویژه با حضور میرایی، در مرحله اول معادله درجه دو به یک معادله خطی به کمک تغییر متغیرها تبدیل می‌شود (معادلات ۱۱).



شکل ۱. طیف موج خلیج فارس با دوره بازگشت ۱۰۰ سال

$$(T_p = 7.10 \text{ و } H_s = 5.83)$$

Fig. 1. The wave spectrum of the Persian Gulf with a 100-year return period ($H_s = 5.83$ & $T_p = 7.10$)

در مرحله بعد، نقشه‌های مهندسی مربوط به مدل‌سازی سکوی SPD2 در نرم‌افزار SAP2000 و روابط اصلی الگوریتم ارتعاش معکوس برای تشخیص خرابی و شناسایی سیستم سکو بعد از آسیب‌های اعمالی بررسی می‌شوند.

فولادی که در مدل‌سازی این سکو استفاده شده از نوع ST52 و مدول الاستیسیته آن $2E+06$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه پلان سکو از شش پایه اصلی تشکیل شده، جرم کلی سازه در هر تراز به طور مساوی به گره پایه‌ها در پلان تراز اختصاص داده شده است.

تحلیل دینامیکی صورت گرفته در این مرحله، با استفاده از امواج شبیه‌سازی شده بر اساس طیف با دوره بازگشت ۱۰۰ سال، منطبق با شرایط محلی انجام شده است. دلیل انتخاب این دوره بازگشت، تحریک حداکثری سکو برای فهم تعداد مودهایی است که در تاریخچه زمانی خروجی ظاهر می‌شود. فولاد بکار رفته در اعضای سکو دارای مدول الاستیسیته 200 Gpa و نسبت پواسون 0.3 و چگالی جرمی 7850 kg/m^3 است.

در مرحله بعدی به کمک مدل‌سازی نرم‌افزاری و با استفاده از طیف موج نامنظم خلیج فارس، تحلیل دینامیکی روی سکوی SPD2 انجام یافت. هدف از انجام این تحلیل دستیابی به اطلاعات ورودی به منظور توسعه روش‌های ماتریسی ارتعاش معکوس می‌باشد. این مدل در نرم‌افزار^۱ Opensees-py با میرایی راییلی ۵٪ آنالیز شد.

۳- روابط الگوریتم ارتعاش معکوس^۲ برای شناسایی سیستم

سیستم دینامیکی چند درجه آزادی میرا^۳ به وسیله معادله

¹ Open System for Earthquake Engineering Simulation-python

² Inverse vibration technique

³ Damped Multiple Degree of Freedom system

⁴ Damping Matrice

ϕ ماتریس نرمال شده مقدار ویژه با توجه به ماتریس جرم در این مرحله، بدون دخیل کردن ماتریس میرایی در معادلات، به کمک الگوریتم Block Lanczos مساله مقدار ویژه متقارن، حل شده و جواب‌های مربوطه محاسبه می‌شوند. ماتریس‌های جرم و سختی به شکل معادلات (۱۳) نمایش داده می‌شود.

$$\begin{cases} [M]_{N \times N} = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & m_3 & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & m_{N-1} \\ & & & & & m_N \end{bmatrix} \\ [K]_{N \times N} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & -k_3 & k_3 + k_4 & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & k_{N-1} + k_N & -k_{N-1} \\ & & & & -k_{N-1} & k_{N-1} \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [\bar{M}] = \begin{bmatrix} -C & -M \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

سپس به منظور تشکیل مسأله برای حالت نامتقارن، معادله (۱۲) نوشته می‌شود:

$$[\bar{K}]\{\bar{\phi}_i\} = \lambda_i[\bar{M}]\{\bar{\phi}_i\} \quad (12)$$

λ_i بردار مختصات مودال
(۱۳)

$$\begin{cases} \{\emptyset\}_i^T [M] \{\emptyset\}_i = 1 \\ \{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

به دلیل اینکه ماتریس جرم قطری است، می‌توان آنرا به شکل ضرب یک ماتریس قطری در ترانهاده آن مطابق رابطه (15) تجزیه کرد:

$$[M] = [L][L]^T \quad (15)$$

در معادله (۱۵) به علت قطری بودن ماتریس جرم در معادلات، درایه‌های ماتریس $[L]$ با جذر درایه‌های متناظر آن در ماتریس جرم، برابر خواهد بود. به عبارت دیگر ماتریس $[L]$ با ترانهاده خود معادل است:

$$[L]_{N \times N} = [L]_{N \times N}^T = [M]^{1/2} = \text{diag}[m_1^{1/2}, m_2^{1/2}, m_3^{1/2}, \dots, m_{N-1}^{1/2}, m_N^{1/2}]_{N \times N} \quad (16)$$

در رابطه (۱۷) با ضرب ماتریس $[L]$ در بردار اشکال مودی، برداری به نام $\{u\}$ به دست می‌آید:

$$\{u\} = [L]\{\phi\} \Rightarrow \{\phi\} = [L]^{-1}\{u\} \quad (17)$$

در معادلات (18) الگوریتم ارتعاشی معکوس، ماتریس $[B]$ ، ماتریسی از نوع ژاکوبی می‌باشد و به ماتریس سختی نرمال شده شناخته می‌شود. λ_i و $\{u\}_i$ به ترتیب مقادیر ویژه و بردارهای نرمال ویژه در این روابط هستند.

$$\begin{cases} ([B] - \lambda_i[I])\{u\}_i = 0 & i = 1, 2, \dots, N \\ [B] = [L]^{-1}[K][L]^{-1} = [M]^{-1/2}[K][M]^{-1/2} \\ [K] = [L][B][L] = [M]^{1/2}[B][M]^{1/2} \end{cases} \quad (18)$$

در مدل چند درجه آزادی، m_j جرم متمرکز هر تراز، u_j درجه آزادی انتقالی و θ_j درجه آزادی دورانی مربوط به هر کدام از ترازهای سیستم دینامیکی می‌باشند.

با در نظرگیری میرایی برای سیستم دینامیکی چند درجه آزادی با جرم متمرکز، شکل ماتریسی معادله دیفرانسیل حرکت به صورت رابطه (۱۹) ارائه می‌شود:

$$[M]\ddot{Y} + [C]\dot{Y} + [K]Y = -[M][A][\ddot{y}_g] \quad (19)$$

$$Y = [y_1 \quad \theta_1 \quad y_2 \quad \theta_2 \quad \dots \quad y_n \quad \theta_n]^T$$

بردار تاثیر تحریکات با Λ قابل نمایش می‌باشد. برای محاسبه ماتریس حالت به شکل معادله (۲۰) عمل می‌شود:

$$\dot{Y} = -[M]^{-1}[C]\dot{Y} - [M]^{-1}[K]Y + [A][\ddot{y}_g] \quad (20)$$

با استفاده از تغییر متغیر در رابطه (۲۰) فرم ماتریسی معادله به صورت معادله (۲۱) بدست می‌آید:

$$Z_1 = Y \rightarrow \dot{Z}_1 = \dot{Y} \quad (21)$$

$$\dot{Z}_2 = -[M]^{-1}[C]Z_1 - [M]^{-1}[K]Z_1 - [A][\ddot{y}_g]$$

$$Z_2 = \dot{Y} \rightarrow \dot{Z}_2 = \dot{Y} \quad (22)$$

$$\dot{Z} = AZ + BU \quad (23)$$

$$\xrightarrow{\{z_N\}^T \times} a_N = \{z_N\}^T [A] \{z_N\} \quad (33)$$

و رابطه (۳۲) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$b_{N-1}\{z_{N-1}\} = a_N\{z_N\} - [A]\{z_N\} = \{r_N\} \quad (34)$$

در رابطه (۳۴) طرف دوم معادله قابل محاسبه است. با معلوم شدن درایه های بردار $\{r_N\}$ ، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$b_{N-1}\|z_{N-1}\| = \|r_N\| \quad (35)$$

با تقسیم درایه های بردار $\{r_N\}$ بر b_{N-1} رابطه (۳۶) حاصل می شود:

$$-b_{N-2}\{z_{N-2}\} + a_N\{z_{N-1}\} - b_{N-1}\{z_N\} = [A]\{z_{N-1}\} \quad (36)$$

حال باید بردار $\{z_{N-1}\}^T$ را در طرفین معادله (۳۶) با توجه به اصل تعامد ضرب کرد:

$$\xrightarrow{\{z_{N-1}\}^T \times} a_{N-1} = \{z_{N-1}\}^T [A] \{z_{N-1}\} \quad (37)$$

با بازنویسی رابطه (۳۶) فرم معادله (۳۸) حاصل می شود:

$$b_{N-2}\{z_{N-2}\} = a_{N-1}\{z_{N-1}\} - b_{N-1}\{z_N\} - [A]\{z_{N-1}\} = \{r_{N-1}\} \quad (38)$$

با ادامه دادن این الگوریتم، علاوه بر یافتن بردارهای $\{z\}$ ، هم درایه های مربوط به ماتریس ژاکوبی $[B]$ که حاوی مشخصات مربوط به سختی و جرم سکو می باشد، بدست می آید و هم ماتریس شکل های مودی سازه، حاصل خواهد شد. در مرحله بعد برای بدست آوردن ماتریس های جرم و سختی از طریق ایجاد ماتریس ژاکوبی به صورت روابط (۳۹ و ۴۰) عمل می شود. تعریف بردار $\{p\}$:

$$\{p\} = \{1, 1, \dots, 1\}^T \quad (39)$$

با ضرب ماتریس سختی در این بردار می توان نوشت:

$$[K]\{p\} = \{k_1, 0, 0, \dots, 0\}^T \quad (40)$$

$$[L][B][L]\{p\} = \{k_1, 0, 0, \dots, 0\}^T \quad (41)$$

بردار $\{l\}$ که از ریشه دوم درایه های متناظر قطری از ماتریس جرم به دست می آید به صورت رابطه (۴۲) تشکیل می شود:

$$\{p\} = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}^T \quad (42)$$

همچنین ماتریس ژاکوبی در این بردار ضرب شده و رابطه ای به فرم معادله (۴۳) حاصل می شود:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}, \dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$Y = CZ + DU \quad (25)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{2n \times 2n} & I_{2n \times 2n} \\ [M]^{-1}[K] & [M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 \\ -[A] \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \\ D = 0 \\ U = [\ddot{y}_g] \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} Z = \{Y\} \\ \dot{Y} = \{y_1 \quad \theta_1 \quad y_2 \quad \theta_2 \quad \dots \quad y_n \quad \theta_n \quad x_d\}^T \end{cases} \quad (27)$$

$$\dot{Y} = \{\dot{y}_1 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{y}_2 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dots \quad \dot{y}_n \quad \dot{\theta}_n \quad \dot{x}_d\}^T \quad (28)$$

در روابط (۲۳ تا ۲۸)، A ماتریس حالت، B ورودی، C خروجی و D بازخورد سیستم می باشد. $I_{2 \times 2}$ و $0_{2 \times 2}$ به ترتیب بیانگر ماتریس های همانی و صفر هستند. برای سهولت تحلیل در تحلیل خطی سیستم های دینامیکی، ماتریس میرایی به دو صورت رایلی و میرایی مودال در معادلات اعمال می شود که در این پژوهش از میرایی رایلی استفاده شده است.

۴- شناسایی ماتریس ژاکوبی با روش Block Lonczos

در رابطه $[B][U] = [U][A]$ ، ماتریسی جدید تحت عنوان $[Z]$ تعریف می شود که با ترانهاد ماتریس $[U]$ برابر است. مطابق روابط (۲۹ و ۳۰) می توان نوشت:

$$[U]^T[Z] \rightarrow [Z][Z]^T = [Z]^T[Z] = [I] \quad (29)$$

$$[U]^T \times [U]^T \{[B][U]\}[U]^T = [U]^T \{[U][A]\}[U]^T \quad (30)$$

$$\rightarrow [Z][B] = [A][Z]$$

معادله (۳۰) را می توان به فرم رابطه (۳۱) بازنویسی نمود:

$$\begin{bmatrix} \{z_1\} \\ \{z_2\} \\ \dots \\ \{z_N\} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & -b_1 & & & \\ -b_1 & a_2 & -b_2 & & \\ & -b_2 & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & -b_{N-1} \\ & & & -b_{N-1} & a_N \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \{z_1\} \\ \{z_2\} \\ \dots \\ \{z_N\} \end{bmatrix}$$

در ادامه روند شناسایی می توان نوشت:

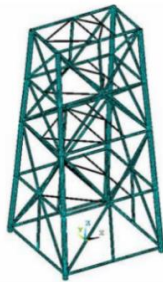
$$a_N\{z_N\} - b_{N-1}\{z_{N-1}\} = [A]\{z_N\} \quad (32)$$

با پیش ضرب بردار Z_N در دو سمت معادله (۳۲) و با توجه به خاصیت تعامد می توان نوشت:

میرایی بر روی نتایج تشخیص خرابی در ترازهای مختلف سکو، از سه درصد متفاوت برای میرایی رایلی استفاده شده است.

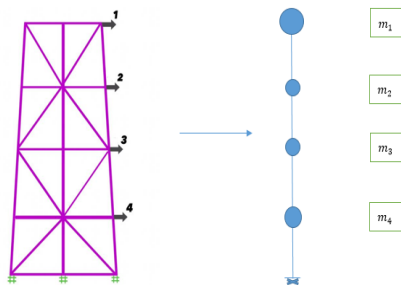
- حالت اول: میرایی رایلی ۳٪ در فرکانس مود اول و سوم
($\omega_j = \omega_3$ و $\omega_i = \omega_1$)
- حالت دوم: میرایی رایلی ۵٪ در فرکانس مود اول و سوم
($\omega_j = \omega_3$ و $\omega_i = \omega_1$)
- حالت سوم: میرایی رایلی ۷٪ در فرکانس مود اول و سوم
($\omega_j = \omega_3$ و $\omega_i = \omega_1$)

در شکل (۲) مدل سه بعدی و در شکل (۳) مدل دو بعدی نرم افزاری و مدل مرجع پیشنهادی برای توسعه روابط معکوس ارتعاشی نشان داده شده است. مقادیر سختی و جرم هر تراز در مدل دو بعدی سکوی SPD2 به شرح جدول (۱) می باشد.



شکل ۲. مدل المان محدود سه بعدی سکوی SPD2

Fig. 2. 3D Finite Element Model (FEM) of SPD2 Platform



شکل ۳. (سمت راست) مدل مرجع [13] و قاب دو بعدی (سمت چپ)

Fig. 3. (Right side) Reference Model and 2D Frame (Left side)

جدول ۱. جرم و سختی ترازها در سکو

Table 1. Mass and stiffness of the levels on the platform

Stiffness ($1000 \frac{KN}{M}$)	Mass (Ton)	Level
153.6	1156.9	1
147.8	88.7	2
146.1	81.3	3
913.8	90.2	4

$$[B]\{l\} = [B]\{l_1, l_2, \dots, l_N\}^T = \left\{ \frac{k_1}{l_1}, 0, 0, \dots, 0 \right\}^T \quad (43)$$

بردار مجهول $\{w\}$ در معادله (۴۴) صدق می کند:

$$[B]\{w\} = [B]\{w_1, w_2, \dots, w_N\}^T = \{1, 0, 0, \dots, 0\}^T = \{e_1\} \quad (44)$$

حال با انجام محاسبات ساده ماتریسی، $\{w\}$ به صورت رابطه

(۴۵) بدست می آید:

$$\{w\} = [B]^{-1}\{e_1\} \quad (45)$$

با توجه به روابط (۴۳) و (۴۴) می توان رابطه (۴۶) را تشکیل داد:

$$\{l\} = c\{w\} \quad (46)$$

در این رابطه جرم کل سیستم سکو به صورت مجموع جرم ها

در نظر گرفته می شود و ضریب c مقدار مثبت دارد.

همچنین با استفاده از رابطه (۴۲) معادله (۴۷) حاصل می شود:

$$M_T = \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n l_i^2 = \|l\|^2 = c^2 \|w\|^2 \quad (47)$$

یکی از فرضیات مهم این پژوهش، معلوم و ثابت بودن جرم

کل سیستم سکو می باشد. با علم بر این فرض و با استفاده از رابطه

(۴۷) ابتدا ضریب ثابت c تعیین می شود. در مرحله بعد با استفاده

از رابطه (۴۶) اطلاعات جرم تمامی درجات آزادی بدست می آید.

با محاسبه این بردار، ماتریس $[L]$ و در نتیجه ماتریس $[M]$ محاسبه

شده و در گام بعدی با استفاده از رابطه $[K] = [L][B][L] = [M]^{1/2}[B][M]^{1/2}$ ماتریس سختی نیز در هر لحظه از مرحله

پایش بدست می آید. تمامی محاسبات مربوط به روند حل الگوریتم

برای یافتن آسیب و تشخیص میزان تفاوت در ماتریس های سختی

بعد از وقوع خرابی در نرم افزار متلب انجام شده است.

۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- تعیین ضرایب میرایی رایلی

برای اینکه بتوان آثار مدل های میرایی رایلی روی پارامترهای

مورد نیاز در سازه را با فرکانس های مودی کاملاً مجزا بررسی کرد،

مدل های دو بعدی و سه بعدی سازه سکو در محیط محاسباتی

Openseespy ایجاد شده است.

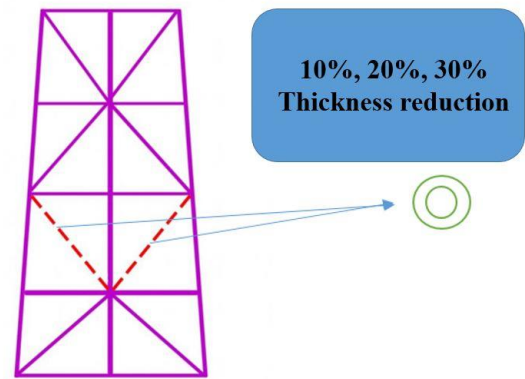
اثر P-delta در همه ی تحلیل ها در نظر گرفته شده است و

خواص دینامیکی خطی سازه از طریق تحلیل مقادیر ویژه خطی

تعیین شده است. در این پژوهش برای نشان دادن آثار مدل های

خرابی‌ها به صورت مصنوعی در مدل‌های نرم‌افزاری اعمال می‌شود. همچنین اطلاعات مربوط به مودها و فرکانس‌هایی که برای محاسبات الگوریتم ارتعاش معکوس لازم است از مدل نرم‌افزاری استخراج می‌شود.

در این مرحله به سازه‌ای که به صورت دو بعدی برشی در نرم‌افزار المان محدود مدل شده است، آسیب تعمدی اعمال می‌شود. با توجه به اینکه سازه‌های دریایی همواره در معرض امواج و مواد خورنده قرار دارند، مطابق شکل (۴) این آسیب در ضخامت عضوهای تراز سوم سکو ایجاد شده است به گونه‌ای که سختی تراز مربوطه در سه حالت به میزان ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ کاهش داشته باشد.



شکل ۴. اعمال خرابی در مدل نرم‌افزاری با سه درصد مختلف در تراز سوم سکو

Fig. 4. Applying damage in the software model at three different percentages at the third level of the platform.

۳-۵- نتایج تشخیص خرابی در مدل دو بعدی برشی سکوی دریایی

مقادیر فرکانس برای حالت اول با آسیب به میزان ۱۰٪ به شرح جدول (۲) است.

۲-۵- چگونگی اعمال خرابی به سکوی پایه ثابت در مدل نرم‌افزاری

به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات دقیق و واقعی از محل سکو،

جدول ۲. مقادیر فرکانس مدل دوبعدی قبل و بعد از اعمال آسیب ۱۰٪

Table 2. Frequency values of the 2D model before and after applying 10% damage

The natural frequency of the model before damage. rad/sec	The natural frequency of the model after damage. rad/sec
5.83	5.69

جدول ۳. سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۱۰٪

Table 3. Stiffness of the decks in the 2D shear reference model with the application of Rayleigh damping and 10% damage

Stiffness parameters of the levels($10^6\text{ }N/m$)			Values of the eigenvectors [B]		Level
Percentage of change	After Damage	Before Damage	After Damage	Before Damage	
Rayleigh damping %3					
-1.62	151.6	153.6	0.9334	0.9763	1
1.08	149.4	147.8	0.1901	0.1912	2
-5.61	137.9	146.1	0.1067	0.1000	3
-0.02	911.1	913.8	0.0126	0.0146	4
Rayleigh damping %5					
-0.09	152.1	153.6	0.9078	0.9763	1
1.01	149.3	147.8	0.1891	0.1912	2
-4.99	138.8	146.1	0.1062	0.1000	3
-0.03	910.6	913.8	0.0119	0.0146	4
Rayleigh damping %7					
-1.6	151.1	153.6	0.9098	0.9763	1
-2.4	144.2	147.8	0.1865	0.1912	2
-4.58	139.4	146.1	0.1022	0.1000	3
-0.05	909.2	913.8	0.0140	0.0146	4

جدول ۴. مقادیر فرکانس مدل دوبعدی قبل و بعد از اعمال آسیب ۲۰٪

Table 4. Frequency values of the 2D model before and after applying 20% damage

The natural frequency of the model before damage. rad/sec	The natural frequency of the model after damage. rad/sec
5.83	5.56

جدول ۵. سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۲۰٪

Table 5. Stiffness of the decks in the 2D shear reference model with the application of Rayleigh damping and 20% damage

Stiffness parameters of the levels($10^6\ N/m$)			Values of the eigenvectors [B]		Level
Percentage of change	After Damage	Before Damage	After Damage	Before Damage	
Rayleigh damping %3					
0.07	154.8	153.6	0.9229	0.9763	1
-0.06	147.7	147.8	0.1886	0.1912	2
-15.2	123.8	146.1	0.1082	0.1000	3
-0.09	912.9	913.8	0.0131	0.0146	4
Rayleigh damping %5					
1.1	155.3	153.6	0.9183	0.9763	1
-0.02	147.4	147.8	0.1872	0.1912	2
-14	125.5	146.1	0.1086	0.1000	3
-0.13	912.6	913.8	0.0129	0.0146	4
Rayleigh damping %7					
1.3	155.7	153.6	0.9171	0.9763	1
-0.03	147.3	147.8	0.1860	0.1912	2
-12.7	127.4	146.1	0.1089	0.1000	3
-0.06	913.2	913.8	0.0136	0.0146	4

جدول ۶. مقادیر فرکانس مدل دوبعدی قبل و بعد از اعمال آسیب ۳۰٪

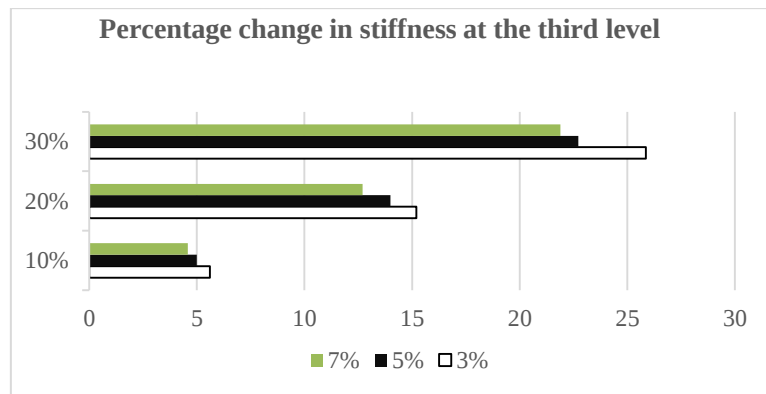
Table 6. Frequency values of the 2D model before and after applying 30% damage

The natural frequency of the model before damage. rad/sec	The natural frequency of the model after damage. rad/sec
5.83	5.31

جدول ۷. سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۳۰٪

Table 7. Stiffness of the decks in the 2D shear reference model with the application of Rayleigh damping and 30% damage

Stiffness parameters of the levels($10^6\text{ }N/m$)			Values of the eigenvectors [B]		Level
Percentage of change	After Damage	Before Damage	After Damage	Before Damage	
Rayleigh damping %3					
-4.8	146.1	153.6	0.9801	0.9763	1
-3.5	142.6	147.8	0.1975	0.1912	2
-25.87	108.3	146.1	0.1102	0.1000	3
-0.9	905.4	913.8	0.0149	0.0146	4
Rayleigh damping %5					
-4.1	147.2	153.6	0.9804	0.9763	1
-3	143.3	147.8	0.1987	0.1912	2
-22.72	112.9	146.1	0.1093	0.1000	3
-0.84	906.1	913.8	0.0154	0.0146	4
Rayleigh damping %7					
-2.8	149.2	153.6	0.9814	0.9763	1
-2.6	143.9	147.8	0.1977	0.1912	2
-21.9	114.1	146.1	0.1091	0.1000	3
-0.6	907.5	913.8	0.0148	0.0146	4



شکل ۵. نمودار تشخیص درصد خرابی مدل دوبعدی در ۳ حالت میرایی

Fig. 5. Diagram of damage percentage detection in 2D model under three damping conditions

سکوهای فراساحلی میرا، به منظور تشخیص خرابی ایجاد شده در سازه بررسی شد. الگوریتم ارائه شده در حوزه فرکانس و با استفاده از مودهای نرمال شده توسعه داده شده است. با توجه به اهمیت تعامل مودهای ارتعاشی در این روش نسبت به ماتریس های سختی و جرم، سیستم مورد نظر به صورت خطی و میرایی آن نیز به صورت کلاسیک در نظر گرفته شده است. با این حال با انتخاب مدل میرایی از نوع میرایی رایلی، این خاصیت در ماتریس میرایی نیز برقرار خواهد بود. در ادامه روند پژوهش برای مشخص نمودن اطلاعات مودی مورد نیاز این الگوریتم مانند شکل های مودی، بردارهای مقادیر ویژه و دیگر ماتریس های اصلی سیستم به انجام یک تحلیل دینامیکی روی مدل دوبعدی سکوی SPD2 و تحت بار امواج حوزه خلیج فارس پرداخته شد. نتایج حاکی از آن بود که تنها مودهای اول و اصلی سکوی مورد مطالعه، قابل اندازه گیری می باشد. میرایی رایلی در سه حالت مختلف (۳، ۵ و ۷ درصد) برای تشخیص آسیب مورد بررسی قرار گرفت. مزیت استفاده از این مدل میرایی در توسعه روش های مودال این بود که اشکال مودی مورد استفاده در محاسبات دستخوش تغییری نسبت به سکوی نامیرا نمی شود. پس می توان فقط با انجام عملیات ریاضی بیشتر برای محاسبه ماتریس سختی در معادلات ارتعاشی اقدام نمود. محاسبات الگوریتم ابتدا در مدلی از نوع برشی ساده انجام شد. محاسبه سختی ترازها با اعمال این روش بعد از آسیب تعمدی ایجاد شده در یکی از ترازهای سکو بیانگر آن بود که الگوریتم مورد نظر در سطح شناسایی خرابی و تشخیص موقعیت آسیب، عملکرد قابل قبولی دارد. همچنین با افزایش درصد میرایی، دقت محاسبه میزان آسیب کاهش می یابد. با مقایسه نمودارهای تشخیص آسیب مربوط به تراز سوم سکوی دریایی مورد مطالعه، مناسب ترین حالت های تشخیص آسیب مربوط به

مرحله بعد بدست آوردن پارامترهای سختی ترازها و مقادیر بردارهای نرمال ویژه مربوط به مدل مرجع پیشنهادی، مطابق اطلاعات مودی و فرکانسی بدست آمده از مدل نرم افزاری، قبل و بعد از اعمال خرابی می باشد.

در این مرحله از سه مدل میرایی رایلی معرفی شده به منظور توسعه روابط الگوریتم استفاده شده است و نتایج هر یک از مدل ها در جدول (۳) ارائه شد. مقادیر فرکانس برای حالت اول با آسیب به میزان ۲۰٪ به شرح جدول (۴) است. بطور مشابه سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۲۰٪ در جدول (۵) ارائه شده است.

مقادیر فرکانس برای حالت اول با آسیب به میزان ۳۰٪ به شرح جدول (۶) و سختی ترازها در مدل مرجع دو بعدی برشی با اعمال میرایی رایلی و آسیب ۳۰٪ در جدول (۷) ارائه شده است. ضمناً نمودار تشخیص درصد خرابی مدل دوبعدی در ۳ حالت میرایی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در شکل (۵) ارائه شده است.

همان گونه که در جداول (۲ تا ۷) مشاهده می شود، الگوریتم ارتعاش معکوس به خوبی تراز آسیب دیده در سکو را (تراز سوم) مشخص کرده است اما به دلیل اختلاف ماهیتی مدل سازی مرجع و مدل نرم افزاری در تشخیص دقت میزان خرابی در تراز عملکرد خوبی نشان نمی دهد. فرکانس های طبیعی مدل نیز در اثر اعمال خرابی مطابق انتظار کاهش داشته اند. در بین مدل های میرایی رایلی وارد شده در روند حل محاسبات نیز در خرابی های مختلف، حالت اول (میرایی رایلی ۳٪)، عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش روش کلی مبتنی بر الگوریتم ارتعاش معکوس در

محاسبات با میرایی رایلی ۳٪ می باشد.

به منظور بررسی های بیشتر به پژوهشگران آتی پیشنهاد می شود که روند حل معادلات در قاب های سه بعدی میرا شده توسعه دهند.

قدردانی نویسندگان

از حمایت های دانشکده عمران دانشگاه تبریز جهت فراهم کردن شرایط مناسب تحقیق و پژوهش قدردانی می گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافع وجود ندارد.

سهم نویسندگان

روح الله نجفی ۳۵٪، محمدعلی لطف اللهی یقین ۳۵٪ و علیرضا مجتهدی ۳۰٪ در فرآیند انجام این پژوهش نقش داشته اند.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

- [1] Zhang, W. and Ma, H., 2020. A hybrid damage detection method based on vibration modes and damping variation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 143, p.106822.
- [2] Khosravan, A., Asgarian, B. and Shokrgozar, H.R., 2021. Improved modal strain energy decomposition method for damage detection of offshore platforms using data of sensors above the water level. *Ocean Engineering*, 219, p.108337. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108337.
- [3] Khan, M.W., Akmal Din, N. and Ul Haq, R., 2020. Damage detection in a fixed-fixed beam using natural frequency changes. *Vibroengineering Procedia*, 30, pp.38-43. doi: 10.21595/vp.2019.21081.
- [4] Liu, G., Chen, G., Jiao, J. and Jiang, R., 2015. Dynamics modeling and control simulation of an autonomous underwater vehicle. *Journal of Coastal Research*, 73(SI), pp.741-746..
- [5] Alavinezhad, M., Hassanabad, M.G., Ketabdari, M.J. and Nekooei, M., 2022. Numerical and experimental structural damage detection in an offshore flare bridge using a proposed modal strain energy method. *Ocean Engineering*, 252, p.111055. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111055.
- [6] Huang, Z., Zang, C., Zhang, G. and Friswell, M.I., 2020. Mode shape transformation for model error localization with modal strain energy. *Journal of Sound and Vibration*, 473, p.115230.
- [7] Li, Y., Wang, S., Zhang, M. and Zheng, C., 2016. An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures. *Journal of Marine Science and Application*, 15(2), pp.182-192.
- [8] Kianian, M., Golafshani, A.A. and Ghodrati, E., 2013. Damage detection of offshore jacket structures using frequency domain selective measurements. *Journal of Marine Science and Application*, 12(2), pp.193-199. doi: 10.1007/s11804-013-1185-y.
- [9] Cosoli, G., Martarelli, M., Mobili, A., Tittarelli, F. and Revel, G.M., 2023. Damage identification in cement-based structures: A method based on modal curvatures and continuous wavelet transform. *Sensors*, 23(22), p.9292. doi: 10.3390/s23229292.
- [10] Dolatshahi, K.M. and Rofooei, F.R., 2014. Inverse vibration problem for un-damped 3-dimensional multi-story shear building models. *Journal of Sound and Vibration*, 333(1), pp.99-113. doi: 10.1016/j.jsv.2013.08.045.
- [11] Elshafey, A.A., Haddara, M.R. and Marzouk, H., 2008. The use of random decrement technique for health monitoring of structures. In: *5th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-V)*, Winnipeg, Manitoba, Canada, 22-24 September.
- [12] Gilbert, S. and Ayyub, B.M., 2016. Models for the economics of resilience. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2(4). doi: 10.1061/AJRUA6.0000867.
- [13] Haeri, M.H., Lotfi, A., Dolatshahi, K.M. and Golafshani, A.A., 2017. Inverse vibration technique for structural health monitoring of offshore jacket platforms. *Applied Ocean Research*, 62, pp.181-198. doi: 10.1016/j.apor.2016.11.010.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Najafi, R., Lotfollahi Yaghin, M.A. and Mojtahedi, A., 2026. Evaluation of the Performance of the Inverse Vibration Algorithm in Damage Detection of a 2D Shear Model in a Damped Offshore Platform. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.35-46.



Investigation of Finite Element Model Updating Process Using POD Mode Shapes and Modal Flexibility Criterion

Salman Rahimian¹, Mousa Mahmoudi Sahebi^{2*} , Mojtaba Kerimaei Tabarestani³, Ali Nabizadeh⁴

1. Ph.D. Student in Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University Tehran
2. Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University Tehran
3. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University Tehran
4. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University Tehran

Abstract

Finite element model updating (FEMU) plays a crucial role in structural health monitoring by improving the accuracy of numerical models in representing real structures. Traditional model updating methods typically rely on experimental modal analysis (EMA), where natural frequencies and ordinary mode shapes are extracted and compared with numerical predictions. However, recent advancements in modal identification techniques have introduced alternative approaches, such as the Proper Orthogonal Decomposition (POD), which has shown promise in reducing data dimensionality and extracting dominant modal characteristics. Despite its advantages, the effectiveness of POD mode shapes in finite element model updating has not been extensively evaluated, particularly in terms of their impact on convergence speed, accuracy, and robustness against noise.

This study investigates the efficiency of POD mode shapes in FEMU compared to conventional mode shapes by considering three different damage scenarios in a steel bridge with a concrete deck. The bridge model was developed in SAP2000, where both undamaged and damaged states were simulated. Damage scenarios included (1) a 20% reduction in the height of a main girder, (2) a 20% reduction in the flange and web thickness of the same girder, and (3) a 20% reduction in the elastic modulus of the main girders. The dynamic response of the bridge was obtained through numerical simulations, and both ordinary mode shapes (OMS) and POD mode shapes were extracted. The optimization process was conducted using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, with two different objective functions: the flexibility-based objective function and the Modal Assurance Criterion (MAC)-based objective function.

The results demonstrated that the use of POD mode shapes significantly improved the convergence rate of the optimization process. Specifically, in all three damage scenarios, the number of iterations required for convergence was considerably lower when using POD mode shapes compared to conventional mode shapes. Additionally, the accuracy of the estimated parameters was enhanced, particularly when using flexibility as the objective function. It was also observed that the first two POD modes provided results comparable to the first five ordinary modes, indicating that fewer mode shapes were required for achieving the same level of accuracy.

Furthermore, the influence of measurement noise was examined to assess the robustness of POD mode shapes in FEMU. Different levels of Gaussian white noise (1%, 5%, and 10%) were introduced to the acceleration responses before extracting the POD mode shapes. The analysis revealed that the first two natural frequencies remained stable under low noise levels (1% and 5%), whereas higher mode frequencies exhibited increased variations as noise intensity increased. However, even under 10% noise, the first two modes retained their reliability, demonstrating the resilience of POD mode shapes against noise effects. The impact of noise on the optimization process was also evaluated, and while higher noise levels led to an increased number of iterations for convergence, the final updated parameters remained close to the actual values.

Overall, this study highlights the advantages of employing POD mode shapes in FEMU, particularly in reducing computational costs and improving model accuracy. The results suggest that incorporating POD-based modal information into FEMU frameworks can enhance the reliability and efficiency of structural model updating. Moreover, the flexibility-based objective function, when combined with POD mode shapes, proved to be a more effective criterion for damage detection compared to the MAC-based objective function. These findings contribute to the growing body of research advocating for the adoption of advanced modal identification techniques in structural health monitoring and numerical model updating.

Review History

Received: May 7, 2025

Revised: Oct 11, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Finite element model updating

POD mode shapes

Ordinary mode shapes

Modal flexibility

Structural damage detection

PSO optimization

* Corresponding Author Email: m.mahmoudi@srut.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9533-9597

بررسی فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود با استفاده از شکل مودهای POD و معیار انعطاف‌پذیری

سلمان رحیمیان^۱، موسی محمودی صاحبی^{۲*} , مجتبی کریمایی طبرستانی^۳، علی نبی زاده^۴

۱. دانشجوی دکتری عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

۲. استاد، دانشکده عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

۳. دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

۴. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این پژوهش، فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود یک پل فولادی با عرشه بتنی با استفاده از شکل مودهای معمولی و شکل مودهای حاصل از تجزیه متعامد مناسب (POD) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، مقایسه دقت و کارایی این دو روش در سه سناریوی مختلف آسیب، شامل کاهش ارتفاع تیر اصلی، کاهش ضخامت بال و جان تیر، و کاهش مدول الاستیسیته، است. برای این منظور، دو مدل عددی از پل، یکی در حالت سالم و دیگری در شرایط آسیب‌دیده، در نرم‌افزار SAP2000 ایجاد شده و داده‌های دینامیکی هر دو مدل استخراج شده‌اند. سپس، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل آسیب‌دیده بر اساس تطابق با مدل مرجع به کار گرفته شده است. در این فرایند، دو تابع هدف مبتنی بر معیار انعطاف‌پذیری و معیار اطمینان مودال (MAC) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، تأثیر تعداد مودها در فرایند به‌روزرسانی و اثر نویز بر استخراج فرکانس‌های طبیعی نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از شکل مودهای POD باعث بهبود همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی و کاهش خطای محاسباتی می‌شود. همچنین، دو مود اول در روش POD عملکردی معادل پنج مود اول در روش معمولی ارائه می‌دهند. معیار انعطاف‌پذیری، به ویژه در ترکیب با شکل مودهای POD، دقت بالاتری در به‌روزرسانی مدل نشان داد. علاوه بر این، تحلیل اثر نویز نشان داد که افزایش نویز تأثیر بیشتری بر مودهای بالاتر دارد، درحالی‌که دو مود اول پایداری بیشتری دارند. هرچند افزایش نویز منجر به افزایش گام‌های همگرایی می‌شود، اما مقدار بهینه پارامترهای مدل همچنان به مقدار واقعی نزدیک خواهد شد.

کلمات کلیدی

به‌روزرسانی مدل اجزای محدود
شکل مودهای POD
معیار انعطاف‌پذیری
تحلیل دینامیکی سازه‌ها
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۱- مقدمه

فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای سازه را ارائه می‌دهند که در طراحی، بهینه‌سازی، و شناسایی آسیب‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. شکل مودهای معمولی که از تحلیل‌های مودال استخراج می‌شوند، نقشی کلیدی در شناسایی آسیب‌های سازه‌ای

تحلیل دینامیکی سازه‌ها یکی از ابزارهای مهم مهندسی عمران است که برای شناسایی رفتار سازه‌ها در مواجهه با بارهای دینامیکی به کار گرفته می‌شود. این تحلیل‌ها اطلاعاتی مانند

* رایانامه نویسنده مسئول: m.mahmoudi@sru.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9533-9597

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



در تحقیقات اخیر، استفاده از شکل مودهای POD در به‌روزرسانی مدل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش‌ها، تابع هدف بر اساس اختلاف شکل مودهای POD عددی و آزمایشگاهی تعریف شده است، باین وجود نیاز به بهبود تعریف تابع هدف و افزایش دقت به‌روزرسانی مدل احساس شده است [9].

گالوانتو و ویولاریس [10] یک روش مبتنی بر POD برای تعیین موقعیت آسیب در سازه‌ها ارائه نمودند. آن‌ها با استفاده از اختلاف شکل مود POM در دو حالت سالم و آسیب‌دیده، محل تقریبی آسیب را در مدل‌های عددی شناسایی کردند. طبق نظر این پژوهشگران دقت بالای روش ممکن است به دلیل استفاده از سازه‌های ساده باشد و برای سازه‌های پیچیده‌تر نیاز به بررسی بیشتری دارد.

زایری و محمودی [9] در تحقیق دیگری اقدام به ارائه یک روش جدید مبتنی بر POD برای به‌روزرسانی مدل‌های اجزای محدود (FEM) نمودند. تابع هدف در این روش بر اساس چگالی طیفی توان (PSD) داده‌های لرزه‌ای در مختصات مودال مناسب تعریف شد. آنها نشان دادند که استفاده از این تابع هدف، که اطلاعات فرکانس‌ها، نسبت‌های میرایی و مودهای متعامد مناسب را ادغام می‌کند، نسبت به روش‌های پیشین عملکرد بهتری، به‌ویژه در شرایط داده‌های دارا نویز دارد.

در پژوهش حاضر از تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری مودال برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود استفاده شد. طبق بررسی‌های انجام شده توسط پژوهشگران حاضر این موضوع برای اولین بار انجام می‌شود. در این تحقیق، سه سناریوی مختلف از آسیب‌های محتمل در یک مدل عددی پل بررسی شده و نتایج به دست آمده با روش‌های مرسوم مقایسه شده است. درواقع، رویکرد این پژوهش که ترکیب شکل مودهای POD و تحلیل انعطاف‌پذیری است، به عنوان گامی نوآورانه در به‌روزرسانی مدل‌های عددی و شناسایی رفتار واقعی سازه‌ها ارائه می‌شود. این روش نه تنها دقت شناسایی پارامترهای مدل را افزایش می‌دهد، بلکه پتانسیل بالایی در کاهش حساسیت به داده‌های حاوی نویز و غیردقیق دارد که در تحقیقات پیشین کمتر موردتوجه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش باهدف بررسی

ایفا می‌کنند. این شکل مودها، که از داده‌های شتاب‌نگاری یا پاسخ‌های دیگر سازه به دست می‌آیند، امکان بررسی دقت مدل‌های عددی را فراهم می‌کنند [2]. جایشی و همکاران [3]، انعطاف‌پذیری مودال را به‌عنوان یک معیار قدرتمند در به‌روزرسانی مدل‌های اجزای محدود سازه‌های واقعی معرفی کردند. در پژوهش ایشان، یک پل واقعی بررسی شد و با استفاده از شکل مودهای معمولی و معیار انعطاف‌پذیری مودال، یک مدل عددی به‌روز و دقیق ارائه شد و نشان داد این رویکرد می‌تواند تطابق بهتری بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی ایجاد کند. ژانگ و همکاران [4] اهمیت معیار انعطاف‌پذیری شکل مود را در به‌روزرسانی مدل‌های اجزای محدود نشان دادند. آنها نشان دادند که استفاده از این معیار به عنوان تابع هدف، می‌تواند برای شناسایی آسیب در سازه‌های واقعی به کار رود. با این حال، مکان‌یابی آسیب‌های کوچک در سازه‌های بزرگ همچنان نیازمند تحقیقات بیشتری است.

روش تجزیه مودهای مناسب (POD^1) به‌عنوان ابزاری کارآمد برای کاهش ابعاد داده‌ها معرفی شده است که توانایی استخراج اطلاعات غالب را از سیگنال‌های پیچیده دارد. این روش با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد (SVD^2) شکل مودهای غالب را شناسایی می‌کند که تنها مودهای مهم را نگه می‌دارد که کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مهندسی سازه، دینامیک سیالات و سایر زمینه‌های مرتبط داشته است [5-8]. زایری و محمودی [8] به بررسی قابلیت مودهای متعامد مناسب (POM^3) در تعیین فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی سامانه‌های خطی پرداختند. آنها نشان دادند که استفاده از شکل مودهای POM می‌تواند فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی را حتی در شرایط داده‌های آلوده به نویز به‌دقت شناسایی کند. آنها همچنین بر کاهش مرتبه مدل با استفاده از POD و تحلیل فرکانس مبتنی بر چگالی طیفی توان (PSD) تمرکز کردند.

اگرچه تحقیقات زیادی درباره کاربرد روش POD در زمینه دینامیک سازه‌ها صورت گرفته است، بیشتر این مطالعات از این روش برای شناسایی شکل مودها و کاهش ابعاد داده‌ها استفاده کرده‌اند و به ندرت به بررسی تطابق آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی یا عددی پرداختند.

¹ Proper Orthogonal Decomposition

² Singular Value Decomposition

³ Proper Orthogonal Modes

- انتخاب متغیرهای بهینه‌سازی: پارامترهایی مانند سختی، جرم، یا هندسه سازه به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند. این متغیرها باید حساسیت بالایی به رفتار دینامیکی سازه داشته باشند [3].
- استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی: برای کمینه‌کردن تابع هدف و یافتن مقادیر بهینه متغیرها، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و ... استفاده می‌شود [12].

۲-۲- معیارهای مورد استفاده در به‌روزرسانی مدل

در به‌روزرسانی مدل اجزای محدود با تعریف معیارهایی به عنوان تابع هدف، اقدام به مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده از مدل عددی سازه از یک طرف و نتایج اندازه‌گیری‌شده از طرف دیگر می‌شود به‌این‌ترتیب با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، پارامترهای مدل اصلاح می‌شود.

در این پژوهش، دو معیار اصلی برای به‌روزرسانی مدل مورد استفاده قرار گرفته است: معیار انعطاف‌پذیری شکل مودها و معیار MAC^2 . معیار انعطاف‌پذیری شکل مودها بر اساس ماتریس انعطاف‌پذیری که از شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی استخراج می‌شود، اختلاف بین رفتار مدل بدون آسیب و مدل آسیب‌دیده را ارزیابی می‌کند. برای تبدیل ماتریس‌های انعطاف‌پذیری به یک مقدار عددی قابل مقایسه، از فریبیوس نرم استفاده شده است. این روش با اندازه‌گیری تفاوت کل بین ماتریس‌های انعطاف‌پذیری مدل بدون آسیب و مدل آسیب‌دیده، امکان ارزیابی دقت به‌روزرسانی را فراهم می‌کند [3].

از سوی دیگر، معیار MAC به مقایسه مستقیم بردارهای مودال در مدل بدون آسیب و مدل آسیب‌دیده می‌پردازد. این معیار با ارائه مقداری بین صفر و یک، میزان تطابق شکل مودها را به‌طور مستقیم ارزیابی می‌کند. مقدار MAC نزدیک به یک، نشان‌دهنده تطابق بالای شکل مودها است.

- ترکیب دو معیار بالا دیدگاهی جامع نسبت به دقت و کارایی به‌روزرسانی مدل ارائه می‌دهد. در ادامه، جزئیات مربوط به محاسبه و استفاده از این معیارها در فرایند به‌روزرسانی شرح داده می‌شود.
- **معیار MAC :** این معیار برای مقایسه شکل مودهای مدل عددی سازه بدون آسیب و سازه آسیب‌دیده استفاده می‌شود و تطابق

دقت و کارایی روش‌های مختلف به‌روزرسانی مدل اجزای محدود، شامل شکل مودهای معمولی و شکل مودهای حاصل از تجزیه متعامد مناسب (POD)، تدوین شده است. در این راستا ابتدا مدل عددی یک پل در نرم‌افزار SAP2000 ایجاد شد و با اعمال سناریوهای مختلف آسیب‌پذیری، شتاب‌های سازه تحت بارگذاری محیطی استخراج شد. در این پژوهش، داده‌های استخراج‌شده از مدل اولیه (بدون آسیب) به‌عنوان مبنای مقایسه و مرجع برای تحلیل‌های بعدی در نظر گرفته شده‌اند. این داده‌ها برای استخراج شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی و ارزیابی دقت فرایند به‌روزرسانی مدل مورد استفاده قرار گرفتند در ادامه، با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد (SVD)، شکل مودهای POD از داده‌های شتاب استخراج شدند و فرکانس‌های متناظر آن‌ها با بهره‌گیری از روش طیفی Welch تعیین شدند. سپس، برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود، از دو تابع هدف مجزا استفاده شد: معیار انعطاف‌پذیری شکل مودها و معیار MAC . الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) به عنوان ابزار بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی اختلاف بین داده‌های سازه آسیب‌دیده و بدون آسیب به کار گرفته شد.

به منظور ارزیابی جامع، سه سناریوی آسیب شامل کاهش ارتفاع تیر اصلی، کاهش ضخامت تیر، و کاهش مدول الاستیسیته تیرها در مدل عددی تعریف شدند. اثر بارگذاری محیطی و نویز بر دقت شناسایی نیز در این تحقیق بررسی شد تا نتایج حاصل از شکل مودهای معمولی و POD با یکدیگر مقایسه شوند.

۲-۱- به‌روزرسانی مدل اجزای محدود

به‌روزرسانی مدل اجزای محدود^۱ یکی از ابزارهای کلیدی برای بهبود دقت مدل‌های عددی در مهندسی سازه به شمار می‌آید. این روش تلاش می‌کند تا تفاوت‌های میان پاسخ‌های دینامیکی مدل عددی و داده‌های تجربی را به حداقل برساند و از این طریق، مدل عددی را به رفتار واقعی سازه نزدیک‌تر کند. فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود شامل مراحل زیر است:

- **تعریف تابع هدف:** تابع هدف معمولاً بر اساس اختلاف پارامترهای دینامیکی مانند فرکانس‌ها، شکل مودها، یا ماتریس انعطاف‌پذیری میان مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی تعریف می‌شود [11].

² Modal Assurance Criterion

¹ Finite Element Model Updating - FEMU

(SVD) استوار است. در این روش، ماتریس A که شامل داده‌های پاسخ یک سازه مانند شتاب است، مورد تجزیه قرار می‌گیرد. هر ستون این ماتریس نشان‌دهنده داده‌های ثبت‌شده توسط یک حسگر در طول زمان است. برای استخراج شکل مدهای POD، فرایند تجزیه مقادیر منفرد ماتریس A بر اساس رابطه زیر انجام می‌شود:

$$USV^T = A \quad (4)$$

که در آن U نشان‌دهنده شکل مدهای POD است، S ماتریس قطری مقادیر منفرد است که اطلاعات انرژی مدها و اهمیت هر مود را نشان می‌دهد و V ماتریس ضرایب زمانی است که میزان مشارکت هر مود را در بازسازی داده‌ها نشان می‌دهد.

یکی از ویژگی‌های کلیدی روش POD این است که شکل مدهای استخراج‌شده سامانه به ترتیب کاهش سهم انرژی آن‌ها مرتب می‌شوند، به طوری که مدهای اولیه بیشترین سهم از انرژی سیستم را دارند. به عبارت دیگر، شکل مود اول POD بیشترین مقدار انرژی را دارد و مدهای بعدی به ترتیب سهم کمتری دارند. این ویژگی موجب می‌شود که در تحلیل‌های مهندسی، با در نظر گرفتن تنها چند مود اول، رفتار دینامیکی سازه را با دقت قابل قبولی توصیف کرد، بدون آنکه نیاز به پردازش تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده باشد.

روش POD در تحلیل دینامیکی سازه‌ها دارای مزایای زیر است [14]:

- کاهش ابعاد داده‌ها: این روش با فیلتر کردن مدهای کم‌انرژی، داده‌های پیچیده را به مدلی ساده‌تر و قابل‌مدیریت تبدیل می‌کند.
 - شناسایی مدهای غالب: مدهای غالب استخراج‌شده از POD، ویژگی‌های مهم سازه را نمایش می‌دهد و اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار دینامیکی سامانه فراهم می‌کند.
 - حساسیت بالا به تغییرات سازه‌ای: روش POD تغییرات کوچک در رفتار دینامیکی سازه را شناسایی کرده و به عنوان ابزاری برای شناسایی آسیب به کار گرفته می‌شود.
- به طور کلی، روش POD به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد خود در کاهش حساسیت به نویز و استخراج ویژگی‌های غالب، به عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی شناخته شده است.

کلی آن‌ها را بررسی می‌کند [13]. رابطه زیر چگونگی محاسبه پارامتر MAC را نشان می‌دهد:

$$MAC(\phi_i, \phi_j) = \frac{(\phi_i \times \phi_j^T)^2}{(\phi_i \times \phi_i^T) \times (\phi_j \times \phi_j^T)} \quad (1)$$

که در آن ϕ_i شکل مود i ام سازه آسیب‌دیده و ϕ_j شکل مود j ام سازه بدون آسیب است. MAC عددی بین ۰ و ۱ است که مقدار ۱ نشان‌دهنده تطابق کامل است.

- معیار Frobenius Norm: این معیار برای مقایسه دو ماتریس انعطاف‌پذیری استفاده می‌شود و حساسیت کمتری نسبت به تغییرات کوچک دارد. رابطه زیر چگونگی محاسبه فربنیوس نرم را نشان می‌دهد:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (F_{exp}(i,j) - F_{num}(i,j))^2} = \|F_{exp} - F_{num}\| \quad (2)$$

که در آن F_{exp} ماتریس انعطاف‌پذیری آزمایشگاهی و F_{num} ماتریس انعطاف‌پذیری عددی است.

برای محاسبه ماتریس انعطاف‌پذیری از شکل مدها و فرکانس‌های طبیعی به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$[F] = \sum_{j=1}^{N_m} \frac{1}{\omega_j^2} \{\phi_j\} \{\phi_j\}^T \quad (3)$$

که در آن ω_j^2 فرکانس طبیعی متناظر با ϕ_j شکل مود، $\{\phi_j\}$ ماتریس شکل مود j ام و N_m تعداد کل شکل مدها است.

ماتریس انعطاف‌پذیری شکل مود ابزاری حساس و کارآمد برای شناسایی آسیب‌ها و به‌روزرسانی مدل است [3].

۲-۳- تجزیه متعامد مناسب POD^۱

تجزیه متعامد مناسب (POD) به عنوان یکی از روش‌های تحلیل داده‌های دینامیکی و کاهش ابعاد سامانه‌ها، کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی سازه، دینامیک شاره‌ها و سازه‌ها یافته است. این روش بر اساس اصل کاهش ابعاد و شناسایی مدهای غالب عمل می‌کند و در بسیاری از مسائل مهندسی، مانند شناسایی آسیب و به‌روزرسانی مدل‌های عددی، مورد استفاده قرار گرفته است [14]. روش تجزیه متعامد مناسب (POD) بر پایه تجزیه مقادیر منفرد

¹ Proper Orthogonal Decomposition

۴-۲- مدل‌سازی عددی سازه

مدل‌سازی عددی به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در تحلیل و شبیه‌سازی رفتار سازه‌ها، نقش اساسی در تحقیقات مهندسی سازه ایفا می‌کند. این فرایند امکان بررسی ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها و پیش‌بینی رفتار آن‌ها تحت شرایط مختلف را فراهم می‌سازد. در این پژوهش، روند مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتواند شرایط واقعی سازه و تأثیر تغییرات سازه‌ای را به‌دقت شبیه‌سازی کند. در این بخش، فرایند مدل‌سازی شامل ایجاد مدل اجزای محدود سازه، تعریف شرایط مرزی و بارگذاری، و محاسبه پاسخ دینامیکی سازه ارائه می‌شود. همچنین چگونگی به‌دست‌آوردن داده‌های لازم برای استخراج شکل مودهای معمولی و POD و همچنین چگونگی استفاده از این داده‌ها در به‌روزرسانی مدل بررسی می‌شود.

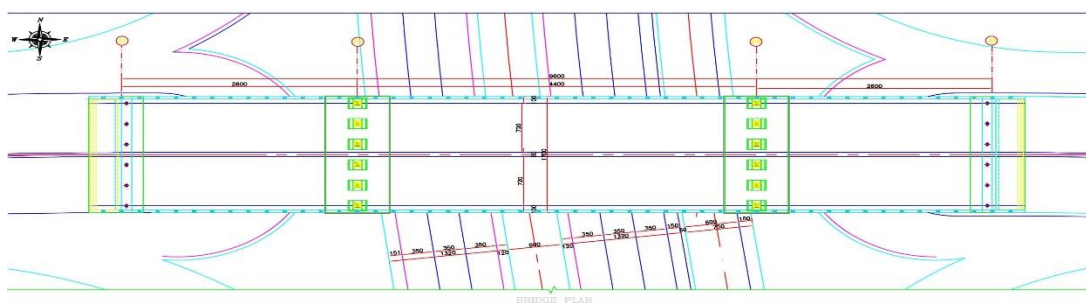
۴-۲-۱- مشخصات پل مورد مطالعه

پل مورد مطالعه یک پل فولادی با عرشه بتنی است که در تقاطع بزرگراه بابایی و بلوار حجازی در شهر تهران قرار دارد.

اطلاعات مربوط به طراحی و مشخصات هندسی این پل از نقشه‌های ارائه‌شده توسط شهرداری شهر تهران تهیه شده است. طول این پل ۹۶ متر و عرض آن ۱۷ متر است. عرشه پل به‌طور متوسط دارای ضخامت بتنی ۲۰ سانتی‌متر است و توسط ۶ تیر اصلی با مقطع I شکل پشتیبانی می‌شود.

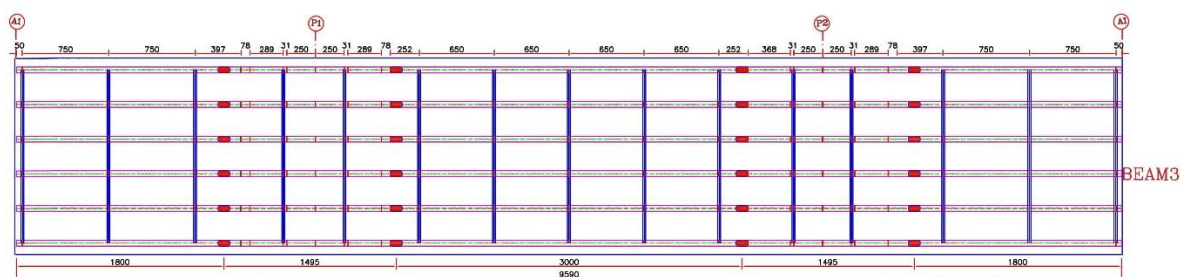
پل در فواصل ۲۶ متری ابتدا و انتها دارای ۶ ستون فلزی است و دو انتهای آن روی کوله‌هایی مستقر شده‌اند که وظیفه انتقال بار به زمین را بر عهده دارند. همچنین دیافراگم‌های کف عرشه که از تیرآهن‌های I شکل تشکیل شده‌اند، پایداری سازه را در برابر بارهای جانبی و ارتعاشات تأمین می‌کنند.

در شکل (۱)، پلان کلی پل و در شکل (۲) موقعیت تیرهای اصلی و دیافراگم‌های کف عرشه پل و در شکل (۳) تصویر واقعی پل ارائه شده‌اند. با توجه به شکل (۲) موقعیت تیر BEAM3 مشخص است که در این تحقیق پارامترهای این تیر به‌روزرسانی خواهد شد.



شکل ۱. نمای کلی از پلان هندسی پل مطابق با نقشه‌های اجرایی

Fig. 1. Overview of the bridge geometric plan based on the construction drawings.



شکل ۲. موقعیت تیرهای اصلی و تیر BEAM3 و دیافراگم‌های کف عرشه پل

Fig. 2. Location of the main girders, BEAM3, and deck diaphragms of the bridge.

سانتی متر مربع است. فولاد مصرفی در کلیه قطعات تیرها و ستون‌ها از نوع GRADE50 معادل ST52-3 است.

۲-۴-۳- بارگذاری و استخراج شکل مودهای دینامیکی سازه

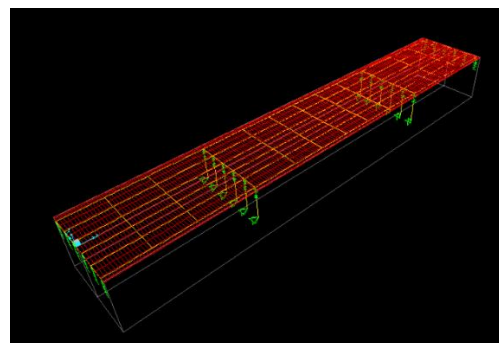
با توجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق مقایسه شکل مودهای معمولی و شکل مودهای POD در به‌روزرسانی پل است، در ابتدا، مدل سالم سازه بر اساس مشخصات هندسی و مصالح موجود ایجاد شد و سپس با تحلیل مودال، شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی پل در نرم‌افزار SAP2000 استخراج شدند. در مرحله بعد برای استخراج شکل مودهای POD ابتدا شتاب‌ها در ۱۴ گره از عرشه پل استخراج شدند. این گره‌ها متناظر با موقعیت‌های حسگرهای فرضی هستند که به صورت یکنواخت در طول عرشه توزیع شده‌اند. در این مرحله، از بار گوسی سفید برای شبیه‌سازی بارگذاری محیطی استفاده شد. این بارگذاری با استفاده از فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ هرتز و گام زمانی ۰/۱ ثانیه در نرم‌افزار متلب ساخته شد و در ادامه با فایل متنی حاوی داده‌های گوسی سفید در نرم‌افزار SAP2000 وارد شد. در مرحله بعد به کمک تحلیل تاریخچه زمانی شتاب‌های حاصل در ۱۴ نقطه از عرشه ثبت و به نرم‌افزار متلب منتقل شد. سپس ماتریس شتاب با ابعاد 101×14 برای تحلیل‌های بعدی تهیه شد. داده‌ها در این ماتریس به ترتیب در ستون‌ها متناظر با هر حسگر و در سطرها متناظر با گام‌های زمانی ذخیره شدند. پس از استخراج ماتریس شتاب از نقاط مختلف سازه، از روش تجزیه مقادیر منفرد (SVD) برای تعیین شکل مودهای POD استفاده شد. از میان مودهای استخراج‌شده، تعداد محدودی از مودها انتخاب شدند که بخش اعظم انرژی سیستم را در بردارند. در این پژوهش، پنج مود اول به‌عنوان شکل مودهای POD برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شدند. این فرایند امکان کاهش ابعاد داده‌ها و استخراج ویژگی‌های غالب دینامیکی سامانه را فراهم می‌آورد که در نهایت به کاهش حساسیت تحلیل‌ها به نویز و اطلاعات نامطمئن کمک می‌کند.

پس از استخراج شکل مودهای POD، برای تعیین فرکانس‌های طبیعی متناظر، از روش [15] Welch استفاده شد. این روش که بر پایه تحلیل چگالی توان طیفی یا PSD^۱ است، ابزار قدرتمندی برای شناسایی فرکانس‌های غالب در سیگنال‌های دینامیکی محسوب می‌شود.



شکل ۳. تصویر واقعی پل

Fig. 3. Actual image of the bridge.



شکل ۴. مدل اجزای محدود پل در SAP2000

Fig. 4. Finite element model of the bridge in SAP2000.

۲-۴-۲- مدل‌سازی عددی پل در SAP2000

در این پژوهش، مدل‌سازی عددی پل مورد مطالعه با استفاده از نسخه ۱۴ نرم‌افزار SAP2000 انجام شده است. این نسخه به دلیل دارا بودن زبانه اختصاصی BRIDGE، امکانات جامعی برای مدل‌سازی پل‌های فولادی با عرشه بتنی ارائه می‌دهد و امکان تعریف دقیق المان‌ها و شرایط مرزی را فراهم می‌کند. شکل (۴) نمایی از مدل ساخته شده در نرم‌افزار شامل تیرهای اصلی، دیافراگم‌های کف عرشه، ستون‌ها، کوله‌ها و عرشه بتنی را نشان می‌دهد. در این مدل تیرها و ستون‌ها به صورت المان‌های خطی مدل‌سازی شدند و تکیه‌گاه‌ها به صورت فنرهای الاستیک با در نظر گرفتن شرایط مرزی واقعی پل تعریف شدند. در این مدل اندازه مش‌های عرشه ۰/۵ متر انتخاب شده است تا تعادل مناسبی میان دقت تحلیل و زمان محاسبات ایجاد شود. با کوچکتر کردن ابعاد مش‌های عرشه پل به ۰/۳ متر، زمان محاسبات ۳۶ درصد افزایش می‌یابد در صورتی که دقت محاسبات فقط ۰/۶۸ درصد بهتر می‌شود. مشخصات مصالح مصرفی شامل بتن و فولاد مطابق با نقشه‌های اجرایی و استانداردهای مربوطه است. سیمان مصرفی در دال، کوله‌ها و شالوده از تیپ ۲ و با عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. و مقاومت فشاری نمونه ۲۸ روزه برابر با ۳۰۰ کیلوگرم بر

¹ Power Spectral Density

هدف از بررسی این سناریوها، ارزیابی دقت روش به‌روزرسانی مدل عددی در شناسایی پارامترهای سازه‌ای آسیب‌دیده و مقایسه شکل مودهای POD و معمولی است همچنین توابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری شکل مود و MAC در شناسایی آسیب و به‌روزرسانی مدل مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق سه سناریوی زیر برای بررسی تأثیر آسیب‌ها و به‌روزرسانی مدل تعریف شدند:

- **سناریوی ۱- کاهش ارتفاع تیر اصلی:** در این سناریو، ارتفاع تیر BEAM3 در عرشه پل به میزان ۲۰ درصد کاهش داده شد. سپس شتاب‌ها در ۱۴ گره استخراج و شکل مودهای معمولی و فرکانس‌های طبیعی مجدداً محاسبه شدند.
- **سناریوی ۲- کاهش ضخامت بال و جان تیر:** در سناریوی دوم، ضخامت بال و جان تیر BEAM3 به میزان ۲۰ درصد کاهش داده شد و شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی جدید محاسبه شدند.
- **سناریوی ۳- کاهش مدول الاستیسیته:** در این سناریو، مدول الاستیسیته تیر BEAM3 به میزان ۲۰ درصد کاهش یافت و مقادیر جدید شتاب‌ها، شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی محاسبه شدند.

۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO^۲

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری است که بر پایه رفتار اجتماعی گروهی از موجودات زنده مانند پرندگان یا ماهی‌ها طراحی شده است. این الگوریتم توسط ابره‌ارت^۳ و کندی^۴ [16] در سال ۱۹۹۵ ارائه شد و به دلیل سادگی، سرعت محاسباتی بالا و توانایی جستجوی بهینه در فضاهای چندبعدی، به‌طور گسترده در مسائل مختلف بهینه‌سازی استفاده شده است.

در PSO، هر راه‌حل بالقوه به عنوان یک‌ذره در نظر گرفته می‌شود که در فضای جستجو حرکت می‌کند. هر ذره دارای دو ویژگی مهم است: موقعیت (نمایانگر راه‌حل فعلی) و سرعت. ذرات با تبادل اطلاعات بین یکدیگر و بهره‌گیری از بهترین موقعیت‌های فردی و گروهی خود، به سمت جواب بهینه حرکت

برای هر شکل مود POD، ابتدا سیگنال مودال متناظر در حوزه زمان به‌عنوان ورودی روش Welch در نظر گرفته شد. چگالی طیفی توان به‌صورت رابطه زیر محاسبه شد.

$$P_{welch} = \left(x(t) \text{ و } \dots \text{ و } N \text{ و } F_s \right) = PSD(f) \quad (5)$$

که در آن $x(t)$ سیگنال شکل مود POD در حوزه زمان و F_s فرکانس نمونه‌برداری سیگنال است.

در نمودار PSD حاصل، قله‌های اصلی نمایانگر فرکانس‌های طبیعی متناظر با هر شکل مود POD هستند. این قله‌ها با استفاده از الگوریتم یافتن پیک‌ها (Peak Detection) شناسایی شدند. این روش به دلیل کاهش حساسیت به نویز و استفاده بهینه از داده‌ها، به‌طور گسترده در تحلیل سیگنال‌های دینامیکی به کار گرفته شده و امکان شناسایی دقیق فرکانس‌های طبیعی را فراهم کرده است.

در این پژوهش، برای استخراج داده‌های دینامیکی از مدل اجزای محدود و انجام تحلیل‌های لازم، از قابلیت API^۱ نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. API امکان تعامل مستقیم بین MATLAB و SAP2000 را فراهم می‌کند و فرایندهایی مانند اجرای تحلیل، استخراج شتاب‌ها، و به‌روزرسانی پارامترهای مدل را به صورت خودکار و دقیق ممکن می‌سازد. با استفاده از کتابخانه COM API ارائه شده توسط SAP2000، دستورات از طریق MATLAB به مدل ارسال و داده‌ها پس از تحلیل، دریافت و پردازش می‌شوند. این روش علاوه بر افزایش سرعت در انجام محاسبات، امکان بهینه‌سازی پارامترهای مدل را نیز فراهم می‌کند.

۲-۴-۴- ایجاد سناریوهای آسیب در به‌روزرسانی مدل

سناریوهای آسیب در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی و ارزیابی کارایی روش‌های پیشنهادی در شناسایی و اصلاح پارامترهای مدل عددی تدوین شده‌اند. هر سناریو بازتاب‌دهنده نوعی خاص از تغییرات سازه‌ای در پل مورد مطالعه است که ممکن است در شرایط عملیاتی یا در طول عمر سازه رخ دهد. این تغییرات می‌تواند شامل تغییرات هندسی، کاهش سختی و تغییر مشخصات مواد باشد که به عنوان شاخص‌هایی از آسیب‌های احتمالی سازه در نظر گرفته شوند.

² Particle Swarm Optimization

³ Eberhart

⁴ Kennedy

¹ Application Programming Interface

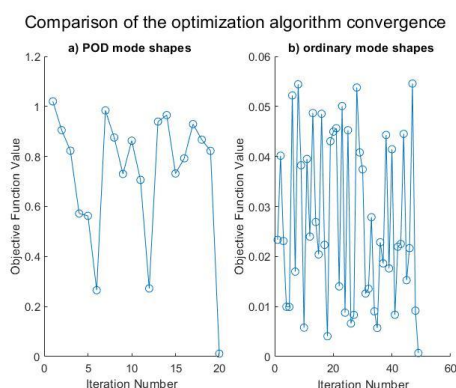
مودهای معمولی تغییرات در طول مراحل به روزرسانی نوسان زیادی دارند. در این حالت نیاز به ۵۰ تکرار در فرایند به روزرسانی برای دستیابی به مقدار بهینه برای تابع هدف وجود دارد. در شکل مود POD این نمودار روند همگرایی بسیار پایدارتر و سریع‌تری را نشان می‌دهد و مقدار اختلاف تابع هدف به سرعت کاهش می‌یابد و تابع هدف در تعداد گام‌های به روزرسانی کمتری به همگرایی می‌رسد. در این حالت با ۲۰ تکرار در فرایند به روزرسانی، تابع هدف به مقدار بهینه می‌رسد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که شکل مودهای POD عملکرد بهتر و پایدارتر در کاهش اختلاف تابع هدف دارند، که می‌تواند ناشی از توانایی POD در فشرده‌سازی داده‌ها و استخراج اطلاعات اصلی باشد.

جدول (۱) ارتفاع تیر عرشه پل را قبل و بعد از به روزرسانی مدل در سناریوی اول آسیب، ارائه می‌دهد. از این جدول مشخص است که مقادیر ارتفاع تیر در هر دو روش به روزرسانی برابر با ۱/۲۷۶۸ متر بدست آمد که بسیار به مقدار واقعی یعنی ۱/۲۸ متر نزدیک است. به طور کلی نتایج این بخش نشان داد که با وجود دستیابی به نتایج یکسان، استفاده از شکل مودهای POD به وضوح زمان و منابع محاسباتی را کاهش می‌دهد.

جدول ۱. ارتفاع تیر عرشه پل قبل و بعد از به روزرسانی در سناریوی اول آسیب

Table 1. Girder height of the bridge deck before and after updating in the first damage scenario

real model (m)	After updating (m)	Before updating (m)	Model update method
1.28	1.2768	1.024	Ordinary mode shapes
1.28	1.2768	1.024	POD mode shapes



شکل ۵. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی

(الف) شکل مودهای POD، (ب) شکل مودهای معمولی در سناریوی اول آسیب

Fig. 5. Comparison of the optimization algorithm convergence a) POD mode shapes, b) ordinary mode shapes in the first damage scenario.

می‌کنند. رابطه به روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات به صورت رابطه ۶ و ۷ تعریف می‌شود.

$$v(t+1) = v(t) + c_1 \times rand(t) \quad (6)$$

$$\times (pbest(t) - position(t)) + c_2 \times rand(t) \times (gbest(t) - position(t))$$

$$position(t+1) = position(t) + v(t+1) \quad (7)$$

در این رابطه‌ها، v سرعت و ضرایب شتاب c_1 و c_2 دو عدد ثابت مثبت موسوم به ضرایب یادگیری هستند و به ترتیب ضریب یادگیری شناختی و ضریب یادگیری اجتماعی نام دارند. r_1 و r_2 اعداد تصادفی، $pbest$ بهترین موقعیت هر ذره و $gbest$ بهترین موقعیت کل است.

۳- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از به روزرسانی مدل اجزای محدود پل با استفاده از شکل مودهای معمولی و شکل مودهای استخراج شده از روش POD ارائه و تحلیل می‌شود. هدف اصلی این تحلیل، ارزیابی عملکرد این دو روش در به روزرسانی مدل عددی برای سه سناریوی مختلف آسیب است.

نتایج این بخش در چهار محور زیر ارائه می‌شوند:

- مقایسه شکل مودهای معمولی و POD در به روزرسانی مدل و عملکرد آن‌ها در سه سناریوی آسیب.
- بررسی تأثیر تعداد مودهای در نظر گرفته شده بر دقت به روزرسانی مدل.
- مقایسه نتایج به روزرسانی برای توابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC در سه سناریوی مختلف آسیب.
- ارزیابی تأثیر نویز بر همگرایی و دقت الگوریتم بهینه‌سازی.

۳-۱- مقایسه شکل مودهای معمولی و POD در به روزرسانی

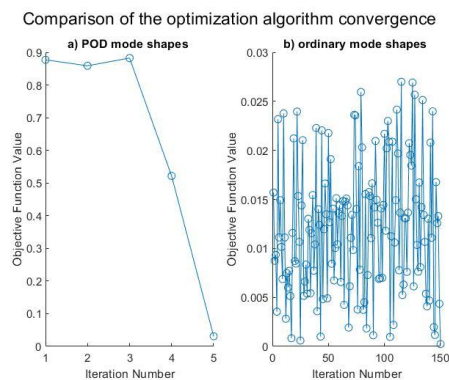
مدل و عملکرد آن‌ها در سه سناریوی آسیب

برای ارزیابی به روزرسانی مدل در هر سناریو، مقادیر متغیرهای مدل قبل و بعد از به روزرسانی با مقادیر واقعی مقایسه شده‌اند.

۳-۱-۱- سناریوی اول آسیب: کاهش ارتفاع تیر BEAM3

عرشه پل

شکل (۵) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس شکل مودهای POD و شکل مودهای معمولی را در سناریوی اول آسیب نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که در شکل



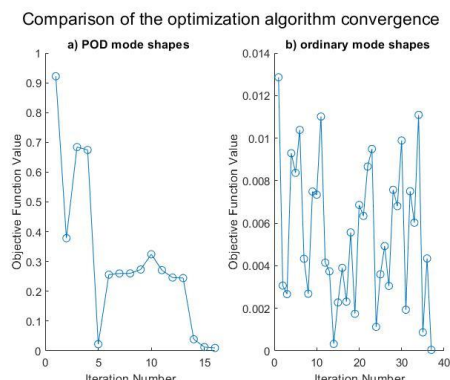
شکل ۷. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی (الف) شکل مودهای معمولی و (ب) شکل مودهای POD در سناریوی سوم آسیب

Fig. 7. Comparison of the convergence of the optimization algorithm a) POD mode shapes and b) ordinary mode shapes in the third damage scenario

معمولی در ۳۷ تکرار تابع هدف به مقدار بهینه همگرا می‌شود. جدول (۲) ضخامت بال و جان تیر عرشه پل را قبل و بعد از به‌روزرسانی مدل در سناریوی دوم آسیب، ارائه می‌دهد. از این جدول مشخص است که در روش شکل مودهای POD، بعد از به‌روزرسانی ضخامت بال تیر ۳ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد در صورتی که در شکل مودهای معمولی ضخامت بال تیر به ۶ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد. همچنین ضخامت جان بعد از به‌روزرسانی در روش شکل مودهای POD، تقریباً ۶ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد و ضخامت جان در شکل مودهای معمولی ۱۵ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد. به طور کلی نتایج این بخش نشان داد که استفاده از شکل مودهای POD به وضوح زمان و منابع محاسباتی را کاهش می‌دهد و همچنین نتایج به مراتب بهتری به دست می‌آید.

۳-۱-۳- سناریوی سوم آسیب: کاهش مدول الاستیسیته تیر BEAM3 در عرشه پل

شکل (۷) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس شکل مودهای POD و شکل مودهای معمولی را در سناریوی سوم آسیب نشان می‌دهد. از شکل (۷) مشخص است تابع هدف در به‌روزرسانی مدول الاستیسیته در شکل مودهای POD در ۵ تکرار به همگرایی رسیده است ولی در شکل مودهای معمولی در ۱۵۰ تکرار همگرایی به دست آمده است. جدول (۳) مدول الاستیسیته تیر عرشه پل را قبل و بعد از به‌روزرسانی مدل در سناریوی سوم



شکل ۶. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی (الف) شکل مودهای معمولی و (ب) شکل مودهای POD در سناریوی دوم آسیب

Fig. 6. Comparison of the convergence of the optimization algorithm a) POD mode shapes and b) ordinary mode shapes in the second damage scenario

جدول ۲. ضخامت بال و جان تیر عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی در سناریوی دوم آسیب

Table 2. Flange and web thickness of the bridge deck girder before and after updating in the second damage scenario

real model (m)	After updating (m)	Before updating (m)	Model update method
0.03	0.032	0.024	Flange thickness
0.012	0.0101	0.096	Web thickness
0.03	0.031	0.024	Flange thickness
0.012	0.0113	0.096	Web thickness

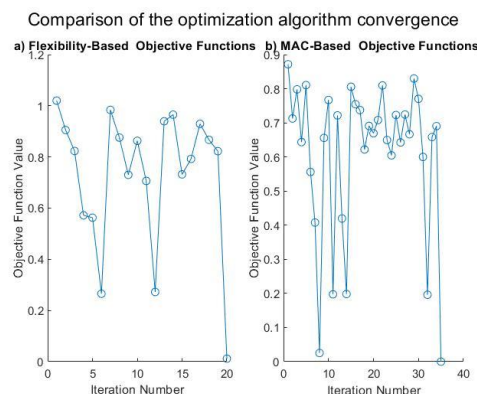
جدول ۳. مدول الاستیسیته تیر عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی در سناریوی سوم آسیب

Table 3. Elastic modulus of the deck girder before and after updating in the third damage scenario

real model (kg/m ²)	After updating (kg/m ²)	Before updating (kg/m ²)	Model update method
2.039e+10	2.0424e+10	1.6312e+10	Ordinary mode shapes
2.039e+10	2.0439e+10	1.6312e+10	POD mode shapes

۳-۱-۲- سناریوی دوم آسیب: کاهش ضخامت بال و جان تیر BEAM3 در عرشه پل

شکل (۶) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس شکل مودهای POD و شکل مودهای معمولی را در سناریوی دوم آسیب نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است با ۱۶ تکرار در فرایند به‌روزرسانی در شکل مودهای POD تابع هدف به مقدار بهینه همگرا می‌شود در صورتی که در شکل مودهای



شکل ۸. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی (الف) توابع هدف انعطاف‌پذیری

(ب) توابع هدف MAC برای شکل مودهای POD در سناریوی اول آسیب.

Fig. 8. Comparison of Optimization Algorithm Convergence a) Flexibility-Based Objective Functions b) MAC-Based Objective Functions for POD Mode Shapes in the First Damage Scenario

جدول ۴. مقایسه ارتفاع تیر BEAM3 در عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی

در سناریوی اول آسیب با توابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC

Table 4. Comparison of the height of BEAM3 in the bridge deck before and after updating in the first damage scenario using flexibility and MAC objective functions.

real model (m)	After updating (m)	Before updating (m)	Model update method
1.28	1.2768	1.024	Flexibility objective function
1.28	1.284	1.024	MAC objective function

۳-۲-۲- سناریوی دوم آسیب: کاهش ضخامت بال و جان تیر

BEAM3 در عرشه پل

شکل (۹) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی برای شکل مودهای POD با تابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC در سناریوی دوم آسیب را ارائه می‌دهد. از این شکل مشخص است که نمودار همگرایی با تابع هدف انعطاف‌پذیری ۱۶ تکرار و با تابع هدف در ۱۷ تکرار همگرا شده‌اند.

جدول (۵) ضخامت بال و جان تیر عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی در سناریوی دوم آسیب با توابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC را ارائه می‌دهد. از این جدول مشخص است که در تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری بعد از به‌روزرسانی، ضخامت بال تیر ۳ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد و در تابع هدف MAC ضخامت بال تیر ۲ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد. همچنین ضخامت جان بعد از به‌روزرسانی در تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری، تقریباً ۶ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد و ضخامت جان در تابع هدف MAC به

آسیب، ارائه می‌دهد. از این جدول مشخص است که در روش شکل مودهای POD، بعد از به‌روزرسانی مدول الاستیسیته برابر با $2.0439e+10$ کیلوگرم بر متر مربع و در شکل مودهای معمولی $2.04424e+10$ کیلوگرم بر متر مربع به دست آمده است که به مقدار واقعی یعنی $2.039e+10$ کیلوگرم بر متر مربع نزدیک هستند. به طور کلی نسبت به دو سناریوی دیگر آسیب، در به‌روزرسانی مدول الاستیسیته تیر عرشه پل، در شکل مودهای POD نمودار همگرایی روند بسیار بهتر را نشان می‌دهد و همچنین هر دو روش در نهایت به مقدار واقعی نزدیک شده‌اند.

۳-۲-۲- مقایسه نتایج به‌روزرسانی برای توابع هدف انعطاف‌پذیری

و MAC در سه سناریوی مختلف آسیب

در این بخش، عملکرد دو تابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC در فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود پل برای سه سناریوی مختلف آسیب مقایسه می‌شود. هدف اصلی این تحلیل، بررسی تأثیر انتخاب تابع هدف بر دقت بازسازی متغیرهای مدل و همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی است.

۳-۲-۱- سناریوی اول آسیب: کاهش ارتفاع تیر BEAM3

عرشه پل

شکل (۸) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی برای شکل مودهای POD با تابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC را در سناریوی اول آسیب ارائه می‌دهد. از شکل (۸) مشخص است که نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی با تابع هدف انعطاف‌پذیری در ۲۰ تکرار و با تابع هدف MAC در ۳۵ تکرار به همگرایی رسیده است. جدول (۴) مقایسه ارتفاع تیر عرشه پل، قبل و بعد از به‌روزرسانی با توابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC را ارائه می‌دهد. از این جدول مشخص است که مقادیر ارتفاع تیر با تابع هدف انعطاف‌پذیری برابر با $2768/1$ متر و با تابع هدف MAC برابر با $1/284$ بدست آمد که به مقدار واقعی یعنی $1/28$ متر نزدیک هستند.

به طور کلی نتایج این بخش نشان داد که باوجود دستیابی به نتایج مشابه، استفاده از تابع هدف انعطاف‌پذیری به‌وضوح زمان و منابع محاسباتی را کاهش می‌دهد.

جدول ۶. مقایسه مدول الاستیسیته تیر BEAM3 در عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی در سناریوی سوم آسیب با توابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC

Table 6. Comparison of the elastic modulus of BEAM3 in the bridge deck before and after updating in the third damage scenario using flexibility and MAC objective functions.

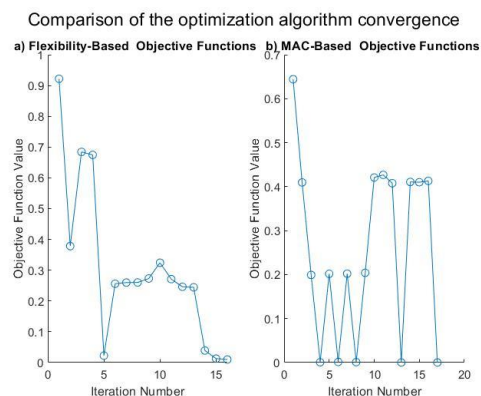
real model (kg/m ²)	After updating (kg/m ²)	Before updating (kg/m ²)	objective function
2.039e+10	2.0439e+10	1.6312e+10	Flexibility
2.039e+10	2.0415e+10	1.6312e+10	MAC

مقادیر واقعی رسیده است. به طور کلی نتایج این بخش نشان داد که نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی با تابع هدف انعطاف‌پذیری نسبت به تابع هدف MAC روند همگرایی هموارتر دارد. اگرچه در روش MAC مقادیر ضخامت بال و جان بعد از به‌روزرسانی به مقدار واقعی نزدیکتر است ولی روش انعطاف‌پذیری نیز اختلاف کمی با مقادیر واقعی دارند.

۳-۲-۳- سناریوی سوم آسیب: کاهش مدول الاستیسیته تیر BEAM3 در عرشه پل

شکل (۱۰) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی بین توابع هدف انعطاف‌پذیری و توابع هدف MAC برای شکل مدهای POD در سناریوی سوم آسیب را ارائه می‌دهد. از این شکل مشخص است که با ۵ بار تکرار در روند به‌روزرسانی تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری به مقدار بهینه رسیده است ولی در تابع هدف مبتنی بر MAC با ۹ بار تکرار تابع هدف به مقدار بهینه رسیده است.

جدول (۶) مقایسه مدول الاستیسیته تیر در عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی در سناریوی سوم آسیب با توابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC را ارائه می‌دهد. از این جدول مشخص است که بعد از به‌روزرسانی مقدار مدول الاستیسیته در تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری برابر با 2.0439e+10 کیلوگرم بر متر مربع و در تابع هدف مبتنی بر MAC برابر با 2.0415e+10 کیلوگرم بر متر مربع به دست آمده که اختلاف کمی با مقدار واقعی مدول الاستیسیته یعنی 2.039e+10 کیلوگرم بر متر مربع دارد. به طور کلی نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی با تابع هدف انعطاف‌پذیری نسبت به تابع هدف MAC روند همگرایی هموارتر دارد. و هر دو روش مدول الاستیسیته تیر به مقدار واقعی نزدیک شده‌اند.



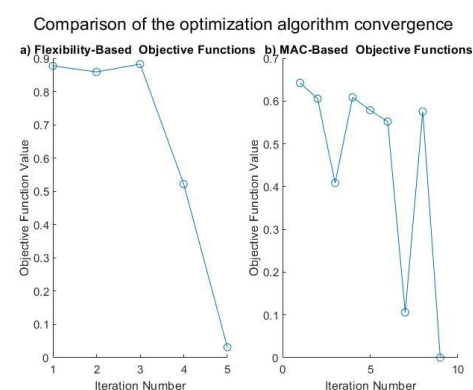
شکل ۹. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی (الف) توابع هدف انعطاف‌پذیری (ب) توابع هدف MAC برای شکل مدهای POD در سناریوی دوم آسیب.

Fig. 9. Comparison of Optimization Algorithm Convergence a) Flexibility-Based Objective Functions b) MAC-Based Objective Functions for POD Mode Shapes in the second Damage Scenario

جدول ۵. مقایسه ضخامت بال و جان تیر BEAM3 در عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی در سناریوی دوم آسیب با توابع هدف انعطاف‌پذیری و MAC

Table 5. Comparison of the flange and web thickness of BEAM3 in the bridge deck before and after updating in the second damage scenario using flexibility and MAC objective functions.

real model (m)	After updating(m)	Before updating (m)	Model update method	
0.03	0.0311	0.024	Flange thickness	Flexibility objective function
0.012	0.0113	0.096	Web thickness	
0.03	0.0294	0.024	Flange thickness	MAC objective function
0.012	0.012	0.096	Web thickness	



شکل ۱۰. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی (الف) توابع هدف انعطاف‌پذیری (ب) توابع هدف MAC برای شکل مدهای POD در سناریوی سوم آسیب.

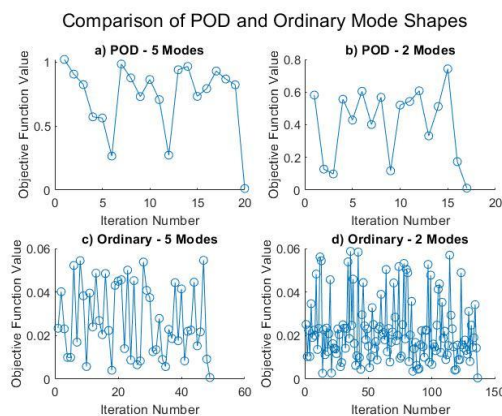
Fig. 10. Comparison of Optimization Algorithm Convergence a) Flexibility-Based Objective Functions b) MAC-Based Objective Functions for POD Mode Shapes in the third Damage Scenario

و به مقدار مطلوب‌تری رسیده است. در مقابل، در شکل مودهای معمولی، کاهش تعداد مودها تأثیر منفی داشته است، به‌طوری که مقدار همگرایی در حالت دو مود اول تقریباً سه برابر مقدار همگرایی در حالت پنج مود است. این موضوع نشان می‌دهد که شکل مودهای POD در کاهش تعداد مودهای مورد نیاز برای دستیابی به دقت مناسب عملکرد بهتری داشته و می‌تواند در به‌روزرسانی مدل‌های عددی، به ویژه در شرایطی که تعداد مودهای محدودی در دسترس است، گزینه مناسبی باشد.

۳-۴- بررسی تأثیر نویز بر فرکانس‌ها و همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی

در این بخش، تأثیر نویز بر استخراج شکل مودهای POD و دقت فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود بررسی می‌شود. از آنجاکه روش POD برای کاهش ابعاد داده‌ها و استخراج مودهای غالب به کار می‌رود، بررسی حساسیت آن نسبت به نویز اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه، با اعمال سطوح مختلف نویز به داده‌های شتاب، تغییرات فرکانس‌های طبیعی متناظر از شکل مودهای POD ارزیابی شده است. همچنین، تأثیر نویز بر همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی در به‌روزرسانی مدل بررسی شده و میزان پایداری روش مبتنی بر شکل مودهای POD تحلیل شده است.

در جدول (۷) تأثیر سطوح مختلف نویز بر فرکانس‌های طبیعی استخراج شده از شکل مودهای POD ارائه شده است. از این جدول مشخص است که فرکانس‌های استخراج شده تحت نویز ۱ درصد تغییری نداشته‌اند. در سطح نویز ۵ درصد، فرکانس‌های اول، دوم و پنجم بدون تغییر باقی مانده‌اند. فرکانس سوم ۱ درصد و فرکانس چهارم بیش از ۵۰ درصد دچار تغییرات شده‌اند. با افزایش نویز به ۱۰ درصد، فرکانس مود اول ۱/۵ درصد تغییر کرده است. مود دوم بدون تغییر و مود سوم تقریباً ۲ درصد تغییر کرده است. در مود چهارم تغییرات بسیار زیاد است به طوری که فرکانس مود چهارم بیش از ۹۰ درصد تغییر کرده است. فرکانس مود پنجم نیز بیش از ۶۰ درصد تغییر کرده است. به طور کلی از مود سوم به بعد تغییرات قابل توجهی مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از روش POD و محدود کردن تحلیل به دو مود اول، می‌توان آثار نویز را حتی در سطوح بالاتر نیز تا حد زیادی نادیده گرفت.



شکل ۱۱. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی برای سناریوی اول آسیب در شکل مودهای POD و معمولی برای ۲ و ۵ مود اول

Fig. 11. Comparison of optimization algorithm convergence for the first damage scenario in POD and ordinary mode shapes for the first 2 and 5 modes

۳-۳- بررسی تأثیر تعداد مودهای در نظر گرفته‌شده بر دقت به‌روزرسانی مدل

انتخاب تعداد شکل مود در فرایند به‌روزرسانی مدل نقش مهمی در دقت نتایج دارد. در این مطالعه، مقایسه بین شکل مودهای معمولی و شکل مودهای POD نشان می‌دهد که استفاده از شکل مودهای POD حتی با تعداد کمتر، نتایج دقیق‌تری نسبت به شکل مودهای معمولی ارائه می‌دهد. این موضوع به دلیل توانایی روش POD در استخراج الگوهای غالب و حذف نویزهای نامربوط است که باعث بهبود دقت در تخمین پارامترهای مدل می‌شود؛ بنابراین شکل مودهای POD گزینه مناسبی برای کاهش هزینه‌های محاسباتی در عین حفظ دقت بالا هستند.

شکل (۱۱) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی برای سناریوی اول آسیب در شکل مودهای POD و معمولی برای ۲ و ۵ مود اول را ارائه می‌کند. از این شکل مشخص است که در شکل مودهای POD با ۵ مود در ۲۰ تکرار در به‌روزرسانی و با ۲ مود در ۱۷ تکرار در به‌روزرسانی، تابع هدف به مقدار همگرایی رسیده است. که نشان می‌دهد در شکل مودهای POD با کاهش مودها روند به‌روزرسانی کمتر نیز شده است. در شکل مودهای معمولی با ۵ مود اول در تقریباً ۵۰ تکرار در به‌روزرسانی و با ۲ مود نزدیک به ۱۵۰ تکرار در به‌روزرسانی، تابع هدف بهینه شده است. در حالت کلی مشخص است که به‌روزرسانی با شکل مودهای POD حتی با در نظر گرفتن تنها دو مود اول، نتیجه همگرایی بهبود یافته

از به‌روزرسانی در سناریوی سوم آسیب برای دو حالت بدون نویز و با نویز ۱۰ درصد را ارائه می‌دهد. از این جدول مشخص است که در شرایط نویز ۱۰ درصد، فرایند همگرایی در تعداد گام‌های بیشتری اتفاق افتاده است. با این حال، مقدار نهایی مدول الاستیسیته در هر دو حالت به مقدار واقعی نزدیک شده است. این امر نشان می‌دهد که اگرچه وجود نویز بر سرعت همگرایی تأثیر دارد، اما روش پیشنهادی قادر است حتی در شرایط نویز ۱۰ درصد نیز مقدار دقیق مدول الاستیسیته را تخمین بزند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرایند به‌روزرسانی مدل اجزای محدود یک پل فلزی با استفاده از دو نوع شکل مود، یعنی شکل مدهای معمولی و شکل مدهای POD، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، مقایسه دقت و کارایی این دو روش در سه سناریوی مختلف آسیب، شامل تغییر ارتفاع تیر اصلی، تغییر ضخامت بال و جان تیر و کاهش مدول الاستیسیته، بود. همچنین، تأثیر تعداد مدهای انتخابی و اثر نویز بر فرایند به‌روزرسانی مدل نیز تحلیل شد.

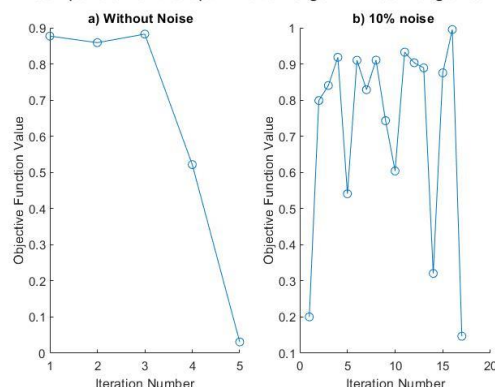
نتایج نشان داد که استفاده از شکل مدهای POD در به‌روزرسانی مدل، نسبت به شکل مدهای معمولی، سرعت همگرایی بیشتری دارد و دقت بالاتری در تخمین پارامترهای مدل ارائه می‌دهد. در سناریوی اول که کاهش ارتفاع تیر اصلی بررسی شد، نتایج نشان داد که شکل مدهای POD توانستند ۲۰ تکرار در فرایند به‌روزرسانی بهینه ارتفاع را به مقدار $1/2768$ متر که نزدیک به مقدار واقعی یعنی $1/28$ متر، نزدیک کنند ولی شکل مدهای معمولی ارتفاع تیر را در ۵۰ تکرار به همان مقدار رساندند. در سناریوی دوم، کاهش ضخامت بال و جان تیر اصلی بررسی شد و مجدداً شکل مدهای POD عملکرد بهتری نسبت به شکل مدهای معمولی داشتند به طوری که شکل مدهای POD بعد از به‌روزرسانی ضخامت بال ۳ درصد و ضخامت جان ۶ درصد با مقدار واقعی اختلاف داشتند در صورتی که شکل مدهای معمولی بعد از به‌روزرسانی ضخامت بال ۶ درصد و ضخامت جان ۱۵ درصد با مقدار واقعی اختلاف داشتند همچنین تعداد تکرار در فرایند به‌روزرسانی در شکل مدها POD برابر با ۱۶ و در شکل مدهای معمولی ۳۷ است. در سناریوی سوم، که مدول الاستیسیته تیر اصلی کاهش یافته بود، نتایج نشان دادند که تابع هدف در شکل مدهای POD در ۵ تکرار به همگرایی رسیده است ولی در شکل مدهای معمولی در ۱۵۰ تکرار همگرایی به دست آمده است. در شکل

جدول ۷. تأثیر سطوح مختلف نویز بر فرکانس‌های طبیعی استخراج‌شده از شکل مدهای POD

Table 7. Effect of different noise levels on the natural frequencies extracted from POD mode shapes

Frequency without Noise (Hz)	Frequency with 0.01 Noise (Hz)	Frequency with 0.05 Noise (Hz)	Frequency with 0.1 Noise (Hz)	Mode Shapes
2.5	2.5	2.5	2.460938	1
3.789063	3.789063	3.789063	3.789063	2
4.296875	4.296875	4.257813	4.21875	3
4.960938	4.960938	2.148438	0.429688	4
4.960938	4.960938	4.960938	1.875	5

Comparison of the optimization algorithm convergence



شکل ۱۲. مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی را برای دو حالت الف) بدون نویز و ب) با نویز ۱۰ درصد، در به‌روزرسانی مدول الاستیسیته با استفاده از شکل مود POD

Fig. 12. Comparison of the optimization algorithm convergence for two cases: a) Without Noise and b) 10% noise, in updating the elastic modulus using POD mode shapes.

جدول ۸. مقایسه مدول الاستیسیته تیر BEAM3 در عرشه پل قبل و بعد از به‌روزرسانی در سناریوی سوم آسیب برای دو حالت بدون نویز و با نویز

Table 8. Comparison of the elastic modulus of BEAM3 in the bridge deck before and after updating in the third damage scenario for two cases: without noise and with noise

Real Model (kg/m ²)	Before updating (kg/m ²)	After updating 10% noise (kg/m ²)	After updating without noise (kg/m ²)
2.039e+10	1.6312 e+10	2.034 e+10	2.039e+10

شکل (۱۲) مقایسه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی را برای دو حالت بدون نویز و با نویز ۱۰ درصد، در به‌روزرسانی مدول الاستیسیته با استفاده از شکل مود POD را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که در شرایط بدون نویز در ۵ تکرار و در حالت نویز ۱۰ درصد در ۱۷ تکرار در فرایند به‌روزرسانی، تابع هدف به همگرا شده است.

جدول (۸) مقایسه مدول الاستیسیته تیر در عرشه پل قبل و بعد

ارائه نتایج دقیق تری نسبت به پنج مود اول در روش معمولی است. این امر نشان‌دهنده قابلیت روش POD در کاهش ابعاد داده و حفظ اطلاعات اصلی مودهای سازهای است.

علاوه بر این، بررسی تأثیر نویز بر شکل مودهای POD نشان داد که در سطح نویز ۱ درصد، فرکانس‌های استخراج شده دچار تغییر محسوسی نشده‌اند. با افزایش سطح نویز به ۵ درصد، فرکانس‌های مود اول، دوم و پنجم بدون تغییر باقی مانده‌اند، در حالی که فرکانس مود سوم حدود ۱ درصد و فرکانس مود چهارم بیش از ۵۰ درصد دچار تغییر شده است. با افزایش نویز به ۱۰ درصد، تغییرات فرکانس مود اول حدود ۱/۵ درصد بوده، در حالی که مود دوم همچنان بدون تغییر باقی مانده است. فرکانس مود سوم تقریباً ۲ درصد تغییر کرده، اما در مود چهارم تغییرات بسیار شدید بوده، به طوری که فرکانس آن بیش از ۹۰ درصد دچار انحراف شده است. علاوه بر این، فرکانس مود پنجم نیز بیش از ۶۰ درصد تغییر کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که مودهای اول و دوم پایداری بالاتری در برابر نویز دارند، در حالی که مودهای بالاتر حساسیت بیشتری به نویز نشان می‌دهند. در حالت کلی با افزایش سطح نویز، فرکانس‌های طبیعی استخراج‌شده از شکل مودهای POD تا حدی تغییر می‌کنند، اما این تغییرات عمدتاً در مودهای بالاتر رخ می‌دهد و دو مود اول تأثیرپذیری کمتری از نویز دارند. همچنین، بررسی تأثیر نویز در فرایند به‌روزرسانی نشان داد که اگرچه افزایش نویز منجر به افزایش تعداد گام‌های همگرایی می‌شود، اما در نهایت مقدار بهینه پارامترهای مدل به مقدار واقعی نزدیک خواهد شد.

این نتایج نشان می‌دهند که روش POD نه تنها در کاهش ابعاد داده و استخراج اطلاعات مودال مؤثر است، بلکه در به‌روزرسانی مدل اجزای محدود نیز می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی ارائه دهد.

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می‌گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سلمان رحیمیان: انجام تحلیل‌ها، نرم افزار، تصویرسازی، نوشتن متن اولیه و ویرایش‌ها.

موسی محمودی صاحبی: ایده و مفهوم، روش‌شناسی، نظارت و مدیریت تحقیق، نوشتن متن اولیه و ویرایش‌ها.

مودهای POD، بعد از به‌روزرسانی، مدول الاستیسیته برابر با $2.0439e+10$ کیلوگرم بر متر مربع و در شکل مودهای معمولی مدول الاستیسیته $2.04424e+10$ کیلوگرم بر متر مربع به دست آمده است که به مقدار واقعی یعنی $2.039e+10$ کیلوگرم بر متر مربع نزدیک هستند. مقایسه دو تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری و MAC نشان داد که در سناریوی اول آسیب نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی با تابع هدف انعطاف‌پذیری در ۲۰ تکرار و با تابع هدف MAC در ۳۵ تکرار به همگرایی رسیده است. همچنین مقادیر ارتفاع تیر با تابع هدف انعطاف‌پذیری برابر با $1/2768$ متر و با تابع هدف MAC برابر با $1/284$ بدست آمد که بسیار به مقدار واقعی یعنی $1/28$ متر نزدیک هستند. در سناریوی دوم آسیب نمودار همگرایی با تابع هدف انعطاف‌پذیری ۱۶ تکرار و با تابع هدف در ۱۷ تکرار همگرا شده‌اند. همچنین در تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری بعد از به‌روزرسانی، ضخامت بال تیر ۳ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد و در تابع هدف MAC ضخامت بال تیر ۲ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد. همچنین ضخامت جان بعد از به‌روزرسانی در تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری، تقریباً ۶ درصد با مقادیر واقعی اختلاف دارد و ضخامت جان در تابع هدف MAC به مقادیر واقعی رسیده است. در سناریوی سوم آسیب با ۵ بار تکرار در روند به‌روزرسانی تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری به مقدار بهینه رسیده است ولی در تابع هدف مبتنی بر MAC با ۹ بار تکرار تابع هدف به مقدار بهینه رسیده است. همچنین بعد از به‌روزرسانی مقدار مدول الاستیسیته در تابع هدف مبتنی بر انعطاف‌پذیری برابر با $2.0439e+10$ کیلوگرم بر متر مربع و در تابع هدف مبتنی بر MAC برابر با $2.0415e+10$ کیلوگرم بر متر مربع به دست آمده که اختلاف کمی با مقدار واقعی مدول الاستیسیته یعنی $2.039e+10$ کیلوگرم بر متر مربع دارد. در حالت کلی استفاده از معیار انعطاف‌پذیری در روش POD، دقت بالاتری و همچنین تعداد تکرار کمتری در به‌روزرسانی مدل ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان یک معیار قابل اعتماد برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شود.

در بررسی تأثیر تعداد مودها نشان داد که شکل مودهای POD با ۵ مود در ۲۰ تکرار و با ۲ مود در ۱۷ تکرار، تابع هدف به مقدار بهینه رسیده است. که نشان می‌دهد در شکل مودهای POD با کاهش مودها روند به‌روزرسانی کمتر نیز شده است. ولی در شکل مودهای معمولی با ۵ مود اول در تقریباً ۵۰ تکرار و با ۲ مود اول نزدیک به ۱۵۰ تکرار، تابع هدف بهینه شده است. در کل شکل مودهای POD حتی با تعداد مود کمتر (مانند دو مود اول) قادر به

برنامه‌ریزی شهر تهران انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش‌ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

مجتبی کریمایی طبرستانی: ایده و مفهوم، روش شناسی، نظارت و مدیریت تحقیق، نوشتن متن اولیه و ویرایش‌ها.
علی نبی زاده: نظارت و مدیریت تحقیق، ویرایش‌ها.

منابع مالی

این تحقیق با حمایت های مادی و معنوی مرکز مطالعات و

References

- [1] Humar, J.L., 2012. *Dynamics of Structures*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [2] Das, S., Saha, P. and Patro, S.K., 2016. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, pp.477-507.
- [3] Jaishi, B., Kim, H.J., Kim, M.K., Ren, W.X. and Lee, S.H., 2007. Finite element model updating of concrete-filled steel tubular arch bridge under operational condition using modal flexibility. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(6), pp.2406-2426. doi: 10.1016/j.ymssp.2007.01.003.
- [4] Zhang, M., Peng, X., Li, Y., Wang, Z., Zhu, J. and Zhang, J., 2024. Study on the structural damage detection method using the flexibility matrix. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 21(6), p.e548. doi: 10.1590/1679-78257966.
- [5] Kerschen, G., Golinval, J.-C., Vakakis, A.F. and Bergman, L.A., 2005. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: An overview. *Nonlinear Dynamics*, 41(1-3), pp.147-169. doi: 10.1007/s11071-005-2803-2.
- [6] Napolitano, K.L., 2016. Using singular value decomposition to estimate frequency response functions. In: *Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 10: Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics*. Springer, pp.27-43. doi: 10.1007/978-3-319-30249-2_2.
- [7] Astrid, P., 2004. *Reduction of Process Simulation Models: A Proper Orthogonal Decomposition Approach*. PhD thesis. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. doi: 10.6100/IR581728.
- [8] Nejad, A.Z.B. and Sahebi, M.M., 2021. An investigation on the capability of proper orthogonal modes in determining the natural frequencies and damping ratios of linear structural systems. *Engineering Structures*, 243, p.112691. doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112691.
- [9] Nejad, A.Z.B. and Mahmoudi, M., 2022. A POD-based methodology for structural finite element model updating. *Journal of Sound and Vibration*, 534, p.117045. doi: 10.1016/j.jsv.2022.117045.
- [10] Galvanetto, U. and Violaris, G., 2007. Numerical investigation of a new damage detection method based on proper orthogonal decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(3), pp.1346-1361. doi: 10.1016/j.ymssp.2005.12.007.
- [11] Ming, Z., Guo, Q., Yue, L. and Zhang, B., 2019. Finite element model updating of jointed structure based on modal and strain frequency response function. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(11), pp.4583-4593. doi: 10.1007/s12206-019-0902-0.
- [12] Chen, H.-P. and Ni, Y.-Q., 2018. Finite Element Model Updating. In: *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. Chapter 6, pp.123-154. Wiley. doi: 10.1002/9781119166641.ch6.
- [13] Allemang, R.J. and Brown, D.L., 1982. A correlation coefficient for modal vector analysis. In: *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference (IMAC)*.
- [14] Liang, Y.C., Lee, H.P., Lim, S.P., Lin, W.Z., Lee, K.H. and Wu, C.G., 2002. Proper orthogonal decomposition and its applications—Part I: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, 252(3), pp.527-544. doi: 10.1006/jsvi.2001.4041.
- [15] Welch, P., 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), pp.70-73. doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.
- [16] Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In: *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, pp.39-43. doi: 10.1109/MHS.1995.494215.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Rahimian, S., Mahmoudi Sahebi, M., Kerimaei Tabarestani, M. and Nabizade, A., 2026. Investigation of Finite Element Model Updating Process Using POD Mode Shapes and Modal Flexibility Criterion. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.47-62.



Performance of low-cement self-compacting concrete using stone sludge as sand replacement

Ali Mohammadsalehi^{1*} , Davood Mostofinejad²

1. PhD, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.
2. Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.

Abstract

The production of sustainable and high-performance concrete has become a global necessity due to the increasing demand for construction materials and the significant environmental burden associated with cement manufacturing and natural aggregate extraction. In this research, self-compacting concrete (SCC) was developed by partially substituting natural sand with stone-cutting sludge derived from marble, granite, and travertine at three replacement levels: 10%, 15%, and 20%. A low-cement ternary binder system was adopted, consisting of 85% ground granulated blast furnace slag (GGBFS), 10% ordinary Portland cement (OPC), and 5% hydrated lime, to drastically reduce cement consumption and CO₂ emissions while maintaining adequate mechanical strength. The experimental program included both fresh and hardened concrete tests. Fresh properties such as slump flow diameter, T₅₀₀ time, V-funnel flow, and segregation resistance were assessed to evaluate workability, viscosity, and stability in line with EFNARC guidelines. Hardened properties included compressive and flexural strength at 7 and 28 days. In addition to mechanical and rheological testing, durability aspects such as resistance to segregation and cohesion were qualitatively assessed. Life cycle assessment (LCA) was also conducted to quantify the environmental benefits of the proposed mixtures compared with conventional SCC made with OPC. By linking laboratory-scale performance with broader sustainability indicators, the study provides an integrated evaluation of technical feasibility and environmental compatibility. Results showed that 10% replacement of sand with any type of stone sludge, especially marble, enhanced flowability and viscosity while significantly improving resistance to segregation without increasing the dosage of superplasticizer. At 15% and 20% replacement levels, marble and travertine sludge maintained acceptable rheological and mechanical behavior, whereas granite sludge exhibited a negative influence, reducing workability and mechanical strength at higher dosages. The optimum replacement level was found at 10%, which yielded up to 5.9% improvement in compressive strength over the control. Flexural strength was unaffected at 10% and even increased with marble sludge, but noticeable reductions occurred at 15% and 20%, with marble again showing the least adverse effect compared to granite and travertine. From an environmental perspective, the use of the ternary binder drastically reduced the global warming potential (GWP), energy demand, and acidification potential relative to OPC-based SCC. The LCA results indicated that GWP decreased by as much as 71.9% compared to conventional mixtures. Moreover, replacing sand with stone sludge contributes directly to the circular economy by diverting industrial waste from landfills and natural water bodies, thereby reducing pollution and ecological degradation. Beyond numerical reductions in environmental indicators, the valorization of stone sludge alleviates waste disposal challenges, minimizes dust and runoff contamination, and preserves limited natural sand resources. These broader sustainability impacts demonstrate that the benefits of stone sludge utilization extend beyond concrete performance and can influence waste management strategies at the industrial scale. Overall, the study demonstrates that the synergy between partial sand substitution with marble, granite, and travertine sludge and the adoption of a low-cement ternary binder offers a promising pathway toward eco-efficient SCC. This approach not only enhances certain rheological and mechanical properties but also provides substantial environmental and economic benefits, making it a viable strategy for future sustainable construction practices.

Review History

Received: Sep 3, 2025
Revised: Dec 8, 2025
Accepted: Jan 27, 2026

Keywords

Self-compacting concrete (SCC)
Stone sludge; Low-cement binder
Ground granulated blast furnace slag (GGBFS)
Life cycle assessment (LCA)

* Corresponding Author Email: a.mohammadsalehi@alumni.iut.ac.ir - ORCID: 0009-0000-3996-7436



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

عملکرد بتن خودمتراکم کم سیمان با استفاده از لجن سنگ به عنوان جایگزین ماسه

علی محمد صالحی^{*1}، داود مستوفی نژاد^۲

۱. دکترا، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

این پژوهش، روشی پایدار برای تولید بتن خودمتراکم (SCC) ارائه می‌دهد که در آن بخشی از ماسه با لجن سنگ حاصل از برش سنگ‌های مرمر، گرانیت و تراورتن در سطوح ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین شده است. همچنین از یک چسباننده سه جزئی کم سیمان شامل ۸۵٪ سرباره کوره بلند آسیاب شده (GGBFS)، ۱۰٪ سیمان پرتلند معمولی (OPC)، و ۵٪ آهک هیدراته استفاده شده تا به طور قابل توجهی از میزان انتشار CO₂ کاسته شود. نتایج نشان داد که جایگزینی ۱۰ درصدی ماسه با هر نوع لجن سنگ، به ویژه مرمر، باعث بهبود کارپذیری، ویسکوزیته و مقاومت در برابر جداسدگی دانه‌ها می‌شود، بدون آنکه نیاز به افزایش میزان فوق‌روان‌کننده باشد. افزون بر این، جایگزینی ۱۵٪ و ۲۰٪ ماسه با لجن سنگ مرمر و تراورتن، خواص رئولوژیکی و مکانیکی مناسبی نشان داد. در مقابل، لجن سنگ گرانیت تنها در سطح ۱۰٪ عملکرد مناسبی در حالت تازه داشت، اما در سطوح جایگزینی بالاتر، کارپذیری و مقاومت بتن کاهش یافت. مقاومت فشاری در مقدار بهینه جایگزینی تا ۵/۹٪ افزایش یافت. همچنین ارزیابی چرخه عمر (LCA) نشان داد که پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) تا ۷۱/۹٪ کمتر از بتن‌های خودمتراکم معمولی با سیمان پرتلند است. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب جایگزینی ماسه با لجن سنگ و استفاده از چسباننده با سیمان کم، امکان تولید بتن سازگار با محیط زیست را فراهم کرده و در عین حال از ضایعات صنعتی بهره‌برداری می‌کند.

کلمات کلیدی

بتن خودمتراکم

لجن سنگ

چسباننده کم سیمان

سرباره کوره بلند آسیاب شده

ارزیابی چرخه عمر

۱- مقدمه

در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای نوین در ساخت و ساز پایدار بر استفاده از پسماندهای صنعتی و مواد ثانویه در بتن تأکید دارند. در میان گزینه‌های مختلف، لجن سنگ‌بری - که پودری ریز و بی‌اثر بوده و در فرآیند برش و صیقل سنگ‌ها تولید می‌شود - به دلیل فراوانی و دانه بندی مناسب، مورد توجه قرار گرفته است [4-6]. با این حال، این پسماندها اغلب در محل‌های دفن زباله یا منابع آبی رها می‌شوند و خطراتی مانند قلیایی شدن خاک، ته نشینی رسوبات و آلودگی بصری ایجاد می‌کنند [7, 8]. بتن خودمتراکم (SCC) که به دلیل کارپذیری بالا و توانایی

صنعت بتن، به عنوان بخش مهمی از ساخت و سازهای مدرن، هم‌زمان یکی از بزرگ‌ترین عوامل تخریب محیط‌زیست به شمار می‌رود. تولید سیمان پرتلند، به عنوان یکی از اجزای اصلی بتن، منشا حدود ۵-۸٪ از کل انتشار جهانی CO₂ است [1]. افزون بر آن، استخراج بی‌رویه سنگدانه‌های طبیعی (به ویژه ماسه رودخانه‌ای) پیامدهای شدید زیست‌محیطی از جمله تخریب زیستگاه‌ها، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و فرسایش کناره رودخانه‌ها را به دنبال داشته است [2, 3].

* رایانامه نویسنده مسئول: a.mohammadsalehi@alumni.iut.ac.ir - ORCID: 0009-0000-3996-7436

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



جاری شدن بدون نیاز به ویبره شناخته می‌شود، کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های با عملکرد بالا و قطعات پیش‌ساخته دارد [9,10]. با این حال، SCC معمولاً به حجم بالایی از مواد چسباننده و ریزدانه‌ها نیاز دارد تا کارپذیری و یکنواختی آن حفظ شود، که این امر مصرف سیمان و هزینه را افزایش می‌دهد [11,12].

استفاده از مواد پوزولانی مکمل مانند خاکستر بادی، دوده سیلیسی، متاکائولن و سرباره کوره بلند آسیاب‌شده (GGBFS) در کاهش مصرف سیمان و افزایش دوام بتن به‌خوبی مطالعه شده است [13-16]. همچنین، برخی مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از پودرهای بی‌اثر مانند پودر سنگ آهک، مرمر یا سایر پودرهای سنگی به عنوان پرکننده، می‌تواند رفتار رئولوژیک بتن را بهبود بخشد [17-20].

با این وجود، استفاده از لجن سنگ‌بری به‌عنوان جایگزین قسمتی از ماسه (نه سیمان)، به‌ویژه در بتن‌های خودمتراکم کم سیمان، کمتر بررسی شده است. اگرچه مطالعات زیادی به بررسی جایگزینی لجن سنگ به‌جای سیمان پرداخته‌اند، اما نقش آن به‌عنوان جایگزین ریزدانه در مقالات موجود به‌خوبی مورد توجه قرار نگرفته است [20, 21].

برای مثال، حمید و سکار [22] نشان دادند که استفاده از لجن مرمر تا ۱۵٪ به‌جای سیمان، مقاومت فشاری را افزایش و پدیده آب‌انداختگی را کاهش می‌دهد. صادق و همکاران [5] دریافتند که ترکیب ۵۰:۵۰ پودر مرمر و گرانیت به‌جای سیمان، مقاومت را افزایش داده و نسبت‌های بهینه جایگزینی سیمان در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد است. همچنین، مطالعاتی از ساردینیا [23] و بلاییدی [24] نشان دادند که لجن سنگ می‌تواند چگالی تراکم و رفتار جمع‌شدگی را بهبود بخشد. اویسال و ییلماز [25] نیز نشان دادند که پودر سنگ آهک با پر کردن فضاهای خالی و تقویت چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، خواص بتن خودمتراکم در حالت تازه و سخت‌شده را ارتقا می‌دهد.

چودهاری و همکاران [26] نیز نشان دادند که ترکیب گرد مرمر با خاکستر بادی و دوده سیلیسی، مقاومت فشاری و تراوایی بتن را بهبود می‌بخشد. کریمی‌پور و همکاران [27] نیز با استفاده از گل قرمز و لجن گرانیت در بتن خودمتراکم، به مقاومت‌هایی برابر با نمونه‌های دارای سیمان کامل دست یافتند.

از سوی دیگر، تحقیقات مربوط به بهینه‌سازی چسباننده‌ها

نشان داده‌اند که سرباره می‌تواند تا ۷۰-۸۵٪ جایگزین سیمان شده و در صورت فعال‌سازی با آهک یا مقادیر کم سیمان، عملکرد مناسبی داشته باشد [28, 29]. یازچی [30] و یانگ [31] نشان دادند که چسباننده‌های ترکیبی حاوی سرباره و خاکستر بادی، دوام و مقاومت حرارتی بتن خودمتراکم را افزایش می‌دهند. همچنین، محمدصالحی و همکاران [32] تولید بتن با عملکرد بالا (HPC) با ترکیب ۸۵٪ سرباره، ۱۰٪ سیمان، و ۵٪ آهک هیدراته را بررسی کرده و بدون نیاز به کلرید کلسیم به مقاومت قابل قبولی دست یافتند.

با وجود پژوهش‌های فراوان در زمینه بتن خودمتراکم و به‌کارگیری پسماندها، شکاف‌های آشکاری در مطالعات وجود دارد:

- از لجن سنگ به‌عنوان جایگزین ماسه (نه سیمان) استفاده کنند،
- از سیستم‌های چسباننده با سیمان کم (مقدار بالای سرباره، آهک، و حداقل سیمان پرتلند معمولی) بهره ببرند،
- به بررسی بهبود خواص رئولوژیکی ناشی از افزودن انواع مختلف لجن سنگ در بتن خودمتراکم بپردازند.

این پژوهش به صورت منحصربه‌فرد، استفاده از لجن سنگ‌بری سنگ‌های مرمر، گرانیت و تراورتن را به عنوان جایگزین قسمتی از ماسه (در سطوح ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) در تولید بتن خودمتراکم بررسی می‌کند. برخلاف مطالعاتی که عمدتاً به جایگزینی سیمان پرداخته‌اند، در اینجا جایگزینی ماسه مستقیماً بر دینامیک جریان بتن تأثیر می‌گذارد. افزون بر آن، چسباننده مورد استفاده شامل ۸۵٪ سرباره، ۱۰٪ سیمان پرتلند و ۵٪ آهک هیدراته است که به‌شدت ردپای کربنی مخلوط را کاهش می‌دهد.

اگرچه این نوع چسباننده به تنهایی خواص مناسبی را در حالت تازه‌ی بتن فراهم می‌کند، افزودن لجن سنگ خواص رئولوژیک، مقاومت در برابر جداشدگی و کارپذیری کلی بتن خودمتراکم را بهبود می‌دهد. در نهایت، یک ارزیابی زیست‌محیطی مقایسه‌ای میان این طرح‌ها و بتن خودمتراکم ساخته شده از سیمان پرتلند با مقاومت مشابه انجام شده است. آنچه این پژوهش را متمایز می‌سازد، استفاده هم‌زمان از پسماند سنگی به‌عنوان جایگزین ماسه و سامانه چسباننده با حداقل سیمان است – رویکردی نوآورانه که پیش‌تر در تحقیقات مطرح نشده است.

در این پژوهش، از سرباره کوره‌بلند آسیاب‌شده (GGBFS)

قابل توجه مصرف سیمان و آثار زیست‌محیطی ناشی از تولید بتن صورت گرفته است. درشت‌دانه مورد استفاده، سنگ آهک شکسته با ابعاد اسمی حداکثر ۱۲/۵ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۶۷ و جذب آب کمتر از ۲٪ بود. همچنین ماسه به کار رفته دارای مدول نرمی حدود ۳/۰ و وزن مخصوص ۲/۶۳ بود (مطابق جدول ۲).

لجن سنگ‌بری به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن خودمتراکم به کار رفت. سه نوع پودر لجن سنگ مورد استفاده شامل لجن سنگ مرمر، گرانیت و تراورتن بودند که از کارخانه‌های سنگ‌بری محلی جمع‌آوری شدند (شکل ۱).

این لجن‌ها در مقادیر ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی جایگزین ماسه شدند. علت استفاده از این درصدها این است که از طرفی میزان جایگزینی ماسه قابل توجه باشد و از طرف دیگر درصد جایگزینی بهینه و درصد جایگزینی که باعث افت نتایج می‌شود را با کمترین تعداد آزمایش بتوان یافت. منحنی دانه‌بندی سیمان، سرباره و لجن سنگ‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است.

برای تضمین کارپذیری مناسب مخلوط‌های SCC، از فوق روان‌کننده پایه پلی‌کربوکسیلات (Auramix 4450)، تولید شرکت فسراک استفاده شد. مقدار این افزودنی برای هر طرح اختلاط بر اساس محدوده کارپذیری مطلوب تنظیم شد.

عمل اختلاط در پن میکسر با ظرفیت ۱۰۰ لیتر انجام شد. در ابتدا، کلیه مواد خشک شامل چسباننده، ماسه، شن و لجن سنگ به مدت حدود ۲ دقیقه مخلوط شدند. سپس نیمی از آب به‌همراه کل فوق‌روان‌کننده به مخلوط اضافه شد و هم‌زدن به مدت ۲ دقیقه دیگر ادامه یافت. در ادامه، نیمه باقیمانده آب به‌تدریج افزوده شده و فرایند اختلاط به مدت حدود ۴ دقیقه ادامه یافت تا یک مخلوط یکنواخت و همگن حاصل شود. بتن تازه بلافاصله پس از اختلاط، برای آزمون‌های کارایی مورد آزمایش قرار گرفت و سپس در قالب‌ها ریخته شد.



شکل ۱. لجن سنگ‌های تراورتن، مرمر و گرانیت

Fig. 1. Stone sludge of marble, travertine and granite

به‌جای سایر مواد پوزولانی استفاده شد، زیرا این ماده در کشور به‌وفور در دسترس است، فعالیت پوزولانی و هیدرولیکی بالایی دارد و با کاهش نیاز به کلینکر، منجر به کاهش قابل توجه انتشار CO_2 می‌شود.

در میان استراتژی‌های اصلی کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در صنعت سیمان، شامل ذخیره‌سازی کربن، استفاده از سوخت و مواد جایگزین، بهره‌وری انرژی، و جایگزینی کلینکر، به‌کارگیری سرباره در چسباننده‌های سیمانی در دسته جایگزینی کلینکر قرار می‌گیرد. این رویکرد با کاهش سهم کلینکر در ترکیب سیمان، انتشار مستقیم CO_2 ناشی از فرآیند کلسیناسیون را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. گرچه این روش به‌طور غیرمستقیم موجب صرفه‌جویی در انرژی نیز می‌شود، اما در چارچوب استراتژی‌های یادشده، به عنوان راهکاری از نوع جایگزینی کلینکر شناخته می‌شود. در این پژوهش نیز استفاده از چسباننده سه‌جزئی شامل سرباره، آهک و سیمان پرتلند، به‌منظور کاهش ردپای کربن و حرکت به‌سوی بتن پایدار به کار گرفته شده است.

اگرچه صنعت فولاد از منابع اصلی انتشار CO_2 است، اما سرباره کوره‌بلند محصول جانبی اجتناب‌ناپذیر آن بوده و استفاده از آن در سیمان و بتن با جایگزینی کلینکر پرکربن، موجب کاهش انتشار خالص CO_2 می‌شود. مطالعاتی مانند مطالعات سینگ [13] نیز این رویکرد را از نظر زیست‌محیطی تأیید کرده‌اند.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، مخلوط‌های بتن خودمتراکم (SCC) با استفاده از یک سامانه چسباننده سه‌جزئی متشکل از سیمان پرتلند معمولی (OPC)، سرباره کوره بلند آسیاب‌شده (GGBFS)، و آهک هیدراته طراحی شدند. سیمان مورد استفاده از نوع ۳۲۵-۱ و محصول شرکت سیمان اصفهان بود. سرباره نیز از شرکت سیمان کویر کاشان تهیه شد. آهک هیدراته با خلوص ۹۸٪ به‌عنوان فعال‌کننده برای افزایش واکنش‌پذیری پوزولانی سرباره به کار رفت. آهک هیدراته با ایجاد محیط قلیایی، واکنش‌های هیدراسیون سرباره را تسریع کرده و باعث تشکیل ژل‌های C-S-H می‌شود که عامل اصلی ایجاد مقاومت در این سیستم‌های کم‌سیمان است.

ویژگی‌های شیمیایی سیمان و سرباره در جدول (۱) ارائه شده‌اند. انتخاب این سامانه چسباننده سه‌جزئی با هدف کاهش

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سرباره و سیمان

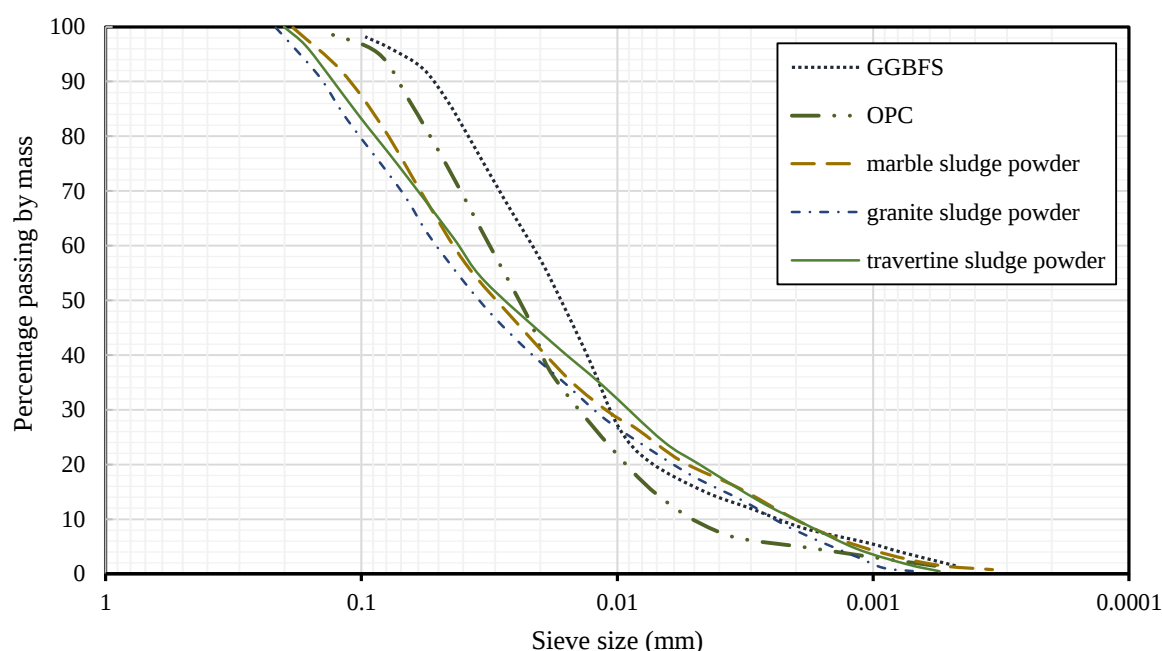
Table 1. Chemical specifications of materials

composition (% by mass)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
GGBFS	37.6	35.8	13.3	1	9	2.4	0.4	0.5	37.6
OPC	61	21.9	5.5	3.4	2.3	2.3	0.3	0.6	-

جدول ۲. توزیع اندازه دانه‌های ماسه و درشت‌دانه

Table 2. Particle size distribution of sand and coarse aggregate.

Sieve size (mm)	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
Percentage passing by mass (%) (sand)	-	-	100	88.65	57.15	33.88	15.38	4.50
Percentage passing by mass (%) (coarse aggregate)	95.80	42.28	0.65	0	-	-	-	-



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سیمان، سرباره و لجن سنگ‌ها

Fig. 2. Particle size distribution of hydrated lime, GGBFS, and stone sludge powders

در تمامی طرح‌های اختلاط، نسبت آب به سیمان یکسان و برابر با ۰/۳۷ در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مقدار فوق‌روان‌کننده در نمونه مرجع (CTRL) و نمونه‌های M10، G10 و T10 یکسان است، اثر افزودن لجن سنگ بر کارپذیری بتن خودمترکم مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش درصد لجن سنگ، برای حفظ نسبت آب به مواد چسباننده، مقدار بیشتری فوق‌روان‌کننده لازم بوده و مقدار افزایش آن در درصد‌های برابر انواع لجن سنگ، ثابت است. به عنوان نمونه میزان فوق‌روان‌کننده در طرح‌های G30، M30 و T30 با هم برابر بوده و به دلیل درصد بیشتر لجن سنگ، دوز بیشتری از فوق‌روان‌کننده در آن‌ها نسبت به طرح‌های دیگر استفاده شده است. به این ترتیب، اثر انواع مختلف لجن سنگ بر خواص بتن تازه و سخت‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نمونه‌های استوانه‌ای (با ابعاد ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM C39 [33]) برای تمام آزمون‌های مکانیکی استفاده شدند. پس از بتن‌ریزی، نمونه‌ها به مدت ۳۶ ساعت در قالب باقی ماندند و سپس در حوضچه آب آهک اشباع به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. جدول (۳) طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد. برای مشخص کردن طرح‌های مختلف بتن، از علائم اختصاری استفاده شد. اصطلاح CTRL به طرح اختلاط شاهد (کنترل) اطلاق می‌شود که هیچ لجن سنگی در آن به کار نرفته است. مخلوط‌هایی که شامل لجن مرمر به عنوان جایگزین ماسه به میزان ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی هستند، به ترتیب به صورت M10، M15 و M20 نام‌گذاری شدند. به طور مشابه، مخلوط‌های حاوی لجن گرانیت با G10، G15 و G20 مشخص می‌شوند و نمونه‌هایی که شامل لجن تراورتن هستند به ترتیب T10، T15 و T20 نام دارند.

جدول ۳. نسبت مصالح در طرح‌های اختلاط

Table 3. Mixture proportions

Mixture	Materials (kg/m ³)							
	Slag	Cement	Hydrated lime	Water	Sand	Stone sludge	Coarse aggregate	Superplasticizer
CTRL	382.5	45	22.5	166.5	1150	0	600	4.05
M10	382.5	45	22.5	166.5	1035	115	600	4.05
M15	382.5	45	22.5	166.5	977.5	172.5	600	4.61
M20	382.5	45	22.5	166.5	920	230	600	4.74
G10	382.5	45	22.5	166.5	1035	115	600	4.05
G15	382.5	45	22.5	166.5	977.5	172.5	600	4.61
G20	382.5	45	22.5	166.5	920	230	600	4.74
T10	382.5	45	22.5	166.5	1035	115	600	4.05
T15	382.5	45	22.5	166.5	977.5	172.5	600	4.61
T20	382.5	45	22.5	166.5	920	230	600	4.74

[35] به منظور ارزیابی ویسکوزیته و کارپذیری بتن اجرا شد. برای تعیین یکنواختی مخلوط و مقاومت آن در برابر آب‌انداختگی و جداسازی درشت‌دانه، آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه انجام گرفت.

۲-۱- آزمایش بتن تازه

۲-۱-۱- آزمون جریان اسلامپ

این آزمون کارپذیری بتن خودمتراکم (SCC) را با اندازه‌گیری قطر بتن پخش شده پس از برداشتن مخروط اسلامپ استاندارد، ارزیابی می‌کند. این فرآیند بدون هیچ‌گونه تراکم مکانیکی انجام می‌شود و قطر متوسط ثبت می‌شود (شکل ۳). نتیجه آزمون مستقیماً نشان‌دهنده قابلیت پرمکنندگی بتن است. محدوده‌های عملکرد قابل قبول این آزمون در جدول (۴) خلاصه شده‌اند.

۲-۱-۲- آزمایش T₅₀₀

زمان T₅₀₀ که به‌عنوان بخشی از آزمون جریان اسلامپ ثبت می‌شود، نشان‌دهنده مدت زمانی است که بتن برای رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر نیاز دارد. این مقدار بیانگر ویسکوزیته نسبی و سرعت جریان مخلوط است. مقادیر هدف برای این پارامتر در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

۲-۱-۳- آزمون V-Funnel

در این آزمون، بتن تحت تأثیر نیروی گرانش از درون یک قیف V شکل عبور داده می‌شود و زمان لازم برای تخلیه کامل آن اندازه‌گیری می‌گردد (شکل ۴). این فرآیند اطلاعاتی درباره ویسکوزیته و کارپذیری بتن فراهم می‌کند. محدوده‌های توصیه‌شده برای این آزمون در جدول (۴) آمده‌اند.



شکل ۳. آزمایش جریان اسلامپ
Fig. 3. Slump flow test

در طرح‌های اختلاطی که از لجن سنگ به‌جای ماسه استفاده شده است، مقدار آب موجود در مخلوط کاهش می‌یابد، زیرا سهم ماسه که مرطوب است در مخلوط کمتر است. این کاهش میزان آب بر اساس رطوبت ماسه محاسبه شده و دوباره به طرح اختلاط اضافه شد. عملکرد طرح‌های اختلاط از طریق مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد آزمایشگاهی، هم در حالت تازه و هم در حالت سخت‌شده ارزیابی شد. ویژگی‌های بتن تازه بلافاصله پس از اختلاط بررسی شدند. آزمایش جریان اسلامپ طبق استاندارد ASTM C1611 [34] برای ارزیابی قابلیت پرمکنندگی بتن خودمتراکم انجام شد. همچنین زمان T₅₀₀ (زمان لازم برای رسیدن بتن جریان یافته در آزمایش اسلامپ به قطر ۵۰۰ میلی‌متر) به‌عنوان شاخص سرعت جریان اندازه‌گیری شد. آزمون V-Funnel بر اساس دستورالعمل EFNARC

زیست محیطی یک محصول را از مرحله استخراج مواد خام، تولید و حمل و نقل تا پایان عمر آن مورد بررسی قرار می دهد. در این مطالعه، LCA با استفاده از داده های پس زمینه ای که عمدتاً از پایگاه داده Ecoinvent v3.8 استخراج شده بود، انجام گرفت.



شکل ۴. آزمایش قیف V شکل

Fig. 4. V-Funnel test



شکل ۵. نمونه های آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 5. Compressive strength test specimens



شکل ۶. آزمایش خمش چهار نقطه ای

Fig. 6. 4-point Flexural test

جدول ۴. محدوده های پیشنهادی برای خواص بتن خودمتراکم تازه بر اساس (EFNARC 2002)

Table 4. Recommended Ranges for Fresh SCC Properties (According to EFNARC 2002)

Test Method	Evaluated Property	Recommended Range
Slump Flow	Filling ability	650–800 mm
T ₅₀₀ Time	Viscosity/flow rate	2–5 seconds
V-Funnel	Flowability/viscosity	6–12 seconds
V-Funnel after 5 min (ΔT)	Segregation resistance	≤ 3 seconds

۲-۱-۴-آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه (مقاومت در برابر

جداشدگی)

این آزمون مقاومت بتن خودمتراکم در برابر جداشدگی را می سنجد. پس از اجرای اولیه آزمون V-Funnel، بتن دوباره داخل قیف ریخته شده و به مدت پنج دقیقه در حالت سکون باقی می ماند و سپس دریچه قیف باز می شود. تفاوت میان دو زمان جریان برای ارزیابی پایداری مخلوط به کار می رود. معیارهای قابل قبول این پارامتر در جدول (۴) ذکر شده اند.

۲-۲-آزمایش های بتن سخت شده

پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب آهک اشباع، نمونه های بتن سخت شده تحت آزمایش های مکانیکی قرار گرفتند. مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39 با استفاده از نمونه های استوانه ای به ابعاد 100×200 میلیمتر اندازه گیری شد (شکل ۵). آزمایش خمش چهار نقطه ای طبق استاندارد BS EN 1170-5 [36] و تحت پروتکل کنترل-جابه جایی انجام شد و نرخ جابه جایی برابر با ۱ میلی متر بر دقیقه تنظیم شد. برای آزمون خمش، نمونه هایی با ابعاد $350 \times 100 \times 40$ میلی متر استفاده شدند. فاصله بین انتهای نمونه و تکیه گاه های مجاور ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شد (شکل ۶). تمام آزمایش ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شدند و هر اندازه گیری حداقل روی سه نمونه تکرار شد.

۲-۳-ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment - LCA)

در چند دهه اخیر، اهمیت پایداری زیست محیطی در صنعت ساخت و ساز به طور چشمگیری افزایش یافته است. یکی از مؤثرترین ابزارها برای ارزیابی عملکرد زیست محیطی مصالح ساختمانی، ارزیابی چرخه عمر (LCA) است.

LCA یک روش علمی استاندارد است که تمام آثار

به ۷۱، ۷۰ و ۷۰/۵ سانتی متر افزایش یافته است، در حالی که زمان T_{500} از ۴/۹ ثانیه به ۲/۷، ۳/۱ و ۲/۸ ثانیه کاهش یافته است.

با جایگزینی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ماسه با لجن مرمر، زمان آزمون V-Funnel به ترتیب ۴/۱۹، ۴/۲۵ و ۴/۰۸ ثانیه کاهش یافت. همچنین اختلاف زمان آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه از ۱/۱ ثانیه به ترتیب به ۰/۱۷، ۰/۲۸ و ۰/۲۸ ثانیه کاهش یافت که نشان دهنده افزایش مقاومت بتن در برابر جداسازی سنگدانه ها است. علاوه بر این، زمان آزمون T_{500} به ترتیب ۲/۲، ۲/۱ و ۲ ثانیه کاهش پیدا کرد.

نمونه ی G10 (با ۱۰٪ لجن گرانیات) در مقایسه با نمونه شاهد ویژگی های بهتری در حالت تازه نشان داد؛ زمان V-Funnel برابر با ۷/۵۹ ثانیه (۳/۷۹ ثانیه کاهش) و مقدار ΔV -Funnel بعد از ۵ دقیقه برابر با ۰/۳۹ ثانیه (۰/۷۱ ثانیه کاهش) بود. همچنین زمان آزمون T_{500} نیز ۱/۸ ثانیه کاهش داشت. با این حال، افزایش درصد لجن گرانیات به ۱۵٪ و ۲۰٪ منجر به افزایش زمان آزمایش T_{500} شد؛ برای مخلوط های G15 و G20 زمان V-Funnel به ترتیب به ۱۱/۱ و ۱۳/۱۲ ثانیه و مقادیر V_{5min} به ۱۳/۰۲ و ۱۴/۹۲ ثانیه رسید. این نتایج نشان می دهد که افزایش میزان لجن گرانیات می تواند کارپذیری مخلوط را کاهش داده و ویسکوزیته را افزایش دهد. با جایگزینی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ماسه با لجن تراورتن، زمان آزمون V-Funnel به ترتیب ۴/۴۵، ۴/۱۷ و ۳/۷۶ ثانیه کاهش یافت. اختلاف زمان آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه نیز از ۱/۱ ثانیه به ترتیب به ۰/۱۹، ۰/۴۱ و ۰/۳۴ ثانیه کاهش پیدا کرد که نشان دهنده بهبود مقاومت بتن در برابر جداسازی سنگدانه ها است. علاوه بر این، زمان آزمون T_{500} نیز به ترتیب ۲/۱، ۱/۶ و ۱/۴ ثانیه کاهش یافت.

مرزهای سیستم در این مطالعه به صورت از گهواره تا دروازه (cradle to gate) تعریف شدند؛ به این معنا که تمامی مراحل از استخراج مواد خام تا رسیدن محصول نهایی به در کارخانه را در بر می گرفت، اما مرحله استفاده و پایان عمر (end-of-life) در نظر گرفته نشد.

در زمینه بتن، به ویژه انواع پیشرفته ای مانند بتن خودمتراکم، LCA نقش مهمی در شناسایی بهینه ترین طرح های اختلاط از منظر زیست محیطی ایفا می کند. برای ارزیابی آثار زیست محیطی طرح های اختلاط بتن در این مطالعه، یک مخلوط بتن خودمتراکم با استفاده از سیمان پرتلند معمولی به عنوان ماده چسباننده تهیه شد. با تنظیم مقدار سیمان و در عین حال ثابت نگه داشتن میزان سنگدانه های درشت و ریز نسبت به سایر طرح ها، مقاومت فشاری ۲۸ روزه این مخلوط به گونه ای طراحی شد که به مقاومت نمونه کنترل نزدیک باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش های بتن تازه

جدول (۵) نتایج آزمایش بتن تازه را ارائه می دهد. طرح اختلاط شاهد، که در آن از لجن سنگ استفاده نشده، حداقل الزامات بتن خودمتراکم را برآورده می کند.

از آنجایی که مقدار آب و فوق روان کننده در طرح اختلاط شاهد و مخلوط های G10، M10 و T10 یکسان است، اثر جایگزینی ماسه با لجن سنگ بر جریان اسلامپ بتن خودمتراکم با مقایسه این چهار مخلوط قابل ارزیابی است.

نتایج نشان می دهد که جریان اسلامپ به ترتیب از ۶۶ سانتی متر

جدول ۵. نتایج آزمایش های بتن در حالت تازه

Table 5. Fresh concrete experiment results

Mixture	Slump flow (mm)	T_{500} (s)	V (s)	V_{5min} (s)	ΔV (s)
CTRL	660 ± 2	4.9 ± 0.10	11.38 ± 0.18	12.48 ± 0.16	1.1
M10	710 ± 1	2.7 ± 0.07	7.19 ± 0.11	7.36 ± 0.13	0.17
M15	725 ± 2	2.8 ± 0.07	7.13 ± 0.10	7.41 ± 0.15	0.28
M20	720 ± 1	2.9 ± 0.08	7.3 ± 0.14	7.58 ± 0.11	0.28
G10	700 ± 3	3.1 ± 0.06	7.59 ± 0.16	7.98 ± 0.14	0.39
G15	660 ± 2	4.7 ± 0.07	11.1 ± 0.18	13.02 ± 0.17	1.92
G20	640 ± 1	5.1 ± 0.09	13.12 ± 0.15	14.92 ± 0.17	1.8
T10	705 ± 1	2.8 ± 0.07	6.93 ± 0.10	7.12 ± 0.12	0.19
T15	690 ± 3	3.3 ± 0.05	8.21 ± 0.12	9.33 ± 0.11	1.12
T20	685 ± 2	3.5 ± 0.05	8.63 ± 0.13	9.76 ± 0.15	1.13

زبرتری نسبت به ذرات مرمر و تراورتن دارند.

۳-۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

۳-۲-۱- آزمون مقاومت فشاری

شکل (۸) مقاومت فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه شاهد به ترتیب ۲۱/۹ و ۳۹/۷ مگاپاسکال بود. چگونگی شکست نمونه‌های فشاری در شکل (۷) نشان داده شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه تقریباً دو برابر مقدار ۷ روزه است. این رفتار در مقایسه با بتن معمولی مبتنی بر سیمان پرتلند، که معمولاً حدود ۷۰ درصد مقاومت نهایی در ۷ روز حاصل می‌شود، بیانگر کندی نسبی در فرایند هیدراسیون اولیه است. علت این رفتار را می‌توان به نقش مواد پوزولانی / افزودنی‌ها در کندسازی واکنش‌های اولیه و رشد تدریجی محصولات هیدراسیون (C-S-H) نسبت داد که در سنین بالاتر منجر به افزایش مقاومت می‌شود [32,37].

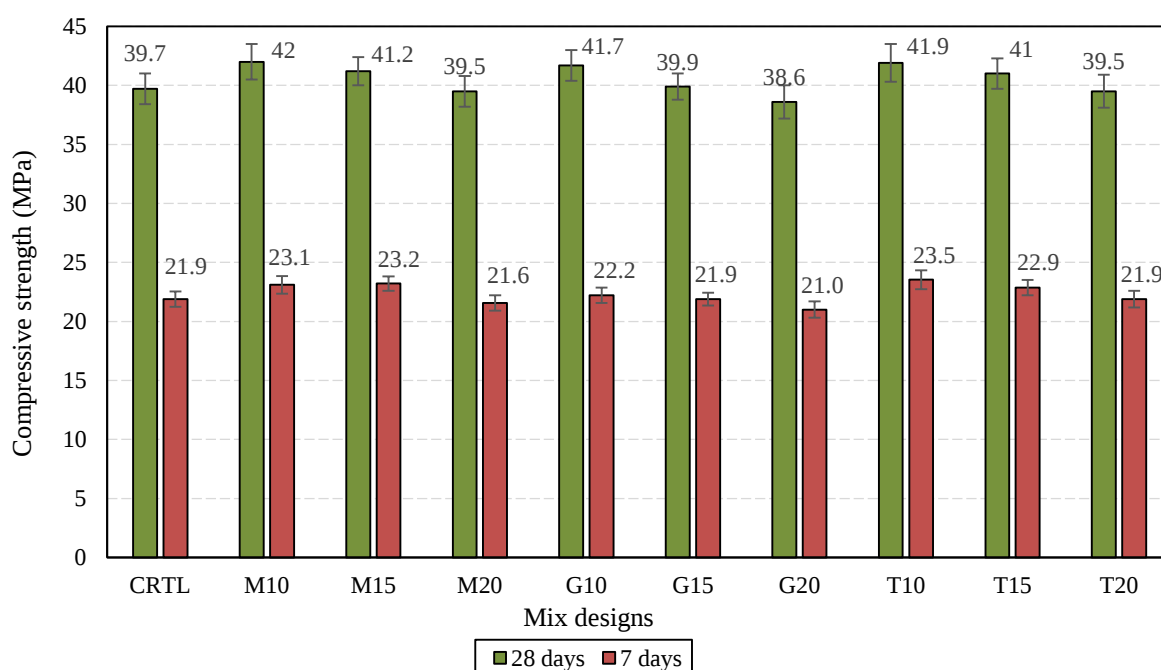
با جایگزینی ۱۰٪ ماسه با لجن مرمر، گرانیت و تراورتن، مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب ۱/۵، ۱/۱۰ و ۱/۹٪ افزایش یافت و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز به ترتیب ۵/۹، ۵/۱ و ۵/۵٪ بیشتر شد.



شکل ۷. شکست فشاری نمونه

Fig. 7. Compressive failure of sample

بر اساس نتایج آزمون‌های بتن تازه، جایگزینی ۱۰٪ ماسه با هر سه نوع لجن سنگ، کارایی بتن و انسجام سنگدانه‌ها را به‌طور چشمگیری بهبود داد، بدون اینکه نیازی به افزودن فوق‌روان‌کننده اضافی باشد. با این حال، در سطوح جایگزینی ۱۵٪ و ۲۰٪، مقایسه سه نوع لجن سنگ نشان داد که لجن سنگ مرمر و پس از آن تراورتن بیشترین تأثیر مثبت را بر بهبود خواص بتن خودمترکم در حالت تازه داشته‌اند، در حالی که لجن گرانیت موجب کاهش کارایی بتن شده است. این پدیده را می‌توان به مورفولوژی ذرات نسبت داد، چراکه ذرات لجن گرانیت لبه‌های تیزتر و سطوح



شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌ها

Fig. 8. Compressive strength of specimens

جدول ۶. مقاومت فشاری نمونه‌ها

Table 6. Compressive strength of specimens

Mix designs	28-day Compressive Strength (MPa)					7-day Compressive Strength (MPa)				
	Samples		Mean	SD		Samples		Mean	SD	
CRTL	38.4	39.9	40.8	39.7	0.99	21	22.1	22.5	21.9	0.63
M10	40.6	41.9	43.5	42	1.19	22.5	23	23.9	23.1	0.58
M15	40.1	41.1	42.4	41.2	0.94	22.6	23.4	23.6	23.2	0.43
M20	38.4	39.3	40.8	39.5	0.99	20.9	21.6	22.3	21.6	0.57
G10	40.4	41.7	43	41.7	1.06	21.5	22.3	22.9	22.2	0.57
G15	38.9	39.8	41	39.9	0.86	21.3	22.2	22.2	21.9	0.42
G20	37.4	38.4	40	38.6	1.07	20.2	21.1	21.7	21.0	0.62
T10	40.3	42.2	43.2	41.9	1.2	23	23.2	24.3	23.5	0.57
T15	39.7	41	42.3	41	1.06	22.2	22.9	23.5	22.9	0.53
T20	38	39.6	40.9	39.5	1.19	21.1	22	22.6	21.9	0.62

با جایگزینی ۱۰٪ ماسه با لجن مرمر، گرانیته و تراورتن، مقاومت خمشی به‌ترتیب ۲۰٪، ۲۰٪ افزایش در مخلوط مرمر و ۳۱٪ و ۲۹٪ کاهش در مخلوط‌های گرانیته و تراورتن نشان داد.

در سطح جایگزینی ۱۵٪، مقاومت خمشی به‌ترتیب برای مرمر، گرانیته و تراورتن ۴۲٪، ۱۱٪ و ۹۹٪ کاهش یافت. با جایگزینی ۲۰٪، این کاهش‌ها به‌ترتیب ۹۰٪، ۱۸٪ و ۱۷٪ بودند.

جایگزینی ۱۰٪ ماسه با انواع لجن سنگ تغییرات کمی در مقاومت خمشی ایجاد کرد؛ درواقع لجن مرمر موجب افزایش جزئی مقاومت در حدود ۲٪ شد. اما افزایش سطح جایگزینی به ۱۵٪ و ۲۰٪ منجر به کاهش قابل توجه مقاومت خمشی گردید. این موضوع را می‌توان به افزایش ذرات ریز و سطح ویژه بالاتر نسبت داد، که باعث بالا رفتن نیاز به مواد سیمانی برای ایجاد پیوند مناسب می‌شود. با این حال، کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی لجن مرمر کمتر محسوس بود.

افزایش ذرات ریز ناشی از جایگزینی لجن سنگ تمایل به تضعیف منطقه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه (ITZ) دارد. در سطوح بالای جایگزینی، وجود ذرات ریز اضافی می‌تواند به کاهش تراکم بسته‌بندی و افزایش نیاز آبی منجر شود که این موضوع باعث ایجاد تخلخل موضعی و نواحی ضعیف در مرز خمیر و سنگدانه خواهد شد. این عوامل در مجموع باعث کاهش عملکرد خمشی می‌شوند، زیرا مقاومت خمشی نسبت به کیفیت پیوند و ریزترک‌ها حساس‌تر از مقاومت فشاری است.

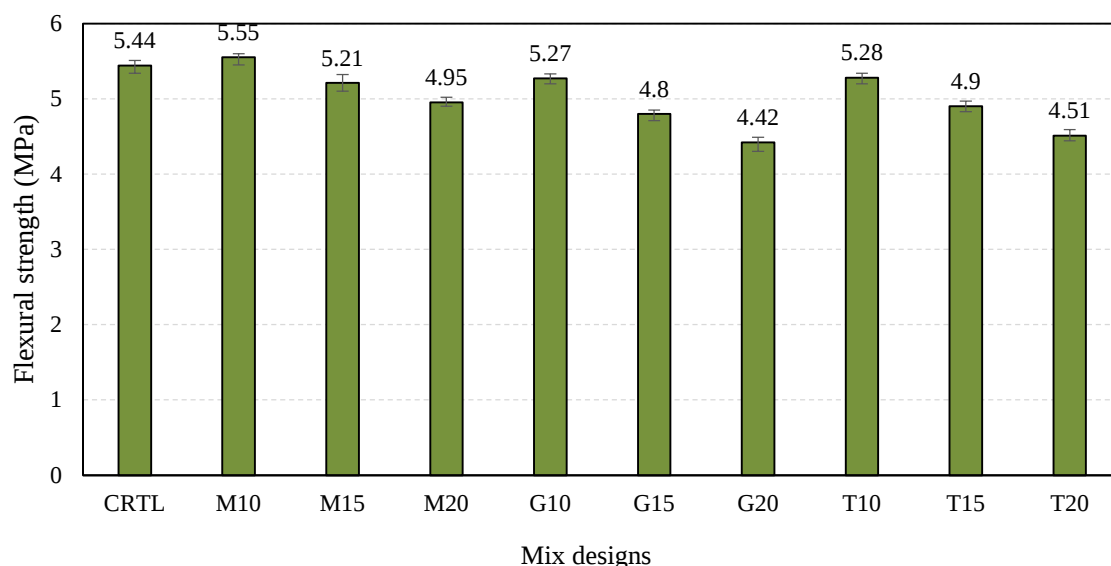
در سطح جایگزینی ۱۵٪، مقاومت فشاری ۷ روزه برای لجن مرمر ۵٪ افزایش و برای لجن گرانیته و تراورتن هر کدام ۵٪/۰ کاهش داشت. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز به‌ترتیب ۳۸٪، ۵٪/۰ و ۳۳٪ افزایش یافت.

در سطح جایگزینی ۲۰٪، مقاومت فشاری ۷ روزه برای لجن مرمر، گرانیته و تراورتن به‌ترتیب ۳۴٪، ۶۳٪ و ۴۴٪ کاهش یافت و مقاومت ۲۸ روزه نیز به‌ترتیب ۴۰٪، ۲۸٪ و ۰۶٪ کاهش پیدا کرد.

به طور کلی، جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ ماسه با لجن سنگ منجر به بهبود مقاومت فشاری شد. این بهبود می‌تواند ناشی از جایگیری بهتر ذرات و توزیع یکنواخت‌تر سنگدانه‌ها باشد. با این حال، بیشترین افزایش مقاومت در سطح جایگزینی ۱۰٪ مشاهده شد. با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری کاهش یافت و در سطح ۲۰٪ کمتر از نمونه‌ی کنترل شد. این کاهش احتمالاً به دلیل افزایش میزان ذرات ریز است که باعث بالا رفتن سطح ویژه و افزایش نیاز به مواد سیمانی برای ایجاد پیوند مناسب می‌شود. با این وجود، لجن مرمر بهترین عملکرد را نشان داد؛ به‌طوری که حتی در سطح ۲۰٪، مقاومت آن نزدیک به نمونه کنترل بود، در حالی که کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی گرانیته محسوس‌تر بود.

۳-۲-۲-آزمون مقاومت خمشی

شکل (۹) مقاومت خمشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در آزمون مقاومت خمشی، تنها مقاومت خمشی ۲۸ روزه اندازه‌گیری شد. مقاومت خمشی نمونه کنترل برابر با ۵/۴۴ مگاپاسکال بود.



شکل ۹. مقاومت خمشی نمونه‌ها

Fig. 9. Flexural strength of specimens

جدول ۷. مقاومت خمشی نمونه‌ها

Table 7. Flexural strength of specimens

Mix designs	28-day Flexural Strength (MPa)				
	Samples			Mean	SD
CTRL	5.34	5.47	5.51	5.44	0.07
M10	5.45	5.60	5.60	5.55	0.07
M15	5.10	5.21	5.32	5.21	0.09
M20	4.90	4.93	5.02	4.95	0.05
G10	5.20	5.28	5.33	5.27	0.05
G15	4.71	4.84	4.85	4.80	0.06
G20	4.30	4.47	4.49	4.42	0.09
T10	5.20	5.30	5.34	5.28	0.06
T15	4.83	4.90	4.97	4.90	0.06
T20	4.44	4.50	4.59	4.51	0.06

۳-۲-۳- تحلیل نتایج بر اساس ریز ساختار

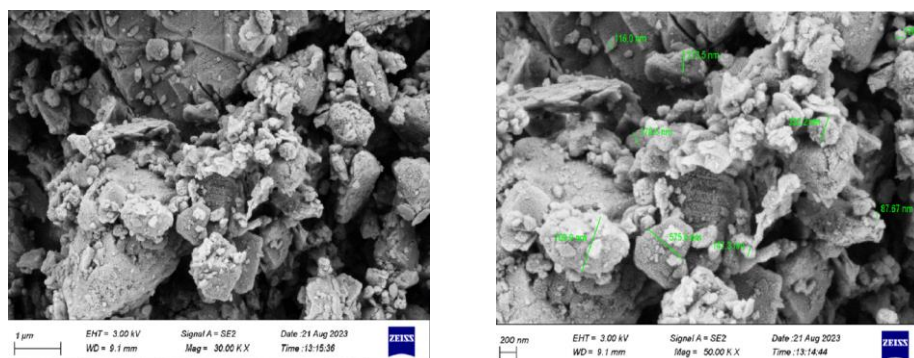
به منظور درک بهتر رفتار رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط‌های بتنی حاوی انواع مختلف لجن سنگ، تحلیل ریزساختاری با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) که از منابع پژوهشی پیشین استخراج شده بودند [38-43] انجام شد. مورفولوژی ذرات لجن - به ویژه شکل، بافت سطحی و میزان ریزی آن‌ها - نقش بسیار مهمی در تأثیرگذاری بر کارایی و مشخصات مقاومتی بتن ایفا می‌کند.

همان‌گونه که در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است،

ذرات لجن تراورتن و مرمر به دلیل ماهیت نرم‌تر این سنگ‌ها و حساسیت بیشتر آن‌ها به سایش در فرآیندهای برش و پولیش، عمدتاً دارای شکلی گردتر و سطحی صاف‌تر هستند. در مقابل، ذرات لجن گرانیت (شکل ۱۲) به‌طور قابل‌توجهی زاویه‌دارتر و زبرتر بوده که این امر ناشی از سختی بالاتر و رفتار شکست ترد گرانیت است.

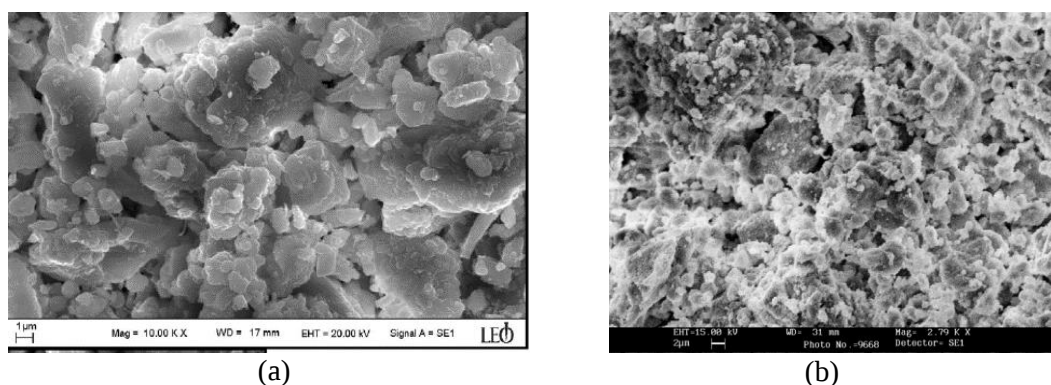
این تفاوت مورفولوژیکی، عملکرد رئولوژیکی مشاهده شده را توجیه می‌کند؛ به‌طوری‌که مخلوط‌های حاوی لجن مرمر و تراورتن، جریان اسلامپ بالاتر و مقادیر کمتر زمان T500 و آزمون قیف V را نشان دادند که بیانگر کارایی بهتر است. ذرات صاف و گرد موجب کاهش اصطکاک داخلی شده و جریان‌پذیری بتن را تحت اثر نیروی گرانش تسهیل می‌کنند. علاوه بر این، ذرات ریزتر و نامنظم‌تر لجن گرانیت می‌توانند نیاز آبی و اصطکاک داخلی را افزایش داده و در نتیجه، جریان‌پذیری را کاهش دهند.

افزون بر این، از دیدگاه ریزمکانیکی، ذرات گردتر موجود در لجن‌های مرمر و تراورتن می‌توانند منجر به بهبود جاگیری ذرات و کاهش تخلخل موضعی در ماتریس سیمانی شوند. این موضوع نه تنها به بهبود روانی مخلوط کمک می‌کند، بلکه در سطوح جایگزینی متوسط، به نتایج مطلوب‌تری در مقاومت فشاری نیز منجر می‌شود [21].



شکل ۱۰. تصویر SEM لجن سنگ تراورتن از تحقیقات نجاتی و همکاران [38]

Fig. 10. SEM image of travertine sludge: Nejati et al. [38]

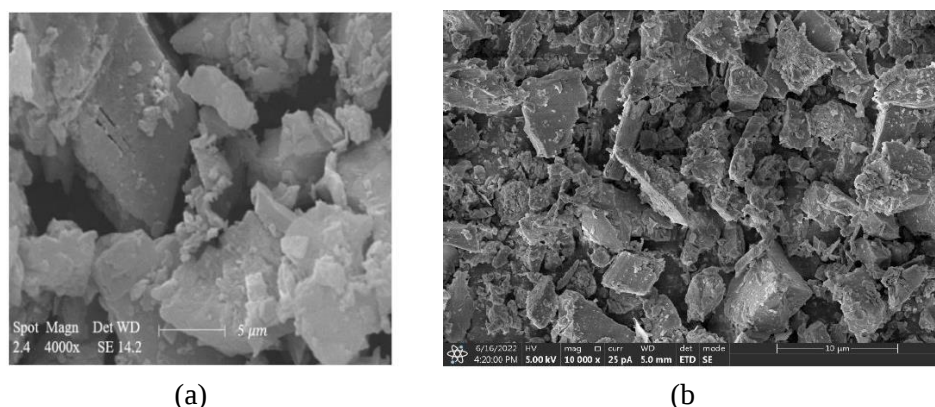


(a)

(b)

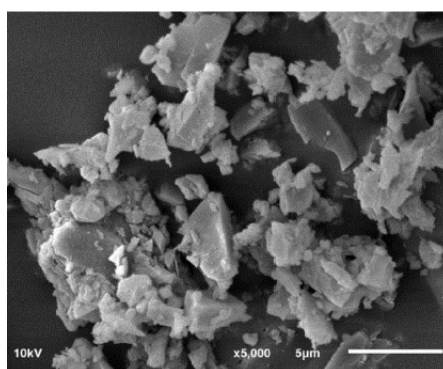
شکل ۱۱. تصویر SEM لجن سنگ مرمریت از تحقیقات: (a) دمیرال و الیاماچ [39]; (b) کرگیز و همکاران [40]

Fig. 11. SEM image of marble sludge: (a) Demirel and Alyamaç [39]; (b) Kırgız et al. [40]



(a)

(b)



(c)

شکل ۱۲. تصویر SEM لجن سنگ گرانیت از تحقیقات: (a) محمدی و همکاران [41]; (b) هوانگ و همکاران [42]; (c) احمد و همکاران [43]

Fig. 12. SEM image of granite sludge: (a) Mohammadi et al. [41]; (b) Huang et al. [42]; (c) Ahmed et al. [43]

جدول ۸. میزان مصالح در یک متر مکعب بتن خودمتراکم

Table 8: Mix Design Proportions per 1 m³ of SCC.

Mixture	Cement	Water	Coarse aggregate	Sand	Superplasticizer	f'_c (MPa)
SCC400	400	160	600	1150	4	40.9±1.6

جدول ۹. نتایج ارزیابی چرخه عمر

Table 9. LCA results.

Mixture	GWP (kg CO ₂ -eq)	AP(kg SO ₂ -eq)	EP(kg PO ₄ -eq)	PE (MJ)
SCC400	369.85	1.47	0.30	2247
CTRL	105.37	0.51	0.11	651.8
X10	104.66	0.51	0.11	650.0
X15	104.34	0.5	0.1	649.1
X20	103.99	0.5	0.1	648.2

۳-۳- نتایج LCA

(شامل انرژی‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر) در طول چرخه عمر یک محصول یا سیستم است و بر حسب مگاژول (MJ) اندازه‌گیری می‌شود.

مخلوط SCC400 بیشترین اثر کربنی را با مقدار ۳۶۹/۸۵ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل بر متر مکعب نشان داد که به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از سایر طرح‌ها بود. مخلوط CTRL توانست GWP را نسبت به SCC400 حدود ۷۱/۵٪ کاهش دهد که این امر عمدتاً ناشی از جایگزینی قسمت زیادی از سیمان با سرباره و آهک هیدراته بود. افزودن لجن سنگ در طرح‌های X10، X15 و X20 اثر اندک اما پایداری در کاهش بیشتر GWP داشت؛ به طوری که X20 کمترین مقدار، یعنی ۱۰۳/۹۹ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل بر متر مکعب را ثبت کرد که ۷۱/۹٪ کمتر از SCC400 است.

مقدار پتانسیل اسیدی شدن (AP) برای SCC400 برابر ۱/۴۷ کیلوگرم گوگرد دی اکسید معادل بود که ۱۸۸٪ بیشتر از نمونه‌ی CTRL (۰/۵۱ کیلوگرم گوگرد دی اکسید معادل) است. مخلوط‌های اصلاح‌شده با لجن سنگ (X10 تا X20)، مقادیر AP را در محدوده ۰/۵ - ۰/۵۱ حفظ کردند.

مقدار پتانسیل یوتروفیکاسیون (EP) در SCC400 برابر ۰/۳۰ کیلوگرم فسفات معادل بود، در حالی که در نمونه CTRL ۰/۱۱ و در X15 و X20 برابر با ۰/۱۰ کیلوگرم بود؛ یعنی کاهش حدود ۶۷٪. این بهبود عمدتاً به دلیل کاهش مقدار سیمان و جایگزینی ماسه با لجن سنگ است که سهم اندکی در انتشار آلاینده‌های یوتروفیک دارد.

برای ارزیابی LCA، نمونه‌ی SCC400 به گونه‌ای ساخته شد که مقاومت فشاری نزدیک به نمونه CTRL داشته باشد و کمترین ویژگی‌های رئولوژیک بتن خودمتراکم را طبق جدول (۴) داشته باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مقادیر مواد تشکیل‌دهنده به ازای هر یک متر مکعب بتن در جدول (۸) ارائه شده‌اند.

جدول (۹) نتایج ارزیابی چرخه عمر (LCA) را در قالب شاخص‌های اصلی آثار زیست‌محیطی نشان می‌دهد. در این جدول X نشانگر علائم اختصاری لجن سنگ‌های G، M و T است. ارزیابی آثار زیست‌محیطی در LCA معمولاً شامل چهار شاخص کلیدی است:

- پتانسیل گرمایش جهانی (GWP): بیانگر سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای در تغییرات اقلیمی است و برحسب کیلوگرم کربن دی اکسید معادل (kg CO₂-eq) گزارش می‌شود.
- پتانسیل اسیدی شدن (AP): نشان‌دهنده ظرفیت آلاینده‌های خاص برای ایجاد باران اسیدی و تخریب زیست‌محیطی است و برحسب کیلوگرم گوگرد دی اکسید معادل (kg SO₂-eq) بیان می‌شود.
- پتانسیل یوتروفیکاسیون (EP): بیانگر غنی‌سازی منابع آبی با مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر است که می‌تواند منجر به رشد بیش‌ازحد جلبک‌ها و کاهش اکسیژن آب شود. این شاخص برحسب کیلوگرم فسفات معادل (kg PO₄³⁻-eq) گزارش می‌شود.
- تقاضای انرژی اولیه (PE): نشان‌دهنده کل انرژی مورد نیاز

۴- خلاصه و نتایج

این مطالعه تولید بتن خودمتراکم با استفاده از یک چسباننده سه‌جزئی و جایگزینی قسمتی از ماسه با درصدهای مختلف از انواع لجن سنگ را مورد بررسی قرار داد. آثار این جایگزینی‌ها بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط‌ها ارزیابی شد. علاوه بر این، عملکرد زیست‌محیطی این مخلوط‌ها با بتن خودمتراکم ساخته شده با چسباننده فقط سیمانی، که برای دستیابی به مقاومت فشاری تقریباً برابر طراحی شده بود، مقایسه شد.

۱- مقایسه‌ی بین بتن خودمتراکم تولید شده با چسباننده فقط سیمانی و بتن با چسباننده سه‌جزئی (شامل ۸۵٪ سرباره، ۱۰٪ سیمان و ۵٪ آهک هیدراته) نشان می‌دهد در حالی که بتن با چسباننده سه‌جزئی برای دستیابی به مقاومت فشاری تقریباً یکسان به حدود ۱۳٪ چسباننده بیشتر نیاز دارد، محتوای کمتر سیمان آن به طور قابل توجهی تمام شاخص‌های زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد. بنابراین، چسباننده سه‌جزئی یک جایگزین مناسب برای سیمان معمولی ارائه می‌دهد.

۲- در حالت تازه، جایگزینی ۱۰٪ ماسه با انواع مختلف لجن سنگ، بدون افزایش میزان آب یا فوق‌روان‌کننده، باعث بهبود چشمگیر رئولوژی بتن شد. تمام نتایج آزمایش بتن تازه به طور قابل توجهی از حداقل معیارهای SCC فراتر رفت.

۳- وقتی سطح جایگزینی لجن سنگ به ۱۵٪ و ۲۰٪ افزایش یافت، لجن مرمر و سپس تراورتن بیشترین تأثیر مثبت را بر خواص بتن خودمتراکم تازه داشتند، در حالی که لجن گرانیت جریان‌پذیری را کاهش داد. لجن مرمر بهترین نتایج را نشان داد.

۴- جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ ماسه با لجن سنگ، مقاومت فشاری را بهبود داد. بیشترین افزایش مقاومت در جایگزینی ۱۰٪ مشاهده شد. در سطوح بالاتر جایگزینی، مقاومت کاهش یافت و در مخلوط‌هایی با ۲۰٪ لجن، مقاومت فشاری از مقاومت نمونه‌ی شاهد کمتر شد. با این حال، لجن مرمر هنوز بهترین عملکرد را داشت و جایگزینی ۲۰٪، مقاومت نزدیکی با نمونه‌ی شاهد ارائه داد. در مقابل، لجن گرانیت باعث کاهش بیش‌تری در مقاومت شد.

۵- جایگزینی ۱۰٪ ماسه با لجن سنگ تأثیر قابل توجهی بر مقاومت خمشی نداشت و حتی در مورد لجن مرمر باعث

مقدار تقاضای انرژی اولیه (PE) در SCC400 برابر ۲۲۴۷ مگاژول بر متر مکعب بود که به دلیل انرژی‌بر بودن تولید سیمان رخ می‌دهد. مصرف انرژی در CTRL تنها ۶۵۱/۸ مگاژول بود و کاهش بیشتری نیز در مخلوط‌های مبتنی بر لجن سنگ مشاهده شد؛ به طوری که X20 فقط ۶۴۷/۲ مگاژول نیاز داشت، یعنی حدود ۷۱/۲٪ کمتر از SCC400.

این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که سیمان اصلی‌ترین عامل آثار زیست‌محیطی در بتن خودمتراکم است. کاهش مقدار سیمان از طریق جایگزینی با محصولات جانبی صنعتی (مانند سرباره، آهک و لجن سنگ) در کاهش GWP، مصرف انرژی و سایر آلاینده‌ها بسیار مؤثر است.

هرچند مخلوط‌های مبتنی بر لجن سنگ نسبت به CTRL کاهش‌های اندکی در GWP (۱/۳٪)، اسیدی شدن (۰/۲٪)، یوتروفیکاسیون (۹/۱٪) و مصرف انرژی (۰/۶٪) نشان دادند، اما اهمیت زیست‌محیطی آن‌ها در جایگزینی تا ۲۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب ماسه طبیعی با لجن سنگ صنعتی تقویت می‌شود. این جایگزینی نه تنها به حفظ منابع غیرتجدیدپذیر سنگدانه‌ها کمک می‌کند، بلکه بازیافت پسماندها را ترویج داده و به اهداف اقتصاد چرخشی فراتر از کاهش عددی آلاینده‌ها یاری می‌رساند.

همچنین استفاده از این ماده زائد نیاز به دفن پسماند در محل‌های دفن زباله (که معمولاً باعث تخریب خاک به دلیل کاهش نفوذپذیری و برهم زدن ساختار طبیعی خاک و رشد گیاه می‌شود) را کاهش می‌دهد. این کار همچنین خطر آلودگی آب ناشی از رواناب سطحی توده‌های لجن را کاهش می‌دهد، چراکه این رواناب می‌تواند ذرات ریز و باقی‌مانده‌های شیمیایی را به منابع سطحی و زیرزمینی منتقل کرده، کدورت آب را افزایش داده و کیفیت آن را کاهش دهد. علاوه بر این، افزودن لجن سنگ به بتن انتشار گرد و غبار معلق در هوا را به‌ویژه در شرایط خشک و بادی را کاهش داده و در نتیجه خطرات بالقوه برای سلامت تنفسی را کم می‌کند. جلوگیری از رهاسازی کنترل‌نشده لجن سنگ همچنین به کاهش اختلالات اکولوژیکی مانند تغییر در pH خاک و آب کمک می‌کند که می‌تواند آثار منفی بر تنوع زیستی داشته باشد.

این ملاحظات زیست‌محیطی، هرچند به‌طور کامل در ارقام LCA منعکس نشده‌اند، ولی حمایتی قوی از کاربرد پایدار لجن سنگ در تولید بتن ارائه می‌دهند.

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

علی محمد صالحی: ایده و مفهوم، روش شناسی، نظارت و مدیریت تحقیق، نوشتن متن اولیه و ویرایش ها.
داود مستوفی نژاد: نظارت و مدیریت تحقیق و ویرایش ها.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

بهبود شد. با این حال، افزایش جایگزینی به ۱۵٪ و ۲۰٪ منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت خمشی شد، اگرچه کاهش برای مخلوط های حاوی لجن مرمر کمتر بود.

۶- جایگزینی ماسه با لجن سنگ مفیدتر از جایگزینی سیمان با لجن است. ماسه بخش قابل توجهی از بتن را تشکیل می دهد و سطح جایگزینی تا ۲۰٪ بدون کاهش قابل توجه مقاومت امکان پذیر است. در نتیجه، حجم بیشتری از لجن سنگ می تواند بازیافت و دوباره وارد تولید شود و بدین ترتیب تجمع زباله های محیطی کاهش می یابد.

۷- مفهوم پایداری در این روش به صورت جامع در نظر گرفته شده است. از نظر فنی، نتایج آزمایش های رئولوژیکی و مقاومتی عملکرد مناسب بتن خودمتراکم کم سیمان را تأیید می کند. از دیدگاه اقتصادی، استفاده از پسماندهای صنعتی مانند سرباره و لجن سنگ موجب کاهش هزینه مواد اولیه می شود. از نظر سرمایه گذاری و فناوری، فرایند تولید مشابه بتن های معمولی است و به تجهیزات ویژه ای نیاز ندارد. همچنین، مواد خام مورد استفاده به وفور در دسترس هستند. بنابراین، این روش از هر چهار جنبه ای اصلی توسعه پایدار قابل توجیه است.

References

- [1] Ige, O.E., Von Kallon, D.V. and Desai, D., 2024. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(3), pp.579-597. doi: 10.1007/s10098-023-02683-0.
- [2] Rentier, E.S. and Cammeraat, L.H., 2022. The environmental impacts of river sand mining. *Science of the Total Environment*, 838, p.155877. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155877.
- [3] Poonia, K., Kansara, P. and Choudhary, P., 2024. Environmental impacts of sand mining: A comprehensive review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 11.
- [4] Agrawal, Y., Varma, M., Gupta, T. and Sharma, R.K., 2022. Development of eco-friendly pervious concrete utilizing granite cutting sludge waste. In: *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development*, Vol. 1, pp.309-320. Springer. doi: 10.1007/978-981-16-6875-3_26.
- [5] Sadek, D.M., El-Attar, M.M. and Ali, H.A., 2016. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121, pp.19-32. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.044.
- [6] Carrillo Beltrán, R., Picazo Camilo, E., Perea Toledo, G. and Corpas Iglesias, F.A., 2024. Towards a sustainable mining: Reuse of slate stone cutting sludges for new geopolymers binders. *Sustainability*, 16(8), p.3322.
- [7] Mosaferi, M., Dianat, I., Khatibi, M.S., Mansour, S.N., Fahiminia, M. and Hashemi, A.A., 2014. Review of environmental aspects and waste management of stone cutting and fabrication industries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, pp.721-730.
- [8] Eid, R.A.H.S., 2011. *Approaching Industrial and Environmental Reform for Shaq Al-Thu'ban Marble and Granite Industrial Cluster*. MSc thesis. The American University in Cairo, Cairo, Egypt.
- [9] EFNARC, 2002. *Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- [10] Okamura, H. and Ouchi, M., 2003. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), pp.5-15. doi: 10.3151/jact.1.5.
- [11] Khatib, J.M., 2008. Performance of self-compacting

- concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(9), pp.1963-1971. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011).
- [12] Muhammad, A. and Thienel, K.C., 2023. Properties of self-compacting concrete produced with optimized volumes of calcined clay and rice husk ash—emphasis on rheology, flowability retention and durability. *Materials*, 16(16), p.5513.
- [13] Singh, R.P., Vanapalli, K.R., Cheela, V.R.S., Peddireddy, S.R., Sharma, H.B. and Mohanty, B., 2023. Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 378, p.131168.
- [14] Yazıcı, H., 2007. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical and chloride permeability of SCC. *Cement and Concrete Research*, 37(3), pp.265-270. doi: [10.1016/j.cemconres.2006.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.003).
- [15] Gursel, A.P., Masanet, E., Horvath, A. and Stadel, A., 2014. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, pp.38-48. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005).
- [16] Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G.I. and Ramyar, K., 2014. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, pp.17-25.
- [17] Khatri, R., Sirivivatnanon, V. and Gross, W., 1995. Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(1), pp.209-220. doi: [10.1016/0008-8846\(94\)00128-L](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00128-L).
- [18] Alyamaç, K.E. and İnce, R., 2009. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp.1201-1210. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012).
- [19] Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E.-H. and Kenai, S., 2012. Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 31, pp.251-257. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109).
- [20] Benaicha, M., Belcaid, A., Alaoui, A.H., Jalbaud, O. and Burtschell, Y., 2019. Effects of limestone filler and silica fume on rheology and strength of self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 20(5), pp.1702-1709. doi: [10.1002/suco.201900150](https://doi.org/10.1002/suco.201900150).
- [21] Karakurt, C. and Dumangöz, M., 2022. Rheological and durability properties of self-compacting concrete produced using marble dust and blast furnace slag. *Materials*, 15(5), p.1795. doi: [10.3390/ma15051795](https://doi.org/10.3390/ma15051795).
- [22] Hameed, A. and Sekar, A., 2012. Properties of self-compacting concrete using marble sludge powder as filler material. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 5(5), pp.1186-1193.
- [23] Sardinha, M., de Brito, J. and Rodrigues, R., 2016. Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. *Construction and Building Materials*, 119, pp.45-52. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.05.071](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.071).
- [24] Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E.-H. and Kenai, S., 2012. Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 31, pp.251-257. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109).
- [25] Uysal, M. and Yilmaz, K., 2011. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7), pp.771-776. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005).
- [26] Choudhary, R., Gupta, R., Nagar, R. and Jain, A., 2021. Mechanical and abrasion resistance performance of silica fume, marble slurry powder, and fly ash amalgamated high strength self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 269, p.121282.
- [27] Karimipour, A., Jahangir, H. and Rezazadeh Eidgahee, D., 2021. A thorough study on the effect of red mud, granite, limestone and marble slurry powder on the strengths of steel fibres-reinforced self-consolidation concrete: Experimental and numerical prediction. *Journal of Building Engineering*, 44, p.103398. doi: [10.1016/j.job.2021.103398](https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103398).
- [28] Yum, W.S., Yu, J., Jeon, D., Song, H., Sim, S., Kim, D.H. and Oh, J.E., 2022. Mechanical and durability properties of cementless concretes made using three types of CaO-activated GGBFS binders. *Materials*, 15(1), p.271. doi: [10.3390/ma15010271](https://doi.org/10.3390/ma15010271).
- [29] Jin, Z.Q., Lu, X.J. and Hu, S.G., 2010. Alkali activation of granulated blast furnace slag. *Advanced Materials Research*, 158, pp.1-11. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.158.1](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.158.1).
- [30] Yazıcı, H., 2008. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22(4), pp.456-462. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002).
- [31] Yang, Z., Liu, S., Yu, L. and Xu, L., 2021. A comprehensive study on the hardening features and performance of self-compacting concrete with high-volume fly ash and slag. *Materials*, 14(15), p.4286. doi: [10.3390/ma14154286](https://doi.org/10.3390/ma14154286).
- [32] Mohammadsalehi, A., Mostofinejad, D. and Bahmani, H., 2024. Effects of calcium chloride, ocher, and PP fibers on the mechanical properties of low cement high-performance concrete with Ca(OH)₂-activated slag binder: A novel approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp.1-19.

- [33] ASTM International, 2022. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM C39/C39M-22. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [34] ASTM International, 2021. *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. ASTM C1611/C1611M-21. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [35] EFNARC, 2005. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*. EFNARC.
- [36] British Standards Institution, 2013. *Test Methods for Self-Compacting Concrete — Part 5: Compressive Strength of Test Specimens*. BS EN 1170-5:2013. London: BSI.
- [37] Shariq, M., Prasad, J. and Masood, A., 2010. Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(8), pp.1469-1478.
- [38] Nejati, A., Mansourian, A., Ravanshadnia, M. and Sadeh, E., 2024. Feasibility of using recycled waste travertine stone powder (RWTSP) as a substitute for mineral filler in microsurfacing surface treatment. *Construction and Building Materials*, 418, p.135389. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2024.135389](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135389).
- [39] Demirel, B. and Alyamaç, K.E., 2018. Waste marble powder/dust. In: *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, pp.181-197. Woodhead Publishing. doi: [10.1016/B978-0-08-102156-9.00006-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00006-7).
- [40] Kirgiz, M.S., Khatib, J., de Sousa Galdino, A.G., Kenai, S., Ashteyat, A., Campilho, R.D., Lezcano, R.A.G., Bamigboye, G.O., Nagaprasad, N. and Ramaswamy, K., 2025. Waste marble sludge and calcined clay brick powders in conventional cement farina production for cleaner built environment. *Scientific Reports*, 15, p.3467. doi: [10.1038/s41598-024-83163-3](https://doi.org/10.1038/s41598-024-83163-3).
- [41] Mohammadi, P., Mirghaffari, N., Razavi, Z. and Soleimani, M., 2025. Synthesis and characterization of zeolite X from granite stone sludge. *Next Materials*, 6, p.100466. doi: [10.1016/j.nxmte.2024.100466](https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100466).
- [42] Huang, J., Xu, G., Chen, S., Yu, D., Fu, T., Feng, C. and Wang, Y., 2024. Enhancing mechanical properties and microstructures of mass-manufactured sand concrete by incorporating granite powder. *Materials*, 17(10), p.2234.
- [43] Ahmed, A., Mahmoud, A.A. and Elkatatny, S., 2020. The use of the granite waste material as an alternative for silica flour in oil-well cementing. *ACS Omega*, 5(50), pp.32341-32348.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Mohammadsalehi, A. and Mostofinejad, D., 2026. Performance of low-cement self-compacting concrete using stone sludge as sand replacement. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.63-79.



Life Cycle Analysis of the Synthesis and Photocatalytic Application of Non-Metallic Semiconductor Nanosheets for Rhodamine B Removal with an Environmental Sustainability Approach

Afsaneh Shahbazi^{1*} 

1. Department of Environmental Technologies, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract

The proliferation of persistent organic dye contaminants, such as Rhodamine B (RhB), in aquatic environments necessitates the development and rigorous environmental evaluation of sustainable wastewater treatment technologies. Visible-light-driven photocatalysis using advanced semiconductor materials has emerged as a promising, green, and energy-efficient solution, offering complete degradation of pollutants into harmless minerals, unlike conventional methods that often merely transfer pollution. Graphitic carbon nitride nanosheets ($g\text{-C}_3\text{N}_4$), a metal-free, visible-light-active photocatalyst, has garnered considerable attention for its high thermal stability, scalability, and favorable physicochemical properties. However, the energy-intensive nature of synthesizing nanostructured catalysts demands a quantitative environmental assessment—a Life Cycle Assessment (LCA)—to validate the technology's true sustainability beyond functional performance metrics. Addressing this critical gap, this study conducted a comprehensive LCA, adhering to ISO 14040/14044 standards, to quantify the environmental burdens associated with both the production and the application of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ in RhB dye degradation. Environmental impacts were assessed using the SimaPro 10.2 software and the globally accepted ReCiPe 2016 method at both the Midpoint (e.g., Global Warming, Water Use) and aggregated Endpoint levels (Human Health, Ecosystems, and Resources). The LCA results revealed a fundamental structural challenge: In the catalyst synthesis phase, electrical energy consumption was identified as the single, dominant environmental hotspot, contributing over 97% across all 22 Midpoint impact categories and approximately 97.5% to 99.8% across the Endpoint damage categories. This high dominance was directly attributed to the severe reliance of the high-temperature calcination process on the region's carbon-intensive, fossil fuel-based electricity grid. Conversely, the contributions from precursor materials (melamine and nitrogen) were consistently negligible, registering below 3%. In the photocatalytic application phase (wastewater treatment), the structure of the hotspot fundamentally shifted: the overall environmental cost was predominantly carried by the embedded environmental cost within the $g\text{-C}_3\text{N}_4$ catalyst itself. The catalyst's embodied burden accounted for approximately 78% of the total damage across all three Endpoint categories (Resources, Human Health, and Ecosystems). The operational electricity required for the visible-light reaction became a secondary contributor, accounting for less than 23% of the total burden. This finding conclusively demonstrated that the main environmental impact of the overall treatment process stemmed not from the operation, but from the initial, heavy "environmental investment" required for the high-carbon synthesis of the catalyst. To mitigate this structural challenge, a sensitivity analysis simulating a 95% reduction in electricity consumption during the $g\text{-C}_3\text{N}_4$ synthesis phase was performed. The results validated the direct relationship between the catalyst's embodied burden and the carbon intensity of its production: the catalyst's contribution to final Endpoint damages plummeted by over 92%, dropping to less than 6% across all damage categories. With the structural burden of the catalyst neutralized, the operational electricity consumption for the treatment process became the new dominant hotspot, contributing over 90% of the remaining impacts. In conclusion, this LCA study provides a critical, quantitative assessment revealing that the environmental sustainability of non-metallic semiconductor nanosheet photocatalytic technology is inextricably linked to the decarbonization of the synthesis process through the adoption of low-carbon electricity, and the maximization of the catalyst's operational lifespan and recoverability to distribute the high embodied environmental cost. This strategy is crucial for the technology to fulfill its potential as a truly green and sustainable solution for advanced wastewater treatment.

Review History

Received: Nov 13, 2025

Revised: Jan 17, 2026

Accepted: May 30, 2026

Keywords

Life Cycle Assessment
Nanosheets, Non-metallic
Semiconductor
Environmental
Sustainability

* Corresponding Author Email: a_shahbazi@sbu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-5230-3332



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تحلیل چرخه حیات سنتز و کاربرد فتوکاتالیستی نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی در حذف رنگ رودامین بی با رویکرد پایداری محیط‌زیستی

افسانه شهبازی^{*۱} 

۱. دانشیار، گروه فناوری‌های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

گسترش آلودگی‌های آبی ناشی از ترکیبات رنگ‌زای آلی، نیاز به بررسی همه‌جانبه و مبتنی بر پایداری فناوری‌های تصفیه را آشکار ساخته است. در همین راستا، در این پژوهش از ارزیابی چرخه حیات به عنوان روشی معتبر برای کمی‌سازی بارها و پیامدهای محیط‌زیستی فرآیندهای سنتز و کاربرد نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی کربن نیتريد گرافیتی در حذف رنگ رودامین بی از پساب (با غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر) استفاده شد. بدین ترتیب، پایداری محیط‌زیستی فرآیند تصفیه مورد مطالعه با استفاده از بانک داده Eco-invent در نرم‌افزار SimaPro و بر پایه روش ReCiPe 2016 در سطوح Endpoint و Midpoint به صورت کمی تحلیل شد. نتایج فاز سنتز نشان داد انرژی الکتریکی با سهمی بیش از ۹۷ درصد، کانون غالب پیامدهای محیط‌زیستی است؛ این امر به دلیل اتکای شدید فرآیند به منابع برق با ردپای کربن بالا در شبکه منطقه می‌باشد. با این حال، در فاز کاربرد (تصفیه پساب)، ساختار کانون آسیب تغییر یافته و هزینه‌های محیط‌زیستی نهفته در کاتالیست با سهمی حدود ۷۸ درصد، به عنوان عامل غالب در تمامی شاخص‌های آسیب‌نمایی شناسایی شد. به منظور مدیریت بارهای ساختاری مذکور، تحلیل حساسیت با سناریوی کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در فاز سنتز انجام شد. نتایج این سناریو، وابستگی مستقیم شدت آسیب‌های مرتبط با کاتالیست به میزان کربن تولید شده در فرآیند سنتز را نشان داد و سهم کاتالیست در آسیب‌های نهایی را حدود ۹۲ درصد کاهش داد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پایداری فناوری فتوکاتالیستی مبتنی بر نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی و کاهش بارهای محیط‌زیستی، به‌طور معناداری به کربن‌زدایی فرآیند سنتز و افزایش طول عمر چرخه استفاده از کاتالیست وابسته است.

کلمات کلیدی

تحلیل چرخه حیات

نانوصفحات

نیمه‌رسانا

غیرفلزی

پایداری محیط‌زیست

۱- مقدمه

حدود ۲۸۰'۰۰۰ تن رنگ صنعتی سالانه از طریق فاضلاب صنایع نساجی وارد محیط زیست می‌شود. این ترکیبات، به ویژه رنگ رودامین بی (RhB)، به دلیل ساختار آروماتیکی پیچیده، مقاومت در برابر تجزیه زیستی و پایداری نوری و حرارتی بالا، از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌های آبی محسوب شده که به راحتی از پساب‌های صنعتی حذف نمی‌شوند و در محیط باقی می‌مانند [1].

افزایش روزافزون صنایع نساجی، چاپ و تولید مواد رنگزا منجر به ورود مقادیر قابل توجهی از رنگ‌های آلی پایدار به منابع آبی شده است. طبق مطالعات پیشین، حدود ۱۰-۱۵ درصد از رنگ‌های استفاده شده در صنعت نساجی در فرآیند رنگرزی وارد فاضلاب می‌شوند. همچنین تخمین زده شده است که رقمی در

* رایانامه نویسنده مسئول: a_shahbazi@sbu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-5230-3332

حضور این ترکیبات در آب، حتی در غلظت‌های بسیار پایین، می‌تواند باعث سمیت، جهش‌زایی، سرطان‌زایی و اختلال در اکوسیستم‌های آبی شود و سلامت انسان و محیط زیست را به شدت تهدید کند. از این رو، توسعه فناوری‌های کارآمد، اقتصادی و پایدار برای حذف مؤثر این ترکیبات از پساب‌ها، یک ضرورت جهانی و حیاتی به شمار می‌رود [2].

روش‌های مرسوم تصفیه شامل جذب سطحی، انعقاد شیمیایی، اکسیداسیون پیشرفته و فرایندهای بیولوژیکی، علی‌رغم اثربخشی نسبی، با محدودیت‌هایی مانند مصرف بالای مواد شیمیایی، تولید لجن ثانویه، هزینه عملیاتی زیاد و ناکارایی در حذف کامل رنگ‌های مقاوم مواجه‌اند. افزون بر این، برخی از این فناوری‌ها فقط موجب انتقال آلودگی از فاز مایع به جامد می‌شوند، بدون آن‌که منجر به تجزیه واقعی ترکیب آلاینده شوند [3]. در این میان، استفاده از فناوری‌های فتوکاتالیستی مبتنی بر نور مرئی و مصارف انرژی اندک، به دلیل قابلیت اکسیداسیون کامل آلاینده‌ها تا محصولات معدنی بی‌ضرر، به عنوان رویکردی سبز و پایدار مورد توجه گسترده قرار گرفته است [4].

در میان نیمه‌رساناهای مورد استفاده در فتوکاتالیز، کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) به عنوان یک فتوکاتالیست نسل جدید بدون فلز و فعال در ناحیه نور مرئی، به دلیل ترکیب منحصربه‌فردی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خود، از جمله پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، باند گپ مناسب (~ 2.7 eV)، سنتز مقرون‌به‌صرفه و مقیاس‌پذیر و سازگاری محیط‌زیستی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [5-8].

با توجه به پیچیدگی فرایندهای سنتز و به‌کارگیری فتوکاتالیست‌های نانوساختار، ارزیابی آثار محیط‌زیستی آن‌ها صرفاً بر اساس کارایی حذف آلاینده‌ها نمی‌تواند تصویری دقیق از پایداری واقعی فناوری ارائه دهد. فرایندهای تولید و استفاده از مواد نانوساختار مانند $g-C_3N_4$ ممکن است با مصرف انرژی بالا، استفاده از پیش‌ماده‌های شیمیایی و تولید پسماندهای جانبی همراه باشند که منجر به بروز پیامدهای محیط‌زیستی مستقیم و غیرمستقیم می‌شود. از این رو، بهره‌گیری از ارزیابی چرخه حیات (Life Cycle Assessment-LCA) به عنوان رویکردی کمی و نظام‌مند مطابق با استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044، برای شناسایی کمی‌سازی و مقایسه پیامدهای محیط‌زیستی در تمامی مراحل از

استخراج مواد اولیه تا پایان عمر سامانه، ضرورتی انکارناپذیر است. این رویکرد، امکان شناسایی مراحل و نقاط بحرانی (هات اسپات‌ها) با بیشترین سهم در پیامدهای محیط‌زیستی، بهینه‌سازی مصرف منابع و انرژی، و تضمین پایداری واقعی فناوری‌های نوین تصفیه آب را فراهم می‌سازد [9-11].

ادغام ارزیابی چرخه حیات (LCA) در توسعه و کاربرد فتوکاتالیست‌های نانوساختار، نه تنها به شناسایی نقاط بحرانی محیط زیستی کمک می‌کند، بلکه بهینه‌سازی فرایندها و انتخاب مواد اولیه را نیز تسهیل می‌نماید. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که پیروی دقیق از مراحل چهارگانه LCA مطابق با استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044 (شامل تعریف هدف و دامنه، تهیه فهرست موجودی چرخه حیات، ارزیابی آثار و تفسیر نتایج) برای اطمینان از شفافیت، کیفیت داده‌ها و قابلیت مقایسه نتایج ضروری است [12-14]. در حوزه فتوکاتالیست‌های نانوساختار، LCA به‌عنوان ابزاری راهبردی برای ارزیابی جامع آثار محیط زیستی از مرحله استخراج مواد اولیه تا پایان عمر محصول به کار می‌رود. این رویکرد امکان شناسایی سهم هر مرحله (مانند سنتز، مصرف انرژی، و دفع نهایی) در پیامدهای محیط زیستی را فراهم می‌سازد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا گزینه‌های بهینه با کمترین آثار منفی را انتخاب کنند. به ویژه، مصرف انرژی و نوع مواد اولیه به عنوان مهم‌ترین نقاط بحرانی شناسایی شده‌اند و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و مواد اولیه پایدار می‌تواند به کاهش آثار منفی کمک کند [15]. همچنین، LCA با فراهم کردن داده‌های کمی و مقایسه‌ای، نقش مهمی در توسعه فناوری‌های نوین تصفیه آب و تضمین پایداری آن‌ها ایفا می‌کند و به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در سیاست‌گذاری و طراحی صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [16].

در سال ۲۰۲۳ مطالعه‌ای با عنوان «مقایسه ارزیابی چرخه حیات مسیرهای سنتز گرافیت کربن نیتريد» انجام شد. آن‌ها با استفاده از LCA، هشت مسیر مختلف سنتز $g-C_3N_4$ را از نظر آثار محیط زیستی بررسی کردند و دریافتند که مصرف برق بیشترین سهم را در آثار تجمعی دارد. همچنین نشان دادند که بهینه‌سازی مراحل سنتز و استفاده از منابع انرژی پاک می‌تواند آثار محیط زیستی را کاهش دهد. مقایسه با نانوذرات TiO_2 نیز نشان داد که روش سنتز و منبع انرژی نقش کلیدی در پایداری محیط زیستی دارند [17].

۲-۱- تعریف هدف و دامنه

براساس روش استاندارد، گام اول که شامل تعریف هدف و دامنه، مشخص کردن مرز فرایندی و عملیاتی و همچنین تعریف واحد عملکردی است، انجام شد. هدف این مطالعه، سنجش کمی پیامدهای محیط‌زیستی و ارزیابی پیامدهای فرایند تخریب فتوکاتالیستی رنگ RhB به وسیله فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ است. واحد عملکردی این مطالعه به صورت "تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ " تعریف شد. این واحد عملکردی به گونه‌ای انتخاب گردید که بیانگر بازده واقعی فرایند فتوکاتالیستی در شرایط آزمایشگاهی باشد و مبنای مناسبی برای مقایسه و ارزیابی آثار محیط زیستی مراحل مختلف سنتز و کاربرد $g-C_3N_4$ در چارچوب ارزیابی چرخه حیات فراهم آورد.

دامنه ارزیابی چرخه حیات این مطالعه به صورت گهواره تا دروازه تعریف شد و شامل فرایند سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ و کاربرد آن در تجزیه‌ی رنگ RhB است. از آنجا که تمامی مواد اولیه به صورت تجاری خریداری شدند، فرایندهای بالادستی تولید آن‌ها در تحلیل موجودی در نظر گرفته نشد و آثار محیط زیستی مرتبط با آن‌ها از طریق داده‌های ثانویه پایگاه Ecoinvent لحاظ شد. در این محدوده، مصرف انرژی و مواد در مرحله‌ی سنتز و اجرای آزمایش تحت تابش نور مرئی بررسی شد. مراحل پایان عمر و بازیافت یا استفاده‌ی مجدد از محدوده این مطالعه خارج هستند.

۲-۲- فهرست موجودی چرخه حیات

فهرست موجودی چرخه حیات (LCI) دومین گام در فرایند ارزیابی چرخه حیات (LCA) محسوب می‌شود و نقشی کلیدی در شناسایی، تعیین و کمی‌سازی جریان‌های ورودی و خروجی مرتبط با سیستم مورد مطالعه ایفا می‌کند. در این مرحله، کلیه داده‌های مربوط به مصرف منابع از جمله مواد اولیه، انرژی و مواد شیمیایی، به همراه خروجی‌ها شامل آلاینده‌ها، پسماندها و انتشارات به هوا، آب و خاک، در محدوده‌ی مرز تعریف‌شده‌ی سیستم گردآوری می‌شوند. این داده‌ها، بنیانی برای تحلیل و ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی در مراحل بعدی LCA فراهم کرده و نقش تعیین‌کننده‌ای در اطمینان از دقت و قابلیت اتکای نتایج دارند [20].

در سال ۲۰۲۴ در مقاله‌ای مروری به بررسی فتوکاتالیست‌های $g-C_3N_4$ دوپ شده با عناصر غیر فلزی و ارزیابی پایداری آن‌ها با استفاده از LCA پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که دوپینگ غیر فلزی می‌تواند عملکرد فتوکاتالیستی را بهبود بخشد و تأکید کردند که برای تجاری‌سازی موفق این فناوری، انجام ارزیابی چرخه حیات جامع و دقیق ضروری است [18].

در سال ۲۰۲۵ در مطالعه‌ای با روش تحلیل کتاب‌سنجی، روند تحقیقات مربوط به کاربرد $g-C_3N_4$ در حذف آلاینده‌های نوظهور از آب بررسی شد. این مطالعه با استفاده از داده‌های ده سال اخیر نشان داد که تحقیقات در این حوزه رشد چشمگیری داشته و ارزیابی چرخه حیات به عنوان یک محور مهم برای هدایت پژوهش‌های آینده و شناسایی محدودیت‌ها مطرح شده است [19]. با این وجود، مرور ادبیات علمی نشان می‌دهد که تاکنون هیچ مطالعه جامعی در زمینه ارزیابی چرخه حیات (LCA) سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ و عملکرد آن در حذف رنگ RhB انجام نشده است. این خلاء پژوهشی موجب شده است که پایداری محیط‌زیستی این فناوری عمدتاً به صورت کیفی و مبتنی بر شاخص‌های عملکردی ارزیابی شود. بنابراین در پژوهش حاضر، چرخه حیات سنتز و کاربرد فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ برای حذف رنگ RhB مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا برای نخستین بار تصویری کمی و جامع از پیامدهای محیط‌زیستی این فرایند ارائه دهد و با شناسایی مراحل و نقاط بحرانی، راهکارهایی برای بهبود پایداری و کاهش آثار منفی ارائه دهد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، چرخه حیات تخریب فتوکاتالیستی رنگ RhB با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ مطابق استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044 مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی انجام شده در قالب چهار گام اصلی طراحی شد که شامل تعریف هدف و دامنه^۱، جمع‌آوری داده‌ها^۲، ارزیابی چرخه حیات^۳ فرایند سنتز و تصفیه، و تحلیل و تفسیر نتایج^۴ است. در ادامه، هر یک از این گام‌ها به تفصیل بررسی خواهد شد.

¹ Goal and Scope

² Life Cycle Inventory (LCI)

³ Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

⁴ Interpretation

نسبی (C/Co) RhB با استفاده از طیف‌سنج UV-Vis مدل DR 6000 (شرکت Hach) در طول موج ۵۵۳ نانومتر اندازه‌گیری گردید. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی نشان داد کارایی فوتوکاتالیستی فوتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در حذف رنگ RhB به ۹۹/۵ درصد در مدت ۹۰ دقیقه تحت تابش نور مرئی می‌رسد [21]. بازده بالای فوتوکاتالیست حاصل، انگیزه بررسی پایداری محیط‌زیستی و ترکیب کارایی فنی با ارزیابی چرخه حیات را فراهم ساخت. از این‌رو، در مطالعه حاضر، کلیه داده‌های ورودی و خروجی به‌صورت کمی و دقیق از تحقیق پیشین گردآوری و مبنای تحلیل LCI قرار گرفت.

به منظور استانداردسازی، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها بر مبنای تخریب ۵۰ میلی گرم از رنگ RhB در یک لیتر محلول آبی نرمال‌سازی شدند (جدول ۱). در این پژوهش، پایگاه داده Ecoinvent به‌عنوان منبع اصلی داده‌های LCI برای تمامی مواد اولیه و حامل‌های انرژی به‌کار گرفته شد. در فرایندهای آزمایشگاهی، برق به عنوان منبع غالب انرژی مصرفی نقش داشت و عمدتاً در مراحل گرمایش، خشک‌سازی، کلسیناسیون نانوماده و نیز در فرایند تخریب فوتوکاتالیستی رنگ RhB مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مربوط به مصرف برق نیز بر اساس الگوی ترکیب تولید برق در ایران از پایگاه داده Ecoinvent استخراج و در فهرست موجودی چرخه حیات لحاظ شد.

۲-۳- ارزیابی آثار و پیامدهای چرخه حیات

مرحله ارزیابی آثار چرخه حیات (LCIA)، بخشی از فرایند LCA است که در آن با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌ها، داده‌های حاصل از LCI به شاخص‌های کمی آثار محیط‌زیستی تبدیل می‌شوند. در این مرحله، ورودی‌ها و خروجی‌های مرتبط با مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها در قالب دسته‌های اثرگذاری^۱ مانند گرمایش جهانی، مصرف آب، سمیت انسانی، و تقاضای تجمعی انرژی ارزیابی می‌شوند تا شدت و نوع آثار محیط‌زیستی سیستم مورد مطالعه مشخص شود [22]. در این مطالعه، برای ارزیابی آثار محیط‌زیستی از نرم‌افزار SimaPro 10.2 و روش استاندارد ReCiPe استفاده شد. این روش با تلفیق رویکردهای علمی و سیاست‌محور، امکان ارزیابی جامع ۲۵ شاخص بین‌المللی اثرگذاری در دو سطح میانی (Midpoint) و نهایی

جدول ۱. فهرست موجودی چرخه حیات تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱

لیتر محلول آبی با استفاده از فوتوکاتالیست $g-C_3N_4$

Table 1. Life Cycle Inventory (LCI) for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 liter of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Stage	Life Cycle Inventory		
	Unit	Amount	Material
Photocatalyst synthesis	g	10	Melamine
	mL	450	Nitrogen
	kWh	6	Electricity
Photocatalyst application	g	0.3	$g-C_3N_4$
	kWh	1.65	Electricity

بر این اساس، داده‌های فرآیندی مورد نیاز برای ارزیابی پیامدهای چرخه حیات در دو فاز سنتز فوتوکاتالیست $g-C_3N_4$ و کاربرد آن در تجزیه رنگ رودامین بی (RhB) از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در مقیاس آزمایشگاهی استخراج شد. نویسنده در پژوهش پیشین خود، با به‌کارگیری روش کنترل جریان گازی، موفق به سنتز مهندسی‌شده، تک‌مرحله‌ای و پایدار نانوصفحات $g-C_3N_4$ بدون نیاز به افزودنی شد. بدین منظور، ابتدا برای سنتز $g-C_3N_4$ مقدار ۱۰ گرم ملامین در یک قایق آلومینایی با ابعاد $10 \times 2 \times 2$ سانتی متر قرار داده شد. سپس قایق در داخل یک کوره لوله‌ای (Tubular Furnace) با نرخ گرمایش ۵ درجه سلسیوس در دقیقه تا دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد و به مدت ۳ ساعت در این دما نگه داشته شد. پس از آن، نمونه به صورت طبیعی تا دمای محیط خنک شد. در فرایند گرمایش، گاز نیتروژن به‌عنوان اتمسفر واکنش پلیمریزاسیون با دبی جریان ۲/۵ میلی لیتر بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعدی برای ارزیابی کارایی فوتوکاتالیستی $g-C_3N_4$ سنتز‌شده، مقدار معینی از فوتوکاتالیست انتخابی با غلظت ۰/۳ گرم بر لیتر در ۵۰ میلی لیتر محلول آبی حاوی ۵۰ میلی گرم بر لیتر RhB در دمای محیط پراکنده شد. به منظور دستیابی به تعادل جذب و واجذب، محلول به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی هم‌زده شد. سپس، نمونه در فاصله حدود ۶ سانتی متری از منبع نور قرار گرفت. لامپ LED با توان ۵۰ وات (مدل Ario 1i، ساخت Golonor، ایران) که فاقد تابش فرابنفش (طول موج انتشار < 400 نانومتر) است، به‌عنوان منبع نور مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تعیین تغییرات غلظت رنگ، نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه انجام شد و مقدار غلظت

¹ Impact Categories

سمیت بوم‌سازگان دریایی (Marine Ecotoxicity) به بالای ۹۹/۶ درصد نیز می‌رسد. این غلبه قاطع نشانگر آن است که فارغ از نوع پیامد محیط‌زیستی مورد مطالعه، ردپای محیط‌زیستی فرآیند سنتز، عملاً بازتاب‌دهنده پروفایل محیط‌زیستی تولید برق در سبد انرژی منطقه مورد مطالعه (ایران) است. این نتایج تأیید می‌کند که هرگونه استراتژی برای کاهش آثار محیط‌زیستی $g-C_3N_4$ باید در وهله اول بر بهینه‌سازی یا جایگزینی منبع انرژی متمرکز باشد.

بیشترین سهم‌گذاری برق در دسته‌بندی‌های مرتبط با مصرف منابع و آلودگی‌های آبی مشهود است. Water Use و Freshwater/Marine Ecotoxicity هر دو سهمی نزدیک به ۱۰۰ درصد را به برق نسبت می‌دهند. علت اصلی این تأثیر بالا، وابستگی شدید نیروگاه‌های حرارتی (که بخش عمده‌ای از تولید برق در سبد انرژی فسیلی را تشکیل می‌دهند) به منابع آبی برای خنک‌سازی است که منجر به مصرف عظیم آب شیرین می‌شود. علاوه بر این، انتشار پساب‌ها و آلاینده‌های حرارتی و شیمیایی از نیروگاه‌ها، عامل اصلی در بروز سمیت آبی (Ecotoxicity) است. از سوی دیگر، آثار مرتبط با تغییرات اقلیمی، مانند Global Warming (با سهمی نزدیک به ۹۸/۳ درصد)، مستقیماً از انتشار گازهای گلخانه‌ای (CH_4 ، CO_2 ، و غیره) ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز، زغال سنگ) در همین نیروگاه‌ها سرچشمه می‌گیرد و علت آن را می‌توان به ماهیت کربن‌محور (Carbon-intensive) سبد انرژی منطقه نسبت داد.

در مقابل تسلط انرژی، سهم مواد اولیه مورد استفاده در سنتز، یعنی ملامین و نیتروژن، بسیار ناچیز است. ملامین، به عنوان پیش‌ماده، حداکثر سهم خود را در دسته‌بندی اسیدی شدن خاک (Terrestrial Acidification) (با ۴/۱ درصد) و تشکیل ذرات ریز معلق (Fine Particulate Matter Formation) (با ۳/۹ درصد) نشان می‌دهد، که علت آن می‌تواند به انتشار ترکیبات اسیدی‌ساز (مانند SO_x و NO_x) و ذرات معلق در فرآیند تولید خود ملامین بازگردد. اما این سهم‌ها در برابر سهم غالب برق (بیش از ۹۵ درصد) کاملاً ثانویه محسوب می‌شوند. این اختلاف فاحش، یک مسیر بهینه‌سازی مشخص را نشان می‌دهد: در حالیکه تلاش برای جایگزینی ملامین یا تغییر در روش تولید آن می‌تواند نتایج جزئی داشته باشد، بزرگترین و مؤثرترین کاهش در ردپای محیط‌زیستی تنها از طریق سه اقدام حاصل می‌شود:

(Endpoint) را فراهم می‌سازد. در سطح میانی، نتایج به صورت شاخص‌های اثرگذاری علمی و کمی مانند گرمایش جهانی، اسیدی شدن، سمیت انسانی و مصرف آب بیان شدند که بیانگر ارتباط مستقیم میان فرآیندهای انتشار و پدیده‌های محیط‌زیستی هستند. در سطح نهایی، این آثار به پیامدهای کلی‌تر و تصمیم‌محور در سه حوزه اصلی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع طبیعی تجمیع شدند تا آثار نهایی فعالیت‌ها بر محیط‌زیست و رفاه انسانی به صورت تلفیقی و قابل تفسیر ارائه شود [23].

۴-۲- تحلیل و تفسیر

مرحله تفسیر، آخرین گام در فرایند LCA است که هدف آن تحلیل، یکپارچه‌سازی و تبیین نتایج به‌دست‌آمده از مراحل LCI و LCIA به منظور دستیابی به نتیجه‌گیری‌های معتبر، شناسایی نقاط بحرانی، و ارائه پیشنهادها بهبود است. در این مرحله، تمامی داده‌ها و فرضیات مورد بازبینی قرار گرفته و منابع اصلی آثار محیط‌زیستی، حساسیت نتایج نسبت به متغیرهای کلیدی، و میزان عدم قطعیت تحلیل می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که نتایج نهایی با اهداف و محدوده تعریف شده مطالعه سازگار است. این مرحله، ماهیتی تفسیری و تصمیم‌محور دارد و نقش آن ارائه درک علمی و جامع از پیامدهای محیط‌زیستی سیستم مورد بررسی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و محیط‌زیستی بر مبنای شواهد کمی و شفاف است [24].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی پیامدهای سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

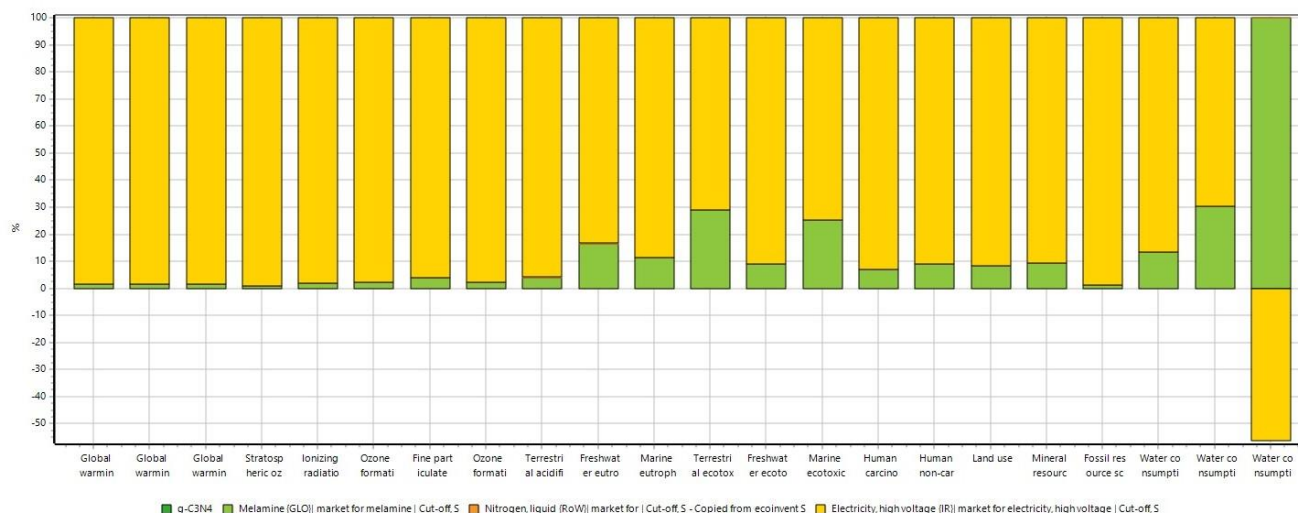
نتایج حاصل از ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی برای ۲۲ پیامد محیط‌زیستی در جدول (۲) و شکل (۱) ارایه شده است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که مصرف انرژی الکتریکی، به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی، نقطه بحرانی^۱ محیط‌زیستی غالب در کل چرخه حیات این نانوماده است. سهم این ورودی در تمام ۲۲ دسته‌بندی پیامدهای محیط‌زیستی، از گرمایش جهانی (Global Warming) تا کاهش منابع فسیلی (Fossil Scarcity)، همواره بالاتر از ۹۵/۸ درصد است، که در برخی دسته‌بندی‌ها مانند مصرف آب (Water Use) و

¹ Hotspot

جدول ۲. نتایج ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی ستر فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Table 2. Midpoint-level environmental impact assessment results for the synthesis of the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Impact category	Unit	Total	Melamine	Nitrogen	Electricity
Global warming, Human health	%	100	1.6775	0.0054	98.3171
Global warming, Terrestrial ecosystems	%	100	1.6777	0.0054	98.3169
Global warming, Freshwater ecosystems	%	100	1.6774	0.0054	98.3172
Stratospheric ozone depletion	%	100	0.7518	0.0060	99.2422
Ionizing radiation	%	100	1.8654	0.0317	98.1028
Ozone formation, Human health	%	100	2.3998	0.0093	97.5909
Fine particulate matter formation	%	100	3.9092	0.0214	96.0694
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	%	100	2.2792	0.0085	97.7123
Terrestrial acidification	%	100	4.1005	0.0114	95.8881
Freshwater eutrophication	%	100	16.6070	0.0926	83.3004
Marine eutrophication	%	100	11.5006	0.0049	88.4945
Terrestrial ecotoxicity	%	100	29.0338	0.0013	70.9649
Freshwater ecotoxicity	%	100	9.0845	0.0066	90.9090
Marine ecotoxicity	%	100	25.3304	0.0013	74.6683
Human carcinogenic toxicity	%	100	6.9639	0.0463	92.9898
Human non-carcinogenic toxicity	%	100	8.9977	0.0358	90.9665
Land use	%	100	8.2231	0.0252	91.7517
Mineral resource scarcity	%	100	9.2655	0.0052	90.7293
Fossil resource scarcity	%	100	1.0894	0.0018	98.9087
Water consumption, Human health	%	100	13.2540	0.0332	86.7127
Water consumption, Terrestrial ecosystem	%	100	30.2949	0.0776	69.6276
Water consumption, Aquatic ecosystems	%	100	228.4466	0.2496	-128.6962



Method: ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.10 / World (2010) H/A / Characterization / Excluding infrastructure processes / Excluding long-term emissions
Analyzing 1 kg $g-C_3N_4$

شکل ۱. نتایج ارزیابی آثار ستر فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Fig. 1. Midpoint-level impact assessment results for the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst

۲- جایگزینی منبع انرژی از شبکه فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر پاک (مانند خورشیدی یا بادی).

۱- بهینه‌سازی فرآیند ستر برای کاهش چشمگیر تقاضای حرارتی و در نتیجه مصرف برق خاص (Specific Energy Consumption).

زیستی سبد انرژی منطقه هستند. در نتیجه، ردپای محیط زیستی $g-C_3N_4$ نه توسط سینتیک شیمیایی ملامین، بلکه توسط زیرساخت تأمین انرژی تعریف می‌شود. این یافته، نقطه داغ اصلی فرآیند را به صورت قطعی در مرحله تأمین انرژی قرار می‌دهد و هرگونه تغییر در مواد اولیه، در مقایسه، تأثیری ثانویه و ناچیز (کمتر از ۳ درصد) خواهد داشت.

با مقایسه آسیب‌های نهایی، حوزه Resources با سهمی نزدیک به ۱۰۰ درصد، به‌عنوان بحرانی‌ترین محور آسیب شناسایی می‌شود. این آسیب عمدتاً از دسته‌بندی‌های سطح میانی مرتبط با کمیابی سوخت‌های فسیلی (Fossil Scarcity) و کانی‌ها (Mineral Scarcity) نشأت می‌گیرد. علت اصلی فنی این امر، اتکای شبکه برق منطقه به منابع تجدیدنپذیر است، که مصرف آن‌ها یک تخریب ترمودینامیکی جبران‌ناپذیر را در مقیاس جهانی اعمال می‌کند و این بیشترین وزندهی را در سطح نهایی دریافت کرده است.

۳- انتخاب مکان تولید در مناطقی با شبکه برق پاک‌تر (انرژی آبی یا هسته‌ای).

این نتایج تأکید می‌کند که پایداری نانوماده $g-C_3N_4$ به صورت جدایی‌ناپذیری با پایداری تأمین انرژی آن مرتبط است.

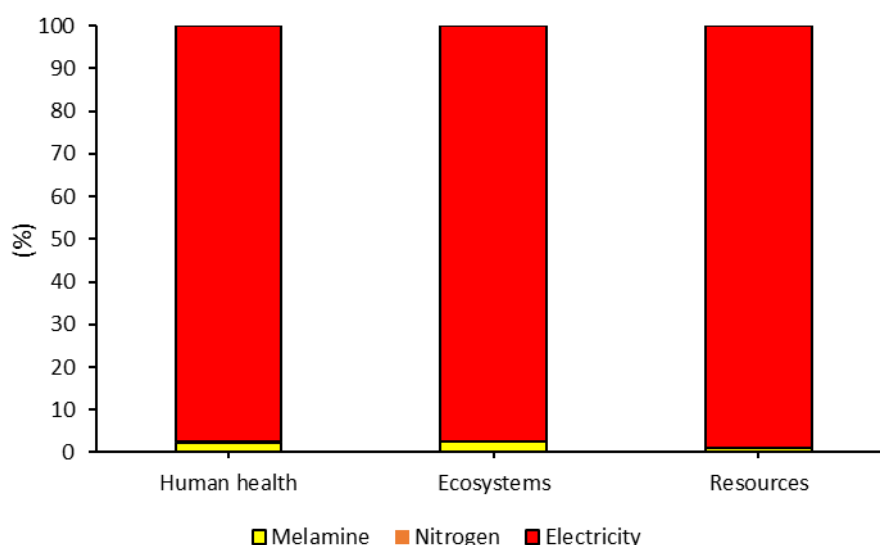
۲-۳- ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

نتایج حاصل از ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی در ۳ حوزه اصلی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع طبیعی در جدول (۳) و شکل (۲) ارائه شده است. نتایج تحلیل سطح نهایی، که اوج ارزیابی آثار محیط زیستی است، به صورت قاطع نشان می‌دهد که انرژی الکتریکی نیروی محرکه اصلی در تمام حوزه‌های آسیب نهایی است. سهم این ورودی در آسیب به منابع (Resources) به ۹۹/۷۹ درصد می‌رسد و در حوزه‌های سلامت انسان (Human Health) و بوم‌سازگان‌ها (Ecosystems) نیز سهمی در حدود ۹۷/۵ درصد دارد. این اعداد فراتر از یک سهم‌گذاری بالا هستند؛ آن‌ها نشان‌دهنده یک رابطه هم‌بستگی تقریباً مطلق میان فرآیند سنتز نانوماده و پروفایل محیط

جدول ۳. نتایج ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Table 3. Endpoint-level impact assessment results for the synthesis of the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Damage category	Unit	Total	Melamine	Nitrogen	Electricity
Human health	%	100	2.3952249	0.010133	97.59464
Ecosystems	%	100	2.553358	0.006812	97.43983
Resources	%	100	1.0973212	0.001833	98.90085



شکل ۲. نتایج ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Fig. 2. Endpoint-level impact assessment results for the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst

دیگر، هزینه محیط زیستی تولید کاتالیست بر هزینه محیط زیستی کارکرد کاتالیست در مقیاس تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی، غلبه کرده است. به عبارتی، بار محیط زیستی شدید فاز تولید کاتالیست به فاز استفاده منتقل شده است. تحلیل دقیق تر سهم گذاری در دسته بندی های کلیدی Midpoint، تأثیر شدید بار منتقل شده از فرآیند سنتز را به شرح ذیل اثبات می نماید:

۱- گرمایش جهانی (Global Warming): سهم $g-C_3N_4$ در هر سه زیردسته گرمایش جهانی (Human Health, Terrestrial, Freshwater) تقریباً ۷۸ درصد است. این سهم عظیم، پیامد مستقیم آن است که فرآیند سنتز نانوماده $g-C_3N_4$ (در بخش قبلی) خود یک فرآیند کربن-فشرده بود (نزدیک به ۹۸ درصد سهم کربن از برق داشت). اکنون این ردپای کربن در کاتالیست «بسته بندی» شده و به سیستم تصفیه تحمیل شده است.

۲- ذرات معلق و اسیدی شدن (Particulate Matter Formation & Acidification): سهم $g-C_3N_4$ در این دسته بندی ها (مانند Terrestrial Acidification با ۷۸/۴۱ درصد و Fine Particulate Matter Formation با ۷۸/۳۸ درصد) نیز غالب است. این آثار، ریشه در انتشار آلاینده های منطقه ای (مانند NO_x و SO_x) دارند که از سوزاندن سوخت های فسیلی در نیروگاه های تأمین کننده انرژی سنتز کاتالیست، نشأت گرفته اند.

۳- مصرف آب و سمیت محیطی (Water Use & Ecotoxicity): اگرچه فرآیند تصفیه، مصرف آب زیادی ندارد، اما سهم $g-C_3N_4$ در دسته بندی هایی مانند Marine Ecotoxicity به ۷۸/۴۱ درصد می رسد. این نشان دهنده آن است که آلودگی های شیمیایی و پساب های مرتبط با فرآیند ساخت نانوماده، حتی پس از تبدیل به محصول نهایی، بار محیط زیستی خود را در فاز کاربرد نیز حفظ کرده اند.

این یافته ها یک الزام مهندسی محیط زیست را مشخص می کنند: پایداری نهایی این فرآیند فتوکاتالیستی به طور معکوس با طول عمر چرخه استفاده (Catalyst Lifespan) و قابلیت بازیابی (Recoverability) کاتالیست در ارتباط است. از آنجا که ۷۷ درصد بار محیط زیستی در هزینه ساخت کاتالیست نهفته است، مؤثرترین استراتژی کاهش آسیب صرفاً کاهش مصرف برق تصفیه (کاهش ۲۲ درصد) نیست. بلکه، حیاتی است که طول عمر چرخه استفاده

در رده های بعدی، آسیب به سلامت انسان (۹۷/۵۹ درصد) و بوم سازگان ها (۹۷/۴۴ درصد) قرار دارد که هر دو با مکانیسم های پویای انتشار آلاینده مرتبط هستند. آسیب به سلامت انسان عمدتاً از طریق تجمع آثار تشکیل ذرات معلق ریز (PM Formation) و سمیت انسانی (Human Toxicity) ناشی از انتشار آلاینده های نیروگاه های حرارتی اعمال می شود. در حوزه بوم سازگان ها نیز، آثار سطح میانی مرتبط با سمیت آبی (Ecotoxicity) و اسیدی شدن (Acidification) ناشی از آلودگی های شیمیایی، مسئول این آسیب هستند. این نشان می دهد که در سبد انرژی منطقه، آلاینده های منتشر شده، نه تنها منابع را تحلیل می برند، بلکه پیامدهای منطقه ای قابل توجهی بر کیفیت هوا و آب نیز دارند.

سهم مواد اولیه (ملازمین و نیتروژن) با حداکثر ۲/۵۵ درصد در حوزه بوم سازگان ها، بسیار ناچیز است. این میزان ناچیز نشان می دهد که تأثیر بار موجود در ساختار مولکولی نانوماده در مقایسه با بار محیط زیستی فرآیند تولید آن، قابل اغماض است.

۳-۳- ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

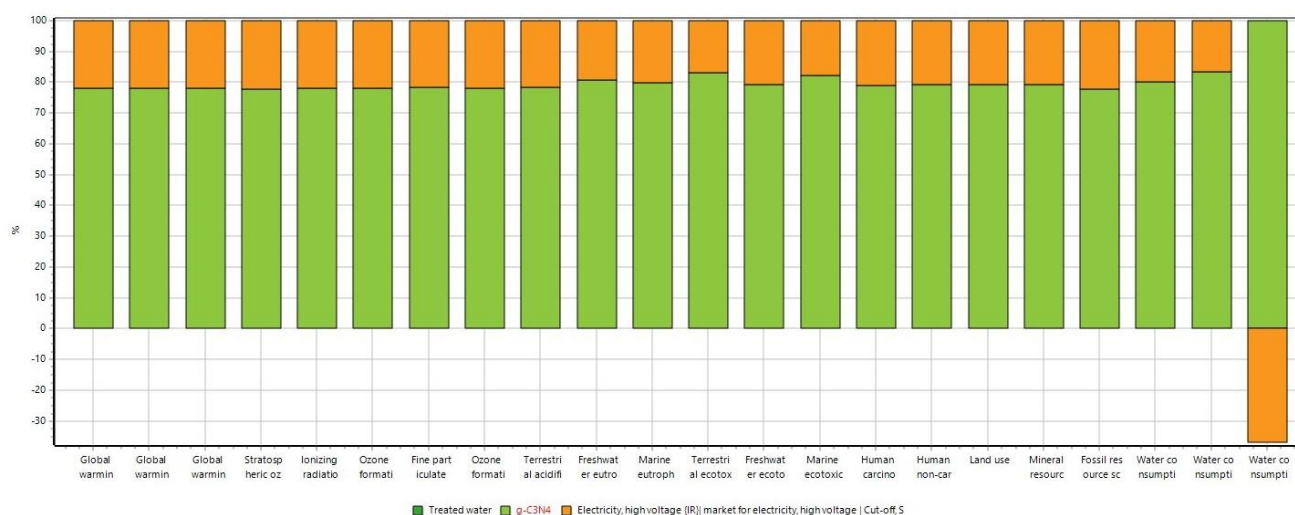
نتایج حاصل از ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی برای ۲۲ پیامد محیط زیستی در جدول (۴) و شکل (۳) ارایه شده است. نتایج تحلیل Midpoint، یک الگوی جدید از نقطه داغ (Hotspot) محیط زیستی را در فاز کاربرد (تخریب آلاینده) نشان می دهد که به طور قاطع با فاز سنتز (ساخت نانوماده) متفاوت است. در این مرحله، بار محیط زیستی به شدت توسط نانوماده $g-C_3N_4$ غالب می شود، در حالی که سهم انرژی الکتریکی که فرآیند فتوکاتالیستی را هدایت می کند، نقش ثانویه پیدا می کند. سهم $g-C_3N_4$ در تقریباً تمام دسته بندی آثار (مانند Global Warming، Stratospheric Ozone Depletion و Ionizing Radiation) به طور متوسط بیش از ۷۷٪ است. در مقابل، سهم انرژی الکتریکی در تمام این دسته بندی ها به کمتر از ۲۳٪ کاهش یافته است. علت این تغییر بزرگ در تخصیص بار، این است که فرآیند تخریب فتوکاتالیستی، اگرچه نیاز به یک منبع نور دارد، اما در مقایسه با تولید پرانرژی خود نانوماده $g-C_3N_4$ (که قبلاً ثابت شد بیش از ۹۵ درصد بار آن از برق ناشی می شود)، مصرف انرژی نسبتاً کمتری دارد. به عبارت

و قابلیت بازیابی کاتالیست به حداکثر برسد. هرچه کاتالیست بتواند زیستی ۷۷ درصدی آن بر یک واحد حجم تصفیه شده، توزیع و تعداد چرخه‌ها یا حجم پساب بیشتری را تصفیه کند، بار محیط ترقیق می‌شود و تأثیر نسبی $g-C_3N_4$ کاهش می‌یابد.

جدول ۴. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Table 4. Midpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 liter of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Impact category	Unit	Total	$g-C_3N_4$	Electricity
Global warming, Human health	%	100	77.99	22.01
Global warming, Terrestrial ecosystems	%	100	77.99	22.01
Global warming, Freshwater ecosystems	%	100	77.99	22.01
Stratospheric ozone depletion	%	100	77.83	22.17
Ionizing radiation	%	100	78.03	21.97
Ozone formation, Human health	%	100	78.12	21.88
Fine particulate matter formation	%	100	78.39	21.61
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	%	100	78.10	21.90
Terrestrial acidification	%	100	78.42	21.58
Freshwater eutrophication	%	100	80.71	19.29
Marine eutrophication	%	100	79.75	20.25
Terrestrial ecotoxicity	%	100	83.08	16.92
Freshwater ecotoxicity	%	100	79.31	20.69
Marine ecotoxicity	%	100	82.35	17.65
Human carcinogenic toxicity	%	100	78.93	21.07
Human non-carcinogenic toxicity	%	100	79.30	20.70
Land use	%	100	79.16	20.84
Mineral resource scarcity	%	100	79.34	20.66
Fossil resource scarcity	%	100	77.89	22.11
Water consumption, Human health	%	100	80.07	19.93
Water consumption, Terrestrial ecosystem	%	100	83.35	16.65
Water consumption, Aquatic ecosystems	%	100	158.57	-58.57



شکل ۳. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Fig. 3. Midpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 L of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

۷۸/۱۴۶ درصدی در میان حوزه‌های سه‌گانه، نشان‌دهنده انتقال حداکثری بارهای آلاینده و سمی از فاز تولید به ساختار کاتالیست است. از نظر علی، سهم ۷۸/۱۴۶ درصدی $g-C_3N_4$ در آسیب به بوم‌سازگان‌ها از تجمیع آثار Midpoint مرتبط با آلودگی‌های شیمیایی و فیزیکی، به‌ویژه سمیت آب‌های شیرین و شور (Ecotoxicity) و اسیدی شدن (Acidification) ناشی می‌شود. این بارها در طول فرآیند سنتز پرانرژی کاتالیست (که از یک شبکه برق آلاینده استفاده می‌کند) ایجاد شده‌اند. آلاینده‌هایی که منجر به باران اسیدی یا ورود مواد شیمیایی به آب‌ها می‌شوند، اکنون در ساختار نانوماده تثبیت شده و در فاز کاربرد، تأثیر مخرب محیطی خود را بر سلامت گونه‌های آبی، خاکی و پوشش گیاهی اعمال می‌کنند. این امر مؤید آن است که آلودگی‌های نهفته در تولید کاتالیست، اصلی‌ترین چالش پایداری زیست‌بوم در فرآیند تصفیه هستند.

۳-۴- ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

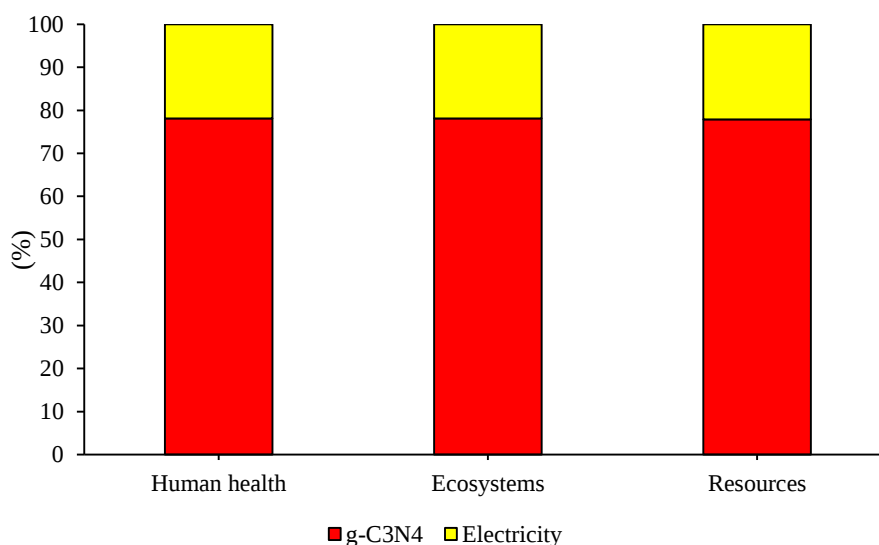
نتایج حاصل از ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی در ۳ حوزه اصلی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع طبیعی در جدول (۵) و شکل (۴) ارایه شده است. تحلیل ارزیابی آسیب (Damage Assessment) برای این فرایند، یک بیش ساختاری راجع به توازن بار محیط زیستی فرآیند ارائه می‌دهد. این تحلیل به صورت قاطع نشان می‌دهد که کانون بار محیط زیستی در فاز کاربرد، به هزینه تولید کاتالیست منتقل شده است. به طوریکه در فاز کاربرد نانوماده، بیش از ۷۷ درصد از بار محیط زیستی در هر سه حوزه آسیب نهایی به‌طور قاطع توسط نانوماده $g-C_3N_4$ به شرح ذیل اعمال می‌گردد:

الف) آسیب به بوم‌سازگان‌ها (Ecosystems): این سهم بیشینه

جدول ۵. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Table 5. Endpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 liter of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Damage category	Unit	Total	$g-C_3N_4$	Electricity
Human health	%	100	78.11	21.88
Ecosystems	%	100	78.14	21.85
Resources	%	100	77.89	22.10



شکل ۴. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Fig. 4. Endpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 L of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

طولانی مدت فراهم شده و هزینه ساخت به ازای هر واحد آب تصفیه‌شده، به حداقل برسد.

۲- لزوم سینتیک سبز و کربن‌زدایی ساختاری: برای ارتقاء این فناوری به یک راه‌حل واقعاً پایدار، لازم است که تحقیقات به سمت توسعه روش‌های سنتز با شدت کربن صفر (Zero-Carbon Intensity Synthesis) هدایت شود. این رویکرد، که می‌تواند شامل استفاده مستقیم از انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی) در سینتیک تولید $g-C_3N_4$ باشد، وابستگی ساختاری فرآیند به منابع انرژی آلاینده (که منشأ بار ۷۸ درصدی هستند) را به‌طور کامل حذف خواهد کرد. این تحول، کارآمدی محیط‌زیستی ذاتی (Intrinsic Environmental Efficiency) کاتالیست را افزایش داده و آسیب‌های نهفته را در منبع اصلی خود خنثی خواهد نمود.

۳-۵- آنالیز حساسیت

$g-C_3N_4$ به عنوان یک فتوکاتالیست نسل جدید بدون فلز و فعال در ناحیه نور مرئی، به دلیل ترکیب منحصر به فردی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خود از جمله پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، باند گپ مناسب ($\sim 2.7 \text{ eV}$)، سنتز مقرون به صرفه و مقیاس‌پذیر و سازگاری محیط‌زیستی، به عنوان یک راهکار حیاتی در فناوری‌های تصفیه آب و فاضلاب شناخته می‌شود. با این حال، تولید این فتوکاتالیست عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی (Laboratory Scale) محصور مانده است، وضعیتی که پتانسیل کاربرد گسترده آن‌ها را محدود می‌کند [25-27]. در این راستا، ارتقاء تولید این مواد به مقیاس صنعتی (Industrial Scale) یک ضرورت تلقی می‌شود. با این وجود، انتقال از محیط کنترل شده آزمایشگاه به یک فرآیند صنعتی، اغلب باعث واگرایی قابل توجهی در پروفایل چرخه حیات می‌شود که این تفاوت ناشی از تغییر در ماهیت جریان‌های انرژی، زنجیره تأمین مواد اولیه و الزامات زیرساختی است [28-30]. از این رو، تحلیل حساسیت می‌تواند در ارزیابی عدم قطعیت در آثار محیط زیستی برای افزایش مقیاس تولید (Scale-up) اهمیت داشته باشد. علاوه بر این، درک فرآیندهای اصلی سهم‌گذار در تولید مقیاس صنعتی می‌تواند تعداد آثار محیط زیستی نامعلوم را کاهش دهد [31]. با توجه به آثار محیط زیستی قابل توجه مرحله تأمین برق در فرآیند ساخت فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ ، پارامتر کاهش مصرف برق (e95%) [32] در آنالیز حساسیت مورد بررسی قرار گرفت. زیرا

ب) آسیب به سلامت انسان (Human Health): سهم ۷۸/۱۱۹ درصدی $g-C_3N_4$ در آسیب به سلامت عمومی، از انتقال بار آلودگی‌هایی با پتانسیل تأثیر مستقیم بر بدن انسان نشأت می‌گیرد. این آسیب‌ها ریشه در دسته‌بندی‌های Midpoint مانند تشکیل ذرات معلق ریز (Fine Particulate Matter Formation) و سمیت انسانی (Human Toxicity) دارند. دلیل این سهم غالب آن است که ردپای آلودگی هوای فاز سنتز کاتالیست، که شامل انتشار آلاینده‌هایی چون $PM_{2.5}$ و پیش‌سازهای اسموگ از نیروگاه‌های حرارتی است، در ساختار $g-C_3N_4$ نهفته شده است.

ج) تحلیل آسیب به منابع (Resources): سهم ۷۷/۸۹۰ درصدی $g-C_3N_4$ در آسیب به منابع، نمایانگر انتقال بار مرتبط با استهلاك منابع پایه و تجدیدنپذیر به ساختار کاتالیست است. این سهم عمدتاً از دسته‌بندی‌های Midpoint مرتبط با کمیابی سوخت‌های فسیلی (Fossil Scarcity) نشأت می‌گیرد. توضیح علی این پدیده در این واقعیت نهفته است که فرآیند سنتز $g-C_3N_4$ یک فرآیند انرژی-فشرده است و تأمین این انرژی از شبکه‌ای متکی بر سوخت‌های فسیلی، یک تخریب ترمودینامیکی و غیرقابل بازگشت را در مقیاس منابع پایه سیاره تحمیل کرده است. در نتیجه، اصلی‌ترین هزینه ساخت کاتالیست، نه در مصرف عملیاتی انرژی برای تصفیه، بلکه در مصرف منابع اولیه برای تولید خود کاتالیست نهفته است که به صورت بار ۷۷ درصدی به سیستم تصفیه منتقل شده است.

نتایج به دست آمده در این قسمت نشان می‌دهند که پایداری نهایی این فناوری، وابسته به مدیریت بار ساختاری و غالب (حدود ۷۸ درصد) است که در هزینه تولید کاتالیست نهفته است. بر این اساس، دو جهت‌گیری استراتژیک برای بهبود محیط‌زیستی فرآیند مورد نیاز است:

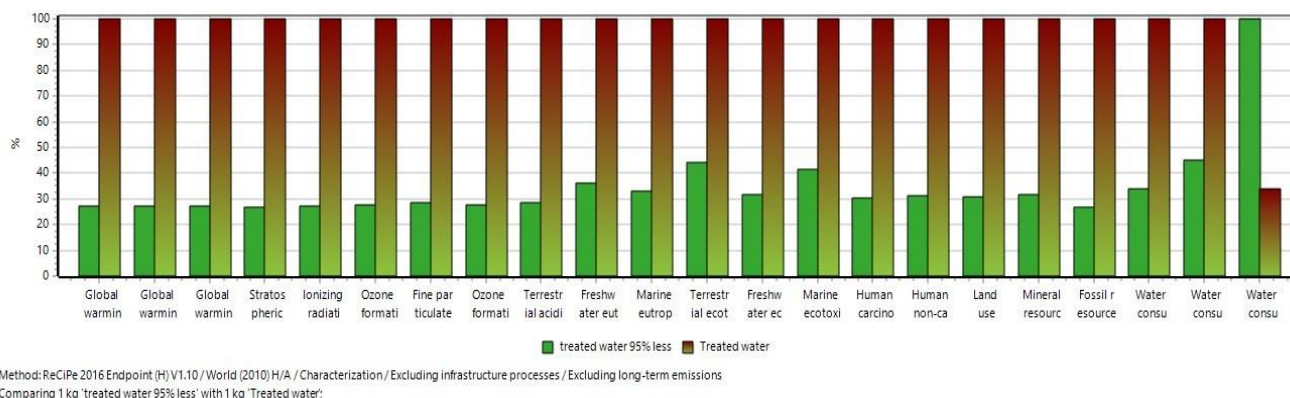
۱- اولویت‌دهی به دوام کاتالیست و قابلیت استفاده مجدد:

پایداری نهایی فرآیند تصفیه به‌طور مستقیم با طول عمر چرخه استفاده (Catalyst Lifespan) و قابلیت بازیابی (Recoverability) نانوماده $g-C_3N_4$ در ارتباط است. از آنجایی که بیش از سه‌چهارم (۷۸٪) بار محیط زیستی در فاز تولید کاتالیست متمرکز شده، ضروری است که این بار بر یک حجم عملیاتی بزرگتر توزیع و رقیق شود. بنابراین، هدف تحقیقات مهندسی باید بر افزایش عدد تناوب استفاده کاتالیست و بهبود پایداری ساختاری آن در برابر تخریب مکانیکی و شیمیایی متمرکز شود تا امکان استفاده مجدد

بار محیط زیستی را به خود اختصاص داده بود، به طور چشمگیری خنثی شده است. به عنوان مثال، در دسته‌بندی‌هایی مانند Global Warming، سهم $g-C_3N_4$ از ۷۸ درصد به کمتر از ۷ تا ۱۰ درصد کاهش یافته است. این امر یک تغییر قاطع در کانون آسیب (Hotspot) سیستم را رقم زده است. انرژی الکتریکی عملیاتی فرآیند تصفیه (تأمین نور)، که در سناریوی پایه تنها ۲۲ درصد سهم داشت، با حذف بار ساختاری کاتالیست، تبدیل به عامل غالب جدید شده و سهم آن در اکثر دسته‌بندی‌ها به بیش از ۹۰ درصد افزایش یافته است. این امر اثبات نمود که هزینه محیط‌زیستی نهفته (Embodied Cost) کاتالیست، مستقیماً تابعی از شدت کربن (Carbon Intensity) برق مصرفی در مرحله تولید آن است. با کاهش ۹۵ درصدی برق آلاینده، وابستگی ساختاری به زیرساخت فسیلی منطقه از بین رفته و تنها بار محیط زیستی مواد اولیه باقی می‌ماند که اکنون در برابر بار عملیاتی، ناچیز محسوب می‌شود.

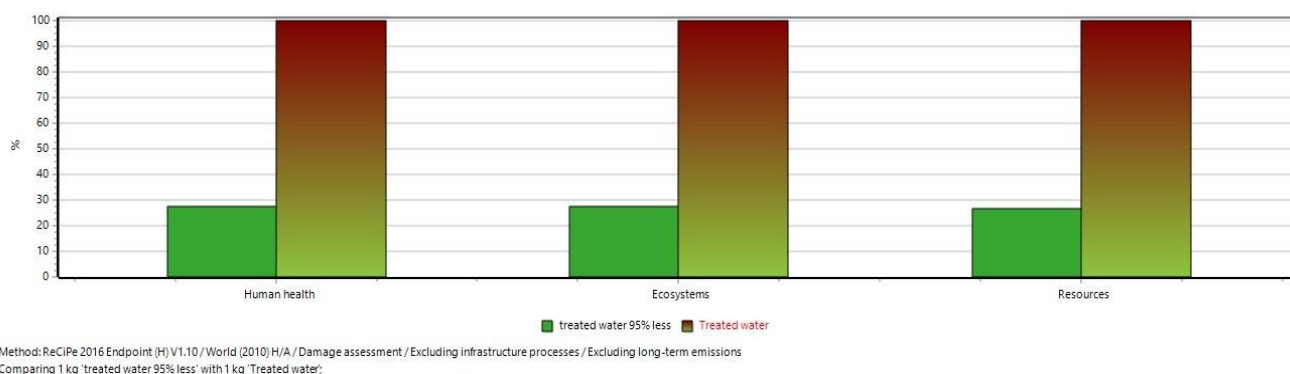
هدف اصلی این سناریو، استفاده از یک ابزار متدولوژیک در چارچوب LCA برای تعیین آستانه‌های بحرانی پایداری و ارزیابی حساسیت ساختاری مطلق فرایند بود. شبیه‌سازی کاهش شدید و تقریباً نزدیک به صفر بار کربن ناشی از مصرف انرژی در سنتز، امکان بررسی این مسئله را فراهم کرد که آیا فتوکاتالیست مورد مطالعه می‌تواند حتی در شرایط ایده‌آل کربن‌زدایی، به برتری محیط زیستی نسبت به گزینه‌های مرجع دست یابد یا خیر.

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، با اعمال سناریوی کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی، یک تحول ساختاری و بنیادین را در توزیع بار محیطی فرآیند تصفیه آشکار ساخت. این یافته‌ها به طور مستقیم، فرضیه غلبه هزینه ساختاری کاتالیست را تأیید نمودند. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، در این سناریوی جایگزین، سهم $g-C_3N_4$ (به عنوان حامل بار تولید) که در سناریوی پایه حدود ۷۸ درصد از



شکل ۵. نتایج آنالیز حساسیت در دو سناریو پایه و کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ ، در سطح میانی

Fig. 5. Sensitivity analysis results for two scenarios: baseline and 95% reduction in electricity consumption during the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst, at the midpoint level



شکل ۶. نتایج آنالیز حساسیت در دو سناریو پایه و کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ ، در سطح نهایی

Fig. 6. Sensitivity analysis results for two scenarios: baseline and 95% reduction in electricity consumption during the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst, at the endpoint level

سناریوی کاهش ۹۵ درصدی برق مصرفی در سنتز اعمال شد. نتایج این تحلیل، فرضیه وابستگی مستقیم آسیب کاتالیست به شدت کربن تولید آن را به صورت قاطع تأیید نمود؛ به طوری که سهم $g-C_3N_4$ در آسیب‌های سطح نهایی بیش از ۹۲ درصد کاهش یافت (به زیر ۶ درصد رسید). این کاهش شدید نشان داد که حذف تقریباً کامل بار آلاینده در تولید کاتالیست، خشی سازی مؤثر هزینه ساختاری آن را در پی خواد داشت. با برداشته شدن بار ساختاری کاتالیست، انرژی الکتریکی عملیاتی تصفیه به کانون آسیب جدید تبدیل شد که این امر، اولویت‌های مهندسی را به طور بنیادین تغییر خواهد داد.

در نهایت، این پژوهش نتیجه‌گیری کرد که دستیابی به یک راهکار فتوکاتالیستی پایدار، مستلزم یک استراتژی دوگانه و جامع است. نخست، الزامی است که تحقیقات بر توسعه روش‌های سنتز با شدت کربن صفر متمرکز شود تا وابستگی ساختاری به زیرساخت انرژی آلاینده کاملاً حذف گردد. دوم، مدیریت بار ساختاری باقی مانده نیازمند افزایش دوام و قابلیت استفاده مجدد کاتالیست است. پایداری فرآیند به طور مستقیم به طول عمر چرخه استفاده و عدد تناوب استفاده وابسته است تا هزینه ساخت به ازای هر واحد آب تصفیه شده، به حداقل برسد و پتانسیل کامل این فناوری اکسیداسیون پیشرفته محقق گردد.

قدردانی

نویسنده از حمایت معنوی دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده علوم محیطی تشکر می‌نماید.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافع برای نویسنده این مقاله در انتشار آن وجود ندارد.

سهم نویسندگان

افسانه شهبازی ۱۰۰ درصد مسئولیت تمامی مراحل پژوهش، شامل طراحی مطالعه، انجام پژوهش، تحلیل و تفسیر داده‌ها و نگارش و ویرایش نهایی مقاله را بر عهده داشته است.

منابع مالی

در این تحقیق از هیچ منابع مالی کمک گرفته نشد.

بیانیه هوش مصنوعی

در این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

تحلیل نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، با اعمال سناریوی کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی به وضوح نشان داد که با کاهش ۹۵ درصدی برق مصرفی در سنتز، سهم $g-C_3N_4$ در هر سه حوزه آسیب نهایی به کمتر از ۶ درصد تنزل یافت (شکل ۶). به طور مشخص، سهم $g-C_3N_4$ در حوزه منابع (Resources) به حدود ۴/۸ درصد رسید که نشان‌دهنده یک کاهش تقریباً ۹۳ درصدی نسبت به حالت پایه (۷۷/۸۹ درصد) بود. به همین ترتیب، در حوزه بوم‌سازگان‌ها (Ecosystems)، سهم $g-C_3N_4$ به حدود ۵/۵ درصد و در حوزه سلامت انسان (Human Health) به حدود ۵/۷ درصد کاهش یافت که در هر دو مورد، کاهشی بیش از ۹۲ درصد را نشان داد. این کاهش شدید و یکنواخت، به صورت قاطع نشان داد که تخریب ساختاری منابع، سلامت و اکوسیستم‌ها که در ابتدا توسط هزینه تولید $g-C_3N_4$ هدایت می‌شد، قابل اجتناب بود. با فرض دستیابی به تولیدی با شدت کربن بسیار پایین، بار محیط زیستی نهفته کاتالیست عملاً به صفر می‌رسید. در نتیجه، در این سناریوی ایده‌آل، چالش پایداری به حوزه عملیات تصفیه (مصرف برق باقی‌مانده) محدود می‌شود که این امر، اولویت‌های مهندسی محیط‌زیست را به طور کامل از تولید کاتالیست به بهینه‌سازی فرآیند تصفیه تغییر می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی جامع چرخه حیات (LCA) برای بررسی آثار محیط زیستی فرآیند تخریب فتوکاتالیستی RhB توسط $g-C_3N_4$ انجام شد. تحلیل‌ها یک انتقال ساختاری و حیاتی در بار محیطی سیستم را آشکار ساخت. در حالی که در فاز سنتز، انرژی الکتریکی پرکربن شبکه منطقه‌ای با سهمی بیش از ۹۷ درصد به عنوان کانون آسیب اصلی شناخته شد، در فاز کاربرد (تصفیه)، این بار به صورت کامل به ساختار $g-C_3N_4$ منتقل شد. در این مرحله، هزینه محیط زیستی نهفته کاتالیست با سهمی حدود ۷۸ درصد، عامل غالب در تمام آسیب‌های سطح نهایی (به منابع، سلامت انسان و بوم‌سازگان‌ها) تعیین گردید. این امر مؤید آن بود که بار محیطی غالب فرآیند تصفیه، نه از مصرف انرژی عملیاتی آن، بلکه از سرمایه‌گذاری محیط‌زیستی اولیه و سنگین برای ساخت خود کاتالیست نشأت گرفته بود.

برای مقابله با این چالش ساختاری، یک تحلیل حساسیت با

References

- [1] Oladoye, P.O., Kadhon, M., Khan, I., Aziz, K.H.H. and Alli, Y.A., 2024. Advancements in adsorption and photodegradation technologies for Rhodamine B dye wastewater treatment: fundamentals, applications, and future directions. *Green Chemical Engineering*, 5(4), pp.440–460. doi: [10.1016/j.gce.2023.12.004](https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.12.004).
- [2] Islam, T., Repon, M.R., Islam, T., Sarwar, Z. and Rahman, M.M., 2023. Impact of textile dyes on health and ecosystem: a review of structure, causes, and potential solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), pp.9207–9242. doi: [10.1007/s11356-022-24398-3](https://doi.org/10.1007/s11356-022-24398-3).
- [3] Pavithra, K.G., Kumar, P.S., Jaikumar, V. and Sundar Rajan, P., 2019. Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, pp.1–19. doi: [10.1016/j.jiec.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.02.011).
- [4] Kumar, A. and Pandey, G., 2017. A review on the factors affecting the photocatalytic degradation of hazardous materials. *Material Science & Engineering International Journal*, 1(3), pp.106–114. doi: [10.15406/mseij.2017.01.00018](https://doi.org/10.15406/mseij.2017.01.00018).
- [5] Rawal, J., Lee, S.-Y. and Park, S.-J., 2023. Facile synthesis of a GO-g-C₃N₄/BaTiO₃ ternary nanocomposites for visible-light-driven photocatalytic degradation of rhodamine B. *Chemosphere*, 345, p.140479. doi: [10.1016/j.chemosphere.2023.140479](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140479).
- [6] Gaikwad, R.P., Naikwadi, D.R., Biradar, A.V. and Gawande, M.B., 2023. Photocatalytic one-pot conversion of aldehydes to esters and degradation of rhodamine B dye using mesoporous graphitic carbon nitride. *ACS Applied Nano Materials*, 6(3), pp.1859–1869. doi: [10.1021/acsanm.2c04846](https://doi.org/10.1021/acsanm.2c04846).
- [7] Mishra, P.P., Behera, D., Suman, S., Das, N., Tripathy, B.C., Kumar, J. and Behera, A.K., 2025. Synergistic efficiency of modified banana leaf derived cellulose-g-C₃N₄ hybrid composite: a sustainable approach for visible-light-driven photodegradation of dyes. *RSC Advances*, 15(17), pp.13712–13727. doi: [10.1039/D5RA01156F](https://doi.org/10.1039/D5RA01156F).
- [8] Song, P., Sun, S., Cui, J., Zheng, X. and Liang, S., 2021. Organic dye-reformed construction of porous-defect g-C₃N₄ nanosheet for improved visible-light-driven photocatalytic activity. *Applied Surface Science*, 568, p.150986. doi: [10.1016/j.apsusc.2021.150986](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150986).
- [9] Barjoveanu, G., Teodosiu, C., Bucatariu, F. and Mihai, M., 2020. Prospective life cycle assessment for sustainable synthesis design of organic/inorganic composites for water treatment. *Journal of Cleaner Production*, 272, p.122672. doi: [10.1016/j.jclepro.2020.122672](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122672).
- [10] Bartolozzi, I., Daddi, T., Punta, C., Fiorati, A. and Iraldo, F., 2020. Life cycle assessment of emerging environmental technologies in the early stage of development: a case study on nanostructured materials. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), pp.101–115. doi: [10.1111/jiec.12959](https://doi.org/10.1111/jiec.12959).
- [11] Ramadan, B.S., Wibowo, Y.G., Anwar, D. and Maryani, A.T., 2024. A review of life cycle assessment of nanomaterials-based adsorbent for environmental remediation. *Global NEST Journal*, 26(7), 06216. doi: [10.30955/gnj.06216](https://doi.org/10.30955/gnj.06216).
- [12] Rashid, S.S., Harun, S.N., Hanafiah, M.M., Razman, K.K., Liu, Y.-Q. and Tholibon, D.A., 2023. Life cycle assessment and its application in wastewater treatment: a brief overview. *Processes*, 11(1), p.208. doi: [10.3390/pr11010208](https://doi.org/10.3390/pr11010208).
- [13] Popowicz, M., Katzer, N.J., Kettele, M., Schöggel, J.-P. and Baumgartner, R.J., 2025. Digital technologies for life cycle assessment: a review and integrated combination framework. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(3), pp.405–428. doi: [10.1007/s11367-024-02409-4](https://doi.org/10.1007/s11367-024-02409-4).
- [14] Luo, Y. and Su, R., 2024. Environmental impact of waste treatment and synchronous hydrogen production: based on life cycle assessment method. *Toxics*, 12(9), p.652. doi: [10.3390/toxics12090652](https://doi.org/10.3390/toxics12090652).
- [15] Sendão, R.M., da Silva, J.C.E. and da Silva, L.P., 2025. Comparative life cycle assessment of the fabrication of visible-light-driven photocatalytic TiO₂–carbon dots nanocomposites for wastewater treatment. *NanoImpact*, 38, p.100556. doi: [10.1016/j.impact.2025.100556](https://doi.org/10.1016/j.impact.2025.100556).
- [16] Ogbu, C.A., Alexiou Ivanova, T., Ewemoje, T.A., Alabi, H.A. and Roubík, H., 2025. Towards environmentally sustainable water management in Africa: a comprehensive review of life cycle assessment studies in water and wastewater treatment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30, pp.956–979. doi: [10.1007/s11367-025-02434-x](https://doi.org/10.1007/s11367-025-02434-x).
- [17] Aquino de Carvalho, N. and Gilbertson, L.M., 2023. Comparative life cycle assessment of graphitic carbon nitride synthesis routes. *Journal of Industrial Ecology*, 27(3), pp.1008–1020. doi: [10.1111/jiec.13390](https://doi.org/10.1111/jiec.13390).
- [18] Sahoo, S., Mahamallik, P., Das, R. and Panigrahi, S., 2024. A critical review on non-metal doped g-C₃N₄ based photocatalyst for organic pollutant remediation with sustainability assessment by life cycle analysis. *Environmental Research*, 258, p.119390. doi: [10.1016/j.envres.2024.119390](https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119390).
- [19] Veiga-del-Baño, J.M., Pérez-Lucas, G., Andreo-Martínez, P. and Navarro, S., 2025. Bibliometric analysis on graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) as photocatalyst for the remediation of water polluted with contaminants of emerging concern. *Catalysts*, 15(2), p.115. doi: [10.3390/catal15020115](https://doi.org/10.3390/catal15020115).
- [20] Rajaeifar, M.A., Akram, A., Ghobadian, B., Rafiee, S., Heijungs, R. and Tabatabaei, M., 2016. Environmental impact assessment of olive pomace oil

- biodiesel production and consumption: a comparative lifecycle assessment. *Energy*, 106, pp.87–102. doi: 10.1016/j.energy.2016.03.010.
- [21] Bijari, M. and Shahbazi, A., 2025. Flow-driven engineering of g-C₃N₄ nanosheet for additive-free, one-step, and sustainable synthesis of high-efficiency photocatalysts. *Materials Today Communications*, 49, p.114208. doi: 10.1016/j.mtcomm.2025.114208.
- [22] Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A. and Sonnemann, G., 2021. Life cycle impact assessment methods for estimating the impacts of dissipative flows of metals. *Journal of Industrial Ecology*, 25(5), pp.1177–1193. doi: 10.1111/jiec.13136.
- [23] van Zelm, R., Hennequin, T. and Huijbregts, M.A.J., 2025. Performing life cycle impact assessment with the midpoint and endpoint method ReCiPe. *Nature Protocols*, 20, pp.3400–3411. doi: 10.1038/s41596-025-01207-y.
- [24] Nizam, N.U.M., Hanafiah, M.M. and Woon, K.S., 2021. A content review of life cycle assessment of nanomaterials: current practices, challenges, and future prospects. *Nanomaterials*, 11(12), p.3324. doi: 10.3390/nano11123324.
- [25] Bhandari, D., Lakhani, P. and Modi, C.K., 2024. Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) as an emerging photocatalyst for sustainable environmental applications: a comprehensive review. *RSC Sustainability*, 2(2), pp.265–287. doi: 10.1039/D3SU00382E.
- [26] Faccani, L., 2022. *Nano-photocatalysts: design, up-scale and characterisation models*. PhD thesis, University of Parma.
- [27] Patra, R., Dash, P., Panda, P.K. and Yang, P.-C., 2023. A breakthrough in photocatalytic wastewater treatment: the incredible potential of g-C₃N₄/titanate perovskite-based nanocomposites. *Nanomaterials*, 13(15), p.2173. doi: 10.3390/nano13152173.
- [28] Arvidsson, R., Nguyen, D. and Svanström, M., 2015. Life cycle assessment of cellulose nanofibrils production by mechanical treatment and two different pretreatment processes. *Environmental Science & Technology*, 49(11), pp.6881–6890. doi: 10.1021/acs.est.5b00888.
- [29] Gavankar, S., Suh, S. and Keller, A.A., 2015. The role of scale and technology maturity in life cycle assessment of emerging technologies: a case study on carbon nanotubes. *Journal of Industrial Ecology*, 19(1), pp.51–60. doi: 10.1111/jiec.12175.
- [30] Kim, H.C. and Fthenakis, V., 2013. Life cycle energy and climate change implications of nanotechnologies. *Journal of Industrial Ecology*, 17(4), pp.528–541. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00538.x.
- [31] Arvidsson, R., Kushnir, D., Sandén, B.A. and Molander, S., 2014. Prospective life cycle assessment of graphene production by ultrasonication and chemical reduction. *Environmental Science & Technology*, 48(8), pp.4529–4536. doi: 10.1021/es405338k.
- [32] Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A. and Olsen, S.I., 2018. Life cycle assessment of nanoadsorbents at early stage technological development. *Journal of Cleaner Production*, 174, pp.527–537. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.245.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Shahbazi, A., 2026. Life Cycle Analysis of the Synthesis and Photocatalytic Application of Non-Metallic Semiconductor Nanosheets for Rhodamine B Removal with an Environmental Sustainability Approach. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.81-96.



Investigation on Self-Healing Concrete Using *Bacillus Subtilis* Bacteria

Komeil Momeni^{1*} , Tahereh Samary Masouleh², Sajad Gholamrezaei Sarvelat³

1. Assistant professor of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.
2. M.Sc of Civil Engineering student of Jihad University, Guilan, Iran.
3. Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering ,Technical and Vocational University(TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Spontaneous healing involves the formation of self-healing compounds through the continuous hydration of unhydrated cementitious materials, which have limited ability to heal cracks. On the other hand, autohealing uses external agents such as superabsorbent polymers, biological agents, high pozzolanic materials, and chemical agents to seal cracks. In this study, the use of *Bacillus subtilis* bacteria was investigated to improve compressive strength and crack repair. Some researchers added *Bacillus subtilis* bacteria directly to concrete. The results of these studies showed that adding *Bacillus subtilis* bacteria directly significantly improves the compressive strength of bacterial concrete compared to control concrete. *Bacillus subtilis* bacteria also produce calcium deposits and fill cracks in concrete. However, some researchers investigated the indirect (encapsulated) addition of *Bacillus subtilis* bacteria with different carriers in concrete. The results showed that using a phenyl vinyl alcohol (PVA) carrier containing *Bacillus subtilis* bacteria in concrete increased the compressive strength of the samples compared to other samples containing bacterial carriers. Also, the concrete mixture containing *Bacillus subtilis* bacteria with 30% fly ash carrier showed higher healing compared to other mixtures. Overall, the results of this study showed that the use of bacteria with *Bacillus subtilis* plays a significant role in improving the compressive strength and self-healing capacity of concrete, which can significantly improve the durability of concrete structures. The results obtained on concrete samples containing *Bacillus subtilis* bacteria compared to control concrete, bacterial concrete had a maximum compressive strength of 18.20 MPa (3.59% increase), 54.29 MPa (15.61% increase), and 88.32 MPa (19.55% increase) after 14, 7, and 28 days, respectively. After 28 days of curing, the self-healing index showed that bacterial concrete had a higher normalized self-healing index of 1.12 compared to control concrete. The results of the research on bacterial concrete containing *Bacillus subtilis* bacteria showed higher compressive strength compared to normal concrete in all grades of concrete. Also, the compressive strength of concrete containing *Bacillus subtilis* bacteria with a bacterial concentration of 5×10^8 cells per ml with concrete grade M30 on day 28 was slightly higher than other samples. In this study, sediment was observed on the surface of concrete samples Cracked bacteria and filling of smooth cracks showed the effectiveness of crack repair. The compressive strength results obtained on concrete samples containing *Bacillus subtilis* bacteria with carriers of phenyl vinyl alcohol fibers, sisal fibers and expanded perlite and concrete samples containing phenyl vinyl alcohol fibers, sisal fibers that do not contain *Bacillus* bacteria and normal concrete. The self-healing concrete of *Bacillus subtilis* with polyvinyl alcohol (PVA) fibers added is stronger than the two carriers with bacteria and without bacteria and normal concrete. The reason is that polyvinyl alcohol (PVA) fibers have a binding role in concrete compared to the expanded perlite material. The repair effect in concrete with *Bacillus subtilis* bacterial solution added at a concentration of 2.5 oz with carrier is higher compared to the other two groups of self-healing concrete. For both normal concrete and self-healing concrete containing *Bacillus subtilis* bacteria, 100% natural aggregate provides the maximum strength. Slow and in case of strength recovery after repair, concrete mix containing 30% fly ash aggregate showed good results. In this test, mix B2 with 30% fly ash aggregate showed high repair performance compared to other mixes.

Review History

Received: Aug 13, 2025

Revised: Oct 10, 2025

Accepted: May 30, 2026

Keywords

Bacterial concrete
Self-healing
Bacillus subtilis

* Corresponding Author Email: kmomeni@tvu.ac.ir - ORCID: 0009-0003-9238-8873



بررسی بتن خود ترمیم شونده با استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس

کمیل مومنی^{۱*} , طاهره ثمری ماسوله^۲، سجاد غلامرضایی سرولات^۳

۱. استادیار فنی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی حرفه ای، تهران، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، جهاد دانشگاهی رشت، رشت، ایران.

۳. گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ملی مهارت تهران، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این مطالعه به بررسی استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس برای بهبود مقاومت فشاری و ترمیم ترک‌ها پرداخته شد. برخی از محققان استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس را به روش مستقیم به بتن اضافه کردند. نتایج این مطالعات نشان داد که افزودن باکتری باسیلیوس سوبتیلیس به روش مستقیم مقاومت فشاری بتن باکتریایی را در مقایسه با بتن کنترلی به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. همچنین باکتری باسیلیوس سوبتیلیس باعث تولید رسوب کلسیم شده و ترک‌های بتن را پر می‌کند. اما برخی از محققان به بررسی افزودن باکتری باسیلیوس سوبتیلیس به روش غیر مستقیم (کپسوله) با حامل‌های مختلف در بتن پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از حامل پنیل ونیل الکل (PVA) حاوی باکتری باسیلیوس سوبتیلیس در بتن در مقایسه با دیگر نمونه‌های حاوی حامل‌های باکتریایی باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. همچنین مخلوط بتن حاوی باکتری باسیلیوس سوبتیلیس با حامل ۳۰٪ خاکستر بادی در مقایسه با سایر مخلوط‌ها ترمیم بالاتری مشاهده شد. در مجموع نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از باکتری باسیلیوس سوبتیلیس نقش چشم‌گیری در بهبود مقاومت فشاری و ظرفیت خودترمیمی بتن دارد که می‌تواند دوام سازه‌های بتنی را به میزان قابل توجهی ارتقاء بخشد.

کلمات کلیدی

بتن باکتریایی
خودترمیم شونده
کپسوله
باسیلیوس سوبتیلیس

۱- مقدمه

که منجر به از دست دادن مقاومت می‌شود. علاوه بر این، قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی تهاجمی و آب می‌تواند منجر به تخریب بتن از طریق حمله شیمیایی و خوردگی آرماتور فولادی شود و یکپارچگی ساختاری و دوام طولانی‌مدت آن را به خطر بیندازد [5-6]. در نتیجه، تلاش‌های گسترده‌ای برای تعمیر و نگهداری برای رسیدگی به این مسائل مورد نیاز است. روش‌های سنتی برای تعمیر ترک‌ها در مصالح پایه سیمانی شامل پوشش سطحی، دوغاب ریزی، مسدود کردن، پر کردن، تقویت سازه و روش‌های جایگزینی بتن است که هر کدام کاستی‌های خاص خود را دارند [7]. تحقیقات

بتن که به دلیل مقاومت فشاری بالا، سهولت شکل‌دهی، دوام و مقرون به صرفه بودنش مشهور است، پرکاربردترین مصالح ساختمانی در سطح جهان است [1-2]. با توجه به افزایش استفاده از بتن، مواد تشکیل‌دهنده آن نیز روز به روز در حال افزایش هستند. خواص و رفتار بتن با توجه به مواد مورد استفاده در حال تغییر است. بتن ماده‌ای است که در کشش ضعیف است، بنابراین تشکیل ترک در ناحیه کشش یک مشکل شایع است [3-4]. با این حال، شکنندگی ذاتی آن، بتن را مستعد انتشار و ادغام ریزترک‌ها می‌کند

* رایانامه نویسنده مسئول: kmomeni@tvu.ac.ir - ORCID: 0009-0003-9238-8873

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



سهولت کشت و اثربخشی گزارش شده در مطالعات قبلی، برای MICP در بتن توصیه می‌شود [19]. باسیلوس سوبتیلیس، باکتری‌های گرم مثبت، میله‌ای شکل و هوازی هستند که هاگ‌هایی با ظرفیت تحمل طولانی‌مدت در معرض دماهای شدید تولید می‌کنند [5, 20-21]. این هاگ‌های مقاوم، مقاومت در برابر فشار مکانیکی بالا و محیط قلیایی را ایجاد می‌کنند. گونه‌های باسیلوس در تولید هاگ‌های خفته‌ای که بیش از دو قرن زنده می‌مانند، مهارت دارند [1, 5, 20]. علاوه بر ویژگی‌های سازگار با محیط زیست و دسترسی تجاری، پذیرش آن‌ها در مهندسی عمران همچنان محدود است [22]. شکل (۱) نمونه‌ای از باکتری باسیلوس را نشان می‌دهد.

۴-۱- روش‌های اضافه کردن باکتری باسیلوس سوبتیلیس به بتن

الف-روش مستقیم

در این روش، باکتری‌های باسیلوس سوبتیلیس به همراه مواد مغذی مورد نیازشان (مانند لاکتات کلسیم) به صورت مستقیم و بدون هیچ محافظی، به مخلوط بتن تازه اضافه می‌شوند. هدف این است که باکتری‌ها در حین هیدراتاسیون سیمان، در داخل ریزترک‌ها جای بگیرند و در زمان مناسب فعال شوند [23].

ب-روش غیرمستقیم (کپسوله)

در این روش، باکتری‌ها و مواد مغذی آن‌ها ابتدا در یک حامل محافظ یا کپسول قرار داده می‌شوند و سپس این کپسول به مخلوط بتن اضافه می‌گردد. این حامل از باکتری‌ها در برابر محیط به شدت قلیایی بتن با pH حدود ۱۲ تا ۱۳ را محافظت می‌کند. با ایجاد ترک در بتن و نفوذ آب، کپسول‌ها شکسته شده و باکتری‌ها آزاد می‌شوند تا فرآیند خودترمیمی را آغاز کنند [23].



شکل ۱. باکتری باسیلوس سوبتیلیس [7]

Fig. 1. Bacterial Solution (Bacillus Subtilis) [7]

اخیر، ظهور بتن خودترمیم شونده با تأثیر زیستی را به عنوان یک روش بالقوه برای کاهش انتشار ترک برجسته کرده است [8-9].

۱-۱- خودترمیمی

ترمیم خودبه خودی، شامل ایجاد ترکیبات خودترمیمی از طریق هیدراتاسیون مداوم مواد سیمانی هیدراته نشده است که توانایی محدودی در ترمیم ترک‌ها دارد. از سوی دیگر، ترمیم خودکار، از عوامل خارجی مانند پلیمرهای سوپرجاذب، عوامل بیولوژیکی، مواد پوزولانی بالا و عوامل شیمیایی برای آب‌بندی ترک‌ها استفاده می‌کند [8-10, 11].

۲-۱- خودترمیمی بتن مبتنی بر باکتری

بیشتر تحقیقات در مورد بتن خودترمیم شونده بر شناسایی انواع باکتری‌های مناسب برای کانی سازی زیستی کارآمد و بی‌حرکت کردن عوامل ترمیم‌کننده شامل باکتری‌ها و منابع کلسیم متمرکز شده است [5-12]. یکی از این فناوری‌ها، بتن رسوب کلسیت ناشی از میکروب است که معمولاً به عنوان بتن باکتریایی شناخته می‌شود. برای حمایت از رشد و فعالیت باکتری‌ها در بتن، یک محیط مغذی مناسب ضروری است. لاکتات کلسیم و سایر ترکیبات مبتنی بر کلسیم معمولاً به عنوان یک منبع مغذی برای تقویت فعالیت باکتریایی و رسوب کربنات کلسیم استفاده می‌شوند [13]. وقتی ترک‌ها در بتن باکتریایی ایجاد می‌شوند، هوا و آب وارد سازه می‌شوند و از طریق فعالیت میکروبی، هاگ‌های باکتریایی را فعال می‌کنند. این فعالیت میکروبی منجر به تشکیل CaCO_3 (کربنات کلسیم) می‌شود. کربنات کلسیم، در نتیجه منافذ را آب‌بندی و ترک‌ها را پر می‌کند. این فرآیند ویژگی‌های بتن را بهبود می‌بخشد و تا زمانی که ترک‌ها به طور کامل پر شوند، ادامه می‌یابد، پس از آن باکتری‌ها وارد مرحله خواب می‌شوند [14-17].

۳-۱- باکتری باسیلوس سوبتیلیس

انواع مختلفی از باکتری‌ها، مانند باسیلوس سوبتیلیس، باسیلوس اسفاریکوس، باسیلوس پاستوری، اسپوروسارینا پاستوری، اشریشیا کلی، باسیلوس سودو فیرموس، و باسیلوس مگاتریومدر مطالعات قبلی استفاده شده‌اند. در میان آن‌ها، باسیلوس سوبتیلیس به دلیل در دسترس بودن در بازار و اثربخشی در ترمیم ترک‌ها، توصیه شده است [18]. باسیلوس سوبتیلیس به دلیل تحمل قلیائیت، توانایی تشکیل هاگ، راندمان بالای رسوب کلسیت، مشخصات ایمنی،

تجربی‌شان، محلول باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس را مستقیماً در طول فرآیند اختلاط با استفاده از یک میکسر، به عنوان یک افزودنی، به بتن اضافه کردند. در مجموع ۴۸ نمونه مکعبی، بتن معمولی و بتن باکتریایی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر برای آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، خودترمیمی و... در سه لایه در هر قالب ریخته شد. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۵۶، ۲۸، ۱۴، ۷ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند.

Akula Visha و همکاران [30] در مطالعه تجربی‌شان سه نوع بتن برای بتن باکتریایی خودترمیم شونده با درجه‌ای (M20، M25 و M30) و ۱۰٪ باکتری باسیلوس سوبتیلیس که به صورت مستقیم به بتن اضافه شد استفاده کردند. همچنین یک مخلوط کنترلی که فقط شامل مواد معمولی (سیمان، آب و سنگ‌دانه) بود، به طور هم‌زمان برای هدف مقایسه طراحی شد. مخلوط‌های بتن در مکعب‌هایی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر قالب‌گیری شد.

۲-۲- نمونه‌های حاوی باسیلوس سوبتیلیس به روش غیرمستقیم (کپسوله)

Yuanyuan Tie و همکاران [31] در مطالعه تجربی‌شان به بررسی سه حامل شامل الیاف سیزال، الیاف پلی وینیل الکل و پرلیت منبسط شده پرداختند. در این آزمایش هر حامل سه غلظت باکتریایی مختلف داشت. محلول‌های باکتریایی با غلظت ۲، ۵/۲ و ۳ اونس برای مقایسه غلظت‌های مختلف باکتری تهیه شد. هر سه الیاف سیزال و الیاف پلی وینیل الکل و پرلیت منبسط شده به طور جداگانه با محلول باسیلوس سوبتیلیس مخلوط شدند و به مدت ۲ دقیقه به حال خود رها شدند تا الیاف سیزال و الیاف پلی وینیل الکل و پرلیت منبسط شده بتوانند هاگ‌های کافی را جذب و حمل کنند. مواد اولیه بتن مخلوط شدند. سپس، الیاف‌های حاوی هاگ را در قالب‌های ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر قرار داده و با نوار چسب بستند تا از جمع شدن الیاف جلوگیری شود. بتن تازه به داخل قالب ریخته شد. سپس، مخلوط پرلیت منبسط شده با هاگ به طور کامل با بتن مخلوط شده و برای شکل‌دهی در قالب قرار داده شد. پس از سه روز نمونه‌ها از قالب خارج شدند، به مدت ۲۸ روز در آب خیسانده شد. همچنین نمونه‌های بتنی از حامل‌های که بدون باکتری بودن و نمونه‌های از بتن معمولی برای هدف مقایسه تهیه شد.

Rama chandran و همکارانش [24] در ابتدا مفهوم بتن خودترمیم شونده با استفاده از باکتری‌ها را بررسی کردند. آن‌ها تشکیل رسوبات CaCO_3 (کربنات کلسیم) را در مکعب‌های ملات سیمان مشاهده کردند، زمانی که باسیلوس سوبتیلیس و باسیلوس پاستوری به همراه یک محیط مغذی حاوی منابع کلسیم مانند استات یا نترات کلسیم اضافه شدند. این امر منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن و آب‌بندی ترک‌ها تا عرض ۰/۴۶ میلی‌متر شد. آب‌بندی ترک در بتن خودترمیم شونده مبتنی بر باکتری، صرف نظر از اینکه بتن در معرض هوا یا آب قرار گرفته باشد، موفقیت آمیز بود. Wang و همکارانش [25] مطالعه‌ای بر روی تیرهای بتنی با استفاده از هاگ‌های باسیلوس اسپریوس و باسیلوس سوبتیلیس و لاکتات کلسیم محصور شده در ذرات رس منبسط شده انجام دادند. آن‌ها پس از خودترمیمی ترک‌ها، بهبودی ۲۷٪ تا ۷۳٪ در مقاومت بتن مشاهده کردند.

Choi و همکاران [12] در تحقیقشان تأثیر باکتری‌ها را بر مقاومت فشاری، جذب آب و نفوذپذیری سریع کلرید بتن، حاوی خاکستر بادی را بررسی کردند و دریافتند که مقاومت فشاری بتن باکتریایی در مقایسه با بتن معمولی به تدریج افزایش می‌یابد. Jun Jun Feng و همکاران [26] تحقیقاتی را برای توسعه بتن خودترمیم شونده جدید مبتنی بر باکتری با استفاده از مکانیسم رسوب کربنات کلسیم ناشی از میکروب، به کارگیری باسیلوس سوبتیلیس به عنوان عامل ترمیم‌کننده و افزودن الیاف پلی وینیل الکل برای تهیه نمونه‌های تیر بتنی خودترمیم شونده انجام داد. Hasan و همکاران [27] تأیید کرد که تثبیت باسیلوس سوبتیلیس روی الیاف سیزال می‌تواند خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشد و باعث خودترمیمی قوی در آسیب‌های مکرر شود. Elzy's و همکاران [28] سنجی استفاده از پرلیت منبسط شونده به عنوان یک حامل میکروبی را تأیید کرد. این سه محقق از حامل‌های مختلفی برای تطبیق با باکتری‌های خودترمیمی استفاده کردند. آن‌ها بتنی با قابلیت ترمیم خوب ساختند، اما در نظر نگرفتند که آیا خواص مکانیکی نمونه تحت تأثیر عملکرد ترکیبی حامل و باکتری تغییر می‌کند یا خیر.

۲- مروری بر تحقیقات

۲-۱- نمونه‌های حاوی باسیلوس سوبتیلیس به روش مستقیم

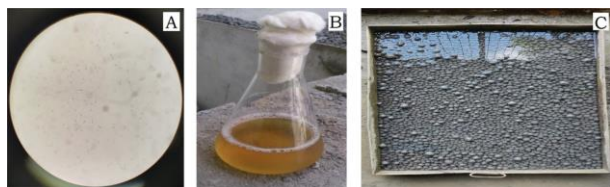
Duresa Dubale Zamba و همکاران [29] در مطالعه

برای تمام درجه‌های بتن مشاهده شد. برای مخلوط‌هایی با تعداد سلول 10^6 سلول در میلی‌لیتر، مقاومت فشاری در مقایسه با مخلوط با تعداد سلول 10^5 سلول در میلی‌لیتر، برای تمام درجه‌های بتن کمی کاهش یافته است. نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۱) ذکر شده است.



شکل ۲. دستگاه گلوله ساز [7]

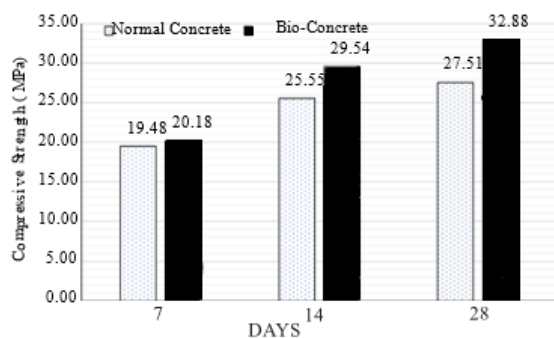
Fig. 2. Pelletizer [7]



شکل ۳. کپسوله کردن (A) - هاگ باسیلوس B- باکتری‌های کشت شده C-

سنگ‌دانه‌های FA خیس‌انده شده در محلول باکتری ([7]

Fig.3. Encapsulation (A-Bacillus spores, B-cultivated bacteria, C- FA Aggregates soaking in bacteria solution) [7]



شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز [29]

Fig.4. Compressive strength of concrete specimens at 7, 14, and 28 days [29]

در مطالعه تجربی که توسط Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] انجام شد دو مجموعه قالب مکعبی و سه مجموعه قالب استوانه‌ای برای هر مخلوط طراحی کردند. برای بتن معمولی با درجه M25، طرح اختلاط طبق استاندارد IS10262:2619 [32] انجام شد. برای بتن کپسوله حامل سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی، ابتدا سیمان و خاکستر بادی و آب را مخلوط کردند تا یک مخلوط چسباننده تهیه شود. سپس در داخل دستگاه گلوله ساز مقداری خاکستر بادی ریختند و مواد حل‌شده را به طور یکنواخت به خاکستر بادی اضافه کردند تا اینکه توپ‌های کوچکی تشکیل شود تجهیزات گلوله ساز در شکل (۲) نشان داده شده است.

در ادامه توپ‌های کوچک را الک کردند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار دادند. سپس سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی را در فرجه مدت ۷ روز در دمای 100°C درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. به کل آب مورد نیاز برای بتن، مقدار معینی باکتری باسیلوس سوبتیلیس اضافه کردند. برای انجام روش کپسوله کردن، سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی را به مدت یک ساعت در آب حاوی باکتری خیس‌انده شد شکل (۳). پس از آن سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مخلوط بتن استفاده شدند.

۲-۳- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به روش مستقیم

Duresa Dubale Zamba و همکاران [29] در مطالعه تجربی‌شان، برای ارزیابی خواص مکانیکی و دوام، در طول مرحله آزمایش، گنجانیدن باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مخلوط بتن منجر به افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی شد. نمونه‌های بتن باکتریایی حاوی باسیلوس سوبتیلیس حداکثر مقاومت فشاری $20/18$ مگاپاسکال و $29/45$ مگاپاسکال و $32/88$ مگاپاسکال را به ترتیب در ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان دادند. در مقایسه با نمونه‌های بتنی معمولی، بتن باکتریایی در ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب بهبود $3/59\%$ ، $15/61\%$ و $19/55\%$ را نشان داد. نتایج مقاومت فشاری در شکل (۴) ارائه شده است.

Akula Vishal و همکاران [30] در مطالعه تجربی‌شان دریافتند مخلوط معمولی برای بتن‌های با درجه‌های (M20، M25 و M30) مقاومتی کمتر از بتن باکتریایی با هر درجه‌ای دارد. همچنین مخلوط با تعداد سلول 10^5 سلول در میلی‌لیتر، در مقایسه با مخلوط با تعداد سلول 10^6 سلول در میلی‌لیتر، مقاومت بالاتری

PVA نشان‌دهنده یک نمونه مکعبی با الیاف پنبیل و نیل الکل و x1، x2، x3 به ترتیب محتوای ۲، ۵/۲ و ۳ اونس باکتری باسیلیوس سوبتیلیس در نمونه‌های حاوی حامل است به عنوان مثال PZX1 نشان‌دهنده نمونه با پرلیت منبسط شونده به عنوان حامل با محتوای ۲ اونس باکتری باسیلیوس سوبتیلیس است. نمونه KB، مخفف عبارت "Blank control group" است این نمونه صرفاً بتن معمولی است که هیچ‌گونه افزودنی (باکتری و حامل) ندارد.

با توجه به نمودار، مقاومت فشاری نمونه‌های با حامل‌های الیاف پلی وینیل الکل و الیاف سیزال با باکتری مقادیر بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌ها نشان داد. همچنین نمونه‌های با حامل الیاف پلی وینیل الکل با غلظت باکتری ۵/۲ به طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های با غلظت ۲ و ۳ است. نمونه‌های حاوی حامل پرلیت منبسط شده چه با باکتری اضافه شده و چه بدون آن مقاومت فشاری کمتری نسبت به دیگر نمونه‌ها حامل و همچنین نمونه بتن معمولی (KB) نشان داد.

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری که توسط Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] انجام شد نشان داد سنگ‌دانه خاکستر بادی (Fly ash aggregate) به عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌های درشت، به‌ویژه هنگامی که با باکتری‌ها ترکیب شود، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. این آزمایش برای دو گروه بتن انجام شده، گروهی بدون باکتری (M1 تا M7) و گروهی حاوی باکتری (B1 تا B4) در ادامه، نتایج گروه حاوی باکتری و بدون باکتری به ترتیب در شکل (۶) و (۷) آورده شده است.

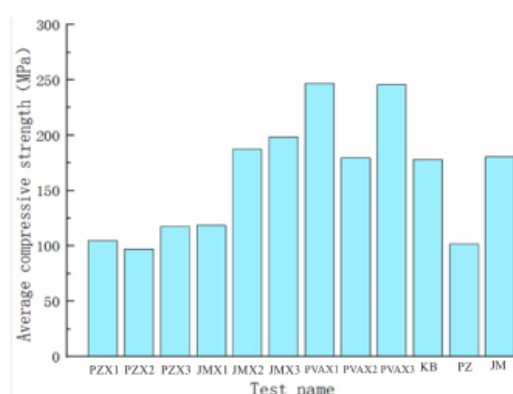
آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتن خودترمیم‌شونده نمونه‌های (B1, B2, B3, B4) در دو زمان (۲۸ و ۵۶) روز انجام شده است. نتایج نشان داد که در تمام نمونه‌های حاوی باکتری، مقاومت فشاری افزایش یافته است. نمونه (B2) با جایگزینی ۳۰٪ سنگ‌دانه خاکستر بادی، این نمونه بیشترین افزایش مقاومت را نشان داده است. به طوری که مقاومت فشاری آن از روز ۲۸ تا روز ۵۶ به میزان ۶۱/۳۷٪ افزایش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که ترکیب باکتری‌ها با این نسبت خاص از خاکستر بادی، بهترین عملکرد را در افزایش مقاومت دارد. نمونه (B3) با جایگزینی ۵۰٪ سنگ‌دانه خاکستر بادی، این نمونه نیز افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری نشان داده است که میزان آن ۵۲/۶۴٪ بوده است. نمونه (B4) با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه خاکستر بادی، افزایش مقاومت در این نمونه ۵۰/۸۳٪ بوده است.

جدول ۱. مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

 برای تعداد سلول‌های مختلف از 10^0 تا 10^8 [30]

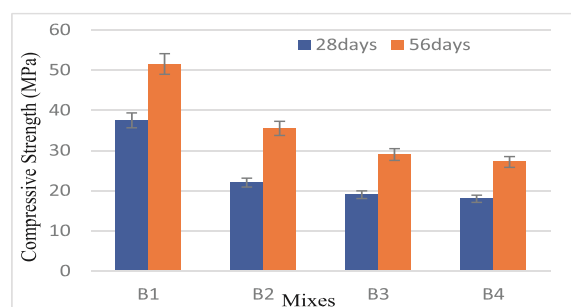
 Table 1. Compressive strengths (MPa) of different cell counts from 10^0 to 10^8 [30]

Cell count (cells/ml)	Grade		
	M20 (MPa)	M25 (MPa)	M30 (MPa)
CC- 10^0	26.46	31.12	36.61
10^1	27.29	32.78	37.45
10^2	27.78	35.61	37.90
10^3	28.10	36.66	38.78
10^4	30.07	37.42	40.60
10^5	33.41	38.9	45.02
10^6	30.11	36.29	41.93
10^7	29.25	34.16	39.70
10^8	28.01	32.89	38.84



شکل ۵. نمودار میانگین مقاومت فشاری [31]

Fig. 5. Mean compressive strength graph [31]



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری [7]

Fig. 6. Compressive strength test results [7]

۴-۲- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به روش غیرمستقیم

Yuanyuan Tie و همکاران [31] به بررسی مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های حاوی حامل‌های با باکتری و بدون باکتری پرداختند. نتایج به دست آمده در نمودار میانگین مقاومت فشاری در شکل (۵) نشان داده شده است.

در نمودار شکل (۵)، PZ نشان‌دهنده یک نمونه مکعبی با پرلیت منبسط شده و JM نشان‌دهنده یک نمونه مکعبی با الیاف سیزال و

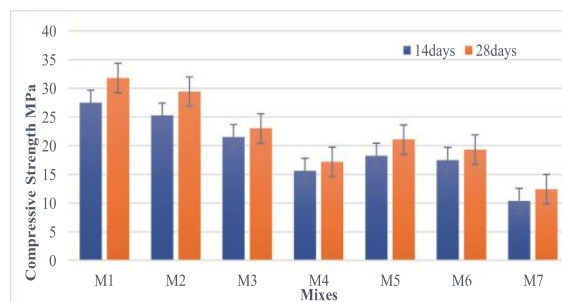
درصدی مقاومت این گرید شده است. این افزایش، مقاومت نهایی آن را به میزان قابل توجهی بالاتر از نمونه‌های دیگر (حتی نمونه‌های بهینه‌سازی شده در مقالات دیگر) قرار می‌دهد. نمونه‌ای که پایین‌ترین مقاومت فشاری را در مقالات فوق ذکر دارد، در بین نمونه‌های کنترل (بدون باکتری) قرار دارد. به صورت خاص، نمونه‌های بدون باکتری و با درصد بالای خاکستر بادی از مقاله Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] در سنین اولیه (۲۸ روز) پایین‌ترین مقاومت را دارند.

علت ضعف: نبود فعالیت باکتریایی در نمونه‌های فاقد باکتری می‌باشد. بنابراین فرآیند خودترمیمی (MICP) که ریزترک‌ها را پر کرده و مقاومت را افزایش می‌دهد، در آن‌ها وجود ندارد. همچنین خاصیت پوزولانی خاکستر بادی به زمان بیشتری (معمولاً پس از ۲۸ روز) نیاز دارد تا به صورت کامل فعال شود. بنابراین، در سنین اولیه، جایگزینی سیمان با خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

۲-۵- مشاهده خودترمیمی به روش مستقیم

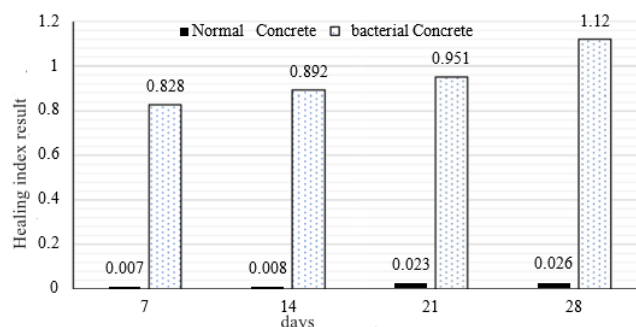
Duresa Dubale Zamba و همکاران [29] برای مشاهده خودترمیمی بر روی نمونه‌ها، پس از یک هفته عمل‌آوری نمونه‌ها، ترک‌هایی به صورت عمودی روی شش نمونه بتن معمولی و بتنی باکتریایی ایجاد شد. نمونه‌ها از پیش ترک‌خورده در فواصل زمانی مشخص ۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز پس از ترک‌خوردگی بررسی شدند، تا اثربخشی فرآیند خودترمیمی با استفاده از یک دستگاه اندازه‌گیری سطح، به‌ویژه یک میکروسکوپ نوری سه‌بعدی ارزیابی شد. شکل (۸) نتیجه شاخص ترمیم نمونه‌های بتنی از میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد.

در شکل (۸) نتایج شاخص بازده ترمیم برای ترک‌های سطحی غوطه‌ور در آب تا ۲۸ روز را با مقایسه نمونه‌های بتن کنترلی و بتنی باکتریایی ارائه می‌دهد. باکتری‌های موجود در بتن توانایی تولید آنزیم اوره‌آز را دارند. آنزیم اوره‌آز هیدرولیز اوره موجود در بتن را کاتالیز می‌کند. این تشکیل ترکیبات ترمیم‌کننده، که ناشی از تبدیل باکتریایی کلرید کلسیم به کربنات کلسیم است، نیز مشاهده شده است. نتایج نمونه‌های بتنی باکتریایی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، بالاترین شاخص ترمیم نرمال شده (۱/۱۲) را نشان می‌دهند. تصاویر میکروسکوپی سه بعدی برای پیشرفت ترک بتن حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس برای روزهای ۰، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ در شکل‌های (۹، ۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری [7]

Fig.7. Compressive strength test results [7]



شکل ۸. نتیجه شاخص نمونه‌های بتنی از میکروسکوپ نوری

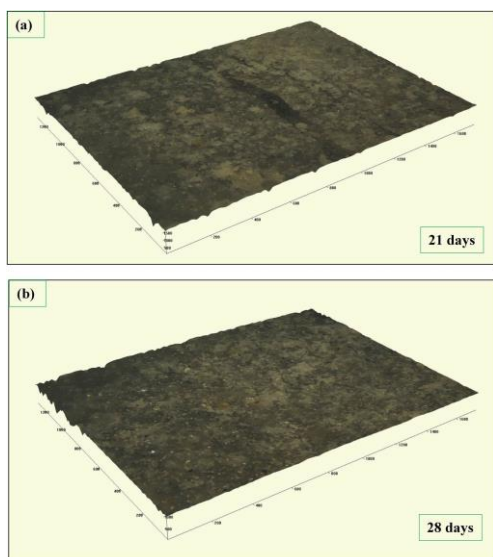
در (۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸) روز [29]

Fig.8. healing index microscope optical result of concrete specimens in (7,14,21,28) days [29]

نمونه (M1) بدون جایگزینی خاکستر بادی، این نمونه که بتن معمولی است، در سن ۲۸ روزگی بالاترین مقاومت فشاری را در بین تمام نمونه‌های این گروه (بدون باکتری) به دست آورده است. این نتیجه نشان می‌دهد که سنگ‌دانه‌های طبیعی به علت خاصیت قفل شدن سنگ‌دانه‌ها، در سنین اولیه، مقاومت بالاتری ایجاد می‌کنند. نمونه‌های حاوی خاکستر بادی دلیل ویژگی‌های (M2 تا M7) در این نمونه‌ها، با افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کاهش یافته است. این امر به دلیل خاصیت پوزولانی خاکستر بادی است که فرآیند هیدراتاسیون آن کندتر از سیمان است و در سنین اولیه تأثیر چندانی بر مقاومت ندارد.

بر اساس نتایج به دست آمده از چهارمقاله ذکر شده، نمونه‌ای که بالاترین مقاومت فشاری را دارد، بتن گرید M30 است که در مقاله Akula Vishal و همکاران [30] بررسی شده.

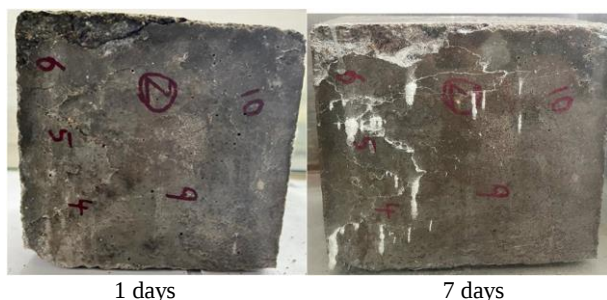
علت برتری: مقاومت پایه بالابتن M30 است که به طور ذاتی دارای بالاترین مقاومت فشاری در میان تمام گریدهای مورد بررسی (M20، M25 و C30) است. همچنین طبق مقاله Akula Vishal و همکاران [30]، افزودن باکتری باعث افزایش ۲۵ تا ۴۰



شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپی نوری سه بعدی برای پیشرفت ترمیم ترک بتن

باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس (a) ۲۱ روز و (b) ۲۸ روز [29]

Fig. 11. 3D optical microscope images for the progress of crack healing of bacterial concrete with *B. subtilis* during (a) 21 days, and (b) 28 days [29]



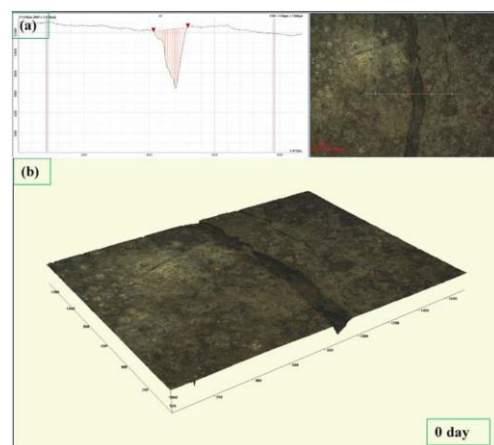
شکل ۱۲. ترمیم ترک بتن باکتریایی خودترمیم شونده برای روز اول و روز هفتم

[33]

Fig. 12. Crack healing capacity of self-healing bacterial concrete for day 1 and day 7 [33]

Akula Vishal و همکاران [30] برای مشاهده ترمیم بتن میکروبی، نمونه‌های باکتریایی با غلظت‌های مختلف باکتری مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در دستگاه آزمایش فشار قرار داده شدند. به محض ظهور ترک‌های قابل توجه، بارگذاری متوقف شد. طبق آزمایش XRF انجام شده، کلسیم حدود ۹۱ تا ۹۲٪، در رسوبات تشکیل شده روی نمونه‌ها وجود داشت که تأیید می‌کند عامل ترمیم، جزء اصلی کلسیم (Ca) است که می‌تواند CaCO_3 باشد. کلسیت اضافی تشکیل شده روی قسمت ترک‌خورده برای نمونه مکعبی در روز اول و هفتم در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

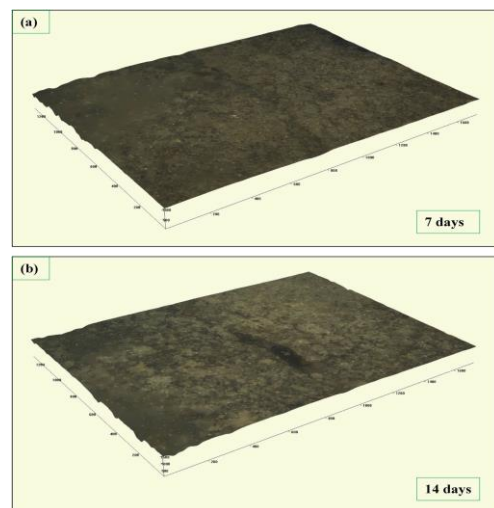
نفوذ میکروبی باسیلوس سوبتیلیس باعث رسوب کربنات کلسیم



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی نوری سه بعدی برای پیشرفت ترمیم ترک بتن

باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس (a) و (b) در صفر روز [29]

Fig. 9. 3D optical microscope images for the progress of crack healing of bacterial concrete with *B. subtilis* during (a) and (b) at 0-day [29]



شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپی نوری سه بعدی برای پیشرفت ترمیم ترک بتن

باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس (a) ۷ روز و (b) ۱۴ روز [29]

Fig. 10. 3D optical microscope images for the progress of crack healing of bacterial concrete with *B. subtilis* during (a) 7 days, and (b) 14 days [29]

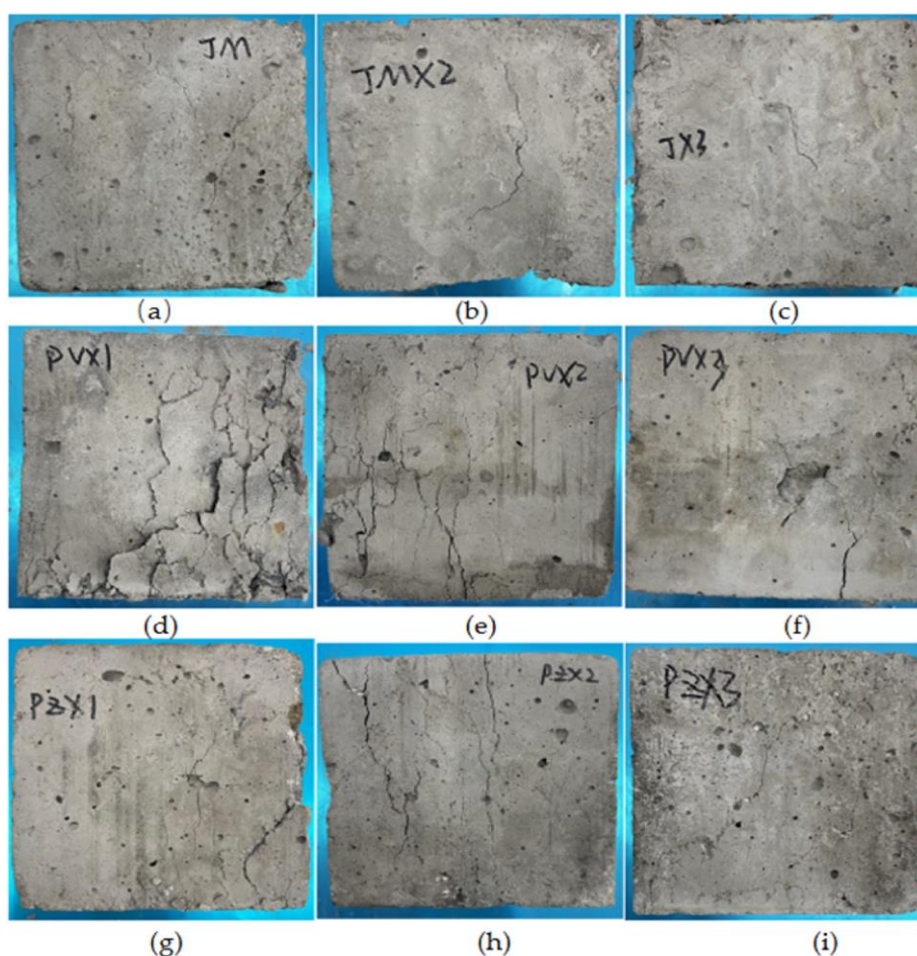
خودترمیمی قابل توجهی در این نمونه‌های ترک‌خورده مشاهده شد، به طوری که مقادیر قابل توجهی از رسوبات کریستالی سفید تولید شده و سطوح ترک را پر کردند. علاوه بر این، تعداد زیادی از محصولات ترمیمی اضافی روی سطوح ترک مشاهده شد که نشان‌دهنده پتانسیل ترمیم داخلی ترک نیز می‌باشد. وجود این کریستال‌های سفید روی سطح نمونه‌های بتن باکتریایی خودترمیمی به وضوح در شکل‌ها (۱۱، ۱۲ و ۱۳) قابل مشاهده است. تشکیل کریستال‌های سفید روی سطح بتن باکتریایی خودترمیم شونده به دلیل فرآیند رسوب کربنات کلسیم است.

برای ترمیم ترک‌ها به صورت قابل توجهی بهبود می‌بخشد اثر ترمیم در بتن با محلول باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس اضافه‌شده با غلظت ۲/۵ اونس در مقایسه با دو گروه دیگر از بتن‌های خودترمیم شونده با غلظت‌های مختلف، قابل توجه تر است. دلیل این امر این است که خواص فیزیکی نمونه‌های اضافه‌شده با مایع باکتریایی ۲/۵ اونس، بهتر از نمونه‌هایی با دو غلظت دیگر است، که نشان می‌دهد در غلظت باکتریایی ۲/۵ اونس، ترک‌های ریز داخلی و خارجی بتن ترمیم می‌شوند. نمونه‌های ترمیم‌شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

می‌شود. باکتری‌ها به صورت آنزیمی، تبدیل یون‌های کلسیم و کربنات‌ها را به کریستال‌های کربنات تسهیل می‌کنند که به ترمیم ترک‌ها و کاهش تخلخل کمک می‌کند. ترک‌های قابل مشاهده و لبه‌های ناهموار در شکل (۱۲) روز اول نشان‌دهنده آسیب روی سطح هستند، در حالی که ترک‌های صاف و پر شده در روز هفتم شکل (۱۲) نشان‌دهنده اثر بخشی خودترمیمی بتن باکتریایی هستند.

۲-۶- مشاهده خودترمیمی به روش غیر مستقیم

Yuanyuan Tie و همکاران [31] با بررسی تأثیر حامل‌ها بر ترمیم ترک‌ها دریافتند که استفاده از حامل‌ها، توانایی باکتری‌ها را



شکل ۱۳. (a) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲ اونس به همراه الیاف سبزال به عنوان حامل (b) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲/۵ اونس به عنوان حامل (c) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۳ اونس به همراه الیاف سبزال به عنوان حامل (d) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲ به همراه الیاف PVA به عنوان حامل (e) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲/۵ اونس به همراه الیاف PVA به عنوان حامل (f) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۳ اونس همراه الیاف PVA به عنوان حامل (g) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲ اونس همراه پرلیت منبسط شده به عنوان حامل (h) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۲/۵ اونس به همراه پرلیت منبسط شده به عنوان حامل (i) نمونه مکعب بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت ۳ اونس همراه پرلیت منبسط شده به عنوان حامل [31]

Fig. 13. Comparison of crushing conditions (a) 2od Bacillus subtilis concrete cube specimen with sisal fiber as the carrier (b) 2.5 od Bacillus subtilis concrete cube specimen with sisal fiber as the carrier (c) 3od Bacillus subtilis concrete cube specimen with sisal fiber as the carrier (d) 2od Bacillus subtilis concrete cube specimen with PVA fiber as the carrier (e) 2.5od Bacillus subtilis concrete cube specimen with PVA fiber as the carrier (f) 3od Bacillus subtilis concrete cube specimen with PVA fiber as the carrier (g) 2od Bacillus subtilis concrete cube specimen with expanded perlite as the carrier (h) 2.5od Bacillus subtilis concrete cube specimen with expanded perlite as the carrier (i) 3od Bacillus subtilis concrete [31]

مشاهده شد. مخلوط B2 با ۳۰٪ سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی، عملکرد ترمیم بالایی را در مقایسه با سایر مخلوط‌ها نشان داد.

با مقایسه خودترمیمی روش‌های مستقیم و غیر مستقیم مقالات ذکر شده، مقاله Akula Vishal همکاران [30] نه تنها به ترمیم ترک‌ها اشاره می‌کند، بلکه این فرآیند را با تحلیل XRF تأیید کرده و میزان کلسیم موجود در رسوبات را به صورت کمی (بیش از ۹۱٪) مشخص کرده است که بهترین عملکرد خودترمیمی را از خود نشان می‌دهد.

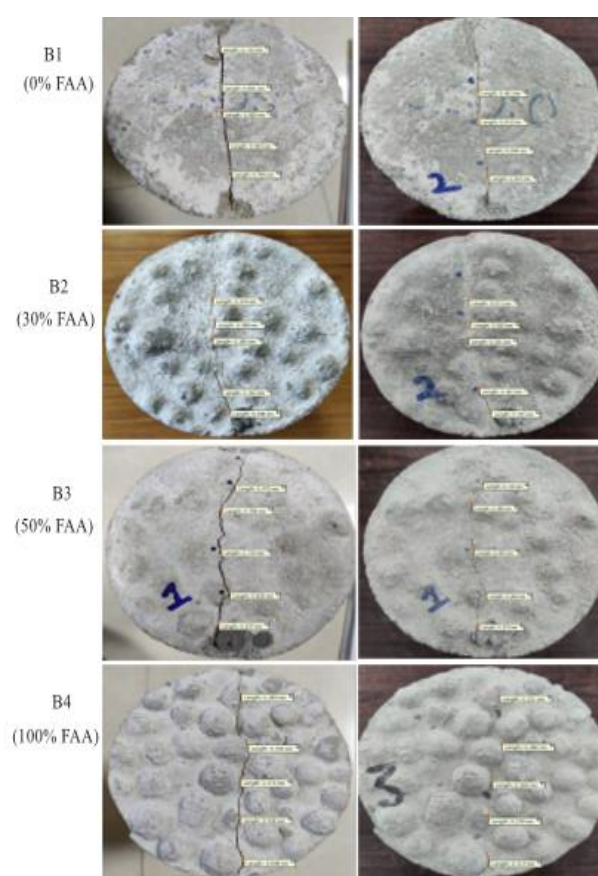
از بین نمونه‌های مورد بررسی در مقالات بالا، نمونه‌های بدون باکتری و حاوی درصد بالای خاکستر بادی از مقاله، Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] پایین‌ترین توانایی خودترمیمی را دارند.

دلیل ضعف: این نمونه‌ها فاقد عامل اصلی خودترمیمی، یعنی باکتری‌ها، هستند. بنابراین، فرآیند MICP که مسئول ترمیم فعال ترک‌هاست، در آن‌ها وجود ندارد. هرگونه ترمیم مشاهده شده در این نمونه‌ها صرفاً به دلیل پدیده خودترمیمی طبیعی بتن (هیدراتاسیون مجدد سیمان) است که کارایی و اثربخشی بسیار محدودی دارد و با ترمیم فعال زیستی قابل مقایسه نیست.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده بر اساس آزمایش انجام شده توسط محققان Duresa Dubale Zamba و همکاران [29] بر روی نمونه‌های بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مقایسه با بتن کنترلی، بتن باکتریایی حداکثر مقاومت فشاری ۲۰/۱۸ مگاپاسکال (۳٪/۵۹٪ افزایش) و ۲۹/۵۴ مگاپاسکال (۱۵/۶۱٪ افزایش) و ۳۲/۸۸ مگاپاسکال (۱۹٪/۵۵٪ افزایش) به ترتیب پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز داشت. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، شاخص خودترمیمی نشان داد که بتن باکتریایی در مقایسه با بتن کنترلی، شاخص خودترمیمی نرمال شده بالاتری معادل ۱/۱۲ دارد.

نتایج مقاومت فشاری به دست آمده توسط Akula Vishal همکاران [30] بر روی بتن باکتریایی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس در مقایسه با بتن معمولی در تمام درجات بتن، مقاومت فشاری بالاتری را از خود نشان داد. همچنین مقاومت فشاری بتن حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس با غلظت باکتری ۱۰^۸ سلول در میلی‌لیتر با درجه بتن M30 در روز ۲۸ کمی بیشتر از نمونه‌های



شکل ۱۴. مشاهده بهبود ترک در ۵۶ روز با استفاده از دیجی مایزر [7]
FAA: سنگ‌دانه خاکستر بادی (B1, B2, B3 و B4).

نمونه‌های باکتری باسیلوس سوبتیلیس

Fig.14. Observation of crack healing in 56 days using Digimizer-[7]

در آزمایش تجربی Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] مشاهده ترک به دو روش انجام شد. یکی با استفاده از میکروسکوپ دستی (Elcometer) و دیگری با نرم‌افزار دیجی مایزر (Digimizer). بهبود ترک‌های نمونه‌های بتنی حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس همراه با سنگ‌دانه‌های خاکستر بادی به‌عنوان حامل در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

در این مشاهده، مشخص شد که ترک‌های مخلوط B1 حداکثر ۰/۸۴۳ میلی‌متر بهبود یافته‌اند. که ۶۲/۱۴۳٪ از عرض واقعی ترک و میانگین بهبود ۲۹/۷۴۲٪ از عرض ترک است. مخلوط‌های B2 و B3 میانگین بهبود خوبی به ترتیب معادل ۵۱/۲۱۴٪ و ۵۰/۲۶۷٪ نشان دادند، اما وقتی به سراغ بهبود رفتیم، مخلوط B2 حداکثر بهبود ۲۷۳/۰ میلی‌متر (برای عرض اولیه ۳۴۴/۰ میلی‌متر) و مخلوط B3 حداکثر بهبود ۵۶۹/۰ میلی‌متر (برای عرض اولیه ۸۲۹/۰ میلی‌متر) را نشان داد. همچنین در مخلوط B4 حداکثر بهبود ۳۲۱/۰ میلی‌متر

بتن حاوی ۳۰٪ سنگدانه خاکستر بادی نتایج خوبی را نشان داد. در این آزمایش مخلوط B2 با ۳۰٪ سنگدانه‌های خاکستر بادی، عملکرد ترمیم بالایی را در مقایسه با سایر مخلوط‌ها نشان داد.

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می‌گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش‌ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

دیگر بود. در این مطالعه مشاهده رسوب روی سطح نمونه‌های بتن باکتریایی ترک‌خورده و پر شدن ترک‌های صاف اثربخشی ترمیم ترک را نشان داد.

نتایج مقاومت فشاری به دست آمده از Yuanyuan Tie و همکاران [31]، بر روی نمونه‌های بتنی حاوی باکتری باسیلیوس سوبتیلیس با حامل‌های الیاف پنبیل و نیل الکل، الیاف سیزال و پرلیت منبسط شده و نمونه‌های بتنی حاوی الیاف پنبیل و نیل الکل، الیاف سیزال که فاقد باکتری باسیلوس بودن و بتن معمولی بتن خودترمیم شونده باسیلوس سوبتیلیس با الیاف پلی و نیل الکل (PVA) اضافه‌شده، نسبت به دو حامل با باکتری و بدون باکتری و بتن معمولی، قوی‌تر است. دلیل آن این است که الیاف پلی و نیل الکل (PVA) در مقایسه با ماده پرلیت منبسط شده، نقش اتصال‌دهنده در بتن را دارد. اثر ترمیم در بتن با محلول باکتریایی باسیلوس سوبتیلیس اضافه‌شده با غلظت ۲/۵ اونس با حامل در مقایسه با دو گروه دیگر از بتن‌های خودترمیم شونده بیشتر است.

در آزمایش تجربی Rama Mohan Rao Pannem و همکاران [7] برای هر دو بتن معمولی و بتن خودترمیم شونده حاوی باکتری باسیلوس سوبتیلیس، ۱۰۰٪ سنگدانه طبیعی حداکثر مقاومت را فراهم می‌کند و در صورت بازیابی مقاومت پس از ترمیم، مخلوط

References

- [1] Abdulkareem, M., Ayeronfe, F., Abd Majid, M.Z., Sam, A.R.M. and Kim, J.H.J., 2019. Evaluation of effects of multi-varied atmospheric curing conditions on compressive strength of bacterial (*Bacillus subtilis*) cement mortar. *Construction and Building Materials*, 218, pp.1–7. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.119.
- [2] Hussein, Z.M., Abedali, A.H. and Ahmead, A.S., 2019. Improvement properties of self-healing concrete by using bacteria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 584(1), p.012034. doi: 10.1088/1757-899X/584/1/012034.
- [3] Bogas, J.A., Ahmed, H.H. and Diniz, T., 2021. Influence of cracking on the durability of reinforced concrete with carbon nanotubes. *Applied Sciences*, 11(4), pp.1–17. doi: 10.3390/app11041672.
- [4] Angst, U.M., 2019. Durable concrete structures: cracks & corrosion and corrosion & cracks. In: Pijaudier-Cabot, G., Grassl, P. and La Borderie, C. (eds.), *10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FramCoS-X)*, pp.233307. doi: 10.21012/FC10.233307.
- [5] Feng, J., Chen, B., Sun, W. and Wang, Y., 2021. Microbial-induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, p.122460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122460.
- [6] Zhao, G., Shi, M., Fan, H., Cui, J. and Xie, F., 2020. The influence of multiple combined chemical attack on cast-in-situ concrete: deformation, mechanical development and mechanisms. *Construction and Building Materials*, 251, p.118988. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118988.
- [7] Pannem, R.M.R., Bashaveni, B. and Kalaiselvan, S., 2024. The effect of fly ash aggregates on the self-healing capacity of bacterial concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), p.102261. doi: 10.1016/j.asej.2023.102261.
- [8] Algaifi, H.A., Bakar, S.A., Sam, A.R.M., Ismail, M., Abidin, A.R.Z., Shahir, S. and Altowayti, W.A.H., 2020. Insight into the role of microbial calcium carbonate and the factors involved in self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 254, p.119258. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119258.
- [9] Aspiotis, K., Sotiriadis, K., Ntaska, A., Mácová, P., Badogiannis, E. and Tsivilis, S., 2021. Durability

- assessment of self-healing in ordinary Portland cement concrete containing chemical additives. *Construction and Building Materials*, 305, p.124754. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124754.
- [10] Bhaskar, S., Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Wolfaardt, G. and Kroukamp, M.O., 2017. Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 82, pp.23–33. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.05.013.
- [11] Gupta, S., Pang, S.D. and Kua, H.W., 2017. Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents: a review. *Construction and Building Materials*, 146, pp.419–428. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111.
- [12] Choi, S.-G., Wang, K., Wen, Z. and Chu, J., 2017. Mortar crack repair using microbial-induced calcite precipitation method. *Cement and Concrete Composites*, 83, pp.209–221. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.013.
- [13] Muthukumar, P., et al., 2020. Effect of nutrient medium on the healing efficiency of bacterial concrete. *Journal of Applied Microbiology*, 128(2), pp.462–473. doi: 10.1111/jam.14578.
- [14] Feng, J., Chen, B., Sun, W. and Wang, Y., 2021. Microbial-induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, p.122460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122460.
- [15] Mondal, S. and Ghosh, A.D., 2021. Spore-forming *Bacillus subtilis* vis-à-vis non-spore-forming *Deinococcus radiodurans*, a novel bacterium for self-healing of concrete structures: a comparative study. *Construction and Building Materials*, 266, Part B, p.121122. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121122.
- [16] Qian, C., Zheng, T., Zhang, X. and Su, Y., 2021. Application of microbial self-healing concrete: case study. *Construction and Building Materials*, 290, p.123226. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123226.
- [17] Song, Y., Chetty, K., Garbe, U., Wei, J., Bu, H., O'Moore, L., Li, X., Yuan, Z., McCarthy, T. and Jiang, G., 2021. A novel granular sludge-based and highly corrosion-resistant bio-concrete in sewers. *Science of the Total Environment*, 791, p.148270. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148270.
- [18] Abdellatif, M., Alanazi, H., Radwan, M.K.H. and Tahwia, A.M., 2022. Multiscale characterization at early ages of ultra-high performance geopolymer concrete. *Polymers*, 14(24), p.5504. doi: 10.3390/polym14245504.
- [19] Jonkers, H.M., 2007. Self-healing concrete: a biological approach. In: van der Zwaag, S. (ed.), *Self-Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, pp.195–204. Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-6250-6_9.
- [20] Mondal, S. and Ghosh, A.D., 2021. Spore-forming *Bacillus subtilis* vis-à-vis non-spore-forming *Deinococcus radiodurans*, a novel bacterium for self-healing of concrete structures: a comparative study. *Construction and Building Materials*, 266, Part B, p.121122. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121122.
- [21] Akindahunsi, A.A., Adeyemo, S.M. and Adeoye, A., 2021. The use of bacteria (*Bacillus subtilis*) in improving the mechanical properties of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1), pp.1–8. doi: 10.1007/s41024-021-00112-7.
- [22] Nguyen, T.H., Ghorbel, E., Fares, H. and Cousture, A., 2019. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. *Cement and Concrete Composites*, 104, p.103340. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103340.
- [23] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., 2014. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education.
- [24] Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V. and Bang, S.S., 2001. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*, 98(1), pp.3–9. doi: 10.14359/10154.
- [25] Wang, J., Van Tittelboom, K., De Belie, N. and Verstraete, W., 2012. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 26(1), pp.532–540. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054.
- [26] Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V. and Bang, S.S., 2001. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*, 98(1), pp.3–9. doi: 10.14359/10154.
- [27] Feng, J., Chen, B., Sun, W. and Wang, Y., 2021. Microbial-induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, p.122460. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122460.
- [28] Amjad, H., Arsalan Khushnood, R. and Ali Memon, S., 2023. Biomimetic robust self-healing of *Bacillus subtilis* immobilized through sisal fiber for next-generation concrete infrastructure. *Construction and Building Materials*, 368, p.130299. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130299.
- [29] Zamba, D.D. and Mohammed, T.A., 2024. Self-healing performance of normal strength concrete with *Bacillus subtilis* bacteria. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(1), p.4. doi: 10.1007/s41024-023-00356-5.
- [30] Akula, V., Chepuri, A. and Chandana, N., 2025. Assessment of bacteria-based self-healing concrete through experimental investigations—a sustainable approach. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1), pp.1–16. doi: 10.1186/s40712-

025-00215-w.

- [31] Tie, Y., et al., 2024. Investigation on the mechanical properties of *Bacillus subtilis* self-healing concrete. *Heliyon*, 10(14), p.e34131. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e34131.
- [32] Bureau of Indian Standards, 1992. *Non-destructive testing of concrete—Methods of test, Part 1: Ultrasonic pulse velocity*. IS 13311 (Part 1):1992. New Delhi: Bureau of Indian Standards.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Momeni, K., Samary Masouleh, T. and Gholamrezaei Sarvelat, S., 2026. Investigation on Self-Healing Concrete Using *Bacillus Subtilis* Bacteria. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.97-109.



Content

Article Title and Authors Names	Page
Haze Storms in Iran: Analyzing Challenges and Providing Management Solutions..... <i>Alireza Aslemand , Faezeh Borhani</i>	7
Blocks on the tunnel structure and their effect on flow energy dissipation in a type B rectangular piano key weir (PKW)..... <i>Wadi Mohammed Wadi, Ali Khoshfetrat, Musa Habib Jasim, Niloofar Salemi</i>	21
Evaluation of the Performance of the Inverse Vibration Algorithm in Damage Detection of a 2D Shear Model in a Damped Offshore Platform <i>Roohollah Najafi, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin, Alireza Mojtahedi</i>	35
Investigation of Finite Element Model Updating Process Using POD Mode Shapes and Modal Flexibility Criterion <i>Salman Rahimian, Mousa Mahmoudi Sahebi, Mojtaba Kerimaei Tabarestani, Ali Nabizadeh</i>	47
Performance of low-cement self-compacting concrete using stone sludge as sand replacement .. <i>Ali Mohammadsalehi, Davood Mostofinejad</i>	63
Life Cycle Analysis of the Synthesis and Photocatalytic Application of Non-Metallic Semiconductor Nanosheets for Rhodamine B Removal with an Environmental Sustainability Approach..... <i>Afsaneh Shahbazi</i>	81
Investigation on Self-Healing Concrete Using Bacillus Subtilis Bacteria <i>Komeil Momeni, Tahereh Samary Masouleh, Sajad Gholamrezaei Sarvelat</i>	97

Guide for authors

Authors are requested to follow the instructions below in the submitted manuscripts.

- 1- It must be noticed that Modares civil journal is officially a Persian journal and manuscripts must be provided in Farsi.
- 2- Manuscripts to be submitted in Modares civil journal include the research papers expressing the authors investigations in civil engineering branches (Structural Engineering, Earthquake Engineering, Hydraulic Structures, Water resource and coastal engineering, Geotechnical Engineering Road construction Transportation Management, water and environmental engineering). The journal is indexed in scientific database of ISC and SID.
- 3- Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint) or is not under review by another journal. Authors are responsible for the points which are mentioned through the text and the journal has the official right for accepting or rejecting the manuscripts.
- 4- Manuscripts to be published in this journal are of two types:
 - a. Original research papers: preferably no more than 12 pages of journal format including tables and illustrations with minimum and maximum of 2500 and 3500 words, respectively.
 - b. Short communications: no more than 10 pages of journal format including tables and illustrations with maximum of 2500 words.

Note 1: Review papers are accepted if written by experienced authors having special publications on the reviewed topics.

Note 2: Translated papers are not considered in review process.

- 5- Ensure that the following items are provided in your manuscript:
 - a. Title, Abstract, Keywords (4 words), all in Farsi Authors Names. They must be introduced by their full name and their affiliation. One author has been designated as the corresponding author with contact details: E mail address, Full postal address, Telephone and Fax number.
 - b. Body of the manuscript including introduction, description of the applied or proposed research approach, analysis and discussion, conclusion, acknowledgment and references.
 - c. Title, Keywords (4 words), Author names and addresses all in English. English Extended Abstract (maximum of one page and 500 words).
- 6- Please check the following notes in the body of your manuscript:
 - a. Fundamental expressions and terms must be represented by best phrases in Farsi. Abbreviations are to be referenced in footnotes.
 - b. Figures, graphs and tables must be represented by their referred order. Figures are to be sent individually with the resolution of 300 dpi in black and white format. Title of the figures and tables must be presented in both Farsi and English, at the lines up and bottom of the objects, respectively.
 - c. Using grid and border lines are not accepted for tables and graphs.
- 7- Under the "Reference" section, referred publications must be sorted by their appearance through the text. The way in which the references are introduced is as below:
 - a. Books: Last name, First name of the author(s), Title, Translator's name, Publication country (city), Publication company, Year of publication, Number of pages.
 - b. Papers: Last name, First name of the author(s), Title, Journal Name, Series (Volume), Year of publication, page numbers.

- 8- Journal format contains single line, double column (with 1 cm space between) manuscripts written by Narrow B Lotus font (12pt) for Persian contents and Times New Roman (10pt) for English contents in Microsoft Word 2010 and A4 Paper with 1.5cm margins from left and right.
- 9- Papers extracted from the PhD or MSc dissertations, are published with the names of student, supervisor and advisors. In this case, the supervisor is introduced as corresponding author.
- 10- To submit the paper, an author have to:
 - a. Register in journal's web page.
 - b. Follow the step by step procedure of uploading the required information.
 - c. Upload the manuscript and related files.
 - d. Obtain the submission code and save it for further use.

Editorial office of Journal:

Faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Jalal e al e Ahmad highway,
Tehran.

Post box: 14115-143

Phone and Fax: +98 21 82884950

Website: <http://civil.journals.modares.ac.ir>

Email: civiljournal@modares.ac.ir

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

Scientific Research Quarterly

Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)

Founder and Publisher: Tarbiat Modares University
Executive Manager: Farhad Daneshjoo (Prof. of Civil Eng., Tarbiat Modares University)
Editor-in-Chief: Masoud Ghodsian (Prof. of Civil Eng., Tarbiat Modares University)
Assistant Director: Zahra khoiniha

Editorial Board:

Dr. Abas	Afshar	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Ali Akbar	Aghakochak	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Mohammad Taghi	Ahmadi	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Hamid	Behbahani	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Farhad	Daneshjoo	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Hossein	Ganjidoust	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. GholamReza	Ghodrati Amiri	Prof. of Civil Eng. Iran University of Science and Technology
Dr. Masoud	Ghodsian	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Aboalfazl	Hassani	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Shahrokh	Malek	Assist.Prof. of Civil Eng. University of Tehran
Dr. Shervin	Maleki	Prof. of Civil Eng. Sharif University of technology
Dr. Seyed Ahmad	MirBagheri	Assoc.Prof. of Civil Eng. K.N.Toosi University of Science and Tech.
Dr. MajdAldin	Hosseini	Assoc.Prof. of Civil Eng. Amirkabir University of Technology
Dr. Mahmood	Safarzadeh	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Ali Akbar	Salehi	Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University
Dr. Masoud	Tajrishi	Assoc.Prof. of Civil Eng. Sharif University of technology
Dr. Shahaboddin	Yasrobi	Assoc.Prof. of Civil Eng. Tarbiat Modares University

Editorial Arbitrators Board:

A.A.	Aghakouchek , Tarbiat Modares University	A.	Fakhimi , Tarbiat Modares University
M.	Ahmadi , Tarbiat Modares University	A.R.	Ghari , Quran University of Isfahan
A.	Pak , Sharif University	Gh.R.	Ghodrati Amiri , Elm O San'at University
N.	Khaji , Tarbiat Modares University	A.H.	Ghazviniyan , Tarbiat Modares University
S.	Dordaei , Tarbiat Modares University	A.	Ghanbari , Kharazmi Univesity
S.M.	Zahraei , Tehran University	A.	Kadousi , Tarbiat Modares University
Sh.	Shahbeik , Tarbiat Modares University	Sh.P.	Kahouni , Amir Kabir University
H.	Shakib , Tarbiat Modares University	M.	Kokabi , Tarbiat Modares University
M.R.	Ameri , University of Shiraz	Sh.	Maleki , Sharif University
A.	Arabzadeh , Tarbiat Modares University	J.	Vaseghi Amiri , Babol Noshirvani University
B.	Asgariyan , Khajeh Nasir Toosi University	M.A.	Hadiyanfard , Shiraz University of Technology
M.N.	Ouliyaei , Tarbiat Modares University	Sh.D.	Yasrebi , Tarbiat Modares University

Technical Editor: Zahra Azizi
English Editor: Fateme Torabi

Executive Expert: Zahra khoiniha
Type and Layout: Masoud Sarvari

Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

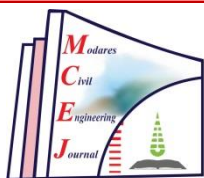
Post Box: 14117-13116.

Tel & Fax: +98 (21) 82884950

Email: civiljournal@modares.ac.ir

This Journal is indexed in the ISC and Scientific Information Database.

www.ISC.ir & www.SID.ir



Modares Civil Engineering Journal



Scientific Journal

Volume 26, Issue 5, 2026 (Serial: 91)

Executive Manager: Farhad Daneshjoo

Owner and Publisher: Tarbiat Modares University

- **Haze Storms in Iran: Analyzing Challenges and Providing Management Solutions**
Alireza Aslemand, Faezeh Borhani
- **Blocks on the tunnel structure and their effect on flow energy dissipation in a type B rectangular piano key weir (PKW)**
Wadi Mohammed Wadi, Ali Khoshfetrat, Musa Habib Jasim, Niloofar Salemi
- **Evaluation of the Performance of the Inverse Vibration Algorithm in Damage Detection of a 2D Shear Model in a Damped Offshore Platform**
Roohollah Najafi, Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin, Alireza Mojtahedi
- **Investigation of Finite Element Model Updating Process Using POD Mode Shapes and Modal Flexibility Criterion**
Salman Rahimian, Mousa Mahmoudi Sahebi, Mojtaba Kerimaei Tabarestani, Ali Nabizadeh
- **Performance of low-cement self-compacting concrete using stone sludge as sand replacement**
Ali Mohammadalehi, Davood Mostofinejad
- **Life Cycle Analysis of the Synthesis and Photocatalytic Application of Non-Metallic Semiconductor Nanosheets for Rhodamine B Removal with an Environmental Sustainability Approach**
Afsaneh Shahbazi
- **Investigation on Self-Healing Concrete Using Bacillus Subtilis Bacteria** 97
Komeil Momeni, Tahereh Samary Masouleh, Sajad Gholamrezaei Sarvelat

Journal Address: Tarbiat Modares University, Shahid Chamran and Jalal-e-Alahmad highways intersection, Tehran, Iran. PO Box 14117-13116.