



نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۵۴

- ۱ تحلیل نظریه تراژدی منابع مشترک مبتنی بر مفهوم ظرفیت برد منابع آب
آتیة فاتحی فر - محمدرضا گودرزی - علی طالبی
- ۲۳ شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم مدت زمان پروژه‌های عمرانی
یعقوب علیپوری - زهرا تاج‌آبادی
- ۵۲ تأثیر کارگذاری دریچه دوار نیم‌دایره‌ای در کانال‌های مستطیلی بر هیدرولیک جریان
مهرداد خیرایی - حجت الله یونسی - بابک شاهی نژاد
حسن ترابی پوده - آوا مرعشی
- ۷۳ ارزیابی آزمایشگاهی ذخیره‌سازی انرژی و خواص رئولوژیکی قیر حاوی کامپوزیت ماده تغییرفازدهنده CO/PANI (PCM)
سید حمید کمالی نسب - سید علی حسینی
- ۹۱ ارزیابی مجدد تئوری رانکین در طراحی سازه‌های نگهبان خرابایی: یک مطالعه عددی بر توزیع فشار جانبی
امیررضا قدرتی - محمد حاذقیان
- ۱۱۷ جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و افزودن نانونقره بر عملکرد ماستیک‌های آسفالتی
وحید باقری مفرد - سید محمود جزایری مقدس - امین توحیدی
حسن دیواندری - مهدی مهدوی عادل

سر دبیر: محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه:

دکتر محمدرضا اصفهانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر کاظم بدو	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده مهندسی
دکتر جعفر بلوری بزاز	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر احمد پویا	استاد، Ecole des Ponts Paris tech
دکتر سید محمود حسینی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر ناصر حافظی مقدس	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه
دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر شهناز دانش	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه عمران
دکتر غلامرضا رخشنده رو	استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده راه و ساختمان
دکتر محمدحسین سبط	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر فرزاد شهبابیان مقدم	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر امیر کاووسی	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکترحسین گنجی دوست	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر محمود فغفور مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون مقدس نژاد	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر ابوالفضل محمدزاده مقدم	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر محمدرضا کیانوش	استاد، University of Ryerson

مسئول دفتر نشریه: تکتّم هوشمند

ویراستار ادبی: الهام دهقان

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی باغبان- تکتّم هوشمند

<http://www.srlst.com>

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز (ISC) نمایه می‌شود.

نشانی: مشهد- دفتر نشریه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی: ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

وب سایت: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir> پست الکترونیکی: civil-ferdowsi@um.ac.ir شماره تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۲۴

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

۱	تحلیل نظریه تراژدی منابع مشترک مبتنی بر مفهوم ظرفیت برد منابع آب آتیه فاتحی فر - محمدرضا گودرزی - علی طالبی
۲۳	شبیه سازی مبتنی بر پویایی سیستم مدت زمان پروژه های عمرانی یعقوب علیپوری - زهرا تاج آبادی
۵۲	تأثیر کارگذاری دریاچه دوار نیم دایره ای در کانال های مستطیلی بر هیدرولیک جریان مهرداد خیرایی - حجت الله یونسی - بابک شاهی نژاد - حسن ترابی پوده - آوا مرعشی
۷۳	ارزیابی آزمایشگاهی ذخیره سازی انرژی و خواص رئولوژیکی قیر حاوی کامپوزیت ماده تغییر فاز دهنده CO/PANI (PCM) سید حمید کمالی نسب - سید علی حسینی
۹۱	ارزیابی مجدد تئوری رانکین در طراحی سازه های نگهبان خرابایی: یک مطالعه عددی بر توزیع فشار جانبی امیررضا قدرتی - محمد حاذقیان
۱۱۷	جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی ریخته گری و افزودن نانونقره بر عملکرد ماستیک های آسفالتی وحید باقری مفرد - سید محمود جزایری مقدس - امین توحیدی - حسن دیواندری - مهدی مهدوی عادل



Analysis of Tragedy of the Commons Theory Based on the Concept of Water Resources Carrying Capacity*

Research Article

Atiyeh Fatehifar¹, Mohammad Reza Goodarzi² , Ali Talebi³

DOI: [10.22067/jfcei.2026.96795.1390](https://doi.org/10.22067/jfcei.2026.96795.1390)

1. Introduction

A fundamental challenge of water management in river basins is that societies, in pursuing economic development and rapid growth, often neglect environmental capacity and ecological limits. Persisting in this pattern, as Hardin's "tragedy of the commons" suggests, leads to growing competition among users and gradual degradation of unowned, overused resources. The Zayandeh Rud basin, as a common-pool resource, has seen intensified competition among stakeholders, rising demand, diversified uses, and the emergence of formal and informal water reallocation patterns over the past two decades—a trend with significant socio-ecological consequences. Therefore, it is essential to examine "competition," "silent reallocation," and the potential for a "tragedy of the

commons" within a framework that integrates social and ecological dimensions.

2. Methodology

The modeling steps are summarized below (and illustrated in the flowchart):

1. This study employs a combined theoretical–quantitative approach to examine historical changes in the flow regime and the weakening of the Zayandeh-Rud River in past and recent periods.
2. Using the WEAP model (2006–2021), we then simulate the dynamics of competition, resource pressure, and conflict formation due to water scarcity.
3. Finally, the socio-ecological status of the basin is evaluated using the Water Resource Carrying Capacity Index (WRCC) across three time periods.

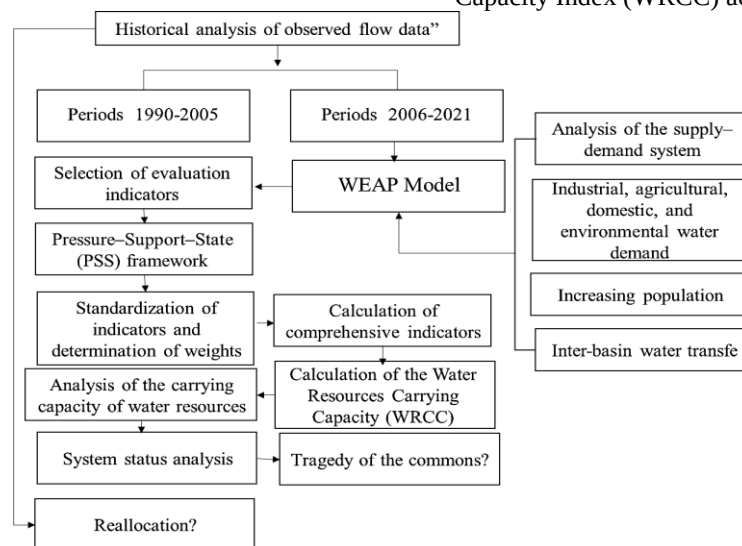


Figure 1: Flowchart of the overall research methodology

* Manuscript received December 01, 2025, Revised February 07, 2026, Accepted March 16, 2026.

¹ Ph.D student, Department of Civil Engineering, Water Resources Management Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

² Corresponding author. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: goodarzimr@yazd.ac.ir

³ Professor, Department of Watershed Management, School of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.

3. Results

The first part of the review presented the status of water reallocation (Table 1). The overall comparison between long-term and recent periods indicates that approximately 400 MCM have been withdrawn from downstream areas and transferred upstream of the Polekaleh station. Following calibration and based on the WEAP model results, Water Resources Carrying Capacity indices were calculated. Figure 2 reveals a gradual deterioration in the balance between pressure and support across three time periods, shifting from a "carrying" to a "overload" state. Concurrently, the comprehensive carrying capacity index has remained in the "poor" range in most years after an initial short period of favorable conditions. These results indicate that in recent years, particularly with increased withdrawals and growing demand, the basin has exceeded its natural and social capacity, demonstrating the occurrence of a tragedy of the commons.

4. Conclusions

This study employed a combined theoretical–quantitative approach, utilizing the WEAP model and the Water Resources Carrying Capacity Index (WRCC or WECCI), to examine the Zayandeh-Rud basin through the lens of the tragedy of the commons. The results revealed that human pressure and diminished natural support have shifted the system from a stable to an overloaded state, with the ecological index remaining in the poor range for most years. The phenomena of silent reallocation and hidden extraction have created a cycle of individually rational actions leading to catastrophic collective outcomes, which aligns with Hardin's theory. Nevertheless, governance structures and development policies have played a major role in intensifying competition and the water crisis.

Table 1: Comparison of average water consumption of Zayandeh-rud upstream and downstream of Polekaleh and review of reallocation (MCM)

Period/ Station	Average (2006-2021)	Average (1990-2005)	Long-term average (1970-2005)	Recent changes compared to the past	Recent changes relative to the long-term
Consumption from the regulating dam S. to PoleKalleh S.	474.2	195.3	65	+279	+409.2
Consumption from the PoleKalleh S. to Varzaneh S.	671.7	1137.1	1104.1	-465.4	-432.4
Sum	1145.9	1332.4	1169.1	-	-

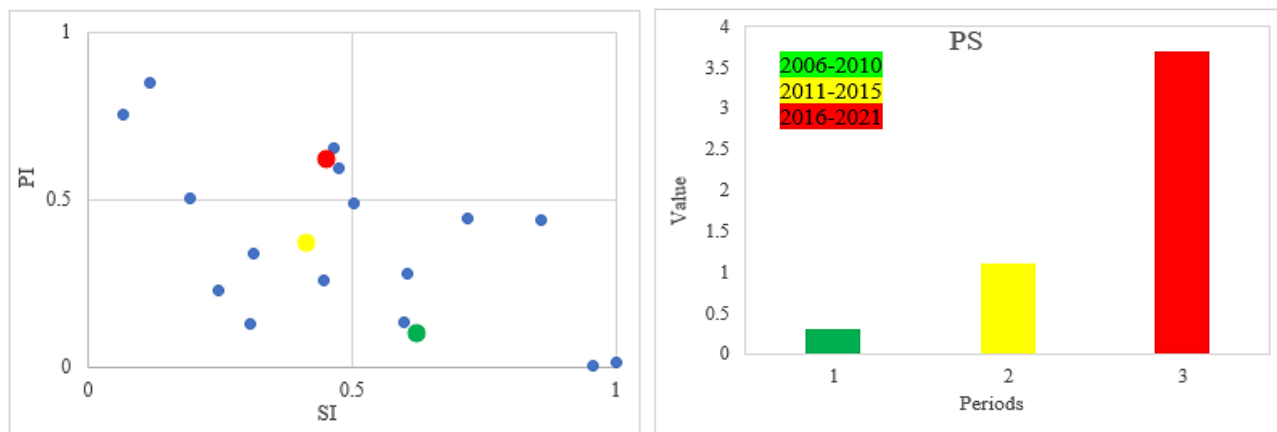


Figure. 2: Annual and period-averaged pressure-support index values and their classification grade change.



تحلیل نظریه تراژدی منابع مشترک مبتنی بر مفهوم ظرفیت برد منابع آب*

مقاله پژوهشی

آتیه فاتحی^(۱) محمدرضا گودرزی^(۲) علی طالبی^(۳)

DOI: 10.22067/jfpei.2026.96795.1390

چکیده مدیریت ناپایدار منابع آب به ویژه در حوضه‌های آبریز فروملی تحت تنش، نمونه‌ای عینی از تراژدی منابع مشترک است که در آن اولویت دادن به منافع اقتصادی کوتاه‌مدت، عملکرد سیستم‌های طبیعی را به نقطه شکست می‌رساند. شکل‌گیری رقابت از این توسعه در بلندمدت شرایط برگشت‌ناپذیری را برای منابع آب ایجاد می‌کند. حوضه زاینده‌رود به مثابه یک منبع مشترک اکنون بستر شکل‌گیری رقابت‌های ذی‌نفعان و بازتخصیص آب شده است. بنابراین در این پژوهش با اتخاذ یک رویکرد نظری-کمی، ابتدا روند تاریخی تغییرات جریان تحلیل، سپس با استفاده از مدل WEAP، پویایی رقابت و بهره‌برداری در حوضه زاینده‌رود شبیه‌سازی شد. در گام نهایی وضعیت اجتماعی-اکولوژیکی حوضه با استفاده از چارچوب شاخص ظرفیت برد منابع آب (WRCC) و دیدگاه هاردین در قالب ساختار فشار-پشتیبانی-وضعیت (PSS) ارزیابی شده است. نتایج در مقیاس سالانه و در سه دوره پنج ساله (۲۰۰۶-۲۰۱۰)، (۲۰۱۱-۲۰۱۵) و (۲۰۱۶-۲۰۲۱) نشان می‌دهد که تناسب میان فشار و پشتیبانی در سه دوره زمانی به تدریج به هم خورده و از وضعیت قابل تحمل به حالت اضافه‌بار شدید (از ۰٫۳ به ۱٫۱ و سپس ۳٫۸) تغییر پیدا کرده است. همزمان شاخص ظرفیت برد در اغلب سال‌ها به محدوده «ضعیف» و «بسیار ضعیف» نزول پیدا کرده است. روی هم رفته نتایج حاکی از آن است که در سال‌های اخیر به ویژه با افزایش برداشت‌ها و رشد تقاضا، حوضه از ظرفیت طبیعی و اجتماعی خود عبور کرده و تراژدی منابع مشترک در این حوضه به وقوع پیوسته است.

واژه‌های کلیدی آینده مشاعات، بازتخصیص آب، حوضه زاینده‌رود، WEAP، PSS.

Analysis of Tragedy of the Commons the Ory Based on the Concept of Water Resources Carrying

Atiyeh Fatehifar

Mohammad Reza Goodarzi

Ali Talebi

Abstract Unsustainable water resource management, especially in stressed basins, is a concrete example of the tragedy of the commons, where prioritizing short-term economics pushes the performance of natural systems to breaking points. The emergence of competition from this development creates irreversible conditions for water resources in the long term. The Zayandeh-Rud basin serves as a common-pool resource for stakeholder competition and water reallocation. Therefore, in this study, with a theoretical-quantitative approach the flow change process was first analyzed, then the dynamic competition and exploitation in the Zayandeh-Rud basin was simulated using the WEAP model. In the final step, the socio-ecological status of the basin was assessed using the Water Ecological Carrying Capacity Index framework and Hardin's perspective in the form of the Pressure-Support-Status (PSS) structure. The results on an annual scale and in three five-year periods (2006-2010), (2011-2015) and (2016-2021) show that the balance between pressure and support has gradually deteriorated in the three time periods and has changed from a carrying capacity state to an overload state (increasing from 0.3 to 1.1 and then 3.8). At the same time, the WECCI has fallen to the "poor" and "extremely poor" range in most years. The results indicate that in recent years, especially with the increase in abstractions and the growth of demand, the basin has exceeded its natural and social capacity and has revealed the occurrence of a tragedy of the common resources.

Key words Future of commons, Water reallocation, Zayandeh-Rud basin, WEAP, PSS.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۹/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۱/۲۵ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

(۳) استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد.

مقدمه

منابع آب در کشورهای با اقلیم خشک و نیمه خشک، از اهمیت بالاتری نسبت به سایر اقلیم‌ها برخوردار است. زیرا در این مناطق، کمبود آب صرفاً سبب ایجاد یک چالش زیست محیطی نمی‌شود، بلکه می‌تواند یک عامل تعیین کننده اساسی در ایجاد چالش‌های اقتصادی - اجتماعی، امنیت غذایی و ثبات سیاسی شود [1]. کشور ایران نیز با اقلیم خشک و نیمه خشک در سال‌های اخیر وارد دوره‌ای جدید از بحران در زمینه کمبود آب و چالش‌های آن شده است. برای پاسخ به این چالش‌ها بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی در کشور افزایش پیدا کرده است. به طوری که طبق گزارش شورای عالی آب، کسری تجمعی مخزن آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۴ معادل ۲۰ میلیارد مترمکعب، در سال ۱۳۸۳ به ۶۰ میلیارد مترمکعب (سال خودکفایی در تولید گندم) و در سال ۱۳۹۸ به ۱۳۰ میلیارد مترمکعب رسیده است [2].

خشکسالی و کمبود آب واقعیت عینی کشور ایران است که با رشد جمعیت و به دنبال آن ضرورت تأمین نیازهای جمعیتی، افزایش سطح زیرکشت و گسترش صنایع به اهمیت و چالش این موضوع اضافه شده است. از طرفی احتمال وقوع تغییرات اقلیمی و عدم قطعیت‌های آن علی‌رغم افزایش بارش بر شاخص‌های کمبود آب اثر می‌گذارد و چالش‌های مدیریتی را تشدید می‌کند [3]. برخی از مشکلات کمبود آب در ایران باعث ایجاد چالش‌های امنیتی و سیاسی - اجتماعی شده، که در افزایش شمار اعتراضات طی سال‌های خشک مشهود بوده است. رقابت فزاینده بین بخشی و بین منطقه‌ای بر سر سهم بیشتر از منابع آب رودخانه، منجر به بهره‌برداری بیش از ظرفیت آبی و به دنبال آن، شکاف اجتماعی و ایجاد تنش و کشمکش میان ذی‌نفعان شده است [4]. یکی از چالش‌های ساختاری حکمرانی آب در حوضه‌های آبریز این است که جوامع انسانی در مسیر دستیابی به توسعه اقتصادی و رشد سریع، اغلب از ظرفیت طبیعی محیط و محدودیت‌های اکولوژیک غفلت می‌کنند [5]. تداوم این الگو، همان گونه که هاردین در نظریه تراژدی منابع مشترک بیان می‌کند، منجر به شکل‌گیری رقابت فزاینده میان بهره‌برداران و تخریب تدریجی منابعی می‌شود که مالکیت فردی ندارند و در معرض استفاده بیش از حد قرار می‌گیرند [6]. همان طور که مقدم‌منش و لنگرودی (۲۰۲۰) طی پژوهشی با بهره بردن از نظریه تراژدی منابع مشترک، وضعیت منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی ایران را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم مورد بررسی قرار دادند و دریافتند رفتار کشاورزان برای حداکثر کردن سود، منجر

به افزایش سطح زیر کشت و کاشت محصولات پرآب‌بر شده است. محققان تأکید می‌کنند راهبرد ترکیبی افزایش بازدهی آبیاری به همراه کنترل اثر ارتجاعی برای به پایداری رساندن سیستم ضروری است [7].

حوضه آبریز زاینده‌رود، طی دو دهه اخیر شاهد افزایش رقابت میان ذی‌نفعان، تشدید تقاضا، تنوع بخشی به مصارف، و بروز الگوهای بازتخصیص رسمی و غیررسمی آب بوده است؛ روندی که پیامدهای اجتماعی - اکولوژیکی قابل توجهی ایجاد کرده است. این رودخانه به عنوان یک منبع مشترک، زمانی از طریق سیستم‌های آبیاری مبتنی بر جامعه، کشاورزی محلی را پشتیبانی می‌کرد. با این حال، با صنعتی شدن سریع، شهرنشینی و سیاست‌های تخصیص مجدد آب توسط دولت، این منبع بیش از حد مورد بهره‌برداری قرار گرفت. افزایش کاربران متنوع صنایع، جمعیت شهری و بخش‌های کشاورزی، بدون هماهنگی مؤثر یا مشارکت محلی منجر به فروپاشی اکولوژیکی رودخانه شد. رویکرد مدیریت از بالا به پایین دولت، با اولویت دادن به استفاده صنعتی بر نیازهای سنتی کشاورزی، وضعیت را تشدید کرد و منجر به خشک شدن چاه‌ها، فرونشست زمین و کاهش کیفیت آب شد [8]. این مورد نشان‌دهنده یک تراژدی کلاسیک از منابع مشترک است: وقتی یک منبع مشترک توسط چندین بازیگر بدون قوانین یا پاسخگویی جمعی مورد دسترسی قرار می‌گیرد، تمام می‌شود و به همه کسانی که به آن وابسته هستند، به ویژه آسیب‌پذیرترین افراد، مانند کشاورزان در مناطق نیمه خشک آسیب می‌رساند.

احمدی‌نژاد (۲۰۲۲) [9] در پژوهشی به بررسی ارتباط بین کمبود آب و مهاجرت کشاورزان در روستای کفران در اصفهان می‌پردازد. در واقع آن‌ها از طریق رویکرد نظری چارچوب سامانه‌های اجتماعی - بوم‌شناختی و تحلیل نهادی به تحلیل دلایل مهاجرت پرداخته‌اند. نتایج نشان داد کمبود آب در منطقه که ناشی از مدیریت نادرست (توسعه صنعتی بی‌رویه، تغییر مرزهای مدیریت آب و اولویت دادن به صنعت) و تغییرات اقلیمی است، زندگی کشاورزان را از جنبه‌های اقتصادی، محیط زیستی، سلامتی و اجتماعی تحت تأثیر قرار داده و در نهایت منجر به مهاجرت آنان شده است. از بین این عوامل، دلایل اقتصادی مهم‌ترین انگیزه برای مهاجرت شناسایی شده است. نتایج این پژوهش نمود عینی تراژدی مهاجرت در پایین دست حوضه و پیامدهای جبران‌ناپذیر برای جامعه محلی و اکوسیستم منطقه می‌باشد. از سوی دیگر، طالبی اسکندی و میرنظامی (۲۰۲۰) [10] نیز وقوع بازتخصیص

وضعیت حوضه در مدل سازی ها و بررسی های نظری و تحلیل های اجتماعی گزارش شده است، در این پژوهش از نزدیک ترین مفهوم در چهارچوب ظرفیت برد منابع آب استفاده می شود تا بتوان وقوع تراژدی منبع مشترک را در وضعیت بیش بارگذاری تحلیل کرد. بنابراین روش پژوهش به صورت ترکیبی (کمی و نظری) است. در واقع هدف اصلی پژوهش، بررسی وقوع باز تخصیص، تحلیل نشانه های تراژدی منابع مشترک هاردین، و تبیین وضعیت اجتماعی - اکولوژیکی حوضه زاینده رود است تا درک بهتری از وضعیت موجود و ضرورت اصلاحات حکمرانی آب در آینده فراهم شود. از این رو ابتدا روند تاریخی جریان در ایستگاه های هیدرومتری تحلیل می شود، سپس رفتار رقابتی ذی نفعان و پویایی تخصیص آب در مدل WEAP شبیه سازی گردید و در نهایت شاخص WECCI محاسبه و ارزیابی شده است.

مواد و روش ها

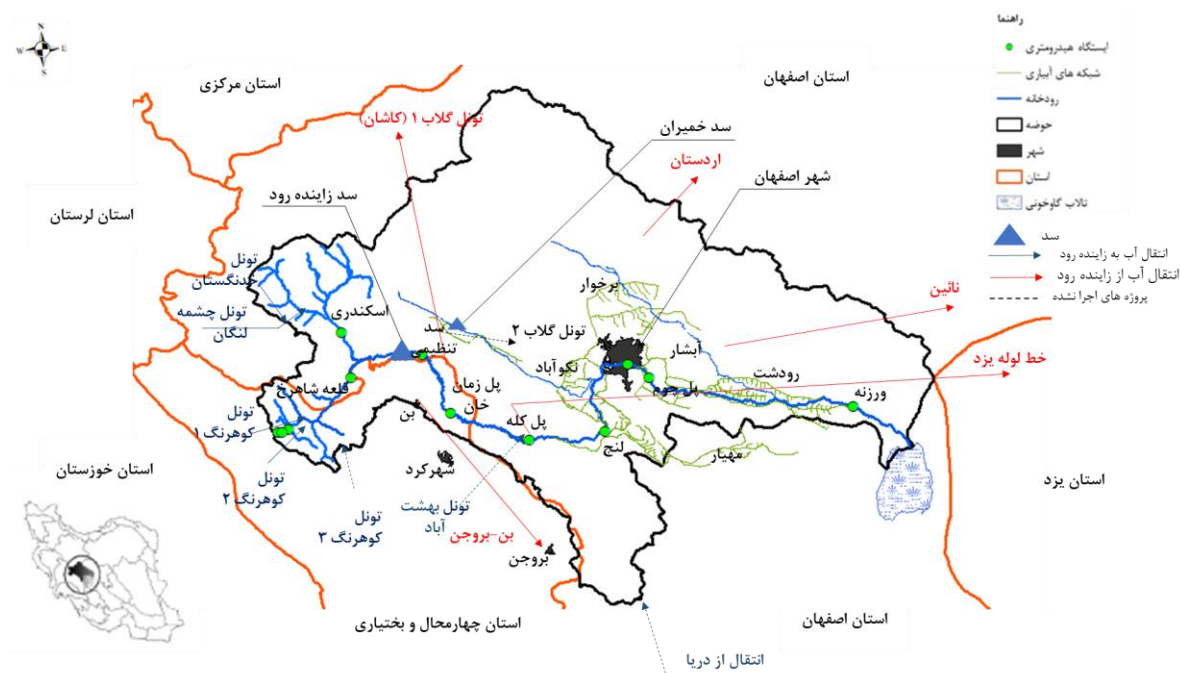
منطقه مطالعه

حوضه آبریز زاینده رود با مساحتی نزدیک به ۲۶۹۷۲ کیلومتر مربع، بیش از دو سوم حوضه آبریز گاوخونی را تشکیل می دهد. این حوضه بر اساس شرایط توپوگرافی و هیدروژئولوژیکی به ۱۶ منطقه مطالعاتی تقسیم شده است که مناطق کوهستانی (۳۶،۶٪) و دشت ها و کوهپایه ها (۶۳،۴٪) را در بر می گیرد. متوسط بارش حوضه زاینده رود ۲۴۴ میلی متر است. در سراب حوضه میزان بارش بیش از ۱۲۰۰ میلی متر، و در پایاب حوضه (ورزنه) و تالاب گاوخونی تا ۱۰۰ میلی متر و کمتر کاهش پیدا می کند. منابع آب سطحی حوضه با در نظر گرفتن تونل های انتقال آب عمدتاً از سد زاینده رود تأمین می گردد [17]. متوسط خروجی از سد ۱۱۹۳ میلیون مترمکعب در سال های ۱۴۰۰-۱۳۸۴ و متوسط حجم ذخیره مخزن ۴۲۶ میلیون مترمکعب بوده است [18]. منابع آب زیرزمینی در حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است و به دلیل بهره برداری از آب سطحی به خصوص بعد از سد چم آسمان فشار بیشتری به منابع آب زیرزمینی وارد می شود. مطابق با داده های کارگروه سازگاری با کم آبی میزان آب زیرزمینی قابل برنامه ریزی برای حوضه حدود ۱۸۷۹ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است. شکل (۱) موقعیت حوضه و تونل های انتقال آب را نشان می دهد.

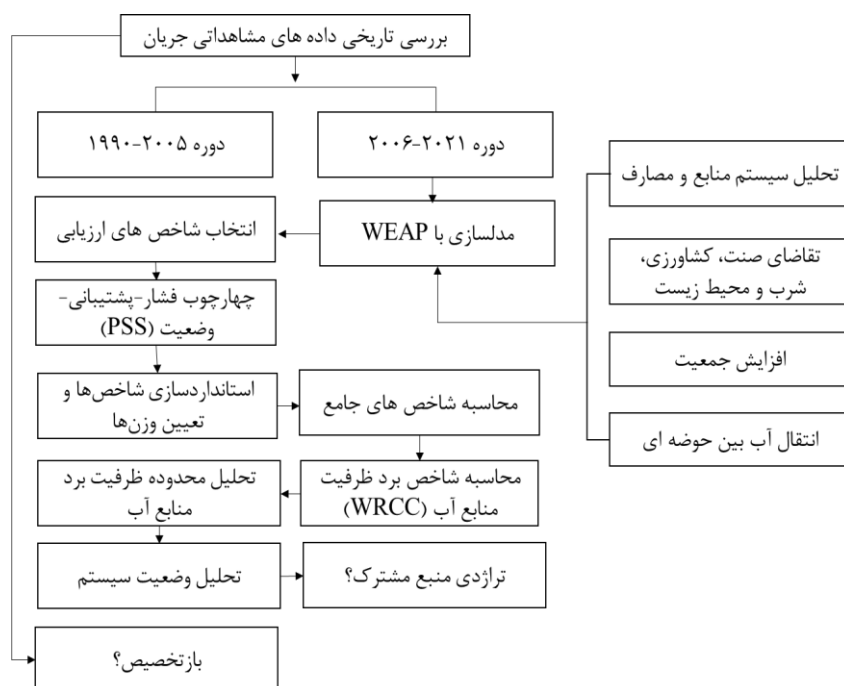
خاموش را در زاینده رود مستند کرده اند؛ پدیده ای که طی آن بدون تصمیم گیری رسمی، جریان آب از بخش های سنتی و پایین دست به مصارف جدید (شهری، صنعتی و انتقال بین حوضه ای) تغییر مسیر می دهد و منجر به تشدید نابرابری در دسترسی به آب و افزایش تنش اجتماعی می شود.

در کنار این شواهد، پژوهش های مدل سازی WEAP نیز پیش تر شکنندگی این حوضه را نشان داده اند. صفوی و همکاران (۲۰۱۶) [11] با استفاده از مدل WEAP نشان دادند که عدم تعادل مزمن بین عرضه و تقاضا، پایداری سیستم را تهدید می کند. جوادی نژاد (۲۰۱۶) [12] نیز در تحلیل تغییرات تقاضا و سناریوهای توسعه، وقوع تنش فزاینده بین ذی نفعان و افزایش وابستگی به منابع انتقالی را گزارش کرده است. افزون بر این، بررسی های اخیر زهتابیان و همکاران (۲۰۲۳) [13] نشان می دهد که کمبود آب، افزایش تقاضا و ناکارآمدی در مدیریت تخصیص، موجب رشد کسری تأمین در بخش های شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست شده و شکاف عرضه - تقاضا در بخش پایین دست گاوخونی را تشدید کرده است. علی رغم این مطالعات، بررسی جامع پویایی رقابت، باز تخصیص خاموش و احتمال وقوع تراژدی منبع مشترک در چهارچوبی که همزمان ابعاد اجتماعی و اکولوژیکی را لحاظ کند، هنوز در ادبیات حوضه زاینده رود محدود است.

در چنین شرایطی، استفاده از شاخص های یکپارچه برای سنجش وضعیت اجتماعی - اکولوژیکی حوضه ها ضروری است. یکی از چهارچوب های مناسب در این زمینه، شاخص ظرفیت برد منابع آب است [14]. اخیراً این مفهوم اساس سیاست های استفاده شده از منابع منطقه ای، توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط زیست شده است [15]. برای این مفهوم تعاریف متعددی به دلیل پیچیدگی منابع آب ارائه شده است اما به طور کلی حداکثر فشار یا باری را که یک سیستم می تواند به راحتی قبل از فروپاشی تحمل کند، ظرفیت برد تعریف می کنند [16]. این شاخص با ساختار فشار - پشتیبانی - وضعیت، امکان ارزیابی همزمان فشار انسانی، توان طبیعی اکوسیستم، و سلامت محیط را فراهم می کند. در این شاخص، برخلاف رویکردهای صرفاً هیدروژئولوژیک، می توان مسائل اجتماعی مانند مناقشات آب را نیز در نظر گرفت. از آنجایی که در پژوهش های مرتبط با تراژدی منبع مشترک از شاخص خاصی استفاده نشده است و این مفهوم تنها با بررسی



شکل ۱ موقعیت حوضه زاینده‌رود و انتقال‌های آب



شکل ۲ فلوچارت روش‌شناسی کلی پژوهش

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، یک رویکرد ترکیبی نظری - کمی برای تحلیل وضعیت تراژدی منبع مشترک و بازتخصیص آب در حوضه زاینده‌رود به کار گرفته شده است. در گام نخست، روند تاریخی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری از سد تنظیمی تا ورزنه در دو

بازه زمانی تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۰۵) و اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱) با هدف آشکارسازی تغییرات الگوی جریان و نحوه تضعیف تدریجی رژیم رودخانه تحلیل شد. در گام دوم، برای بررسی پویایی رقابت و رفتار بهره‌برداری ذی‌نفعان، مدل WEAP در دوره اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱) اجرا شد تا میزان فشار بر منابع، نحوه

کالیبره شد. داده‌های ورودی در جدول (۱) آورده شده است. به منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی از چهار معیار ضریب تبیین (R^2) [20] و ضریب تأثیر ناش - ساتکلیف (NSE) [21]، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) [22] و شاخص کارایی کلینگ و گوپتا (KGE) [23] استفاده شده است. در همه مقادیر به جز RMSE هر چه به یک نزدیک‌تر باشد عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد [20-23]. معادلات مربوط به معیارهای ارزیابی عملکرد در زیر آورده شده است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\alpha-1)^2} \quad (4)$$

که در آن‌ها، $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، $\bar{S}$ میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده، O_i داده‌های مشاهداتی هر ماه در کل دوره و S_i داده‌های شبیه‌سازی شده هر ماه در کل دوره می‌باشند. در معادله KGE، r ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، α نسبت انحراف معیار شبیه‌سازی شده به مشاهده شده و β نسبت میانگین شبیه‌سازی شده به مشاهده شده است.

جدول ۱ لیست داده‌های ورودی به مدل در حوضه زاینده‌رود

منابع	سطحی	رودخانه، سد، انتقال، تصفیه‌خانه
	زیرزمینی	حجم ذخیره، حجم اولیه، ماکزیمم برداشت، شارژ طبیعی
مصارف	شرب (شهری و روستایی)	جمعیت و نرخ رشد، سرانه مصرف آب، میزان مصرف
	صنعت	سرانه مصرف آب، میزان مصرف
	کشاورزی	مساحت زیر کشت، میزان مصرف سالانه آب، تغییرات ماهانه، میزان مصرف
	محیط زیست	حداقل نیاز
	انتقال	انتقال به خارج از حوضه

توزیع آب و شکل‌گیری مناقشه‌های ناشی از کمبود شبیه‌سازی گردد. از آنجا که شاخص مستقلی برای ارزیابی وضعیت تراژدی منبع مشترک وجود نداشت، در گام نهایی از شاخص جامع ارزیابی ظرفیت برد منابع آب (WECCI) بر پایه ساختار فشار - پشتیبانی - وضعیت (PSS) استفاده شده است تا وضعیت اجتماعی - اکولوژیکی حوضه با تأکید بر منطق هاردین ارزیابی شود. محاسبات شاخص WECCI در مقیاس سالانه و برای سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۰، ۲۰۱۱-۲۰۱۵ و ۲۰۱۶-۲۰۲۱ انجام گرفت و نتایج آن به منظور تبیین چرخه فشار، پویایی رقابت و میزان عبور حوضه از ظرفیت طبیعی و اجتماعی تفسیر گردید. شکل (۲) فلوجارت روش‌شناسی پژوهش را نشان می‌دهد.

ساختار مدل WEAP

مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب WEAP به عنوان یک ابزار جامع مدل‌سازی منابع آب، بر پایه معادلات بنیادی و محاسبات تعادل جرمی آب عمل می‌کند. این مدل قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های متنوعی از جمله شبکه‌های شهری، کشاورزی، حوضه‌های مستقل و رودخانه‌های مرزی پیچیده را دارد. مدل WEAP با تقسیم سیستم آبی به مؤلفه‌های مختلف مانند رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی، مخازن و تصفیه‌خانه‌ها، امکان بررسی دقیق تأمین منابع، انتقال آب، تصفیه فاضلاب و نیازهای اکولوژیک را فراهم می‌کند. این مدل از یک برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تأمین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر قیود است [19].

در این پژوهش مدل WEAP بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده پس از ترسیم شماتیک حوضه زاینده‌رود در دوره شبیه‌سازی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ (برابر با سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹) تعریف شده است. گام زمانی ماهانه و شروع از اکتبر سال ۲۰۰۵ (معادل شمسی مهر ۱۳۸۴) و سال پایه ۲۰۰۶ تعریف شده است. بر اساس اطلاعات استخراج شده از مطالعات به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب کشور و شرکت آب منطقه‌ای اصفهان منابع و مصارف، جریان‌های ورودی، الویت‌های تخصیص و درصد آب برگشتی، مدل تخصیص در ۴ ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی، پل زمان خان، پل کله، لنج، پل چوم

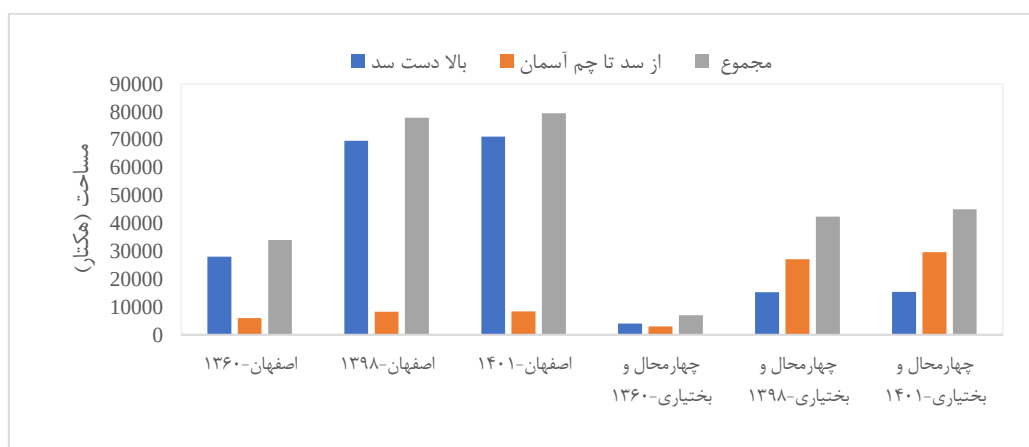
سناریوی رقابتی شکل گرفته

در طی چند دهه گذشته، حوضه زاینده‌رود مسیری از توسعه شتابان را تجربه کرده که در آن سیاست‌های افزایش عرضه و گسترش زیرساخت‌های انتقال و ذخیره‌سازی آب بر مدیریت تقاضا غلبه داشته است. ایجاد سد زاینده‌رود، توسعه شبکه‌های آبیاری و اجرای طرح‌های انتقال بین‌حوضه‌ای در کنار گسترش نواحی صنعتی و رشد جمعیت شهری، موجب افزایش بارگذاری بر منابع آب و تشدید ناپایداری بیلان شده است. این روند، چرخه‌ای از اتکا به توسعه بیشتر برای پاسخ‌گویی به تقاضاهای فزاینده ایجاد کرده که در نهایت به کاهش جریان‌های طبیعی، افت آبخوان‌ها، تضعیف تاب‌آوری اکولوژیکی و شکل‌گیری تعارضات اجتماعی در پایین‌دست انجامیده است [24]. پس از سال ۱۳۸۰ به دلیل رشد تقاضای آب در بخش‌های اصلی یعنی کشاورزی، شرب و صنعت و افزوده شدن تقاضاهای جدید، رقابت بین مصرف‌کنندگان آب تشدید گرفت.

در بخش شرب با افزایش جمعیت مصرف آب در سال پایه (۲۰۰۶) از ۳۳۱٫۵ به ۴۳۶٫۶۲ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۰۰ (۲۰۲۱) رسید. اگر چه مصرف کلی در بخش کشاورزی کاهش داشته است (به طور کلی از ۴۷۲۸ به ۱۷۸۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۰۰ رسیده است) اما تغییرات رقابتی از پایین‌دست به بالادست شکل گرفته است؛ به طوری که تغییر سطح زیر کشت در مطالعات سنجش از دور توسط شرکت تحقیقات منابع آب نشان می‌دهد سطح زیر کشت از بالادست سد تا چم آسمان در سال ۱۳۶۰ از ۴۱۰۰۰ هکتار به حدود ۱۲۰۰۰۰ هکتار در سال

۱۳۹۸ و ۱۲۴۵۵۰ هکتار در سال ۱۴۰۱ رسیده است. این آمار در خلاصه نتایج جلسه کارگروه تخصصی کاربری اراضی و مصارف آب حوضه آبریز زاینده‌رود در سال ۱۴۰۱ گزارش شده است [18]. این مقدار افزایش برای اصفهان در بالادست سد بیشتر بوده و در پایین دست سد تا چم آسمان برای چهارمحال و بختیاری بیشتر بوده است. این یک نمونه بارز شکل‌گیری رقابت توسط سیاست‌های حاکم در آن زمان بوده است. شکل (۳) تغییرات سطح زیر کشت را نشان می‌دهد.

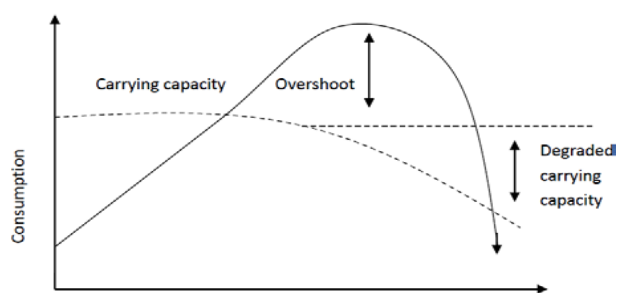
از طرفی طبق آمار سال ۱۳۸۵ در حوضه زاینده‌رود از تعداد ۳۱۹۷۲ منابع آب زیرزمینی حدود ۳ میلیارد مترمکعب سالانه آب برای مصارف مختلف تخلیه می‌گردید [25]. این تعداد چاه در سال ۱۳۹۴ به ۴۲۹۹۰ عدد و تخلیه‌ای حدود ۳ میلیارد مترمکعب رسید [26]. در صورتی که قبلاً برداشت از منابع زیرزمینی در بازه سال‌های ۸۵ تا ۹۵ از حدود ۴۰۰۰ میلیون مترمکعب به ۲۵۰۰ میلیون مترمکعب رسیده است [10]. طبق آمار سال ۹۶-۹۷ در حوضه حدود ۵۲۸۱۲ حلقه چاه (تخلیه ۱۳۸۹٫۴ میلیون مترمکعب)، ۲۲۳۹ رشته قنات (تخلیه ۹۴٫۵ میلیون مترمکعب) به طور کلی ۱۴۸۳٫۹ میلیون مترمکعب تخلیه می‌شود. مطابق با آمار سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ ۵۲۱۹۸ حلقه چاه و تخلیه کل ۱۶۸۸٫۷۹ میلیون مترمکعب به ثبت رسیده است [18]. افزایش تعداد چاه‌ها در کنار کاهش تخلیه آبخوان‌ها، نمایانگر فشار مضاعف بر منابع زیرزمینی و نمونه‌ای از تراژدی منابع مشترک است که در بلندمدت قابلیت پایداری حوضه را تهدید می‌کند.



شکل ۳ مقایسه مساحت اراضی آبی از بالادست سد زاینده‌رود تا چم آسمان در سال‌های ۱۳۶۰-۹۸-۱۴۰۱ [18]

می‌شود؛ یعنی مصرف و برداشت بیش از توان تجدید یا پشتیبانی محیط است. قسمت بالای خط ظرفیت نشان‌دهنده وضعیتی است که منابع با سرعتی بیش از تجدیدپذیری مصرف می‌شوند، ذخایر کاهش می‌یابد، و توان آینده محیط افت می‌کند. این بخش از نمودار نماد آغاز تنش‌های اکولوژیک، اقتصادی و اجتماعی است [28].

نظریه تراژدی منابع مشترک (Tragedy of the commons) نخستین بار توسط گرت هاردین در مقاله‌ای کلاسیک در مجله Science در سال ۱۹۶۸ مطرح شد و از آن زمان به یکی از تأثیرگذارترین چارچوب‌های نظری در تحلیل مسائل مربوط به مدیریت مشاعات و سیاست‌گذاری عمومی تبدیل شده است [2]. هاردین نشان داد که در یک سیستم منابع مشترک، هنگامی که افراد به طور مستقل و مبتنی بر منطق عقلانیت فردی تصمیم‌گیری می‌کنند، تمایل دارند میزان برداشت خود را تا حد امکان افزایش دهند؛ رفتاری که در سطح فردی «عقلانی» است اما در سطح جمعی باعث تخریب تدریجی منبع و کاهش رفاه همه کاربران می‌شود. از این رو، تضاد میان عقلانیت فردی و عقلانیت جمعی در نهایت به فروپاشی منبع منتهی می‌شود [6]. تحقیقاتی که این نظریه را گسترش و نقد کردند نشان دادند که تراژدی منابع مشترک تنها نتیجه رفتار کاربران نیست، بلکه محصول ترکیبی از فشارهای جمعیتی، سیاست‌های ناکارآمد دولتی، ضعف نهادها، و ساختارهای قدرت نابرابر است و در غیاب سازوکارهای نهادی و اجتماعی به ویژه در نظام‌هایی که سیاست‌گذاری‌های کلان، تخصیص آب، یا توسعه اقتصادی از بالا هدایت می‌شود، شکل‌گیری الگوی تراژدی بسیار محتمل است [29,30,31].



شکل ۴ ظرفیت برد و فزون‌باری در سیستم‌های جمعیتی و منابع طبیعی [28]

مفهوم ظرفیت برد شباهت بنیادینی با ایده تراژدی منابع مشترک هاردین دارد. هاردین نیز دنیا را به یک مرتع مشترک تشبیه می‌کند که تعداد مشخصی دام را می‌تواند پشتیبانی کند، اما

رقابت در بخش صنعت نیز از آمار موجود قابل بررسی است. اگر چه طبق آمار شرکت آب منطقه‌ای اصفهان [18] میزان مصرف صنایع کاهش داشته است و از ۱۷۲ به ۷۰ میلیون مترمکعب رسیده است، اما در این حوضه تعداد صنایع فعال تا سال ۱۳۹۷ به ۹۳۸۵ واحد صنعتی رسیده است (رشد دو برابری از سال پایه ۱۳۸۵) (۴۵۹۷) که ۳۰ واحد بزرگ صنعتی هر یک با بیش از ۰,۵ میلیون مترمکعب حدود ۷۵ درصد مصرف صنعت در حوضه را به خود اختصاص داده است [18, 27].

مفهوم تراژدی منابع مشترک و ظرفیت برد

ظرفیت برد (Carrying Capacity) به عنوان حداکثر سطح جمعیت، مصرف یا فعالیتی تعریف می‌شود که یک محیط می‌تواند بدون کاهش توان پشتیبانی خود در بلندمدت تحمل کند. ریشه این مفهوم به اکولوژی بازمی‌گردد و نخستین بار در ۱۸۸۶ در نیویورک وارد ادبیات مدیریت مرتع شد، زمانی که واژه carrying از معنای لغوی حمل کردن به معنای مدیریتی توان زیستگاه برای حمایت از دام تغییر یافت. تا ۱۸۸۹ ظرفیت برد مبنای اصلی سنجش و برنامه‌ریزی ظرفیت مراتع شد. پس از جنگ جهانی دوم، مفهوم ظرفیت برد همزمان وارد زیست‌شناسی جمعیت و مناقشه‌های مربوط به رشد جمعیت انسانی شد. دانشمندانی مانند اودوم این مفهوم را صورت‌بندی علمی کردند و نشان دادند هر انحراف جمعیت از حد ظرفیت، بازتاب محدودیت‌های واقعی محیط است [28]. شکل (۴) این مفهوم را نشان می‌دهد. منحنی کلاسیک ظرفیت برد شامل سه بخش است: (۱) ناحیه پایداری که مصرف کمتر از ظرفیت است، (۲) ناحیه overshoot که مصرف از ظرفیت فراتر می‌رود، و (۳) ناحیه تخریب ظرفیت که در آن توان طبیعی و اجتماعی سیستم برای حمایت از مصرف کاهش می‌یابد. مطابق تصویر، خط افقی یا خط‌چین بالای نمودار نمایانگر ظرفیت برد ثابت محیط است؛ یعنی سقفی که محیط می‌تواند در بلندمدت پشتیبانی کند. منحنی صعودی که در نمودار دیده می‌شود بیانگر رشد مصرف انسان از منابع محدود است. در بخش ابتدایی نمودار، مصرف کمتر از ظرفیت است و سیستم در ناحیه پایدار عمل می‌کند. اما با افزایش جمعیت یا شدت مصرف، منحنی به خط‌چین نزدیک می‌شود و به نقطه آستانه یا threshold می‌رسد. لحظه‌ای که منحنی مصرف از خط‌چین عبور می‌کند، سیستم وارد Overshoot یا «فزون‌باری»

در کنار فاکتورهای منابع آب وجود ندارد. از این رو شاخص ظرفیت برد منابع آب شاخصی با انعطاف پذیری بالا و مناسب برای بررسی هدف مقاله است. در این پژوهش، ظرفیت برد منابع آب بر اساس چارچوب فشار - پشتیبانی - وضعیت (PSS) تعریف شد. این ساختار در مطالعات مختلف مدیریت آب [16, 32] به عنوان چارچوبی انعطاف پذیر معرفی شده است که شاخص های آن می توانند متناسب با وضعیت هر حوضه انتخاب شوند. در سایر پژوهش ها شاخص اقتصادی تعریف شده است ولی از آنجایی که در این پژوهش مناقشات آبی به عنوان نمادی از تراژدی در نظر گرفته شده، این فاکتور در ارزیابی ها به جای شاخص اقتصادی در نظر گرفته شده است. شاخص های به کار رفته در جدول (۲) نوشته شده است.

وقتی هر بهره بردار برای کسب منفعت فردی، مصرف را افزایش دهد، مجموع رفتارها باعث فراتر رفتن از ظرفیت و تخریب مرتع می شود. این دقیقاً همان چیزی است که در ادبیات ظرفیت برد با اصطلاح Overshoot شناخته می شود. همان گونه که یک مرتع نمی تواند بیش از ظرفیت طبیعی خود دام پشتیبانی کند، یک حوضه آبریز، شهر، یا حتی کل سیاره نیز در صورت عبور از ظرفیت، دچار کاهش کارکرد، تنش اجتماعی و تخریب اکولوژیک می شود. بنابراین ظرفیت برد و نظریه هاردین دو صورت بندی مکمل از یک مسئله واحد هستند: محدودیت منابع و پیامدهای عبور از آن.

شاخص های ارزیابی مدل در چهارچوب ظرفیت برد
به طور کلی شاخصی برای بررسی وضعیت مناقشات اجتماعی

جدول ۲ شاخص های مورد استفاده در ارزیابی ظرفیت برد منابع آب [16,33]

دسته بندی	شماره/وزن	شاخص	واحد	نوع شاخص	توضیح / تعریف	استخراج
فشار (Pressure) (۰,۳۳)	۱ (۰,۲۵)	اطمینان پذیری حجمی	-	طبیعی - انسانی	نسبت حجم آب تأمین شده به نیاز کل در حوضه [34]	خروجی از WEAP
	۲ (۰,۲۵)	بیشینه کمبود	Mm ³ /yr	طبیعی - انسانی	بیشترین نیاز برطرف نشده *	خروجی از WEAP
	۳ (۰,۲۵)	جمعیت	Persons/yr	اجتماعی	جمعیت سالانه	آمار نفوس و مسکن
	۴ (۰,۲۵)	اعتراضات یا مناقشات مرتبط با آب	-	اجتماعی - سیاسی	در صورت وجود مناقشه آب عدد یک در نظر گرفته می شود *	سایت های معتبر خبری
پشتیبانی (Supportive) (Force) (۰,۳۳)	۵ (۰,۴)	بارش	mm/yr	طبیعی - اقلیمی	متوسط بارش سالانه در کل حوضه	آب منطقه ای
	۶ (۰,۶)	حجم آب خروجی از سد زاینده رود	Mm ³ /yr	طبیعی - اقلیمی	حجم سالانه خروجی از سد زاینده رود	آب منطقه ای
وضعیت (Health) (state) (۰,۳۳)	۷ (۰,۳)	جریان زیست محیطی به تالاب	m ³ /s	زیست محیطی	دبی ایستگاه ورزنه	آب منطقه ای
	۸ (۰,۷)	افت آبخوان	Mm ³ /yr	زیست محیطی	میزان افت حجم آبخوان در حوضه *	خروجی از WEAP

*نویسندگان این شاخص ها را در نظر گرفته اند.

اهمیت یکسان (وزن‌های مساوی) در نظر گرفته شد. شاخص‌های فشار نیز اهمیت برابر و در شاخص پشتیبانی اهمیت دبی رهاسازی شده از سد بیشتر از مقدار بارش در نظر گرفته شد. مؤلفه اکولوژیک نیز دو زیرشاخص تعریف شد. از آنجایی که تالاب در بیشتر مواقع آبی دریافت نمی‌کند وزن بیشتری به افت آبخوان داده شد.

گام سوم محاسبه شاخص تجمعی با استفاده از روابط زیر است [16, 36]:

$$PI = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i \quad i=1,2, \dots, n \quad (6)$$

$$SI = \sum_{i=1}^n S_i \cdot W_i \quad i=1,2, \dots, n \quad (7)$$

$$HSI = \sum_{i=1}^n S_i \cdot W_i \quad i=1,2, \dots, n \quad (8)$$

$$PS = \frac{PI}{SI} \quad (8)$$

$$WECCI = (1 - PI) \times W_{PI} + SI \times W_{SI} + HSI \times W_{HSI} \quad (9)$$

که PI شاخص تجمعی فشار اجتماعی - سیاسی (به جای اجتماعی - اقتصادی در سایر پژوهش‌ها)، و PI بیانگر زیرشاخص نام این بخش؛ SI شاخص تجمعی پشتیبانی منابع آب و SI بیانگر زیرشاخص نام و W_i وزن متناظر با هر شاخص؛ PS شاخص درجه فشار - پشتیبانی؛ $WECCI$ شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب (همان شاخص جامع ظرفیت برد اکولوژیک آب)، HSI شاخص تجمعی وضعیت سلامت محیط زیست و W وزن‌های متناظر به هر مؤلفه است، که در این پژوهش یکسان در نظر گرفته شده است.

ارزیابی وضعیت سیستم و بررسی تراژدی

از آنجایی که شاخص $WECCI$ شامل سه مؤلفه اصلی است و امکان تبادل‌پذیری بین شاخص‌ها وجود دارد، ممکن است مقادیر کم یک شاخص با مقادیر زیاد شاخص دیگر جبران شود. بنابراین این حالت ممکن است وضعیت سیستم را به درستی بیان نکند. از طرفی اگر تنها پایداری محیط زیست را ملاک ارزیابی قرار دهیم اکثر سال‌ها در تقسیم‌بندی بیش‌بارگذاری قرار خواهند گرفت. زیرا آب ورودی به تالاب در محدوده دوره شبیه‌سازی بسیار کم است و تالاب در وضعیت خشک قرار دارد. بنابراین برای شاخص سلامت اکولوژیک دو پارامتر در نظر گرفته شده است. افت آبخوان، که سالانه حدود ۳۷۹ میلیون مترمکعب

فشار بیانگر عواملی است که سبب افزایش تقاضا، برداشت یا تنش بر سیستم می‌شود. در این مطالعه با توجه به شرایط خاص زاینده‌رود، شاخص‌ها انتخاب شده است. شاخص‌های اطمینان‌پذیری حجمی و بیشینه کمبود که از مدل $WEAP$ به دست می‌آیند، جمعیت نیز در هر سال از آمار موجود به دست آمده است. شاخص فشار اجتماعی - سیاسی که مناقشات آبی شکل گرفته در حوضه را نشان می‌دهد از سایت‌های خبری مستند شده است. به این منظور هر گونه اعتراض یا مناقشه‌ای که در حوضه چه برای کشاورزان اصفهان و یا اعتراض به انتقال‌های آب توسط چهارمحال و بختیاری و اصفهان بوده، در نظر گرفته شده است. در نتیجه سالی که مناقشه وجود داشته (۲۰۱۱، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱) عدد یک و غیر از آن عدد صفر در نظر گرفته شده است. پشتیبانی بیانگر ظرفیت طبیعی و مدیریتی تأمین آب است که حجم خروجی از سد زاینده‌رود توان مدیریتی تأمین را با در نظر گرفتن حجم آب و تونل‌های انتقال در نظر دارد. بارش نیز متغیر کلیدی اقلیمی است. شاخص‌های وضعیت، کیفیت کلی سیستم را نمایش می‌دهند که وضعیت تالاب و افت آبخوان بازتاب نهایی اثر فشار و پشتیبانی است.

محاسبه شاخص ارزیابی جامع

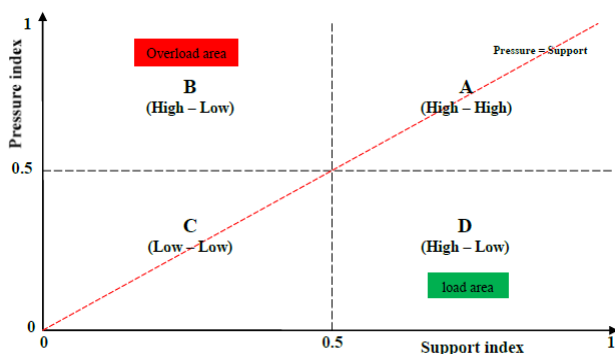
برای ارزیابی جامع شاخص ظرفیت برد حوضه از یک شاخص ترکیبی مطابق با جدول (۲) استفاده شده است که بر اساس مطالعات پیشین و با توجه به بومی‌سازی شاخص‌ها تعریف می‌شود [16]. برای این منظور اولین قدم نرمال‌سازی شاخص‌ها است که مطابق رابطه (۵) حاصل می‌شود:

$$XI = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

که XI مقدار استانداردسازی شده شاخص، X_i مقدار واقعی شاخص و حداقل و حداکثر شاخص می‌باشد. باید توجه داشت برای شاخص‌های منفی باید عدد حاصل منهای یک شود. به این معنی که مثلاً شاخص اول قابلیت اطمینان هر چه به یک نزدیک‌تر باشد شرایط بهتر است اما در تحلیل فشار باید آن را منهای یک کرد تا هرچه به یک نزدیک شود یعنی فشار بیشتر است.

گام دوم پس از یکسان‌سازی مقدار شاخص‌ها تعیین وزن شاخص‌ها هست که در این پژوهش از روش وزن‌دهی سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده است [35]. سه مؤلفه اصلی با

پژوهش همان وضعیت تراژدی در نظر گرفته شده است. حالت C وضعیتی است که هر دو شاخص کم هستند. سطح توسعه ضعیف و ظرفیت برد نیز در حالت ایدئال نیست. در این شرایط افزایش توانایی زیرسیستم پشتیبانی و انتقال تدریجی به حالت D و سپس حالت A است. در حالت D پشتیبانی بالا و فشار کم است و پتانسیل توسعه زیادی در منابع آب وجود دارد [36].



شکل ۵. حالت‌های اتصال فشار - پشتیبانی [36]

نتایج و بحث

بررسی تاریخی توسعه و تغییرات دبی ایستگاه‌ها در

رودخانه زاینده‌رود

در این قسمت برای مشخص کردن وضعیت تغییر در برداشت در حوضه با تحلیل داده‌های مشاهداتی میزان مصرف آب در فاصله هر ایستگاه به دست آورده شده است. به این منظور دبی سالانه هر ایستگاه منهای دبی ایستگاه قبل شده است تا میزان مصرف بین ایستگاه‌ها به دست آید. اعداد منفی نشان از برگشت آب در آن بازه است. نتایج متوسط سالانه در دوره گذشته و اخیر از ۲۰۰۵-۱۹۹۰ و ۲۰۲۱-۲۰۰۶ بررسی و مقایسه می‌شود. در ابتدا وضعیت ورودی به سد زاینده‌رود بررسی شده است. جدول (۴) نشان می‌دهد تقریباً به میزان ۲۷۰ میلیون مترمکعب حجم آب در بالادست سد کاهش یافته است که می‌توان آن را به خشک‌سالی و کاهش آورد سرچشمه‌ها یا برداشت غیرمجاز در آنجا یا افزایش سطح زیر کشت و برداشت‌های بیشتر در سرشاخه‌های پلاسجان نسبت داد. بنابراین برخی از کمبودها قبل از سد رخ داده است. نکات قابل توجه در جدول (۴) تغییرات مصرف از سد تا پل کله و از پل کله تا ورزنه می‌باشد. با دقت در اعداد می‌توان نتیجه گرفت تا قبل از سال ۲۰۰۵ (۱۳۸۳-۸۴) مصرف در بالادست بسیار کمتر بوده و با گذشت زمان مصرف بالادست حدود ۳۰۰

کسری آبخوان گزارش شده است [37]. بنابراین برای تعریف شاخص آبخوان حد آستانه بر اساس نصف مقدار گزارش شده در افت آبخوان (۲۰۰ میلیون مترمکعب) در نظر گرفته شده است. برای نیاز زیست‌محیطی تالاب نیز به منظور حفظ و بقای اکوسیستم ۱۴۰,۷۲ میلیون مترمکعب سالانه و تنها برای بقای پرندگان ۶۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است [17]. بنابراین در پژوهش برای حداقل آب ورودی به تالاب نصف نیاز برای بقای پرندگان (۳۰ میلیون مترمکعب) در نظر گرفته شد. در این پژوهش از بررسی تک‌بعدی سلامت اکولوژیک صرف نظر شده و تنها به شاخص جامع و تحلیل فشار - پشتیبانی پرداخته شده است. در این صورت مقدار بالای شاخص‌های فشار یا پشتیبانی می‌تواند ضعف شاخص اکولوژیک را پوشش دهد.

برای ارزیابی وضعیت سیستم از جدول (۳) طبق بازه‌های تعریف‌شده و شکل (۵) استفاده شده است [16, 32, 36]. همان طور که مشخص است در محدوده ۰,۴ تا ۰,۶ ظرفیت حمل در حالت آستانه قرار دارد.

جدول ۳ استاندارد ارزیابی شاخص ظرفیت برد منابع آب و شاخص درجه

فشار - پشتیبان [16, 32, 36]

شاخص	محدوده	تفسیر سطوح محدوده
WECCI	۰,۸-۱	ظرفیت حمل عالی (Excellent carrying)
	۰,۶-۰,۷۹	ظرفیت حمل خوب (Good carrying)
	۰,۴-۰,۵۹	ظرفیت حمل (General carrying)
	۰,۲-۰,۳۹	ظرفیت حمل ضعیف (Poor carrying)
	۰-۰,۱۹	ظرفیت حمل بسیار ضعیف (Very poor carrying)
PS	۰-۰,۹۹	محدوده حمل (Carrying)
	۱	وضعیت بحرانی (Critical situation)
	۱-+∞	بیش‌بارگذاری (Overload)

در کنار آن چهار حالت کلی نشان‌دهنده وضعیت سیستم بر مبنای دو شاخص اصلی فشار و پشتیبانی بر اساس شکل (۴) بررسی می‌شود. در حالت A هر دو شاخص بالا است که نشان‌دهنده سطح بالایی از توسعه منابع آب منطقه‌ای است، در نتیجه توجه به سیستم پشتیبانی مهم است در غیر این صورت سیستم وارد بیش‌بارگذاری خواهد شد. حالت B شاخص فشار بالا و پشتیبانی پایین است که بیانگر عدم توجه به حفاظت از منابع آب سیستم و توسعه ناپایدار است. این حالت برای این

کارخانه فولاد مبارکه (۱۳۷۱) احداث کانال و توسعه شبکه‌های برخوار، مهیار، جرقویه و کرون به تدریج افزایش بازیگران رقابتی را تشدید کرد [24]. طبق نمودار اگر چه میان‌دست حوضه (پل کله تا لنج-قرمز رنگ) همچنان بیش‌ترین مصرف‌کننده است اما پایین‌دست (خطوط آبی و مشکی) سهم آبی افزایشی را طی می‌کند که نشان از رقابت فردی بین ذی‌نفعان است. در این دوره تا اواخر دهه ۷۰ (۲۰۰۰) به تدریج جابه‌جایی مصرف رخ داده است و از میان‌دست (کاهش مصرف از پل کله تا لنج - قرمز) به پایین‌دست مصرف آب جابه‌جا می‌شود.

دهه ۷۰ تا ۸۰ (۱۹۹۱-۲۰۰۱) با افزایش اراضی قابل آبیاری شبکه رودشت از ۱۷۰۰۰ هکتار به حدود ۴۲۰۰۰ هکتار (شرکت زاینده آب، ۱۳۹۷)، اضافه شدن حق اشتراکی‌ها در بهره‌برداری از منبع موجود و تصویب طرح طوبی کم‌کم رقابت شروع به شکل‌گیری کرد [24]. مطابق با نمودار میان‌دست روند کاهشی (خط قرمز) و پایین‌دست (آبی و مشکی) روند افزایشی و منطبق با شرایط پرآبی و کم‌آبی نوسان دارد. در این دوره میزان مصرف در بالادست شروع به تغییر و افزایش می‌کند (سبز پررنگ). این روند همزمان با تونل‌های انتقال و افزایش شرب رشد می‌کند. به طوری که در سال‌های خشک ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ (سال ۱۳۸۰ سال بسیار خشک) در بقیه بخش‌ها کاهش یافت اما در این بازه همچنان روند افزایشی بود.

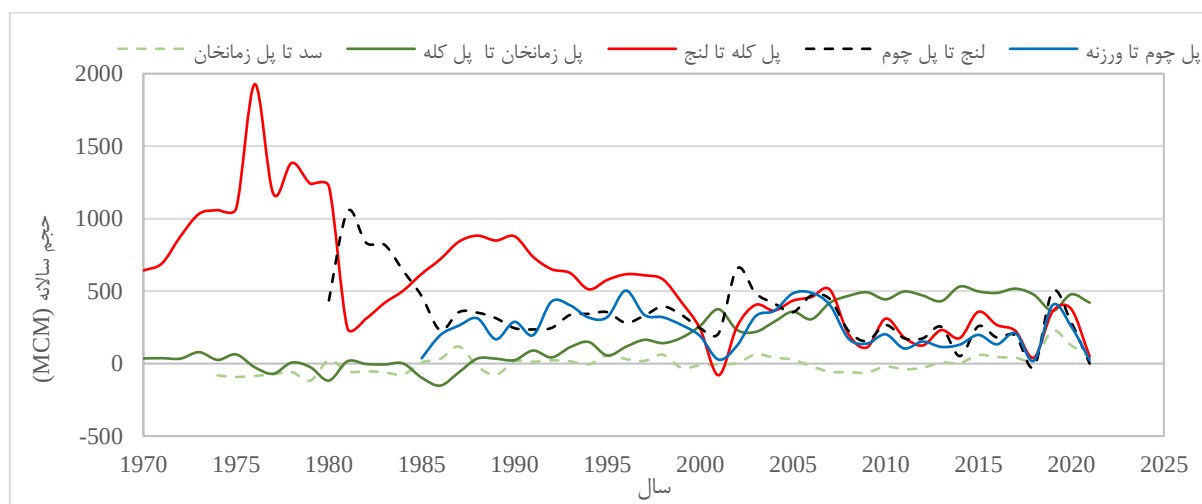
میلیون مترمکعب افزایش یافته است. مقایسه مجموع مصرف نشان می‌دهد تغییرات زیاد و معناداری در مصارف رخ نداده است ولی جابه‌جایی مصرف رخ داده است. بیشترین آسیب‌پذیری نیز در سال‌های خشک بوده و سال‌های خشک، تر و نرمال بالادست هیچ گونه تغییر معناداری را تجربه نکرده است.

شکل (۶) تغییرات حجم مصرف در بازه‌های ایستگاه‌های مطالعاتی طولانی‌تر و از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. بیشترین مصرف در بازه سال‌های ۵۰ تا ۶۰ (۱۹۷۱-۱۹۸۱) بوده است که همزمان با توسعه شبکه‌های مدرن نکوآباد و آبشار در ابتدای دهه ۵۰ و همزمان با احداث تونل اول و سد زاینده‌رود بوده است، توسعه صنایع به ویژه کارخانه ذوب آهن، و به دنبال آن توسعه جمعیت شهری شکل گرفت. در این دوره سهام‌آبه‌بران بازیگران رقابتی جدیدی بودند که بعد از حق‌آبه‌بران به بهره‌برداران حوضه اضافه شدند [38]. دقیقاً در مصرف در بازه پل کله تا لنج (خط قرمز) بیشترین و پس از آن لنج تا پل جوم (خط چین مشکی) بوده است. در این دوران برداشتی در بالادست وجود نداشته است.

در دهه بعد ۶۰ تا ۷۰ (۱۹۸۱-۱۹۹۱) با افزایش برداشت‌ها و کمبودها مجدد ایجادشده تونل دوم کوهرنگ به بهره‌برداری رسید. مدیریت عرضه محور و تعریف توسعه‌های جدید افزایش سطح زیر کشت اراضی کشاورزی با منابع آبی رودخانه و احداث

جدول ۴ مقایسه متوسط مصارف آب زاینده‌رود در بازه ایستگاه‌های مختلف و حجم دبی در بالادست سد زاینده‌رود (میلیون مترمکعب)

بازه/ سال	متوسط (۲۰۰۶-۲۰۲۱)	متوسط (۱۹۹۰-۲۰۰۵)	میزان تغییرات اخیر نسبت به گذشته	سال پرآب (۲۰۱۹)	سال نرمال (۲۰۱۷)	سال خشک (۲۰۲۱)
ورودی سد زاینده‌رود	۱۲۱۳	۱۴۸۳	-۲۷۰	۱۷۵۰	۱۲۲۷	۷۴۲
ایستگاه سد تنظیمی	۱۱۶۳	۱۴۴۳٫۸	-۲۷۹٫۹	۱۸۷۲٫۸	۱۱۸۸٫۸	۵۴۶٫۶
مصرف از سد تنظیمی تا پل زمانخان	۱۸٫۳	۱۹٫۹	-۱٫۶	۲۲۵٫۶	۴۰	۴۵٫۶
مصرف از پل زمانخان تا پل کله	۴۵۵٫۸	۱۷۵٫۳	+۲۸۰٫۶	۳۶۳٫۳	۵۱۶٫۷	۴۲۰
مصرف از پل کله تا لنج	۲۴۸٫۹	۴۸۹٫۵	-۲۴۰٫۶	۳۵۸٫۴	۲۲۵٫۳	۴۸٫۱
مصرف از لنج تا پل جوم	۲۲۵٫۶	۳۴۱٫۵	-۱۱۵٫۹	۴۹۷٫۵	۱۹۳٫۶	۰٫۵
مصرف از پل جوم تا ورزنه	۱۹۷٫۱	۳۰۶	-۱۰۸٫۹	۴۰۳٫۳	۲۰۹٫۹	۲۴٫۴
مصرف از سد تنظیمی تا پل کله	۴۷۴٫۲	۱۹۵٫۳	+۲۷۹	۵۸۹	۵۵۶٫۶	۴۶۵٫۷
مصرف از پل کله تا ورزنه	۶۷۱٫۷	۱۱۳۷٫۱	-۴۶۵٫۴	۱۲۶۰	۶۲۸٫۸	۷۳



شکل ۶ مقایسه حجم مصرف در بازه‌های ایستگاه‌های مطالعاتی از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۱

مترمکعب در بازه پل زمانخان تا پل کله مصرف شده است. مطابق با آمار حدود ۳۵۰ میلیون مترمکعب شرب و ۳۴ میلیون برای صنعت از سد تخصیص یافته است و باقی برای مصارف کشاورزی بوده است. در دوره ترسالی ۹۸-۱۳۹۷ همه بازه‌ها مصرف خود را افزایش داده‌اند.

نتیجه توسعه افسارگسیخته و شکل‌گیری رقابت در سال‌های خشک به شدت نمایان می‌شود که شکست سیستم را افزایش می‌دهد. طبق نظریه تراژدی هاردین مرحله فرسایش منابع و فروپاشی جریان مشترک در سال‌های خشک (۱۳۸۷، ۱۳۹۷، ۱۴۰۰)، نمودار مشهود است حجم مصرف در پایین‌دست تقریباً صفر و تالاب گاوخونی (به عنوان گیرنده نهایی) کاملاً بی‌آب مانده است. با هر خشکسالی، این رقابت تشدید و نمودارها واگرا می‌شوند که نشان از نبود همکاری و تنظیم جمعی دارد. الگوی مصرف آب در نمودار به صورت عینی، نمودار تراژدی منابع مشترک است؛ خطوط بالادست پایدار و حتی گاهی افزایشی هستند، در حالی که پایین‌دست فرومی‌پاشد. برای پاسخ به بحران کاهش جریان پایین‌دست اتفاق افتاده است، نه صرفه‌جویی بالادست. به طور کلی هر بازه به جای مدیریت اشتراکی، سهم خود را حداکثر کرده است و فقدان نهادهای اثرگذار در تخصیص عادلانه، کنترل برداشت، حقوق محیط زیست موجب شده توازن بین بخش‌ها از بین برود.

دهه ۸۰ (۲۰۰۱ به بعد) آغازی برای رقابت بین منطقه‌ای شکل گرفت مخصوصاً از ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ رقابت منطقه‌ای به بالاترین حد خود رسید. پس از جدا شدن آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری (در سال ۱۳۸۴)، افزایش سطح زیرکشت و باغات در بالادست در اصفهان و چهارمحال و بختیاری و افزایش تقاضای حوضه رقابت در سال‌های خشک بیشتر خود را نشان داد. اگر چه رویکردهای عرضه‌محور همچنان با تونل چشمه‌لنگان و خدنگستان ادامه داشت اما نتوانست در بلندمدت اثر مثبتی بگذارد.

نتیجه رقابت‌های شکل‌گرفته در حوضه از سال ۱۳۹۰ (۲۰۱۱) به شکل مناقشات و تنش‌های اجتماعی خود را نشان داد. تالاب گاوخونی به خشکی کامل رفت. به عبارتی دیگر مطابق با نظریه هاردین می‌توان گفت رقابت از «پایین‌دست به بالادست» منتقل شد، نه از «فرد به فرد». با دقت به نمودار پس از دهه ۹۰ (۲۰۱۱) تقریباً مصرف در همه بازه‌ها با روند خشکسالی و ترسالی همگرایی مثبت دارند به طوری که در سال نسبتاً خشک ۱۳۹۲-۹۳ (۲۰۱۴) در همه بازه‌ها کاهش مصرف دیده می‌شود اما در بالادست همچنان میزان مصرف بالا بوده است. اگر چه در میان‌دست حوضه (پل کله تا لنج) همچنان از پایین‌دست آب بیشتری مصرف شده ولی در بالادست همچنان در این دهه روند ثابت و افزایشی بوده است. همچنین در خشک‌سالی شدید ۲۰۱۸ (۱۳۹۶-۹۷) با کل حجم مخزن حدود ۵۵۰ میلیون مترمکعب تقریباً به هیچ بازه‌ای آبی تعلق نگرفته است اما حدود ۴۷۰ میلیون

جدول ۵ مقایسه متوسط مصارف آب زاینده رود در بالادست و پایین دست پل کله و بررسی باز تخصیص (میلیون مترمکعب)

بازه/ سال	متوسط اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱)	متوسط گذشته (۱۹۹۰-۲۰۰۵)	متوسط بلندمدت (۱۹۷۰-۲۰۰۵)	میزان تغییرات اخیر نسبت به بلندمدت	میزان تغییرات اخیر نسبت به گذشته
مصرف از سد تنظیمی تا پل کله	۴۷۴,۲	۱۹۵,۳	۶۵	+۴۰۹,۲	+۲۷۹
مصرف از پل کله تا ورزنه	۶۷۱,۷	۱۱۳۷,۱	۱۱۰۴,۱	-۴۳۲,۴	-۴۶۵,۴
مجموع سد تا ورزنه	۱۱۴۵,۹	۱۳۳۲,۴	۱۱۶۹,۱	-	-

نمودار شکل (۶) و جدول (۵) کاملاً روند واژه باز تخصیص خاموش که توسط طالبی اسکندری و میرنظامی [10] بیان شد را اثبات می کند و به تصویر می کشد. این فرایند مطابق با پژوهش آن ها زمانی آغاز شد که با توسعه صنایع بزرگ، افزایش جمعیت شهری و اجرای طرح های انتقال بین حوضه ای، اولویت تخصیص آب از کشاورزی سنتی و حقابه داران پایین دست به مصارف جدید شهری و صنعتی تغییر یافت. همزمان، در بالادست حوضه، حفر چاه های مجاز و غیرمجاز و گسترش باغات باعث افزایش برداشت آب شد و عملاً جریان طبیعی رودخانه به سمت پایین دست کاهش یافت. در نتیجه، بدون اعلام رسمی یا جبران خسارت، بخشی از حقابه های تاریخی کشاورزان و تالاب گاوخونی به نفع مصارف جدید جابه جا شد؛ فرایندی که نویسندگان آن را باز تخصیص خاموش نامیده اند، زیرا در فضایی غیرشفاف و بدون رضایت حق آبه داران اتفاق افتاد [10]. همان طور که نتایج عددی در جدول (۶) تغییرات در اثر گذشت زمان را نشان می دهد، که اگر چه بین دوره اخیر و متوسط بلندمدت گذشته مجموع مصرف یکسان بوده (حدود ۲۳ میلیون مترمکعب اختلاف)، اما حدود ۴۰۰ میلیون مترمکعب مصرف از پایین دست کم شده و به بالادست اضافه شده است.

کالیبره مدل WEAP

به منظور بررسی شرایط تراژدی در دوره اخیر مدل از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ (۸۵-۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹) به صورت ماهانه (۱۹۲ ماه) شبیه سازی شده است. در ادامه الویت های تعریفی از ۱ با بیشترین اهمیت (شرب) تا ۹ کمترین اهمیت (محیط زیست) در مدل تعریف شد. شرب الویت یک، کشاورزی و صنعت با الویت های ۲ تا ۴ بسته به موقعیت جای گذاری با نظر کارشناسان حوضه تغییر کرده است. محیط زیست الویت آخر در شبیه سازی مطابق با آنچه اتفاق افتاده است تعریف شده است. نتایج پس از کالیبراسیون دستی دقت بسیار مناسبی داشتند که نشان دهنده ارزیابی درست در بالادست بوده است. اگر چه در مدل کامل دبی

در ایستگاه سد تنظیمی با ضرایب تبیین و نش ۰/۸۲ به دست آمد و قابل قبول بود، اما از آنجایی که مقادیر دبی در این قسمت بسیار بالا بود، این مقدار اختلاف خطای ۳۰ میلیون مترمکعبی را ایجاد می کرد که منجر به پایین آمدن دقت سایر ایستگاه ها می شد. به همین منظور مدل دوباره و با دبی خروجی از سد مدل سازی شد در نتیجه دقت شبیه سازی در این ایستگاه به ضرایب ۰/۹۹ و میزان خطا به حدود ۶ میلیون مترمکعب رسید. مدل با روش PEST کالیبره شد. در ایستگاه های مورد نظر نقاط برداشت انتخاب و پارامترهای حساس در شبیه سازی در بازه مشخصی تعریف شدند. برخی از پارامترهای حساس در روند کالیبره ایستگاه ها سطح زیر کشت، مصرف آب و نرخ مصرف آب بود. نتایج واسنجی در جدول (۶) آورده شده است که نشان از عملکرد خوب مدل دارد. ایستگاه ورزنه برای کالیبره از آنجایی انتخاب نشد که دبی در اکثر روزها صفر است و تنها مدت کوتاهی در سال برای پایین دست رهاسازی می شود که عملاً کالیبره ایستگاهی که اکثر روزهای آن دبی صفر است بسیار ضعیف است.

جدول ۶ مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در ایستگاه های هیدرومتری

ایستگاه	R ²	NSE	KGE	RMSE (MCM)
ورودی سد زاینده رود	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۵	۲۷
سد تنظیمی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۷	۶,۷
پل زمان خان	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۸۷	۱۲
پل کله	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۸	۱۸
لنج	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۳	۱۵
پل چوم	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۷۹	۱۳

ارزیابی شاخص های ظرفیت برد بر اساس خروجی مدل WEAP

پس از بررسی داده های مشاهداتی و تغییرات دبی ایستگاه ها در دوره های مورد بررسی و مدل سازی دوره اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱)

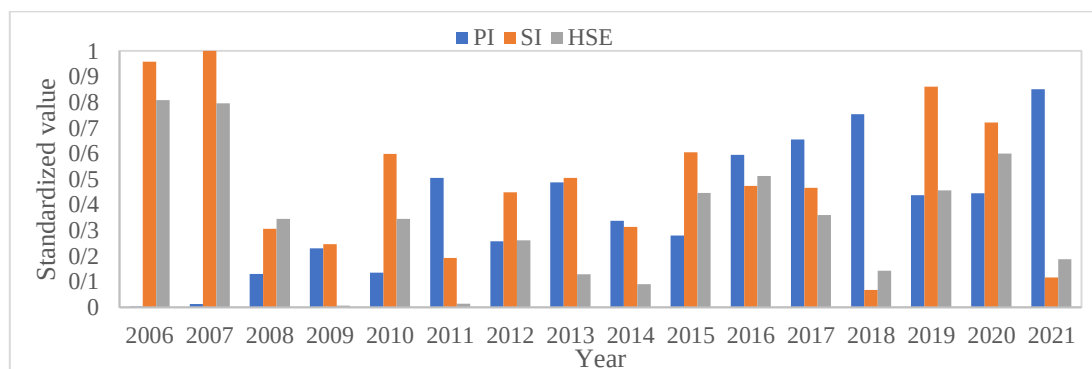
(الف) دوره اول ۲۰۱۰-۲۰۰۶ (سبز رنگ): SI بالاتر از سایر دوره‌ها و PI نسبتاً پایین‌تر است. این دوره نشان‌دهنده فشار کمتر و شرایط اکوسیستمی سالم‌تر است. در قسمت ب شکل (۸) PS بسیار پایین‌تر از ۱ است که این وضعیت به معنای آن است که توان پشتیبانی اکوسیستم در این دوره بیشتر از فشار وارده بوده؛ بنابراین سیستم در حالت carrying capacity قرار داشته است. این همان وضعیتی است که می‌توان گفت سال‌های با سلامت نسبی اکوسیستم وجود داشته است.

(ب) دوره دوم ۲۰۱۵-۲۰۱۱ (زرد رنگ): SI کاهش یافته و PI افزایش پیدا کرده است؛ این روند نشان‌دهنده تشدید فشار و کاهش توان طبیعی است. در قسمت ب شکل (۸)، PS حدوداً نزدیک ۱ می‌باشد. این دوره مانند critical state است. فشار و پشتیبانی تقریباً متوازنند، اما شرایط شکننده است. چنین وضعیتی آسیب‌پذیر و مستعد ورود به اضافه‌برداشت می‌باشد.

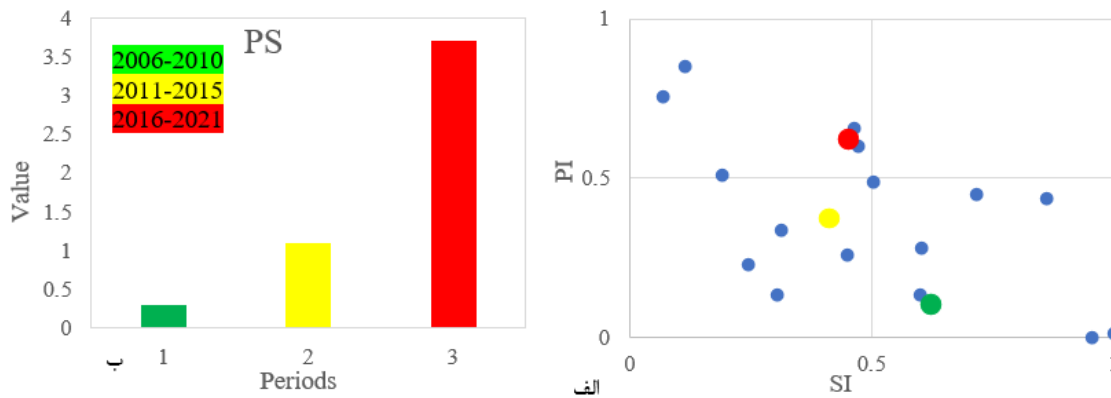
(ج) دوره سوم ۲۰۲۱-۲۰۱۶ (قرمز رنگ): نقطه قرمز بالاترین مقدار PI و یکی از کمترین SI‌ها را نشان می‌دهد. این دقیقاً همان الگوی تشدید تضاد فشار - پشتیبانی است که نشانه ورود سیستم به وضعیت overload می‌باشد. در قسمت ب شکل (۸) PS بسیار بالاتر از ۱ (بیش از ۳٫۵) می‌باشد. این مقدار بالا نشان‌دهنده غلبه شدید فشار بر توان پشتیبانی است. این وضعیت بدون ابهام به عنوان بیش‌بارگذاری شدید قابل تفسیر است و نشان می‌دهد که اکوسیستم در سال‌های اخیر قادر به تحمل سطح فعالیت انسانی نبوده است. این وضعیت دقیقاً همان شرایط تراژدی منبع مشترکی است که هدف مقاله آن را برای اثبات دنبال کرده است. در واقع این دوران فشار اجتماعی - سیاسی نیز بیشتر شده است.

با سناریو وضع موجود با رشد جمعیت و رقابت ذی‌نفعان شرب، صنعت و کشاورزی، ارزیابی نتایج انجام شد. همان طور که در قبل بیان شد در این پژوهش به منظور تصویرسازی و تحلیل وضعیت تراژدی منبع مشترک هاردین از چهارچوب مفهوم ظرفیت‌برد استفاده شده است. در ابتدا طبق چهارچوب PSS شکل (۷) شاخص فشار، پشتیبانی و وضعیت سلامت حوضه را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است شاخص فشار روند صعودی داشته و شاخص پشتیبانی اکثراً کاهشی ولی روند ثابتی نداشته و بسته به وضعیت بارش و شرایط ذخیره سد تغییر کرده است. اما وضعیت سلامت یعنی کاهش جریان به تالاب و افت آبخوان‌ها، روند نزولی داشته و در برخی از سال‌ها به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است؛ مثلاً سال ۲۰۰۹ سال خشکی بوده و جبران آن از طریق فشار بر منابع آب زیرزمینی جبران شده است.

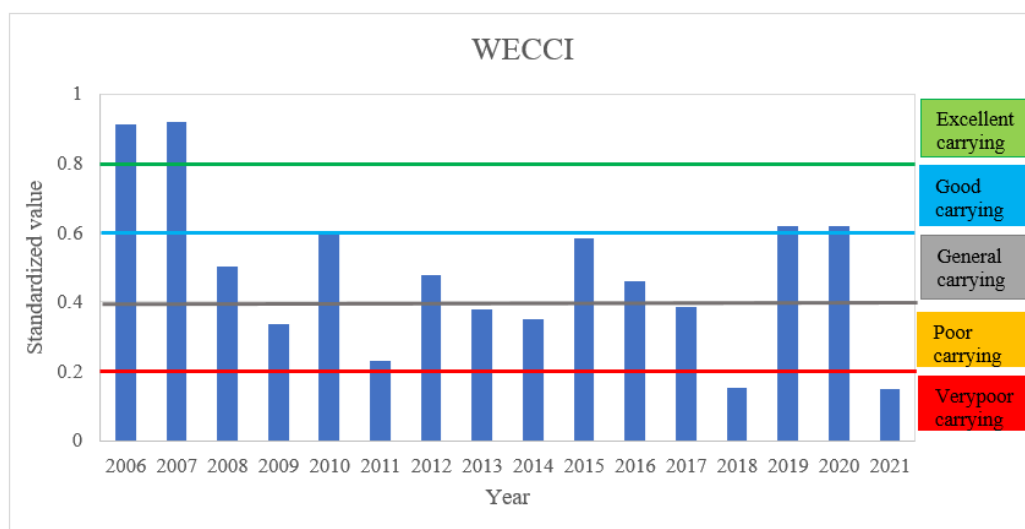
شکل (۸ - الف) حالت‌های اتصال فشار - پشتیبانی را سال به سال نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این هست که در این دوره هیچ سالی در حال A قرار نگرفته است یعنی سیستم هیچ گاه در وضعیت پیشرفت و توسعه نبوده است. سیستم بیشتر در حالت D و C است یعنی توانایی پشتیبانی گاهی زیاد و گاهی کم بوده است و برخی از سال‌ها در حالت B قرار گرفته که به معنی بیش‌بارگذاری در سیستم است. از آنجایی که از نتایج سال به سال به دلیل اختلافات زیاد نمی‌توان یک نتیجه واحد گرفت از این رو به صورت متوسط دوره ای نیز نتایج بررسی شد. دوره مطالعاتی به ۲۰۱۰-۲۰۰۶، ۲۰۱۵-۲۰۱۱ و ۲۰۲۱-۲۰۱۶ تقسیم شد. همچنین برای مشخص شدن بیشتر وضعیت فشار - پشتیبانی (PS) شکل (۸ - ب) نیز به صورت دوره ای بررسی شد:



شکل ۷ مقادیر سه مؤلفه اصلی فشار، پشتیبانی و وضعیت در سال‌های مورد مطالعه ۲۰۰۶-۲۰۲۱



شکل ۸ (الف) مقادیر شاخص فشار - پشتیبانی سالانه و میانگین دوره‌ای، (ب) میانگین تغییرات شاخص درجه فشار - پشتیبانی دوره‌ای



شکل ۹ تغییرات شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب در دوره ۲۰۰۶-۲۰۲۱

[16]، بیانگر ورود حوضه به وضعیت اضافه برداشت مزمن است که بدون کاهش فشار یا تقویت جدی منابع پشتیبان قابل ترمیم نیست.

این مسیر کلی از نظر مفهومی با تراژدی منابع مشترک هاردین سازگار است، که در آن تقاضاهای رقابتی متعدد بر روی یک منبع محدود، به تدریج ظرفیت اکولوژیکی آن را از بین می‌برد. در زمینه حوضه مورد مطالعه، فشارهای تجمعی - همراه با بازیابی محدود اکولوژیکی - نشان‌دهنده تغییر به سمت یک الگوی بهره‌برداری ناپایدار است و سامانه را به سوی ناپایداری و کاهش تاب‌آوری سوق می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با یک رویکرد ترکیبی نظری - کمی، به بررسی

در نهایت شاخص کلی ظرفیت برد منابع آب در شکل (۹) محاسبه و نشان داده شده است. اگر چه اکثر سال‌ها در محدوده General carrying یا مرز قابل تحمل قرار دارند (بالای خط طوسی رنگ) اما آسیب‌پذیری بسیار بالاست. بررسی ۱۶ ساله شاخص WECCI نشان می‌دهد که در سال‌های اولیه (۲۰۰۶-۲۰۰۷) در وضعیت ظرفیت برد مناسب قرار داشته، اما از ۲۰۰۸ به بعد با افت ناگهانی مواجه شده و در بخش عمده دوره در وضعیت ضعیف یا بسیار ضعیف ظرفیت برد باقی مانده است. دوره‌های کوتاه‌مدت بهبود (۲۰۱۰، ۲۰۱۵-۲۰۱۷ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰) پایدار نبوده‌اند و سیستم در سال‌های پایانی دوره (۲۰۱۸-۲۰۲۱) مجدداً وارد وضعیت بحرانی شده است. این رفتار نشان‌دهنده تضاد مداوم میان فشارهای انسانی و توان طبیعی اکوسیستم و مطابق تفسیر مقاله Yang و همکاران در سال ۲۰۱۵

تشدید کرده و بهره‌برداران را به سمت برداشت بیشتر سوق داده است. راه‌حل‌های دولت نیز عمدتاً ماهیت فنی داشته (سدسازی، انتقال آب، حفر چاه)، نه اصلاح حکمرانی، مشارکت اجتماعی، مدیریت تقاضا یا سازگاری با ظرفیت اکولوژیک. با این حال، نقدهای وارد به نظریه هاردین یعنی استروم بیان می‌کند که تراژدی سرنوشت محتوم حوضه‌های مشترک نیست؛ او تأکید می‌کند که نهادهای محلی، قواعد مشارکتی و حاکمیت چندسطحی می‌توانند از تخریب منابع مشترک جلوگیری کنند [28]. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده شاخص‌های بیشتر و تأثیرگذارتر جنبه‌های اقتصادی و سیاسی بیشتری به همراه تفکر استروم تحلیل شود.

واژه‌نامه

Tragedy of the commons	تراژدی منابع مشترک
	ظرفیت برد منابع آب
Water Resources Carrying Capacity (WRCC)	
Carrying Capacity	ظرفیت برد
	شاخص ظرفیت برد اکولوژیک آب
Water Ecological Carrying Capacity Index (WECCI)	
	سیستم برنامه‌ریزی و ارزیابی آب
Water Evaluation And Planning System (WEAP)	
Pressure-Support-State (PSS)	فشار - پشتیبانی - وضعیت
Health state index (HSI)	شاخص وضعیت سلامت حوضه
Overload	بیش‌بارگذاری
Analytic Hierarchy Process (AHP)	تحلیل سلسله‌مراتبی
Coefficient of Determination (R^2)	ضریب تبیین
	ضریب تأثیر ناش - ساتکلیف
(NSE) Nash-Sutcliffe Efficiency	
Root Mean Square Error (RMSE)	ریشه میانگین مربع خطا
	شاخص کارایی کلینگ و گوپتا
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	

سپاسگزاری

وضعیت حوضه زاینده‌رود با نظریه تراژدی منابع مشترک در چهارچوب شاخص ظرفیت برد منابع آب یا همان شاخص ظرفیت برد اکولوژیک آب (WECCI) پرداخته شد. تلفیق روش شبیه‌سازی با مدل WEAP و روش ارزیابی مبتنی بر شاخص برای محاسبه شاخص WECCI به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده شاخص فشار - پشتیبانی (PS) از مقدار ۰,۳ در دوره اول (۲۰۰۶-۲۰۱۰) به ۱,۱ در دوره دوم (۲۰۱۱-۲۰۱۵) و نهایتاً به ۳,۸ در دوره سوم (۲۰۱۶-۲۰۲۱) رسیده است و بیانگر گذار سیستم از حالت پایدار به قابل تحمل و اضافه‌بار یا overload است. در همین حال، شاخص ظرفیت برد اکولوژیک (WECCI) نیز که در آغاز دوره وضعیت مطلوبی را نشان می‌داد، در بیشتر سال‌ها به محدوده ضعیف و بسیار ضعیف نزول کرده و تنها در چند سال به صورت موقتی بهبود یافته است. این الگوی کمی، تصویری روشن از تشدید فشار انسانی، کاهش پشتیبانی طبیعی و افت وضعیت اکولوژیک حوضه ارائه می‌دهد. حالت‌های رخ داده به خصوص در دوره آخر وضعیت تراژدی را تفسیر می‌کند.

پدیده بازتخصیص خاموش نیز یکی از ویژگی‌های مهم مدیریت آب در زاینده‌رود است. بخشی از آب مورد نیاز حقابه‌داران به بهانه کمبود بارش، تغییر اقلیم یا نیازهای جدید صنعتی در بالادست جذب شده، در حالی که برداشت پنهانی و پمپاژ گسترده در پهنه بالادست فشار مضاعفی بر سیستم وارد کرده است. نتیجه آن شده که حق‌آبه‌داران برای جبران کمبود، به برداشت از چاه‌های غیرمجاز روی آورده‌اند؛ راه‌حلی که در کوتاه‌مدت رضایت‌بخش است، اما در بلندمدت به فرسایش شدید آبخوان‌ها و گسترش مناقشات منجر شده است. این همان چرخه‌ای است که در نظریه هاردین توصیف می‌شود: مجموعه‌ای از کنش‌های عقلانی فردی که پیامدهای جمعی فاجعه‌بار به همراه دارد.

ذکر این نکته ضروری است که مطابق با تئوری هاردین، نمی‌توان تنها کشاورزان را به عنوان مسبب اصلی تراژدی معرفی کرد. کشاورزی در این حوضه سابقه‌ای چند هزار ساله دارد و رفتار کشاورزان، همچون سایر کنشگران عقلانی، متأثر از سیاست‌های تشویقی دولت، توسعه‌گرایی، خودکفایی، مجوزدهی گسترده به چاه‌ها، و اولویت‌دهی به صنایع آب‌بر بوده است. در واقع، این ساختار حکمرانی و تصمیم‌گیری است که رقابت را

مراجع

- [1] S. Nikpey, B. Rahimibadr, N. Nozari, and S. Rezaei, "The effect of water scarcity on Iran's food security," *Brazilian Journal of Biology*, vol. 85, p. e291705, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.291705>
- [2] B. Attarzadeh, "Tragedy of the commons: An explanation of the theory and its lessons for us," *Iranian Journal of Public Policy*, vol. 8, no. 3, pp. 147–161, 2022. (In Persian) [Online]. Available: <https://doi.org/10.22059/jppolicy.2022.89548>
- [3] M. Goodarzi and M. Sabaghzadeh, "Prediction and analysis of the probability of climate change and water scarcity in Yazd," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 29–48, 2025. (In Persian) [Online].
- [4] R. Sohrabi, "The politics of drought in the Middle East: Case study from Iran," *Discover Environment*, vol. 3, no. 1, p. 122, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00334-3>
- [5] H. P. Qin, Q. Su, and S. T. Khu, "An integrated model for water management in a rapidly urbanizing catchment," *Environmental Modelling & Software*, vol. 26, pp. 1502–1514, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.003>
- [6] G. Hardin, "The tragedy of the commons," *Science*, vol. 162, no. 3859, pp. 1243–1248, 1968. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>
- [7] M. Moghadam Manesh and S. Pour-Masoumi Langarudi, "Tragedy of the commons in using groundwater resources in agriculture sector," *Journal of Strategic Management Studies*, vol. 11, no. 42, pp. 77–98, 2020. (In Persian) [Online]. Available: https://www.smsjournal.ir/article_111610.html
- [8] K. Madani, "Water management in Iran: What is causing the looming crisis?" *Journal of Environmental Studies and Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 315–328, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- [9] Y. Ahmadinejad, "The relationship between water scarcity and farmer migration in Isfahan, Iran," M.S. thesis, Univ. of Twente, Enschede, Netherlands, 2022. [Online].
- [10] S. Talebi Eskandari and S. J. Mirnezami, "Silent reallocations in Zayandehrud River Basin," *Iran-Water Resources Research*, vol. 16, no. 2, pp. 292–311, 2020. (In Persian) [Online]. Available: https://www.iwrr.ir/article_114200.html
- [11] H. R. Safavi, M. H. Golmohammadi, and S. Sandoval-Solis, "Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin," *Journal of Hydrology*, vol. 539, pp. 625–639, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.073>
- [12] S. Javadinejad, "Integrated water resources management in the Zayandeh Rud Basin: Scenario analysis using WEAP," Ph.D. dissertation, Univ. of Birmingham, Birmingham, UK, 2016. [Online]. Available: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/7103/5/Javadinejad16PhD.pdf>
- [13] E. Zehtabian, R. Masoudi, F. Yazdandoost, M. Sedghi-Asl, and H. A. Loáiciga, "Investigation of water allocation using integrated water resource management approaches in the Zayandehroud River basin, Iran," *Journal of Cleaner Production*, vol. 395, p. 136339, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136339>
- [14] J. Peng, Y. Du, Y. Liu, and X. Hu, "How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems," *Ecological Indicators*, vol. 60, pp.

- 1017–1030, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.008>
- [15] Z. Guiyou, L. Shuai, J. Zhuowei, W. Shuo, and M. Youhua, “Evaluation and forewarning management of regional resources and environment carrying capacity: A case study of Hefei City, Anhui Province, China,” *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1637, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su12041637>
- [16] J. F. Yang, K. Lei, S. T. Khu, F. Qiao, and Q. Liu, “Assessment of water ecological carrying capacity using an indicator-based method applied to Tieling City, China,” *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 15, no. 5, pp. 940–947, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2166/ws.2015.051>
- [17] M. H. Golmohammadi, “Scenario analysis for integrated water resources planning and management (IWRPM) in the Zayandehrud Basin under uncertainty using fuzzy performance criteria and sustainability index,” M.S. thesis, Isfahan Univ. of Technology, Isfahan, Iran, 2015. (In Persian) [Online].
- [18] Regional Water Company of Esfahan, *Baseline Water Resources Studies — Protection and Exploitation Deputy*, Isfahan, Iran, 2022. (In Persian) [Online]. Available: <https://www.esrw.ir/>
- [19] D. Yates, J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee, “WEAP21—a demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 1: Model characteristics,” *Water International*, vol. 30, no. 4, pp. 487–500, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/02508060508691893>
- [20] M. Azizi and A. Abbasi, “Developing a robust data-driven model based on ground and satellite measured data for agricultural drought prediction in Iran,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 1–28, 2025. (In Persian) [Online]. Available: https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_45941.html
- [21] H. M. Yaqoubi, B. Keshtegar, and H. A. Rahdar, “Model-based analysis for ultimate axial load of circular CFST columns using artificial neural network,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 33–48, 2019. (In Persian) [Online]. Available: https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_32433.html
- [22] H. Fattahi, F. Malekmahmoudi, and H. Ghaedi, “Predicting the most important geomechanical parameter of rock mass using the harmony search and teaching learning based optimization algorithms,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 1–18, 2022. (In Persian) [Online]. Available: https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_42483.html?lang=en
- [23] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez, “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling,” *Journal of Hydrology*, vol. 377, no. 1–2, pp. 80–91, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- [24] S. Talebi Eskandari, *Five decades of silent reallocation and transformations in the Zayandeh-Rud water exploitation system*, Kerman, Iran: Iran Water Management Think Tank, Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agriculture of Kerman Province, 2021. (In Persian) [Online]. Available: <http://iwpri.ir/home/single/634>
- [25] Zayand-Ab Consulting Engineers, *Water resources and water-use assessment in the Zayandeh Rood Basin, Isfahan, Iran*, Isfahan, Iran: Esfahan Regional Water Company, 2009. (In Persian) [Online].
- [26] D. Salehi, “Sustainable management of water resources allocation in the Zayandehrood river basin using WEAP model and conflict resolution models for different climatic conditions,” M.S. thesis, Yasouj Univ., Yasouj, Iran, 2017. (In Persian) [Online].

- [27] S. Enteshari Najafabadi, "Codifying a framework for water resources management in the Zayandehrud Basin with emphasis on social, economic, and environmental aspects," Ph.D. dissertation, Isfahan Univ. of Technology, Isfahan, Iran, 2020. (In Persian) [Online].
- [28] F. J. Taiwo and O. O. Feyisara, "Understanding the concept of carrying capacity and its relevance to urban and regional planning," *Journal of Environmental Studies*, vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2017. [Online]. Available: <https://www.avensonline.org/wp-content/uploads/JES-2471-4879-03-0017.pdf>
- [29] J. M. Baland and J. P. Platteau, *Halting Degradation of Natural Resources: Is There a Role for Rural Communities?* Rome, Italy: Food and Agriculture Organization (FAO), 1996. [Online].
- [30] T. Dietz, E. Ostrom, and P. C. Stern, "The struggle to govern the commons," *Science*, vol. 302, no. 5652, pp. 1907–1912, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.1091015>
- [31] E. Ostrom, *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1990.
- [32] Z. Zhang, W. X. Lu, Y. Zhao, and W. B. Song, "Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process," *Ecological Modelling*, vol. 275, pp. 9–21, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.031>
- [33] H. Mohammadi Sedaran, M. Delavar, and M. Shahbazbegian, "Assessment of water resources carrying capacity of the river basins using the simulation approach and index-based evaluation method; case study: Zarrineh-Roud Basin," *Iran-Water Resources Research*, vol. 17, no. 2, pp. 154–173, 2021. (In Persian) [Online]. Available: https://www.iwrr.ir/article_135136.html?lang=en
- [34] S. Sandoval-Solis, "Water planning and management for large scale river basins: Case study of the Rio Grande/Rio Bravo transboundary basin," Ph.D. dissertation, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA, 2011. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2152/ETD-UT-2011-08-3772>
- [35] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 83–98, 2008. [Online]. Available: https://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/95520020309.pdf
- [36] Y. W. Du and Y. C. Wang, "Evaluation of marine ranching resources and environmental carrying capacity from the pressure-and-support perspective: A case study of Yantai," *Ecological Indicators*, vol. 126, p. 107688, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107688>
- [37] S. Mohajeri, L. Horlemann, S. Sklorz, M. Kaltofen, S. Ghanavizchian, and T. Nuñez von Voigt, "Integrated water resource management in Isfahan: The Zayandeh Rud catchment," in *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*, Cham, Switzerland: Springer, pp. 603–627, 2016. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-25071-7_23
- [38] P. Mamasani, "Analyzing water conflicts in shared water resources systems based on relative deprivation theory; case study: Zayandeh-rud River Basin," M.S. thesis, Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran, 2023. (In Persian) [Online].



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

System Dynamic Based Project Duration Simulation of Construction Projects

Research Article

Yaghoob Alipouri¹ , Zahra Tajabadi²

DOI: [10.22067/jfcei.2026.93175.1355](https://doi.org/10.22067/jfcei.2026.93175.1355)

1. Introduction

Construction projects, characterized by their intricate nature and high interdependence of components, are perpetually plagued by challenges such as delays, rework, and cost fluctuations. This research is formulated to model and simulate the System Dynamics (SD) governing these projects within the Iranian context. The primary objective is to identify the underlying feedback structures, critical variables, and complex interactions that indirectly influence productivity and project duration. A comprehensive literature review highlighted a gap: despite the existence of SD models for analyzing delay factors or the impact of BIM, no holistic model specifically addresses the dynamic structures of Iranian projects, focusing on managerial and financial factors (e.g., liquidity and payment delays). This identified gap serves as the main motivation for this study.

2. Methodology

The research methodology is firmly rooted in System Dynamics (SD) Modeling. This approach enables the representation and simulation of system behavior over time, particularly in the face of delays and complex feedback loops. The model is constructed based on six key causal and feedback loops. These loops illustrate factors such as the iterative effect of remaining work on the demand for resources (machinery and manpower), the impact of reduced safety compliance on legal and contractual issues, and most crucially, the relationship between **payments to the contractor**, employee motivation, productivity, and the work progress rate. Variables such as the number of machinery, machinery efficiency, workspace size, maintenance, and resource allocation are incorporated to provide a comprehensive picture of the project's operational flow (Fig 1).

The structural and behavioral validity of the developed SD model was examined through a multi-phase verification process. Initially, the causal loop diagrams

were refined based on experts' feedback, followed by sensitivity analysis and behavioral comparison between the simulated results and real project data from Iranian construction cases. The modeling process in Vensim PLE consisted of qualitative and quantitative stages, where mathematical formulations were derived for each stock and flow variable to represent the dynamic interdependencies among financial resources, workforce motivation, training, and contractual issues. In this study, the accuracy of the model was investigated by structural analysis test, structural behavior test, ultimate limit test, and reference behavior reconstruction test. Fig 2 shows the accuracy and validity of the model based on the structural evaluation test. This level of validation ensures that the model reliably reproduces the actual behavior of construction projects and serves as an effective analytical tool for testing managerial policies in nonlinear and complex environments.

3. Findings and Scenario Analysis

System behavior was simulated under Scenario One (Current Conditions) to benchmark the baseline performance of key variables. Subsequently, two policy-driven scenarios were examined:

1. Scenario Two (Personnel Rigor): This scenario assumed reductions in training, R&D investment, and the ratio of salary to work volume, coupled with a significant increase in employer delays in payments (up to 60 days). Results indicated that while delayed payments directly affect the contractor's liquidity and morale, the reduction in investment in training and R&D introduces long-term detrimental effects on quality and the rate of correct work completion.
2. Scenario Three (Impact of Employer's Refusal to Change Execution Method): This scenario focused on the consequences of the employer's inflexibility in adopting optimized execution methods, which directly strains the budget and schedule.

* Manuscript received April 27, 2025, Revised December 28, 2025, Accepted February 23, 2026.

¹ Corresponding author. Assistant Professor, Innovative Technologies Center for Construction Management, Department of Construction Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: y.alipouri@kntu.ac.ir.

² MSc Graduated, Department of Construction Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

The findings strongly suggest that stable and timely cash flow to the contractor acts as a vital balancing loop capable of moderating the adverse effects stemming from initial poor design quality or necessary rework.



4. Conclusion and Future Directions

The developed model provides a robust framework for understanding the dynamics of construction delays in Iran. For future studies, further model refinement is strongly recommended, including the detailed modeling of procurement risks, macroeconomic conditions, and the integration of this SD model with other approaches like Building Information Modeling (BIM) to quantify the benefits derived from reducing design errors.

In future research, expanding the proposed SD framework through integration with Building Information Modeling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) can substantially enhance managerial insight into the complex dynamics of construction projects. The coupling of SD

with BIM allows dynamic behaviors to be visualized within a three-dimensional project environment, facilitating more accurate prediction of delays, activity interferences, and the consequences of operational decisions. Moreover, applying machine learning algorithms to automatically calibrate model parameters will improve adaptability and predictive accuracy based on real project data. This extension will pave the way for an intelligent decision-support system, capable of assisting managers in strategic planning and performance optimization across large-scale infrastructure projects.



شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم مدت زمان پروژه‌های عمرانی*

مقاله پژوهشی

زهرا تاج‌آبادی^(۲)

یغوب علیپوری^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2026.93175.1355

چکیده در این پژوهش، پس از شناسایی پارامترهای مؤثر بر زمان پروژه‌های عمرانی، از رویکرد تفکر سیستمی و روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای ریشه‌یابی علل، یافتن روابط و بازخورد بین عوامل مختلف به منظور شناخت و یادگیری جامع‌تر استفاده شد. برای شناسایی عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه دلفی با ۲۲ نفر از خبرگان بهره گرفته شد. پس از آن، مدل‌های مفهومی ذهنی مبتنی بر حلقه‌های علت و معلولی برای شناخت بهتر روابط بین عوامل شناسایی شده ایجاد شد و سپس با استفاده از رویکرد حاکم بر روش شبیه‌سازی پویایی سیستم، به تدوین یک نمودار حالت جریان برای درک بهتر و یادگیری و همچنین تحلیل پویای مسئله تحقیق پرداخته شد. صحت مدل جریان انباشت با آزمون‌های ارزیابی ساختاری، رفتار ساختاری، حد نهایی و بازسازی رفتار مرجع سنجیده شد و چهار سناریوی اصلی تدوین و بر اساس آن‌ها رفتار و عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در چهار سناریو نشان داد مؤثرترین اهرم‌ها برای تسریع پروژه، به حداقل رساندن تغییرات دامنه/روش ناشی از کارفرما و سرمایه‌گذاری استراتژیک در توسعه منابع انسانی (آموزش و جبران خدمات عادلانه) است، که با بهبود کارایی سیستم، به طور قابل توجهی تأخیرات پروژه را کاهش می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده تأییدکننده عملکرد صحیح مدل پیشنهادی است. امید است که به واسطه درک حاصل‌شده از سیستم پیشنهادی، زمینه و مبنای لازم برای اتخاذ تصمیمات بهتر و کارآمدتر در حوزه مدت زمان پروژه‌ها فراهم شود.

واژه‌های کلیدی برنامه زمان‌بندی، مدیریت پروژه، پویایی‌شناسی سیستم‌ها، حلقه‌های علت و معلولی، پروژه‌های عمرانی.

System Dynamic Based Project Duration Simulation of Construction Projects

Yaghoub Alipouri

Zahra Tajabadi

Abstract In this study, after identifying the factors and parameters affecting the duration of construction projects, the system thinking approach and system dynamics method are used to find the root causes, relationships and feedback between the factors. Library studies were used to identify the factors affecting the duration of the projects and Delphi interviews with 22 experts were used to improve and supplement these factors. Then, a conceptual model based on causal loops is presented to better understanding of the relationships between variables. Afterwards, using the approach governing the system dynamics method, a flow diagram is compiled to better understand and learn and also to more dynamic analysis of the research problem. The accuracy of the accumulation flow model has been measured with some tests, including reviewing and evaluating the behavior and structure of the model, and also four main scenarios were formulated for implementing different executive policies. Based on the results, the behavior and performance of the model have been evaluated and analyzed. The results obtained from the evaluations confirm the correct performance of the proposed model. Simulation results across four scenarios demonstrated that the most effective levers for project acceleration are the minimization of owner-driven scope/method changes and the strategic investment in human resource development (training and fair compensation), which significantly mitigate project delays by improving system efficiency. It is hoped that the understanding gained from this learning system will provide the necessary basis for making better and more efficient decisions in the field of project time

Key words Scheduling program, Project management, Systems dynamics, Causal loops, Construction projects.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۲/۰۴ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، آزمایشگاه فناوری های نوین در مدیریت ساخت، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی

Email: y.alipouri@kntu.ac.ir

خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مقدمه

مدت زمان انجام یک طرح سازه‌ای در مقدار سرمایه‌گذاری و بازدهی سرمایه هزینه‌شده در آن طرح، رابطه مستقیم دارد. با ازدیاد مدت زمان اجرا و دیرکرد پروژه نسبت به برنامه زمان‌بندی‌شده سرمایه زیادی اعم از سرمایه مالی، نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات در پروژه بلوکه و تلف می‌شود. ساختار پروژه‌های ساختمانی از فاکتورهای مختلفی اثر می‌پذیرد. شرایط اقتصادی، موقعیت جغرافیایی، دسترسی به مصالح، نیروهای متخصص و کاری بومی، مدیریت دستگاه‌های اجرایی و فرهنگ بومی منطقه در تسریع یا تأخیر پروژه اثر می‌گذارد. بنابراین، هر منطقه‌ای عوامل اثرگذار مربوط به خود را بر روی زمان پروژه‌ها دارد. از این رو، شناخت پارامترها و عوامل مؤثر در تعیین مدت زمان پروژه‌های عمرانی برای هر منطقه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد و لازم است انجام بگیرد.

شکاف در برنامه زمان‌بندی معلول عللی است که شناخت آن‌ها و تعیین اهمیت این عوامل می‌تواند ما را در ارائه راهکار اجرایی مناسب برای پروژه‌ها یاری کند [1]. اگر زمان تحقق پروژه بیشتر از زمان برنامه‌ریزی پروژه باشد، ممکن است کاهش سود پروژه، اتلاف فرصت‌ها، ازدیاد هزینه‌های پروژه و مهم‌تر از همه اختلال در توجیه اقتصادی پروژه‌ها مطرح باشد. از این روی، لازم است از رخداد عوامل مخرب در زمان‌بندی پروژه که منجر به تطویل آن می‌شود جلوگیری به عمل آید تا بتوان به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان صرف‌شده برای انجام پروژه نائل آمد. مطالعات و تلاش‌های متفاوتی به منظور مدیریت بهتر پروژه‌ها صورت گرفته است. علی‌رغم همه این تلاش‌ها، پروژه‌ها در اکثر مواقع با شکست روبه‌رو می‌شوند. انحراف از برنامه و افزایش هزینه‌ها به قانونی برای اکثر پروژه‌ها تبدیل شده است و نبود روشی کل‌نگر و در نهایت عدم توجه به بعد غیرخطی و پویای پروژه‌ها به معضلی برای مدیران پروژه تبدیل شده است [2].

در پژوهش حاضر، با استفاده از ابزار پویایی سیستم‌ها (SD) سعی بر آن است تا پس از شناسایی عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها، نحوه ارتباط و تأثیر این عوامل بر روی همدیگر و بر روی زمان پروژه‌های عمرانی مشخص شود تا از طریق مدل پیشنهادی ابزار مناسبی برای مدیریت پروژه‌ها فراهم آید. این پژوهش از حیث به‌کارگیری ابزار پویایی سیستم‌ها در بررسی عوامل مؤثر بر زمان پروژه‌ها از نوآوری برخوردار است.

بر این اساس، ادامه این نوشتار به این صورت سازمان‌دهی شده است که در ابتدا پیشینه پژوهش مرتبط با موضوع پژوهش در دو زیربخش شناسایی پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها و کاربردهای ابزار پویایی سیستم‌ها در صنعت ساخت‌وساز، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، در بخش سوم، روش تحقیق این پژوهش تشریح می‌شود. یافته‌های تحقیق در بخش چهارم تبیین می‌شود و تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری‌شده و همچنین تشریح مدل پیشنهادی در این بخش فراهم می‌شود. در این بخش، همچنین بر روی نتایج و مدل‌ها بحث و بررسی شده و چهار سناریوی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. نهایتاً، در بخش پنجم نتیجه‌گیری این پژوهش ارائه شده و نوآوری‌های پژوهش ذکر می‌شود و همچنین پیشنهادات محقق برای پژوهش‌های آتی تشریح می‌گردد.

پیشینه پژوهش

با توجه به هدف این پژوهش که شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی - سیستم مدت زمان پروژه‌های عمرانی است، لازم است از دو حیث به بررسی پیشینه پژوهش پرداخته شود؛ نخست مقالات و منابع مرتبط در حوزه بررسی عوامل و پارامترهای مرتبط با زمان و برنامه زمان‌بندی پروژه بررسی شود و سپس پیشینه پژوهش در راستای کاربرد روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها در صنعت ساخت-وساز بررسی گردد.

پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌ها

سامباسیوان و سون [3] در سال ۲۰۰۷ در پژوهش خود ده دلیل مهم تأخیرات در صنعت ساخت‌وساز مالزی را شامل مواردی می‌دانستند که عبارت بود از برنامه‌ریزی نامناسب پیمانکار عمومی، مدیریت ضعیف کارگاه ساختمانی توسط پیمانکار عمومی، تجربه ناکافی پیمانکار عمومی، تأمین مالی نامناسب و پرداخت ناکافی کارفرما برای کار تکمیل‌شده، مشکلات با پیمانکاران فرعی، کمبود مواد و مصالح، مشکلات تأمین نیروی کار، دسترسی به تجهیزات، عدم ارتباط کافی بین ذی‌نفعان و اشتباهات اجرایی. از نظر این پژوهشگران شش اثر اصلی تأخیر عبارتند از افزایش زمان، افزایش هزینه، ایجاد اختلافات، داوری و دعاوی قضایی و ترک کل کار [3]. ندکوگری و همکاران [4] در سال ۲۰۰۸ بر اساس نتایج پژوهش خود مطرح کردند که به

اولابی و همکاران [9] در سال ۲۰۱۴ مهم‌ترین علل تأخیر در پروژه‌های عمرانی را ضعف در تأمین مالی پروژه، تغییرات نقشه، نبود ارتباط مؤثر بین طرف‌های درگیر در پروژه، کمبود اطلاعات کافی از سوی مشاور، تصمیم‌گیری ضعیف و ورشکستگی پیمانکار معرفی کردند. همچنین مشکلات کنترل پروژه، اشتباهات و اختلافات در متن قرارداد، در دسترس نبودن و عدم کارکرد تجهیزات، اشتباهات حین ساخت، آب و هوای بد، نوسانات قیمتی مواد و مصالح و همچنین ساختار سازمانی ضعیف نیز از جمله سایر عوامل تأثیرگذار در تأخیر یک پروژه در این مقاله معرفی شدند [9]. تفضلی و شرستا [10] نیز در سال ۲۰۱۷ علل تأخیر در پروژه‌های ساخت‌وساز ایالات متحده را شناسایی کردند. این پژوهشگران، با توجه به نتایج پژوهش خود، همکاری کارفرما با تیم ساخت‌وساز، کیفیت طراحی و ارتباط میان ذی-نفعان را مهم‌ترین عوامل مربوط به تأخیر در مدت زمان پروژه‌ها برشمردند. همچنین، تأکید کردند که دو اقدام اساسی برای کاهش خطر تأخیر، شناخت علل تأخیر و دانستن اهمیت و وزن هر کدام از علل تأخیر است [10].

با توجه به پژوهش‌های فوق، مشخص می‌شود که برخی از علل تأخیر پروژه‌ها بین کشورهای مختلف مشترک هستند و برخی خیر. از نظر عباس‌نژاد و ایزدی دلیل این امر وجود ارتباط نزدیک بین تأخیر و فرهنگ کاری، سبک مدیریت، روش‌های ساخت، شرایط جغرافیایی، ذی‌نفعان، سیاست دولت، وضعیت اقتصادی و در دسترس بودن منابع در یک کشور است؛ این‌ها مفاهیمی هستند که اغلب از کشوری به کشور دیگر متفاوت هستند [7]. اکثریت مطالعات انجام‌شده در زمینه عوامل مؤثر بر تأخیرها، با رویکردهای آماری و مبتنی بر جمع‌آوری نظرات از طریق پرسش‌نامه انجام گرفته است. با وجود اینکه عوامل تأخیر پروژه‌ها در صنعت ساخت‌وساز ایران توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است، اما جامع بودن عوامل معرفی شده توسط این پژوهش‌ها مورد تردید نویسندگان گزارش حاضر است و به همین دلیل، در این پژوهش در راستای تکمیل‌تر کردن عوامل و پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی، علاوه بر مطالعات جامع کتابخانه‌ای از مصاحبه نیمه‌ساختار یافته با افراد خبره در حوزه صنعت ساخت‌وساز نیز استفاده شده است که شرح چگونگی آن در روش تحقیق آمده است.

تأخیر افتادن یک پروژه ساخت‌وساز اغلب ناشی از تعامل پیچیده ترکیبی از رویدادها است که برخی از آن‌ها ریسک‌های پیمانکار و برخی دیگر ریسک‌های کارفرمای پروژه هستند. این پژوهشگران گزارش کردند که سطح ضعیف دانش، درک و مهارت‌های مورد نیاز اغلب موانعی را برای اتمام به‌موقع و مطابق با زمان‌بندی یک پروژه ایجاد می‌کنند. موانع دیگر از نظر این پژوهشگران عبارتند از اطلاعات ناکافی پروژه، به‌روزرسانی ضعیف زمان‌بندی‌ها و استفاده از زمان‌بندی‌هایی که بر پایه شبکه-های مبتنی بر روش مسیر بحرانی تهیه نشده‌اند [4]. جی‌سوایس و همکاران [5] در سال ۲۰۰۸ مشکلات اقتصادی پیمانکار، دخالت کارفرما، مدیریت پروژه ضعیف پیمانکار، عدم وجود نیروی کار ماهر و کمبود متخصصان در دستگاه پیمانکار را مهم‌ترین دلایل تأخیر زمان پروژه‌ها در کشور اردن اعلام کرده‌اند [5]. پوررستم و اسماعیل [6] در سال ۲۰۱۲ مهم‌ترین علل تأخیر در پروژه‌های ایران را اولویت‌بندی کردند. عوامل شناسایی شده توسط این پژوهشگران عبارتند از تأخیر در پرداخت به موقع از سوی کارفرما، تغییرات درخواست توسط کارفرما حین اجرا، مدیریت ضعیف کارگاه، مشکلات مالی پیمانکار، تأخیر در بررسی و تأیید اسناد طراحی توسط کارفرما، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ناکارآمد توسط پیمانکار، مشکلات و اختلافات در اسناد طراحی و شرایط بد آب‌وهوایی [6].

عباس‌نژاد و ایزدی [7] نیز در سال ۲۰۱۳ عوامل اصلی تأخیر در پروژه‌های ساخت‌وساز ایران را شناسایی کردند که عبارتند از صورت‌های مالی پرداخت‌نشده، تغییرات در محدوده پروژه‌ها و مداخلات کارفرمایان، تحویل پروژه به پیمانکاران ارزان‌تر در فرایند برگزاری مناقصات و مدیریت ضعیف کارگاه ساختمانی توسط پیمانکاران. تمام عوامل تأخیر در تضاد با نیازهای صنعت ساخت‌وساز هستند. یافته‌ها نشان می‌دهد که مهم‌ترین علت تأخیر، فقدان دانش کافی در مورد ماهیت صنعت ساخت‌وساز در میان اعضای درگیر در پروژه‌ها است [7]. در یک مقاله مروری، موکاا و همکاران [8] در سال ۲۰۱۳ تأخیر در پرداخت‌ها به پیمانکار، ضعف مالی پیمانکار، تأخیر در تصویب اسناد، تغییرات عمده در محدوده پروژه، تأخیر در تأمین مواد، خرابی تجهیزات، بهره‌وری پایین کارگران و شرایط بد آب‌وهوایی را به‌عنوان علل اصلی تأخیر در پروژه شناسایی کرده‌اند [8].

پویایی سیستم‌ها و صنعت ساخت‌وساز

اولین کار پژوهشی بر روی کاربرد پویایی سیستم در مدیریت پروژه به‌وسیله لاینیز و همکارانش [11] در سال ۱۹۶۴ انجام شد که در این مورد، مدل پویایی سیستم به‌عنوان ابزاری برای حل تعارض بین نیروی دریایی آمریکا، به‌عنوان کارفرما، و شرکت اینگال، به‌عنوان پیمانکار، استفاده شد. این مدل به‌عنوان ابزار تشخیص برای موشکافی کردن علت انحراف از هزینه و برنامه استفاده شد [11]. رپنینگ [12] در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها به بررسی روند توسعه تعهد کارکنان در پذیرش نوآوری در سازمان و پروژه‌ها پرداخت. وی با مدل کردن این روند و بررسی سیاست‌های مختلف به شناسایی عوامل مهمی چون تعهد کامل مدیران در زمان بین قبول نوآوری تا مشاهده نتایج و عوامل بسیار دیگری پرداخت [12]. هویک [13] در سال ۲۰۰۱ از روش پویایی سیستم‌ها برای پیگیری مواردی همچون بالا رفتن هزینه‌ها، افزایش مدت زمان نسبت به برنامه زمانی پروژه‌ها و بررسی تأثیر تأخیرات و به هم ریختگی‌ها بر ابعاد پروژه استفاده کردند [13].

کریتمارا و همکاران [14] در سال ۲۰۰۲ طی تحقیقی با در نظر گرفتن پنج پروژه بزرگ طراحی و ساخت در تایلند اقدام به مشخص کردن عوامل مهم در ایجاد انحراف زمانی و هزینه‌ای پروژه‌ها از طریق مصاحبه با مدیران پروژه و طراحان کردند. این پژوهشگران همچنین اقدام به ساخت مدل پویایی سیستم از عوامل مهم در ایجاد انحراف زمانی کردند. از محدودیت‌های این پروژه می‌توان به در نظر نگرفتن عواملی چون شرایط اقتصادی و عوامل محیطی در مدل اشاره کرد [14]. لاو و همکاران [15] نیز در سال ۲۰۰۲ به منظور درک تأثیر تغییرات و خطاهای طراحی و ساخت که منجر به دوباره‌کاری‌ها بر سیستم مدیریت پروژه می‌شوند، از روش پویایی سیستم استفاده کردند [15]. در همین سال، بونر و همکاران [16] به بررسی عوامل مرتبط با اشتیاق، تعهد و اتحاد افراد تیم پروژه با ایجاد یک مدل پویایی سیستم پرداختند و این موضوع را روشن ساختند که اشتیاق و تعهد در پروژه‌های ساخت‌وساز در صورتی به وجود می‌آید که همکاری و مشارکت در محیط کار ساخته و پرورانده شود [16]. هویک [17] در سال ۲۰۰۳ در پژوهش خود به‌کارگیری روش پویایی-سیستم برای تجزیه و تحلیل اختلال و تأخیر در پروژه‌های پیچیده را برای دعاوی قضایی مورد بررسی قرار داد و هدف تحقیق را

با در نظر گرفتن اینکه آیا روش پویایی سیستم قادر به برآورده کردن اهداف مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل دعاوی قضایی است یا خیر، دنبال کرد [17].

چنگ و همکاران [18] در سال ۲۰۰۷ تأثیر فشرده‌سازی برنامه زمان‌بندی را بر بهره‌وری نیروی کار صنعت ساخت‌وساز بررسی کردند و مدلی را ارائه دادند که فرایند این تأثیر را نشان دهد [18]. در سال ۲۰۰۹ سبط و همکاران [19] مطالعه‌ای بر روی مدیریت پیوسته تهدیدها و فرصت‌های پروژه با استفاده از روش پویایی سیستم انجام دادند. در این مطالعه با تأکید بر این موضوع که عدم قطعیت در یک پروژه محدود به تهدیدها (جنبه منفی) نیست، به بررسی فرصت‌ها (جنبه مثبت) در کنار تهدیدها به عنوان عدم قطعیت یک پروژه پرداخته شد [19]. دنگریلد و همکاران [20] در سال ۲۰۱۰ اقدام به شناسایی و ایجاد مدلی پویا از عوامل تأثیرگذار بر رقابت در پروژه‌های ساخت کردند. آن‌ها مدل را در چهاربخش اصلی شامل قراردادهای کار در جریان، سرمایه‌گذاری و منابع انسانی تنظیم کردند و به بررسی سیاست‌های گوناگون در زمینه عوامل رقابتی در پروژه‌های ساخت‌وساز با استفاده از روش پویایی سیستم اقدام کردند [20]. مادسلی و آل‌جیوری [21] نیز در سال ۲۰۱۰ تحقیقی در زمینه مشخص کردن عوامل تأثیرگذار بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز و همچنین چگونگی ارتباط و میزان اهمیت این عوامل با استفاده از روش پویایی سیستم انجام دادند. در نهایت عواملی چون برنامه‌ریزی و کنترل را از عواملی معرفی کردند که ارزش صرف وقت و هزینه در مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز را دارند [21].

وان و همکاران [22] در سال ۲۰۱۲ اقدام به شبیه‌سازی مدلی پویا از دو پروژه ساختمانی در هنگ‌کنگ کرد. از نتایج این تحقیق می‌توان به اهمیت تلاش‌های مدیریتی در زمینه افزایش هماهنگی در مرحله برنامه‌ریزی، مشخص ساختن تصمیمات طراحی برای کارهایی که به هم وابسته‌اند و بهبود شرایط مقدم بر تجهیز کارگاه نام برد [22]. الوانچی و همکاران [23] در سال ۲۰۱۲ در مدل‌های خستگی، پویایی تجدید نظر شده را ایجاد کردند که می‌تواند توسط مدیر پروژه مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق چهار متغیر اصلی تأثیرگذار از دست دادن بهره‌وری نیروی کار، خستگی ذهنی، جسمی و اضافه‌کاری بررسی شده است [23]. گوی‌یه و همکاران [24] نیز در سال ۲۰۱۲ تحقیقی در زمینه مدیریت ضایعات پروژه‌های ساخت‌وساز انجام داده‌اند، آنان با

شامل استفاده از فناوری‌های کم پسماند و عملکرد مدیریت پسماند در سایت است می‌تواند تا ۲۷/۰۵ درصد پسماند حاصل از ساخت را کاهش دهد [30]. ابوطالب و ال‌ادوای [31] در سال ۲۰۱۸ در پژوهش خود مطرح کردند که برای بهبود تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساختمانی، مدل‌های پویا برای درک پویایی پروژه‌های پیچیده طراحی شده‌اند که روش‌های برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری سنتی فاقد آن است. با این حال، هر یک از مدل‌های پویای موجود فقط بر روی پارامترهای محدودی متمرکز می‌شوند که بر چرخه مدیریت پروژه تأثیر می‌گذارند [31]. آن‌ها در پژوهش خود ۲۵ پارامتر پویا را معرفی کردند و بر اساس بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که، هیچ کدام از مدل‌های پیشنهاد شده تا آن سال همه این ۲۵ پارامتر پویا را در بر نگرفته‌اند و حداکثر تعداد پارامترهایی که به طور همزمان مدل‌سازی شده‌اند ۱۸ پارامتر است [31]. این مسئله نیازی جدی به یک مدل SD را ایجاد می‌کند که بتواند حداکثر پارامترهای پویا را برای مدیریت جامع‌تر پروژه‌های ساختمانی ادغام کند.

زین قاضی کفاهی و همکاران [32] در سال ۲۰۲۰ در پژوهش خود بیان کردند که مدل‌سازی پویایی سیستم برای کمی-سازی تأثیر تغییر سفارشات بر بهره‌وری نیروی کار تأثیر به‌سزایی دارد. مدل توسعه‌یافته در این مطالعه با استفاده از یک بسته نرم‌افزاری SD به نام Vensim ساخته شده است [32]. محمدرضایی طیبی و همکاران [33] در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای در خصوص تخمین کیفیت کار پیمانکاران صنعت ساختمان با استفاده از روش پویایی سیستم انجام دادند. در این مطالعه با استفاده از ایجاد حلقه‌های علیتی ایجاد شده مبتنی بر عوامل مؤثر بر کیفیت کار و نظر متخصصان، کیفیت کار انجام‌شده توسط پیمانکاران فرعی صنعت ساختمان مورد پیش‌بینی قرار گرفته - است [33]. گلشنی‌منش و همکاران [34] نیز در سال ۲۰۲۱ با استفاده از روش پویایی سیستم مطالعه‌ای در خصوص پیش‌بینی توسعه صنعت ساخت‌وساز در ایران انجام دادند. در این مطالعه با استفاده از شاخص‌های توسعه پایدار از جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، وضعیت ساخت‌وساز در آینده مورد پیش‌بینی قرار گرفته است [34]. چن ونگ و همکاران [35] در سال ۲۰۲۲ با استفاده از ترکیب روش پویایی سیستم و وزن‌دهی آنتروپی، مدلی برای کنترل ریسک‌های تزریق ملات در ساختمان‌های پیش‌ساخته ارائه دادند. در این رویکرد، از ابزارهای

ارائه مدلی در این زمینه با در نظر گرفتن متغیرهای اصلی که بر عملکرد محیطی ضایعات پروژه‌های ساخت‌وساز تأثیر دارند، اقدام به شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار iThink کردند [24]. وانگ یوجینگ [25] در سال ۲۰۱۲ در پژوهش خود از روش پویایی سیستم در برنامه‌ریزی و کنترل یک پروژه ساختمانی استفاده کردند و معتقدند که ساختار اصولی مبتنی بر توسعه پروژه ساخت‌وساز مدل SD با تمرکز بر جنبه‌های مرز مدل، ساختار مدل پایه، معادلات متغیر، حلقه‌های دوباره‌کاری و حلقه‌های کنترل مشخص می‌شوند [25].

هان و همکاران [26] در سال ۲۰۱۳ یک مدل پویایی سیستم ایجاد کردند تا پویایی و تنوع خطاهای طراحی را که منجر به دوباره‌کاری و اصلاح طراحی می‌شوند، شناسایی کنند [26]. نصیرزاده و نجدهی [27] در همین سال یک مدل SD را برای توصیف تأثیر متغیرهای مختلف بر بهره‌وری نیروی کار طراحی کردند. با استفاده از این مدل، مدیر پروژه می‌تواند تأثیر پاسخ‌های مختلف را برای افزایش بهره‌وری نیروی کار ارزیابی کند [27]. وارهو [28] در سال ۲۰۱۳ یک مدل SD را برای بررسی پیشنهاد قیمت در قراردادهای طراحی - مناقصه - ساخت پروژه‌های ساختمانی ارائه کرد و نشان داد که عوامل مختلف چگونه می‌توانند بر بهره‌وری نیروی کار تأثیر بگذارند. این مدل دارای هر دو متغیر برون‌زا و درون‌زا است. متغیرهای درون‌زا شامل استخدام کارگران، ساعات اضافه‌کاری، میزان تولید خطا، تلاش کلی اعمال شده، کار انجام شده و کارگران اخراج شده و متغیرهای برون‌زا نیز شامل بهره‌وری روزانه کارگر، ساعت تخمین زده شده کار پروژه، شناسایی تغییر دامنه، زمان لازم برای استخدام کارگر، زمان تغییرات و نرخ تخمین پایه کار است [28]. نصیرزاده و همکاران [29] در سال ۲۰۱۳ به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدیریت کیفیت در پروژه‌های ساختمانی با استفاده از روش پویایی سیستم پرداختند. در این پژوهش، ابتدا در چارچوب حلقه‌های علیتی و بازخوردها، تمامی عوامل داخلی و خارجی مؤثر بر مدیریت کیفی یک پروژه تعیین شدند و سپس با استفاده از ترکیب منطق فازی و پویایی سیستم، مدل‌سازی صورت پذیرفت [29].

ژیکوندینگ و همکاران [30] در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی با بهره‌گیری از تئوری رفتارهای برنامه‌ریزی شده و پویایی سیستم، منافع زیست‌محیطی مدیریت کاهش پسماند را مورد شبیه‌سازی قرار دادند. نتیجه این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش منابع که

بازخوردی، متغیرهای کلیدی و رویکردهای مدل‌سازی (مانند بهره‌وری، کیفیت، و ریسک) است که به عنوان علل ریشه‌ای، به صورت غیرمستقیم بر پویایی مدت زمان پروژه‌های ساختمانی تأثیر می‌گذارند. از پیشینه پژوهش فوق نتیجه می‌شود که اگر چه مدل‌های متعددی برای تحلیل عوامل تأخیر یا اثرات BIM بر زمان پروژه با استفاده از پویایی سیستم‌ها ارائه شده است (نظیر مطالعات اخیر در خصوص عوامل ریسک تأخیر با SD و تأثیر BIM بر زمان پروژه در عربستان)، اما تا کنون مدلی جامع ارائه نگردیده است که:

۱. عوامل شناسایی شده در پروژه‌های ایران (که در این پژوهش استفاده شده) را در ساختار SD ادغام کند.
 ۲. ساختار دینامیک‌های علی و معلولی مختص به پروژه ایران را با تمرکز بر حلقه‌های تقویتی و تعادلی تحلیل کند.
 ۳. عوامل مؤثر بر روی زمان پروژه‌ها را به صورت کامل شناسایی کند و به صورت سیستمی و با رویکرد تفکر سیستمی (SD) به تعامل پیچیده تمام عوامل مؤثر بر مدت زمان بپردازد.
- این موارد همان شکاف‌های موجود در تحقیقات پیشین است که منجر به ایجاد احساس نیاز و ایجاد انگیزه در نویسندگان گزارش حاضر برای تحقیق و بررسی بر روی این موضوع گردیده است.

روش تحقیق

هدف این تحقیق شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم مدت زمان پروژه‌های عمرانی است. از منظر روش جمع‌آوری داده، روش پویایی سیستم برای جمع‌آوری داده‌های اولیه و شبیه‌سازی کامپیوتری از روش‌های کیفی استفاده می‌کند و در توصیف روابط بین متغیرها و اعتبارسنجی بعد از انجام شبیه‌سازی از روش‌های کمی بهره می‌برد [40]، بنابراین روش جمع‌آوری داده در تحقیق حاضر روش ترکیبی است. در این پژوهش، برای شناسایی عوامل و پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی در ابتدا از مطالعات کتابخانه‌ای بهره گرفته شد و پس از آن به منظور تأیید این عوامل و پارامترهای شناسایی شده و شناسایی پارامترهای جدید، با استفاده از روش دلفی مصاحبه‌ای نیمه‌ساختاریافته با پیمانکاران، مهندسان مشاور، کارفرمایان و سایر متخصصان صنعت ساخت‌وساز که با مدیریت زمان پروژه‌ها آشنایی داشتند، صورت گرفت. در این راستا، پرسشنامه‌ای باز - پاسخ در دو

مدل‌سازی مانند نمودارهای حلقه‌های علیتی و نمودار حالت جریان استفاده شد تا تعاملات غیرخطی میان ریسک‌ها تحلیل شود [35].

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که کاربرد SD همچنان در حال گسترش است. برای مثال، داداشی حاجی و بهنام [36] در سال ۲۰۲۳ چارچوبی تلفیقی از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و پویایی سیستم‌ها برای ارزیابی شاخص‌های پیشرو ایمنی (SLI) در پروژه‌های ساخت‌وساز ارائه کردند. شاخص‌های پیشرو ایمنی که به طور پیش‌گیرانه وقوع خطرات را پیش‌بینی می‌کنند، ابزار مهمی برای بهبود ایمنی هستند. این چارچوب از مدل پویایی سیستم‌ها برای بررسی روابط علی میان شاخص‌ها و از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان برای تصویری‌سازی داده‌های مکانی - زمانی استفاده می‌کند [36]. ریاض و همکاران [37] در سال ۲۰۲۳ به بررسی عوامل کلیدی در پیاده‌سازی مدیریت کیفیت جامع (TQM) در صنعت ساخت‌وساز با تمرکز بر کشورهای در حال توسعه پرداخته است. با استفاده از رویکرد تفکر سیستمی و مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها، این پژوهش پیچیدگی‌ها و روابط علی میان عوامل مؤثر بر مدیریت کیفیت جامع را تحلیل کرده است. در این تحقیق، ابتدا با مروری جامع بر ادبیات، ۲۸ عامل کلیدی شناسایی شد و سپس با استفاده از پرسش‌نامه‌های مقدماتی و تفصیلی، ۱۲ عامل مهم از جمله تعهد مدیریت ارشد، رضایت مشتری، فرهنگ کیفی سازمانی و هزینه‌های اولیه بالا اولویت‌بندی شدند و در نهایت برای تجسم روابط میان این عوامل، نمودارهای حلقه‌های علیتی طراحی و مدل پویایی سیستم توسعه یافتند [37]. الاریحسی و همکاران [38] تأثیر BIM بر زمان پروژه در عربستان سعودی را با استفاده از پویایی سیستم‌ها شبیه‌سازی کرده‌اند و ژائو و همکاران [39] بر عوامل ریسک تأخیر پروژه ساخت‌وساز با مدل SD تمرکز کردند. اگر چه برخی از این مطالعات به تحلیل عوامل مؤثر بر زمان/تأخیر پرداخته‌اند، اما پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های منطقه ایران و تحلیل‌های کیفی دلفی، قصد دارد یک مدل ساختاری جامع‌تر ارائه دهد که تعاملات دینامیکی بین تمامی عوامل مؤثر بر مدت زمان را به صورت یکپارچه، و نه صرفاً متمرکز بر یک جنبه (مانند ریسک یا BIM)، مدل‌سازی کند.

هدف از این مرور جامع، صرفاً محدود به تحقیقات با عنوان «مدت زمان پروژه» نیست، بلکه به دنبال شناسایی ساختارهای

تفکر سیستمی است و ابزاری برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشد [44]. مدل‌های SD در دسته مدل‌های علت و معلولی دسته‌بندی می‌شوند و با طی دو مرحله مدل‌سازی کیفی و مدل‌سازی کمی تهیه می‌شوند. در مدل‌سازی کیفی SD با کمک حلقه‌های علت و معلولی فرضیه‌های علی در طول تدوین مدل نشان داده می‌شوند تا به این وسیله نمایش ساختار به صورت کامل و جامع امکان‌پذیر شود [45]. در مدل‌سازی کمی با تدوین نمودار حالت جریان، که کامل‌ترین نمودار در مدل‌سازی پویایی سیستم است، ساختار ریز و جزئی جریان سیستم نشان داده می‌شود تا ایجاد و تدوین مدل ریاضی برای شبیه‌سازی تسهیل شود [46]. نمودار حالت جریان بین زیرسیستم‌های فیزیکی و اطلاعاتی تفاوت قائل می‌شود و همچنین انواع مختلف متغیرها و توابع را طبقه‌بندی می‌کند. متغیرهای سطح در نمودار حالت جریان درون چهارضلعی نمایش داده می‌شوند و متغیر نرخ در این نمودار با شیر سوپاپ‌دار نمایش داده می‌شود، زیرا متغیر نرخ تصمیمی است که جریان ورودی و خروجی به نمودار سطح را کنترل می‌کند. سومین نوع متغیرها از نوع کمکی هستند که از لحاظ تئوری اختیاری هستند، اما بر متغیر نرخ تأثیر می‌گذارند و از متغیر سطح تأثیر می‌پذیرند و همچنین بر تأثیرگذاری متغیر نرخ بر متغیر سطح اثرگذار هستند. تعریف متغیرهای نرخ به درک و فهم جزئیات مدل کمک می‌کند [44]. روابط مربوط به متغیرهای سطح و نرخ در حالت پیوسته به صورت روابط (۱) و (۲) و در حالت گسسته به صورت روابط (۳) و (۴) است:

$$\text{level}(t) = \int (\text{inflow}(t) - \text{outflow}(t))dt + \text{level}(0) \quad (1)$$

$$\text{Rate}(t) = \frac{d(\text{level}(t))}{dt} = \text{Netchangein} \quad (2)$$

$$\text{level}(k) = \text{level}(j) + \Delta T(\text{Rate}(jk)) \quad (3)$$

$$\text{Rate}(kl) = \text{Inflow}(k) - \text{outflow}(l) \quad (4)$$

که در این روابط، رابطه (۱) معرف متغیر سطح است که حاصل انباشت متغیر نرخ است. متغیرهای سطح، انباشت و یا تجمیع یک جریان در طول زمان را نشان می‌دهند. متغیرهای سطح را می‌توان در هر نقطه از زمان اندازه‌گیری کرد. رابطه (۲) معرف متغیر نرخ است. متغیرهای نرخ در یک سیستم همان متغیرهای تصمیم هستند که توسط ساختار سیاست‌ها و

بخش سؤالات عمومی و تخصصی طراحی گردید و در اختیار آزمودنی‌های مصاحبه قرار گرفت و فرایند اصلاح پرسشنامه، ارسال مجدد آن به خبرگان و دریافت پاسخ‌ها تا زمان رسیدن به همگرایی در نظرات پیگیری شد. تأثیر ارتباط بین تعداد افراد مصاحبه‌شونده در روش دلفی با دقت و کارآمدی این روش توسط براکهورف [41] و بورجه و مورنیگان [42] بررسی شده است و هیچ کدام ارتباط مناسبی پیدا نکردند. در این پژوهش، به منظور اطمینان از جامعیت دیدگاه‌ها، خبرگان از سه گروه اصلی شاغل در صنعت ساخت‌وساز (پیمانکاران، مهندسان مشاور و کارفرمایان) انتخاب شدند تا تنوع نقش‌ها و تجربیات آنان در نتایج لحاظ گردد. هالوول و گامباتر [43]، با توجه به اینکه در اکثر مطالعات پیشین تعداد افراد شرکت‌کننده در مصاحبه دلفی ۸ تا ۱۶ نفر بوده است، حداقل تعداد ۸ نفر را برای دستیابی به همگرایی آرا و اعتبار نتایج در مصاحبه دلفی مناسب دانستند. از این رو، در پژوهش حاضر، بر اساس معیار کفایت عددی ذکر شده در مطالعات دلفی و به منظور رسیدن به دقت بالا در انجام مصاحبه و همچنین با توجه به تعداد خبرگان در دسترس، ۲۲ نفر خبره به عنوان شرکت‌کننده در مصاحبه دلفی انتخاب شدند و پرسش‌نامه این مصاحبه بین آن‌ها توزیع شد. انتخاب ۲۲ نفر خبره در این پژوهش ضمن رعایت استانداردهای روش‌شناسی، امکان تحلیل عمیق و تشکیل چندین دور نظرخواهی را نیز فراهم کرد. برای دستیابی به یک دیدگاه جامع و متعادل، نمونه خبرگان از نظر نقش و سابقه به دقت طبقه‌بندی شدند. ترکیب خبرگان عبارت بودند از: الف) ۸ نفر از مدیران ارشد پروژه‌های کارفرمایی (شامل نمایندگان سازمان‌های دولتی و خصوصی)، ب) ۷ نفر از مدیران عامل و مدیران فنی شرکت‌های پیمانکاری سطح اول، و ج) ۷ نفر از مدیران فنی و اجرایی دفاتر مهندسی مشاور. همچنین، تمامی خبرگان شرکت‌کننده دارای حداقل ۱۵ سال سابقه فعال در مدیریت پروژه‌های عمرانی و آشنایی با چالش‌های زمان‌بندی بودند. این ترکیب متوازن تضمین می‌کند که عوامل شناسایی شده منعکس‌کننده دیدگاه‌های متفاوت ذی‌نفعان اصلی پروژه باشد.

پس از شناسایی عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی، نحوه ارتباط و تأثیر این عوامل بر همدیگر و بر روی مدت زمان یک پروژه با بهره‌گیری از روش پویایی سیستم مدل‌سازی شد و از نرم‌افزار Vensim برای انجام شبیه‌سازی استفاده گردید. پویایی سیستم‌ها یک روش شبیه‌سازی برگرفته از

نتایج و بحث

پس از بررسی پیشینه پژوهش و انجام مصاحبه، ۴۷ پارامتر مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی شناسایی شدند که ۴۳ تا از آن‌ها از مطالعات کتابخانه‌ای استخراج شدند و به تأیید خبرگان رسیدند و پارامترهای نرخ پیشرفت پروژه، تکمیل چارت سازمانی، سرعت انجام کارها و بازده ماشین‌آلات در مصاحبه نیمه-ساختاریافته اضافه شدند. تمام پارامترهای شناسایی شده از مقالات و مصاحبه در جدول (۱) آورده شده است.

استراتژی‌های سیستم تعیین می‌شوند. متغیرهای نرخ به صورت جریان‌های ورودی و خروجی یک متغیر سطح هستند و بنابراین تصمیمی که در قالب متغیرهای نرخ اتخاذ می‌شود، متغیرهای سطح و یا اطلاعات در مورد سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. متغیرهای نرخ را نمی‌توان در هر لحظه از زمان و به طور آنی اندازه‌گیری کرد و این متغیرها در یک بازه زمانی مشخص قابل اندازه‌گیری هستند. همان طور که گفته شد روابط (۳) و (۴) در حالت گسسته نوشته شده است.

جدول ۱ پارامترهای شناسایی شده از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه دلفی

ردیف	عنوان پارامتر	منابع	تعریف
۱	دوباره کاری	[47]	کارهایی که باید به دلیل نقص یا اشتباه قبلی، تکرار یا اصلاح شوند
۲	اضافه کاری	[23]	ساعات کاری فراتر از زمان استاندارد روزانه یا هفتگی پرسنل برای جبران تأخیر یا تسریع کار
۳	خطای اجرایی	[26]	اشتباهات ناشی از اجرای نادرست نقشه‌ها یا دستورالعمل‌ها در حین عملیات ساخت
۴	خطای طراحی	[9]	نقص‌ها یا ابهامات موجود در نقشه‌ها و مشخصات فنی پروژه که پیش از ساخت شناسایی نشده‌اند
۵	خطای ساخت	[49]	مشکلات کیفی در مواد یا فرایند ساخت قطعات پروژه که منجر به نیاز به تعویض یا اصلاح می‌شود
۶	فشارکاری	[25]	شدت نیروی کار تحمیل شده به کارکنان که اغلب منجر به خستگی و کاهش بهره‌وری می‌شود
۷	استخدام	[20]	فرایند تأمین نیروی کار جدید مورد نیاز برای پوشش کمبودها یا افزایش ظرفیت تیم‌ها
۸	نیروی انسانی	[20]	مجموع ظرفیت و تخصص نیروی کاری که به طور فعال در فرایند اجرای پروژه درگیر هستند
۹	بهره‌وری	[51]	میزان خروجی (کار انجام شده) به ازای هر واحد ورودی (زمان، نیروی کار یا هزینه)
۱۰	رضایت	[51]	سطح خشنودی کارکنان از شرایط کاری، مدیریت و محیط پروژه
۱۱	انگیزه	[11]	تمایل درونی و اشتیاق کارکنان برای انجام مؤثر و باکیفیت وظایف محوله
۱۲	خستگی	[25]	کاهش توانایی فیزیکی و ذهنی کارکنان ناشی از کار طولانی یا فشار کاری مداوم
۱۳	شرایط آب و هوایی	[8]	تأثیرات محیطی مانند بارندگی، دما یا باد شدید بر قابلیت اجرای فعالیت‌های خارج از محیط بسته
۱۴	دخالت کارفرما	[5]	اعمال تغییرات غیربرنامه‌ریزی شده یا تصمیمات مدیریتی کارفرما بر روند جاری پروژه
۱۵	تغییر در سفارش‌ها	[53]	اصلاح یا بازنگری در دامنه و جزئیات اولیه کارهای مورد نیاز پروژه توسط سفارش‌دهنده
۱۶	اضافه‌شدن کارهای جدید	[32]	ورود فعالیت‌ها یا آیتم‌های کاری که در قرارداد اولیه پروژه پیش‌بینی نشده بودند
۱۷	تغییر در روش اجرا	[52]	نیاز به استفاده از تکنیک‌ها یا رویکردهای فنی متفاوت از آنچه اولیه طراحی شده بود
۱۸	تکنولوژی جدید	[7]	استفاده از روش‌ها یا تجهیزات نوین که نیازمند یادگیری و سازگاری تیم اجرایی است
۱۹	تحقیق و توسعه	[54]	فعالیت‌های تخصیص‌یافته برای بهینه‌سازی فرایندها یا حل مشکلات فنی پیچیده در حین پروژه
۲۰	آموزش	[53]	فرایند ارتقای دانش و مهارت‌های پرسنل برای استفاده از تکنولوژی‌های جدید یا بهبود کارایی
۲۱	شناسایی تأمین‌کنندگان	[20]	فرایند یافتن، ارزیابی و انتخاب منابع معتبر برای تأمین مصالح و تجهیزات پروژه
۲۲	جلسات با ذی‌نفعان	[11]	زمان صرف‌شده برای هماهنگی، تصمیم‌گیری و گزارش‌دهی به تمامی طرف‌های ذی‌نفع پروژه
۲۳	مسائل حقوقی، قراردادی	[51]	درگیری‌ها یا ابهامات ناشی از تفسیر قرارداد، ادعاها یا اختلافات قانونی در حین کار
۲۴	تلاش برای رفع مسائل	[8]	زمان و انرژی صرف‌شده توسط مدیریت برای حل مشکلات غیرفنی و اداری (مانند اختلافات)

ردیف	عنوان پارامتر	منابع	تعریف
۲۵	مدت زمان رفع مسائل	[8]	زمانی که یک مسئله (حقوقی، اداری، فنی) پس از شناسایی، صرف رفع نهایی آن می‌شود
۲۶	ایمنی	[28]	سطح رعایت استانداردهای ایمنی در کارگاه که مستقیماً بر حوادث و وقایع کاری اثر می‌گذارد
۲۷	وقایع کاری	[3]	حوادث غیرمترقبه یا پیش‌بینی نشده در محیط کار (مانند حوادث، آتش‌سوزی‌ها یا خرابی‌های بزرگ)
۲۸	برنامه زمان‌بندی	[48]	کیفیت و دقت برنامه زمان‌بندی کلی پروژه و فعالیت‌های جزئی آن
۲۹	نرخ پیشرفت پروژه	*	سرعت تکمیل کارها بر حسب درصد یا واحد فیزیکی در یک دوره زمانی مشخص
۳۰	تکمیل چارت سازمانی	*	میزان کامل بودن ساختار مدیریتی و تخصیص نقش‌ها در تیم پروژه
۳۱	بودجه کل پروژه	[50]	منابع مالی مصوب و تخصیص یافته برای انجام کامل تمام فعالیت‌های پروژه
۳۲	بودجه باقی‌مانده از پروژه	[50]	باقی بودجه مصوب که هنوز برای تکمیل کارهای باقی‌مانده در دسترس است
۳۳	کل پرداختی به پیمانکار	[50]	مجموع مبالغی که تا کنون طبق پیشرفت کار، به پیمانکار اصلی پرداخت شده است
۳۴	سرعت انجام کارها	*	نرخ کلی اجرای فعالیت‌ها، که تحت تأثیر بهره‌وری و منابع است
35	تأخیر در پرداخت حقوق	[6]	مدت زمانی که پرداخت حقوق پرسنل یا دستمزدها به تأخیر می‌افتد
36	تناسب حقوق دریافتی و میزان کار	[51]	ارزیابی منصفانه بودن مبلغ دریافتی کارگران در مقایسه با حجم کار انجام شده توسط آن‌ها
۳۷	مدت زمان نرمال تأخیر در پرداخت حقوق	[8]	متوسط یا زمان پذیرفته شده برای تأخیر در پرداخت‌ها بدون تأثیر منفی جدی بر انگیزه
۳۸	تعداد کل کارهای پروژه	[52]	مجموع فعالیت‌ها یا واحدهای کاری که باید برای تکمیل پروژه انجام شوند (%۱۰۰ کار)
۳۹	تعداد کل کارهای باقی‌مانده	[52]	حجم کاری که هنوز باید انجام شود تا پروژه به اتمام برسد
۴۰	تعداد کل کارهای انجام شده	[52]	حجم کاری که تا کنون تکمیل و تأیید شده است
۴۱	هزینه‌های صرف شده	[3]	مجموع مبالغی که تا تاریخ ارزیابی، صرف فعالیت‌های پروژه شده است
۴۲	تخصیص و تسطیح منابع	[3]	فرایند توزیع بهینه نیروی انسانی و تجهیزات بین فعالیت‌های همزمان برای جلوگیری از گلوگاه
۴۳	تعمیر و نگهداری	[3]	زمان و هزینه صرف شده برای نگهداری، سرویس یا تعمیر ماشین‌آلات و تجهیزات در طول پروژه
۴۴	تعداد ماشین‌آلات	[9]	کمیت کلی تجهیزات سنگین و سبک موجود در اختیار تیم اجرایی
۴۵	دسترسی به ماشین‌آلات	[28]	سهولت و سرعت دسترسی تیم اجرایی به تجهیزات مورد نیاز در زمان مناسب
۴۶	اندازه فضای کاری	[27]	مساحت فیزیکی موجود در سایت که بر تراکم فعالیت‌ها و سهولت جابه‌جایی تأثیر می‌گذارد
۴۷	بازده ماشین‌آلات	*	کارایی عملیاتی هر دستگاه (میزان کار مفید در واحد زمان کارکرد)
مواردی که با * مشخص شده‌اند مربوط به «استخراج از مصاحبه نیمه‌ساختاریافته» می‌باشند.			

نمودار حالت جریان رسم گردید و با استفاده از داده‌های مطالعه موردی، که در ادامه ذکر می‌شود، مدل‌سازی صورت گرفت. در نهایت، پس از تأیید مدل و اطمینان از صحت مدل، چهار سناریوی مختلف در جهت مدیریت بهتر پروژه تدبیر و مورد بحث قرار گرفت. در ادامه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی کیفی، نمودار حالت جریان، اعتبارسنجی و سناریوپردازی ارائه شده و بر روی آن‌ها بحث می‌شود.

حلقه‌های علت و معلولی

نمودار علت و معلولی ابزاری قوی و کارا برای نشان دادن ساختار بازخوردی سیستم‌ها و چگونگی ارتباط و تعامل عوامل بر

هر یک از ۴۷ پارامتر شناسایی شده، نماینده یک بعد منحصر به فرد از دینامیک پروژه در محیط ایران هستند. اگر چه برخی از آن‌ها در نگاه اول مشابه به نظر می‌رسند (مانند «مسائل حقوقی، قراردادی» و «اختلاف داوری»)، تفکیک آن‌ها برای مدل‌سازی دقیق، به ویژه در مرحله اعتبارسنجی کیفی با خبرگان، ضروری تشخیص داده شد. در مدل‌سازی حالت - جریان، تأثیر این متغیرها بر یکدیگر (به ویژه در حوزه مالی و مدیریتی) به صورت تعاملی و پویا پیاده‌سازی شده است.

مطابق روش تحقیق، بعد از شناسایی دقیق پارامترهای مؤثر بر زمان پروژه‌ها و تعیین مرز سیستم، رسم حلقه‌های علت و معلولی آغاز شد. سپس، در محیط نرم‌افزار Vensim نسخه PLE

یکدیگر می‌باشد. گام اصلی مدل‌سازی با روش SD، کشف و معرفی فرایندهای بازخوردی است. حلقه‌های علت و معلولی مقدمه‌ای جامع، مفهومی و مدلی عمومی و ذهنی است که موجب درک بهتر روابط و تسهیل رسم نمودار حالت جریان می‌شود [55].

در مدل پیشنهادی این پژوهش شش حلقه اصلی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها به تأیید افراد متخصص حوزه ساخت‌وساز رسیده است. حلقه‌های بزرگ‌تر شامل چندین حلقه کوچک‌تر هستند. بدین ترتیب سعی شده است تا حد ممکن ارتباط و بازخورد تمام عوامل مهم و تأثیرگذار بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی کشف و بررسی شود، که در ادامه همه این حلقه‌های علت و معلولی توضیح داده می‌شوند.

حلقه شماره یک: رابطه بین کل کارهای انجامی، کارهای انجام‌شده و حلقه دوباره‌کاری

همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است بهره‌وری بر نرخ انجام کارهای اشتباه تأثیرگذار است و خطاهای طراحی و خطاهای ساخت نیز منجر به افزایش خطا و اشتباهات اجرایی می‌شوند. بر اساس مدل بنیادی و ابتدایی حلقه دوباره‌کاری کوپر «خطاهای کشف‌شده» منجر به افزایش «دوباره‌کاری‌های کشف‌نشده» می‌گردند که به مرور بر اساس «نرخ شناسایی دوباره‌کاری» بر میزان کارهای باقی‌مانده می‌افزاید. دخالت کارفرما و تغییر در سفارش‌ها نیز منجر به اضافه شدن کارهای جدید می‌شوند که این کارهای جدید نیز به نوبه خود منجر به افزایش کارهای باقی‌مانده می‌شوند. با افزایش کارهای باقی‌مانده در اثر افزایش خطا، دوباره‌کاری‌های شناسایی‌شده و دخالت کارفرما، نیاز به تخصیص و تسطیح منابع بیشتر می‌شود که در نتیجه آن دسترسی موجودی تجهیزات و ماشین‌آلات کاسته می‌شود و این امر منجر به کاهش تعداد انجام کارهای درست و افزایش کارهای باقی‌مانده می‌شود. حلقه اصلی شماره یک سه حلقه کوچک‌تر را در بر گرفته است که دو تا از آن‌ها حلقه‌های مثبت (تقویت‌شونده) و یکی از آن‌ها حلقه منفی (تعادلی) است.

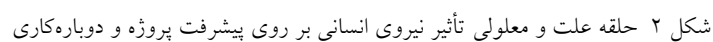
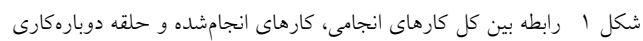
حلقه شماره دو: حلقه تأثیر نیروی انسانی بر روی پیشرفت پروژه و دوباره‌کاری

همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، اگر پیش‌بینی از تأخیر اتمام پروژه بیشتر باشد، اضافه‌کاری پرسنل، فشارکاری و

نیاز به استخدام بیشتر می‌شود. استخدام با توجه به تعداد پرسنل موجود و پرسنل مورد نیاز تعیین می‌شود، که هر چقدر اختلاف این دو عدد کم‌تر باشد چارت سازمانی کامل‌تر است و از فشار کاری کاسته می‌گردد. فشار کاری با خستگی رابطه مستقیم و با رضایت کارکنان رابطه عکس دارد. لازم به ذکر است که، تناسب حقوق پرداختی با مقدار کار و تأخیر در پرداخت حقوق نیز در میزان رضایت تأثیرگذار است. تأخیر طولانی در پرداخت حقوق (پارامتر ۳۵)، خود می‌تواند عاملی تشدیدکننده برای ظهور و افزایش سطح «مسائل حقوقی، قراردادی و اداری» (پارامتر ۲۳) باشد و این افزایش، متعاقباً بر بهره‌وری از طریق افزایش جلسات ذی‌نفعان (حلقه ۳) تأثیر می‌گذارد. رضایت کارکنان، شرایط آب و هوایی، توجه به بخش تحقیق و توسعه، ورود تکنولوژی جدید، آموزش پرسنل و اندازه فضای کاری بر میزان بهره‌وری کارکنان اثر دارد. با افزایش بهره‌وری نرخ انجام کارهای صحیح بالا می‌رود و از تعداد کارهای باقی‌مانده کاسته می‌شود که در نتیجه زمان پیش‌بینی از تأخیر اتمام پروژه کم می‌شود.

حلقه شماره سه: حلقه تأثیرگذاری رفع مسائل حقوقی، قراردادی و اداری، جلسات با ذی‌نفعان و شناسایی تأمین‌کنندگان بر پیشرفت پروژه

همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است کارهای باقی‌مانده - ی بیشتر منتج به تشکیل جلسات بیشتری با ذی‌نفعان می‌شود و بدین ترتیب مسائل حقوقی، قراردادی و اداری (پارامتر ۲۳) بیشتری ایجاد می‌گردد که ممکن است بروکراسی موجود موجب شود تا مدت زمانی از پروژه صرف امور حقوقی، قراردادی و اداری گردد. توجه شود که اختلافات داور (به عنوان یکی از انواع پیچیده مسائل حقوقی) نیز در این متغیر سطح لحاظ شده است و مستقیماً نرخ انجام کار درست را کاهش می‌دهد. از طرفی باید مدیران برای رفع مسائل حقوقی، قراردادی و اداری تلاش کنند تا موجب رفع مسائل شوند. همچنین، وجود سطح بالای مسائل حقوقی، روند تأیید پیشرفت کارها را مختل می‌کند و به طور مستقیم بر «تأخیر در پرداخت حقوق» تأثیر معکوس می‌گذارد. بنابراین، این فرایند سبب می‌شود که نرخ انجام کار درست کم‌تر شود و به تعداد کارهای باقی‌مانده موجود اضافه گردد. شناسایی تأمین‌کنندگان نیز همچون جلسه با ذی‌نفعان همین مشکل را ایجاد خواهد کرد.



حلقه شماره چهار: حلقه تأثیرگذاری تعداد ماشین‌آلات بر پیشرفت پروژه

همان طور که در شکل (۴) مشخص است هر چقدر کارهای

استخدام، اضافه شدن کارهای جدید، نرخ کشف دوباره‌کاری، نرخ تکمیل کارهای اشتباه، نرخ تکمیل کارهای درست و نرخ پرداختی به پیمانکار از جمله متغیرهای نرخ نمودار حالت جریان هستند.

اعتبارسنجی

مدلی مفید است که تا حد ممکن پارامترهای تأثیرگذار در مسئله را در خود جای دهد و ارتباط و نوع علیت را تعیین کند و همچنین رفتارهای بازخوردی را در نظر بگیرد. البته هیچ مدلی نمی‌تواند عیناً آینده را پیش‌بینی کند، در نتیجه باید با استفاده از یک یا چند روش، اعتبار و درستی مدل را مورد سنجش و بررسی قرار داد [56]. پس از اینکه نمودار حالت جریان ایجاد شد و شبیه‌سازی سیستم به درستی در نرم‌افزار Vensim انجام گرفت، لازم است پیش از انجام تحلیل و سناریوپردازی، اعتبار مدل سنجیده شود. به منظور شبیه‌سازی مدل از اطلاعات یک پروژه تجاری - اداری واقع در استان تهران، شهر تهران، خیابان میرداماد استفاده شده است، که در زمینی به متراژ ۱۰۰۰ متر مربع واقع شده است و ۱۹۰۰۰ متر مربع مجموع زیربنای طبقات است. این پروژه دارای مجموعاً ۲۴ طبقه است و نرخ پیشرفت متوسط ماهیانه آن ۳/۵ درصد است. تعداد ماشین‌آلات و تجهیزات این پروژه ۱۳ دستگاه سبک و سنگین و تجهیزات بالابر می‌باشد و تعداد کل فعالیت‌های پروژه ۸۵۰ فعالیت است. استفاده از داده‌های تاریخی پروژه‌ها در مدل‌های SD عموماً با هدف بازسازی رفتار مرجع انجام می‌شود و نه تعمیم آماری، از این رو حجم داده‌های واقعی حاصل از یک پروژه تجاری - اداری در شهر تهران متناسب با اصول روش پویایی سیستم است. در عین حال، تعمیم مدل به چند پروژه واقعی در آینده می‌تواند دقت مدل را باز هم افزایش دهد.

باقی‌مانده افزوده می‌شود. از طرف دیگر دخالت کارفرما در اکثر مواقع موجب تغییر در روش اجرا می‌شود که سبب اضافه شدن کارهای جدید می‌شود.

حلقه شماره پنج: حلقه تأثیرگذاری وقایع کاری بر پیشرفت

پروژه

همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است هر چقدر کارهای باقی‌مانده افزایش یابد، فشار بر منابع (انسانی و تجهیزات) تشدید می‌شود و این امر منجر به کاهش رعایت پروتکل‌های ایمنی و بروز وقایع و حوادث کاری خواهد شد و به دنبال آن مسائل حقوقی، قراردادی و اداری ایجاد می‌شود که باعث می‌شود کارهای درست با نرخ آهسته‌تری انجام شود و سبب افزایش کارهای باقی‌مانده و شدت کار می‌شود.

حلقه شماره شش: حلقه تأثیرگذاری پرداختی به پیمانکار بر

پیشرفت پروژه

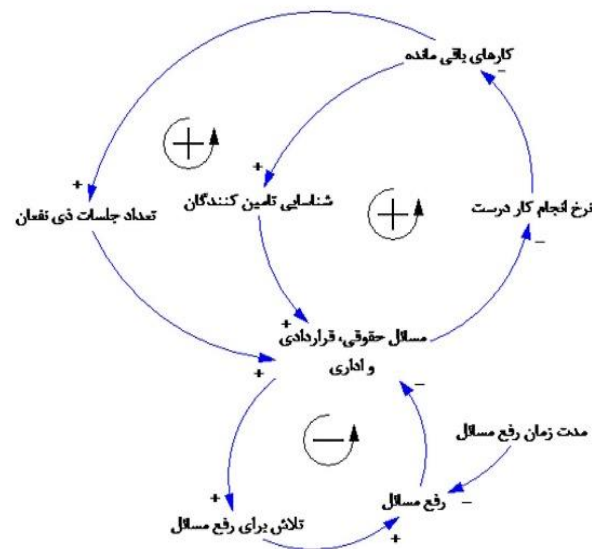
نرخ پیشرفت کار بر اساس کارهای انجام شده و کل کارهای پروژه تعیین می‌شود و کل پرداختی به پیمانکار بر اساس نرخ پیشرفت کار و بودجه پروژه تعیین می‌شود. تغییر روش اجرا بر بودجه پروژه نیز اثرگذار است. اگر پرداختی به پیمانکار بیشتر باشد در واقع از میزان تأخیر در پرداخت حقوق کم می‌شود و سبب افزایش انگیزه، بهره‌وری، نرخ انجام کار درست و نرخ پیشرفت کار می‌شود. حلقه شماره شش در شکل (۶) مشخص شده است.

حلقه علت و معلولی کلی و جامع که از تجمیع شش حلقه

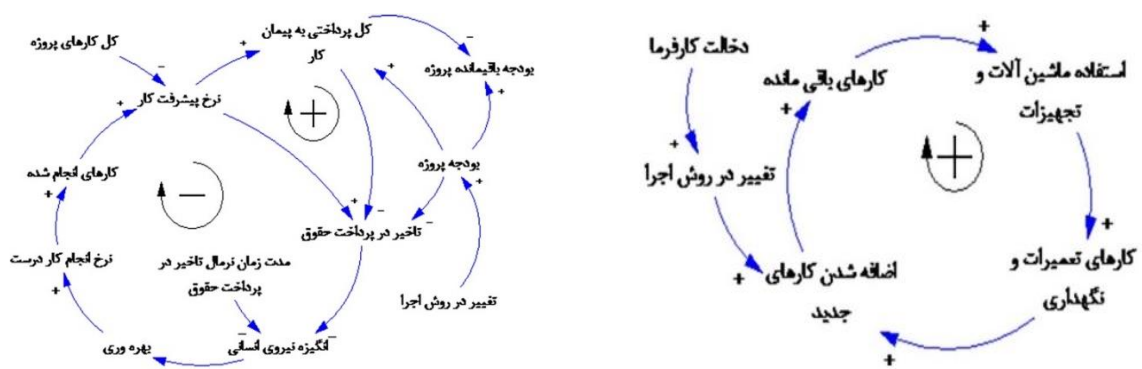
و روابط بین آن‌ها شکل گرفته است در شکل (۷) نشان داده شده است.

مدل‌سازی و نمودار حالت جریان

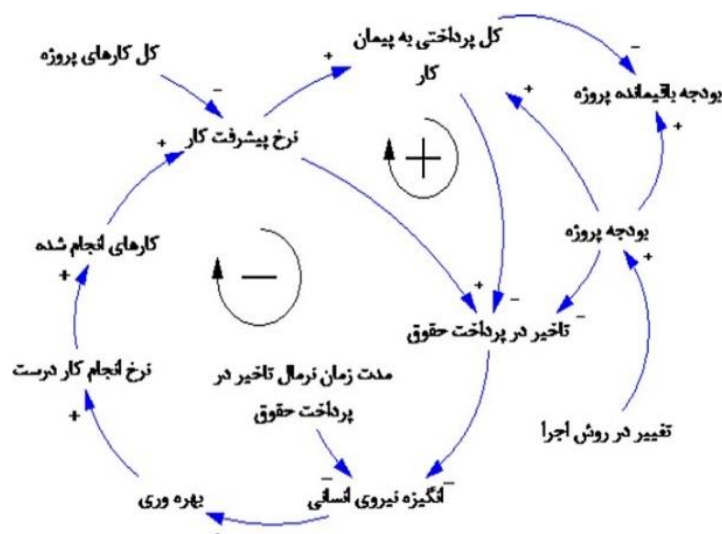
با وجود اینکه نمودارهای علت و معلولی رفتار، بازخورد و ارتباط بین متغیرها را به خوبی نشان می‌دهند، ولی ابزار مناسبی برای مدل‌سازی رایانه‌ای نیستند که در نتیجه باید به نمودار حالت جریان تبدیل شوند. در شکل (۸) که نمودار حالت جریان مسئله تحقیق توسط نرم‌افزار Vensim رسم شده است، متغیرهای تعداد کارگران موجود، کارهای باقی‌مانده، دوباره‌کاری‌های کشف‌نشده، منابع مالی باقی‌مانده پیمانکار، کل پرداختی به پیمانکار، هزینه‌های اضافی و مسائل حقوقی، قراردادی و اداری متغیرهای سطح هستند و حاصل انباشت و تجمع متغیرهای نرخ هستند. متغیرهایی نظیر



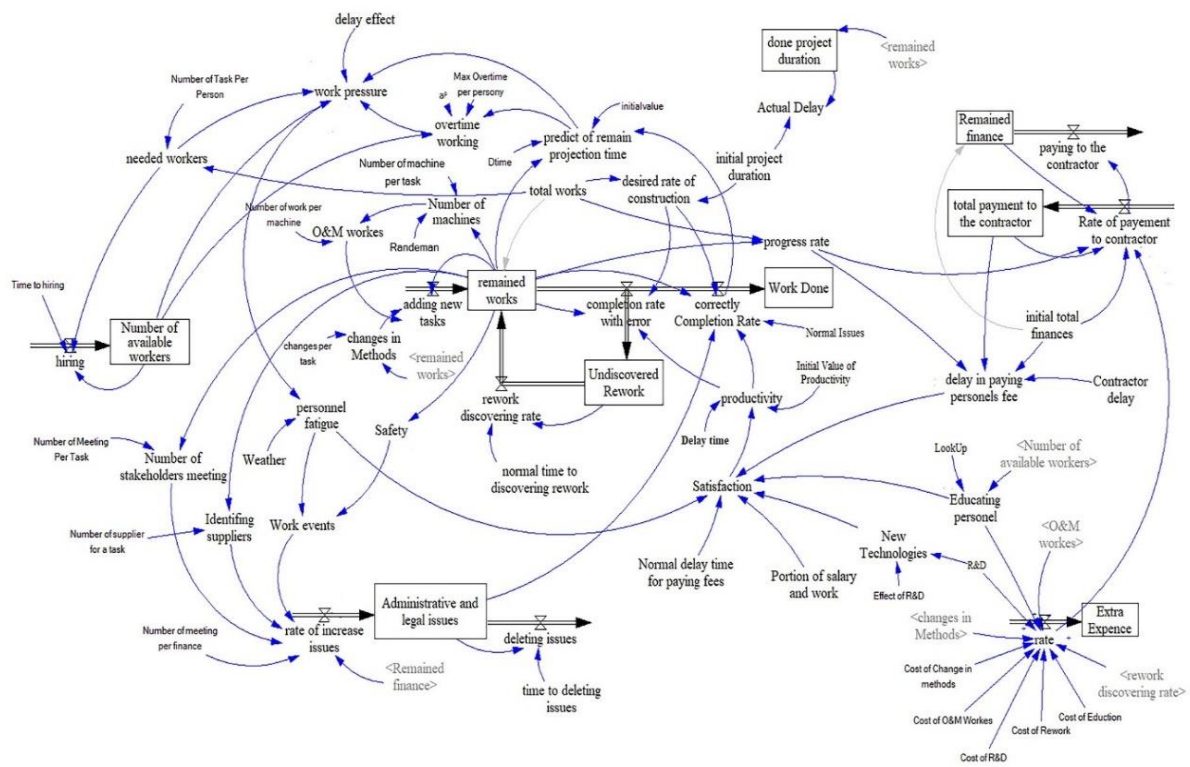
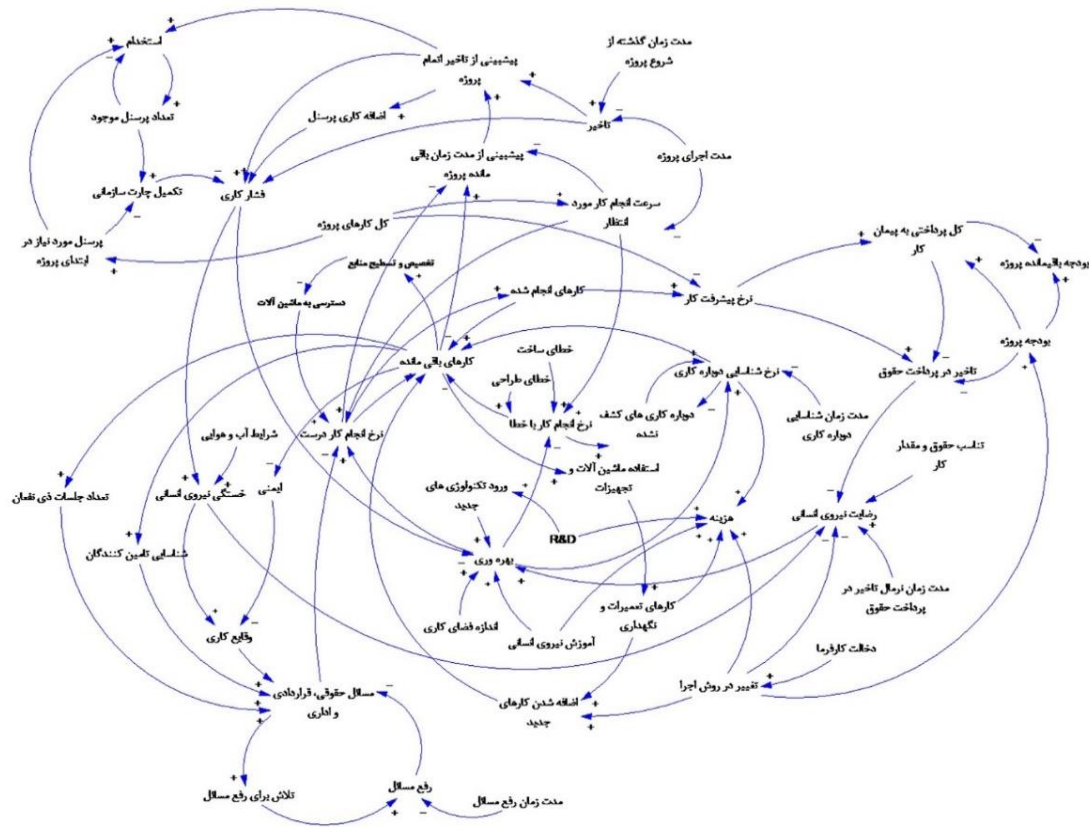
شکل ۳ حلقه تأثیرگذاری رفع مسائل حقوقی، قراردادی و اداری، جلسات با ذی نفعان و شناسایی تأمین کنندگان بر پیشرفت پروژه

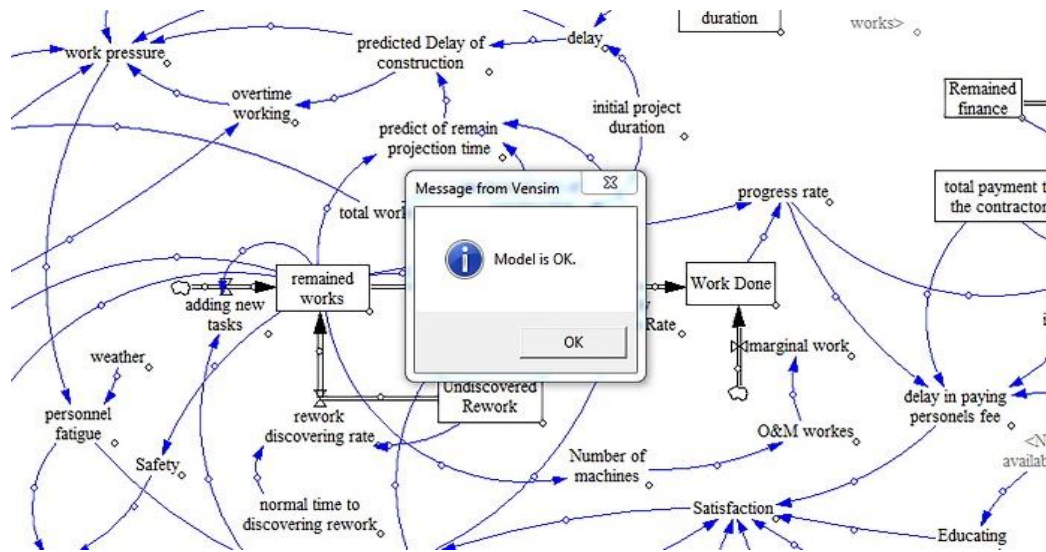


شکل ۴ حلقه تأثیرگذاری تعداد ماشین آلات بر پیشرفت پروژه

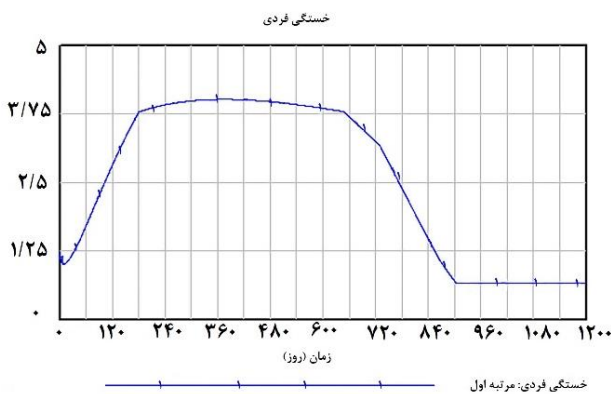


شکل ۵ حلقه تأثیرگذاری پرداختی به پیمانکار بر پیشرفت پروژه

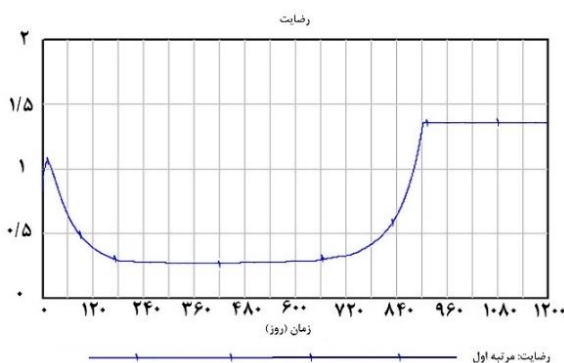




شکل ۹ آزمون ارزیابی ساختار



شکل ۱۰ آزمون رفتار ساختاری خستگی فردی



شکل ۱۱ آزمون رفتار ساختاری رضایت

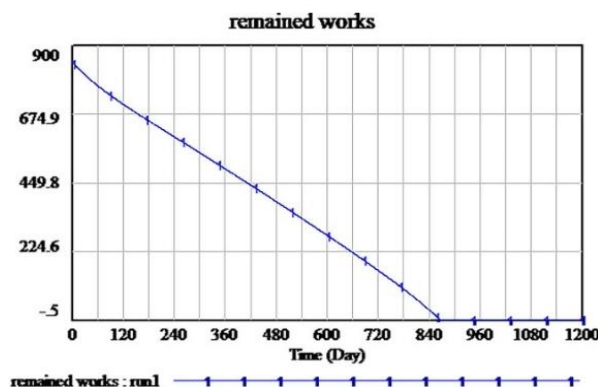
در این پژوهش با آزمون ارزیابی ساختاری و آزمون رفتار ساختاری، آزمون حد نهایی و آزمون بازسازی رفتار مرجع صحت مدل بررسی شده است. شکل (۹) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون ارزیابی ساختاری نشان می‌دهد، هدف از این آزمون بررسی تطابق ساختار مدل با دانش توصیفی مربوط به سیستم مدل‌سازی است. در این تحقیق با توجه به اینکه بخش اعظمی از متغیرها، حلقه‌ها و روابط بر اساس مطالعات پیشین تدوین شده است، از نظر ساختاری مورد تأیید است.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون رفتار ساختاری نشان می‌دهد، نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر اولیه مربوطه برای متغیرهای گوناگون، رفتاری متناظر با رفتار مورد انتظار آن متغیرها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، انتظار می‌رفت در اواسط پروژه برای کارکنان خستگی بیشتری نسبت به زمان‌های ابتدایی شروع پروژه باشد که نتایج مدل نیز منطبق بر این واقعیت است. شکل (۱۰) نتایج آزمون رفتار ساختاری را نشان می‌دهد.

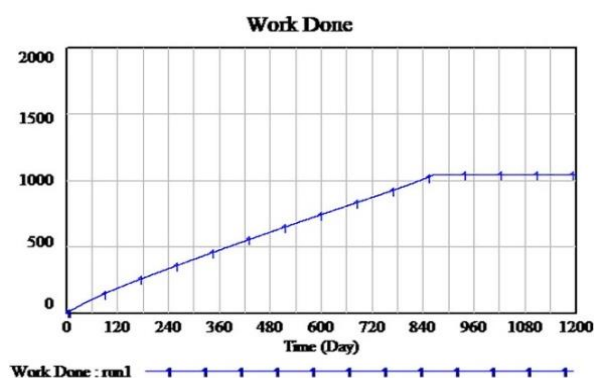
در خصوص متغیر رضایت کارکنان نیز می‌بایست رفتار آن با میزان خستگی پرسنل رابطه عکس داشته باشد که نتایج مدل نیز گویای همین موضوع است. شکل (۱۱) نتایج آزمون رفتار ساختاری را نشان می‌دهد.

شکل (۱۲) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون حد نهایی نشان می‌دهد در این آزمون مقدار ورودی‌های مدل مقدار

از ۱٪ خطا) به محققان اطمینان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته، علت و معلول‌های کلیدی مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی را به درستی درونی‌سازی می‌کند و می‌تواند به عنوان مبنایی قابل اعتماد برای تحلیل سناریوهای مدیریتی آتی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۳ آزمون بازسازی رفتار مرجع



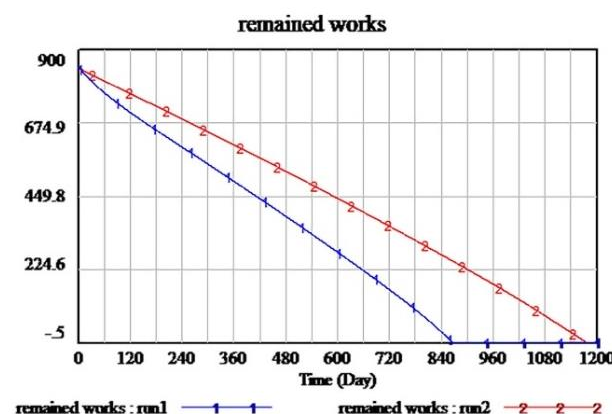
شکل ۱۴ آزمون بازسازی رفتار مرجع

در طول این تحقیق باید این فرض مهم را مد نظر داشت که مقادیر سیستم در حد قابل ملاحظه‌ای طی تعاملات با یکدیگر مقدارشان تعیین می‌شوند و این همان اصول حاکم بر تفکر سیستمی و اساس و شالوده روش پویایی سیستم‌ها می‌باشد.

سناریوپردازی

در بررسی سیاست‌های مختلف و سناریوپردازی این نکته بررسی می‌شود که متغیرهای برون‌زا چه تأثیری بر روی پیشرفت پروژه خواهند گذاشت. در این پژوهش چهار سناریوی زیر مورد بررسی قرار گرفتند:

حدی خود را گرفته و اثر آن بر روی متغیرهای مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل پویایی سیستم ارائه‌شده از نظر این آزمون نیز مورد تأیید است. به عنوان مثال در صورتی که مقدار پارامتر مناسب بودن شرایط آب و هوایی که یک عدد نسبی بین صفر و ۱ است، برابر با یک عدد کوچک مانند ۰/۱ قرار گیرد نتایج زیر حاصل می‌شود که از نظر منطقی نیز صحیح است. به عنوان مثال، با این تغییر مدت اتمام کارها از ۸۴۵ روز به عدد ۱۲۰۰ روز خواهد رسید. شکل (۱۲) نتایج آزمون حد نهایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ آزمون حد نهایی

شکل‌های (۱۳) و (۱۴) صحت و اعتبار مدل را بر اساس آزمون بازسازی رفتار مرجع نشان می‌دهد. در این آزمون مدل باید بتواند رفتار داده‌های تاریخی مربوط به متغیرها را به صورت مناسب بازسازی کند. اعتبار مدل پیشنهادی از نظر این آزمون نیز مورد تأیید قرار گرفت. به عنوان نمونه، در سناریوی شرایط جاری، مدل مدت زمان اتمام پروژه را ۸۴۵ روز پیش‌بینی می‌کند. از آنجا که پروژه مطالعه موردی مورد استفاده، ۲ سال و ۴ ماه به طول انجامیده است (که معادل تقریباً ۸۵۰ روز است)، نتایج شبیه‌سازی با اختلاف تنها ۰/۵۸٪ با داده‌های تاریخی همخوانی دارد. این تطابق قوی، صحت ساختار مدل در بازسازی رفتار واقعی پروژه را تأیید می‌کند. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نتایج سازگاری مدل با آزمون بازسازی رفتار مرجع نشان داده شده است.

برخلاف آزمون‌های رفتاری که صحت ساختار مدل را می‌سنجند، مقایسه نتایج مدل در سناریوی جاری (۸۴۵ روز) با عملکرد واقعی پروژه مطالعه موردی (۸۵۰ روز)، قوی‌ترین شواهد اعتبارسنجی را فراهم می‌آورد. این دقت بسیار بالا (کمتر

در این سناریو فرض شد که مناسب بودن شرایط آب و هوایی، که در شرایط جاری حالت خیلی مناسب برای این پارامتر در نظر گرفته شده است، به حالت متوسط تغییر یابد و سایر متغیرهای مدل همانند سناریوی شرایط جاری باشند. لازم به ذکر است شرایط آب و هوایی با توجه به طیف لیکرت به ۵ بازه تقسیم بندی شده است. نتایج تغییرات تحت عنوان مرتبه چهارم در شکل های (۱۵ - الف تا و) آورده شده است. لازم به ذکر است، این چهار سناریوی استراتژیک انتخاب شده برای اعتبارسنجی پویایی مدل مهم ترین روابط علی شناسایی شده در مدل را از جنبه های مدیریتی (سناریوی ۳)، منابع انسانی و مالی (سناریوی ۲)، و محیطی (سناریوی ۴) نیز تحت تأثیر قرار می دهند. این سناریوها به گونه ای طراحی شدند که عدم پایداری های اصلی پروژه را شبیه سازی کنند، در نتیجه تحلیل های مدیریت ریسک مالی و طراحی به طور غیرمستقیم در رفتار سناریوهای موجود منعکس شده است.

همان طور که از نتایج بررسی سناریوها حاصل گردید اگر بتوان دخالت کارفرما که عمدتاً موجب تغییر در سفارش ها و تغییر در روش اجرا می گردد را به حداقل رساند، نرخ پیشرفت پروژه ها سریع تر خواهد شد. همچنین، پیمانکاران به دلیل عدم آگاهی در مورد مهارت فعالیت های پروژه معمولاً توجه کمی به آموزش دارند. همان طور که در نتایج بررسی سناریوهای مختلف مشاهده شد، توجه به آموزش پرسنل در روند بهبود وضعیت موجود تأثیر به سزایی خواهد داشت. بنابراین علل بروز بسیاری از مشکلات عدم آشنایی عوامل دخیل در پروژه با ماهیت صنعت ساخت و ساز می باشد که برای از میان برداشتن این مشکل باید به آموزش مدیران ارشد شرکت ها و سازمان های پیمانکار و کارفرما توجه ویژه کرد. برای عملی شدن این مهم باید نهاد یا سازمانی که دارای ضمانت اجرایی است متولی آموزش شود. علاوه بر این، تحلیل های تکمیلی ساختار مدل نشان داد که دینامیک های پیچیده مانند وابستگی متقابل بین تأخیر پرداخت ها و مسائل حقوقی / داوری، و همچنین رابطه بین خطاهای کشف شده و نشده، به طور مؤثر از طریق حلقه های بازخورد متعدد در مدل SD لحاظ شده است و اعتبار کیفی مدل را تقویت می کند. این پژوهش با رویکرد پویایی سیستم، مدلی تحلیلی برای شناخت عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه های عمرانی در ایران ارائه می دهد.

سناریوی اول: به عنوان سناریوی اول، شرایط جاری عواملی از قبیل دوباره کاری کشف نشده، کارهای باقی مانده و نرخ پیشرفت در شرایط فعلی مدل اصلی بررسی شدند که رفتار متغیرهای کلیدی مدل پس از شبیه سازی تحت عنوان مرتبه اول در شکل های (۱۵ - الف تا و) نشان داده شده است.

سناریوی دوم: سناریوی اثر بررسی سخت گیری بر روی پرسنل

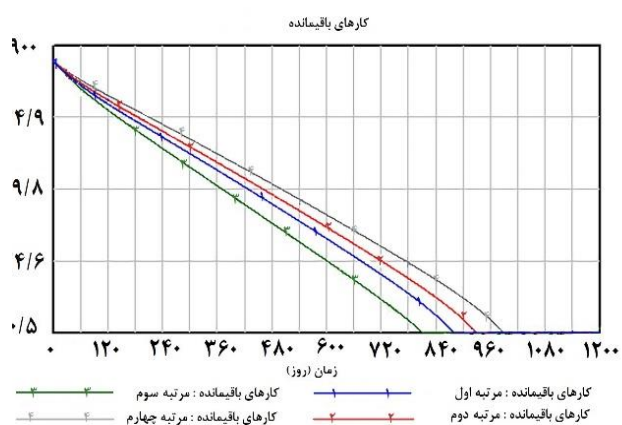
با توجه به این اصل که آموزش، توجه به بخش تحقیق و توسعه، تناسب حقوق کارکنان با توجه به مقدار کار آن ها و تأخیر پیمانکار در پرداخت حقوق کارکنان تأثیر به سزایی در میزان رضایت، انگیزه و بهره وری خواهد داشت، در سناریوی دوم فرض شد که متغیرهای تأخیر کارفرما در پرداخت حقوق (به معنی تأخیر در تسویه حساب با پیمانکار که این متغیر، تأثیر مستقیم بر جریان نقدینگی پیمانکار و در نتیجه، بر توانایی وی در پرداخت حقوق کارکنان خواهد داشت)، تحقیق و توسعه، آموزش پرسنل، نسبت حقوق به مقدار کار مطابق با جدول (۲) تغییر کند. نتیجه این تغییرات با وضعیت جاری سناریوی اول بر رفتار متغیرهای کلیدی تحت عنوان مرتبه دوم در شکل های (۱۵ - الف تا و) نشان داده شده است.

جدول ۲ جزئیات سناریوی دوم

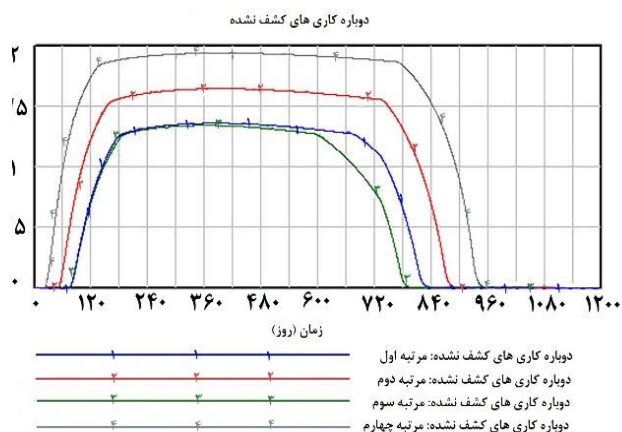
متغیر	میزان تغییر
تأخیر کارفرما در پرداخت حقوق	از صفر به ۶۰ روز افزایش یابد
تحقیق و توسعه	۲۰ درصد کاهش یابد
آموزش پرسنل	۲۰ درصد کاهش یابد
نسبت حقوق به مقدار کار	۱۰ درصد کاهش یابد

سناریوی سوم: تأثیر عدم تغییر روش اجرا توسط کارفرما در سناریوی سوم فرض شد که تمامی متغیرها مطابق با سناریوی شرایط جاری باشند. تنها تغییری که در سناریوی سوم اعمال شد حذف تغییر روش اجرا است. نتایج این تغییر تحت عنوان مرتبه سوم در شکل های (۱۵ - الف تا و) آورده شده است. همان طور که از نتایج واضح است با اعمال این تغییر بر روی مدل بهترین شرایط برای اتمام پروژه ایجاد شده است.

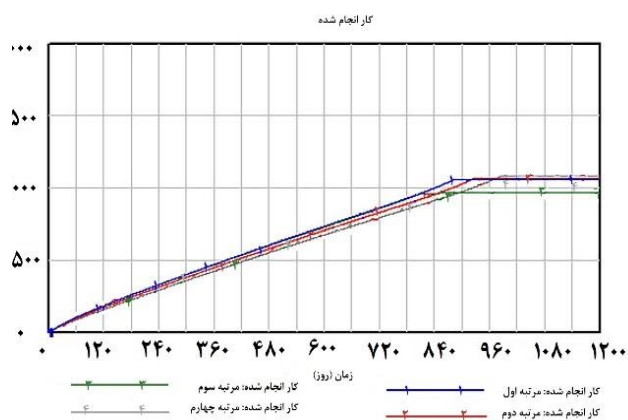
سناریوی چهارم: تأثیر شرایط آب و هوایی بر روی اجرای پروژه



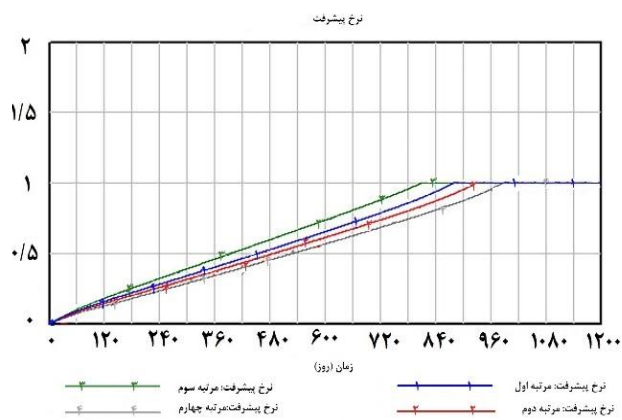
(ب)



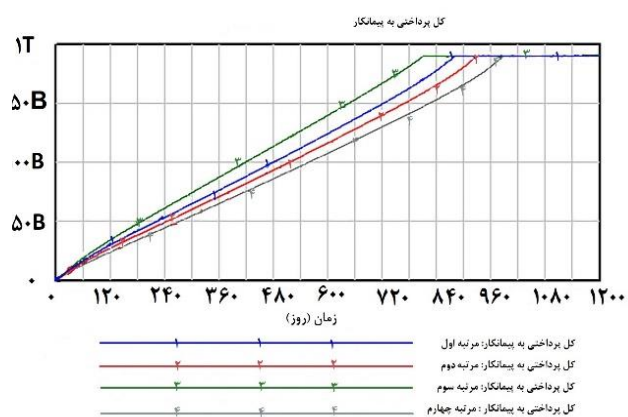
(الف)



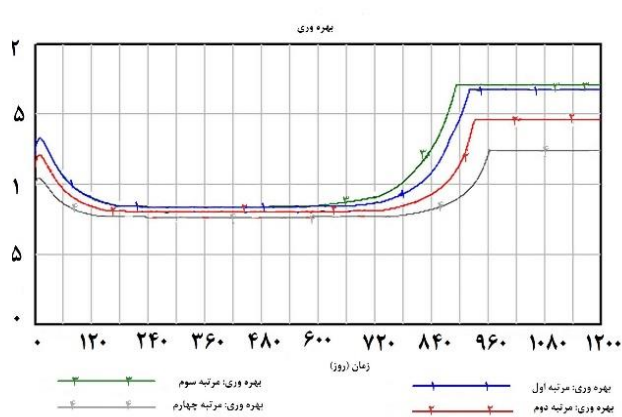
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱۵ نتایج چهار سناریو

مطرح است. با این وجود تأخیر در اجرا و بهره‌برداری یکی از مشکلات و چالش‌های رایج پروژه‌های ساخت‌وساز است. در

مدیریت پروژه‌های عمرانی با رأس بنیادی مدیریت زمان به عنوان یکی از حوزه‌های مهم و چالش‌برانگیز در جهان امروز

بود. این یافته نشان می‌دهد که ساختار مدیریتی و ثبات در اهداف پروژه، عاملی حیاتی‌تر از بهبود صرفاً فنی است.

۲. حساسیت به منابع انسانی (سناریوی ۲): تغییرات منفی در پارامترهای مرتبط با نیروی انسانی (کاهش آموزش، کاهش تحقیق و توسعه و تناسبات حقوق با کار) منجر به افزایش چشم‌گیر زمان اتمام پروژه شد. این امر بر اهمیت حلقه‌های بازخوردی مربوط به انگیزه، خستگی و بهره‌وری تأکید دارد.

۳. اعتبارسنجی قوی: مدل توسعه‌یافته در آزمون بازسازی رفتار مرجع، عملکردی بسیار دقیق از خود نشان داد؛ به طوری که پیش‌بینی مدل برای سناریوی جاری ۸۴۵ روز بود، در حالی که مدت زمان واقعی پروژه مطالعه موردی ۸۵۰ روز (۲ سال و ۴ ماه) ثبت شده است، که نشان‌دهنده خطای کمتر از ۱٪ است.

مدل معرفی شده در این پژوهش، موجب شناخت و یادگیری بهتر پروژه‌های عمرانی می‌گردد و درک درستی از ارتباط عوامل مؤثر بر زمان ارائه می‌دهد. همچنین، می‌تواند عوامل و ارتباط بین آن‌ها را به درستی نشان دهد. با توجه به تناسب بین رفتار مدل و دنیای واقعی و همچنین آزمون‌های اعتبارسنجی مدل، می‌توان گفت در مدل پیشنهادی فرایند انتخاب متغیرها، مفهوم‌سازی و نوشتن معادلات ریاضی، ساختار و رفتار سیستم تا حد مطلوبی درست شناسایی شده است. عمده روابط بین متغیرها مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای است و مابقی بر اساس منطق حاکم و رفتار غالب تدوین شده است. مدل ارائه‌شده با تغییر در مقادیر مرتبط و بازنویسی مجدد متغیرهای ثابت در پروژه‌های ساختمانی دیگر قابل استفاده می‌باشد. بنابراین، اهمیت ویژه این تحقیق در عمل محقق خواهد شد، به طوری که می‌توان در اجرا به عنوان کاربرد اساسی مدل‌سازی در صنعت با پیشنهاد سناریوهای جدید، اعمال آن‌ها در مدل و مشاهده اثرات آن‌ها، رفتارهای نامطلوب را بهبود داد و گامی اساسی در راستای ارتقای صنعت ساخت‌وساز برداشت.

اغلب موارد، تأخیر به معنای افزایش هزینه‌های سربار و قرار گرفتن در معرض تورم برای پیمانکار است. حتی با وجود فناوری‌های مدرن، امروزه نیز دیرکرد زمان تکمیل و بهره‌برداری از پروژه‌ها، به دلیل عدم شناخت عوامل و پارامترهای مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی و عدم درک درست ارتباط و تعامل بین آن‌ها، از برنامه زمان‌بندی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش، یک مدل تحلیلی با رویکرد پویایی سیستم برای شناخت عوامل پویایی پروژه و چگونگی تعاملات آن‌ها ارائه شد. هدف از این مطالعه، شناخت عوامل مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی و کشف ساختارهای بازخوردی مؤثر بر آن بود. این پژوهش نشان داد که چگونه مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم برای توصیف و کمی‌سازی اثرات عوامل مختلف بر مدت زمان یک پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که گفته شد، غالب مطالعات انجام‌شده در زمینه شناسایی عوامل مؤثر بر دیرکرد پروژه‌های عمرانی با رویکردهای آماری و مبتنی بر جمع‌آوری نظرات از طریق پرسش‌نامه انجام گرفته است. در این تحقیق‌ها عموماً، در بهترین حالت، عوامل مؤثر به درستی شناسایی شده است اما به ارتباط بین این عوامل، چگونگی اثرات متقابل آن‌ها، ارتباطات و بازخوردها پرداخته نشده است. بنابراین، نتایج این تحقیقات نمی‌تواند منجر به شناخت و یادگیری از سیستم شود و این همان شکاف موجود در تحقیقات پیشین است که در نویسندگان برای ارائه مدلی جامع از پارامترها و عوامل مؤثر بر زمان انگیزه ایجاد کرد. پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی و تحلیل پویایی‌های سیستم مؤثر بر مدت زمان پروژه‌های عمرانی طراحی شد. مدل پویایی سیستم توسعه‌یافته با استفاده از ۴۷ پارامتر شناسایی‌شده از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه دلفی، به عنوان ابزاری تحلیلی برای درک ساختارهای بازخوردی پنهان در این پروژه‌ها عمل می‌کند.

خلاصه یافته‌های اصلی مدل

مدل‌سازی SD منجر به شناسایی شش حلقه علت و معلولی اصلی شد که بر زمان‌بندی پروژه تأثیر می‌گذارند. تحلیل سناریوپردازی مهم‌ترین یافته‌های ساختاری را به شرح زیر مشخص کرد:

۱. اولویت کنترل کارفرما (سناریوی ۳): مهم‌ترین عامل در کوتاه‌ترین زمان اتمام پروژه، حذف یا به حداقل رساندن «تغییر در روش اجرا» و «تغییر در سفارش‌ها» ناشی از دخالت کارفرما

جدول ۳ توصیه‌های عملی برای کاهش تأخیرات و بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی

محور راهکار	توصیه عملیاتی مشخص	دلیل مبتنی بر مدل SD
مدیریت قرارداد و ریسک کارفرما	تثبیت فرایند طراحی و اجرا: مدیران پروژه و مشاوران باید تلاش کنند تا روش اجرا و ساختار سفارشات را در فازهای اولیه قرارداد تثبیت نمایند. از اعمال تغییرات روش اجرا توسط کارفرما (به جز در موارد اضطراری) اجتناب شود.	سناریوی سوم نشان داد که حذف تغییر روش اجرا، بهترین عملکرد را دارد. این امر از ورود به حلقه‌های بازخوردی منفی ناشی از عدم قطعیت جلوگیری می‌کند.
سرمایه‌گذاری در منابع انسانی	تضمین پرداخت به موقع حقوق: کارفرمایان باید سازوکار پرداخت حقوق پرسنل پیمانکار را به صورت منظم و بدون تأخیر تضمین کنند. همچنین، تخصیص حداقل بودجه ثابت برای آموزش‌های دوره‌ای پرسنل فنی کلیدی الزامی است.	سناریوی دوم نشان داد که کاهش حقوق و آموزش، مستقیماً بر «انگیزه» و «بهره‌وری» تأثیر منفی می‌گذارد و منجر به افزایش نرخ «دوباره‌کاری» می‌شود.
مدیریت بوروکراسی و ارتباطات	تقویت سازوکار حل مسئله حقوقی: نیاز است برای رسیدگی به مسائل حقوقی، قراردادی و جلسات ذی‌نفعان (حلقه ۳)، زمان‌بندی مشخص و مدیریتی قوی در نظر گرفته شود تا این اقدامات به جای کاهش نرخ کارهای انجام‌شده، صرفاً بخشی از فرایند اداری با زمان‌بندی تعریف شده باشند.	جلسات زیاد و مسائل حقوقی، نرخ پیشرفت پروژه را در صورت عدم مدیریت صحیح، کاهش می‌دهند.

توصیه‌های عملی برای مدیران پروژه و ذی‌نفعان

بر اساس تحلیل‌های کمی و کیفی مدل، توصیه‌های عملی جدول (۳) برای کاهش تأخیرات و بهبود عملکرد پروژه‌های عمرانی ارائه می‌شود.

کاربردها و کارکردهای مدل

مدل ارائه شده، فراتر از صرفاً شناسایی عوامل، یک ابزار کاربردی برای مدیریت پروژه است که می‌تواند در سطوح استراتژیک و تاکتیکی مورد استفاده قرار گیرد. برای پیمانکاران، مدل یک آزمایشگاه شبیه‌سازی فراهم می‌آورد تا اثرات سرمایه‌گذاری بر منابع انسانی (مانند افزایش آموزش و بهبود حقوق) را بر نرخ پیشرفت واقعی بسنجند (همان‌طور که در سناریوی دوم مشاهده شد)، که این امر توجیهی برای تخصیص منابع به فعالیت‌های بهره‌وری‌زا ارائه می‌دهد. برای کارفرمایان، مدل ابزاری برای کنترل ریسک‌های سازمانی است؛ زیرا تأثیر تصمیمات مدیریتی، مانند حذف تغییرات ناخواسته در روش اجرا (سناریوی سوم)، را به صورت کمی بر مدت زمان نهایی پروژه نشان می‌دهد. در نهایت، کارکرد اصلی مدل، افزایش «یادگیری از سیستم» برای هر دو طرف است تا با درک ساختارهای بازخوردی پنهان، سیاست‌هایی را اتخاذ کنند که به طور سیستماتیک موجب کاهش زمان و افزایش کارایی پروژه گردد.

محدودیت‌ها و مسیر تحقیقات آتی

با وجود اعتبارسنجی قوی مدل از منظر ساختاری و رفتاری، محدودیت‌های مدل پویایی سیستم حاضر باید مورد توجه قرار گیرد. این مدل عمدتاً بر دینامیک‌های داخلی مدیریت پروژه و روابط بین عوامل عملیاتی و انسانی متمرکز است، و در نتیجه، ممکن است در شرایطی که نوسانات کلان اقتصادی (مانند تورم‌های شدید و تغییرات ناگهانی شاخص‌های تعدیل) عامل غالب تأخیر باشند، دقت آن کاهش یابد، زیرا اثرات این عوامل به صورت مستقیم مدل‌سازی نشده‌اند. همچنین، مدل در سطح جزئیات تأمین منابع و مدیریت ریسک‌های زنجیره تأمین دارای حوزه‌هایی برای توسعه است. لذا، کاربرد اصلی این مدل در پروژه‌هایی با ثبات نسبی اقتصادی است، و برای تعمیم کامل به شرایط پرنوسان، نیازمند بسط مدل با لحاظ کردن دقیق‌تر ریسک‌های اقتصادی - مالی و مدل‌سازی عدم قطعیت‌های فازی می‌باشد.

یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش، عدم مدل‌سازی صریح و مجزا برای مفاهیم انتزاعی مانند «فرهنگ سازمانی» و «سبک مدیریت» است. اگرچه اثرات این عوامل بر بهره‌وری و رضایت، از طریق متغیرهای واسطه‌ای مانند رضایت کارکنان و انگیزه در مدل گنجانده شده است، تحقیقات آینده می‌تواند با استفاده از شاخص‌های کمی رفتاری، این مفاهیم را به صورت متغیرهای سطح یا نرخ مجزا به مدل پویایی سیستم اضافه کند.

فوق، با توجه به مطالعات و نتایج به دست آمده، زمینه‌های پیشنهادی جدید زیر نیز در جهت انجام مطالعات آتی در این حوزه پیشنهاد می‌شود:

۱. افزایش جزئیات بیشتر در مورد انواع منابع و هزینه آن‌ها و نیز مدل‌سازی تغییرات احتمالی در مورد نوع و کیفیت منابع.
۲. مدل‌سازی ریسک‌های معمول در پروژه‌ها مخصوصاً در زمینه تدارک منابع، شرایط اقتصادی و تأمین اعتبار.
۳. بسط اثرات کمبود نقدینگی بر روی منابع مختلف و نرخ انجام کار.
۴. تحلیل ماهیتی ریسک‌هایی که روی کل پروژه، در اثر ایجاد دوباره‌کاری، هزینه‌های اضافی و تأخیرات اعمال می‌شود.
۵. یکپارچه‌سازی مدل‌های پویایی سیستم و رویکردهای کلاسیک.

واژه‌نامه

پویایی سیستم‌ها	System Dynamics
مدل‌سازی اطلاعات ساختمان	Building Information Modeling
شاخص‌های پیشرو ایمنی	Safety Leading Indicators
مدیریت کیفیت جامع	Total Quality Management
حلقه دوباره‌کاری کوپر	Cooper's Rework Cycle

سپاسگزاری

در این مطالعه، مرز مدل بر اساس هدف پژوهش در سطح درون‌پروژه تعریف شد و عوامل کلان اقتصادی یا سیاسی در دامنه مدل لحاظ نگردیدند. این تصمیم بر مبنای اصول پویایی سیستم و با هدف حفظ شفافیت ساختار بازخوردی اتخاذ گردید. با این حال، ترکیب داده‌ها و متغیرهای محیطی در چارچوب مدل‌های سطح کلان در پژوهش‌های آینده می‌تواند به شناسایی تعاملات بین‌سازمانی و اثر نوسانات اقتصادی بر مدت زمان اجرای پروژه‌ها کمک کند. همچنین، با وجود موفقیت مدل فعلی در تبیین پویایی‌های تأخیر پروژه، عدم توجه مستقیم به فناوری‌های نوین یک محدودیت برای کاربرد آینده است. پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آتی بر ادغام مدل‌سازی پویایی سیستم با مفاهیم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) متمرکز شوند. این کار مستلزم تعریف پارامترهایی جدید برای تخمین میزان کاهش خطاهای طراحی و افزایش بهره‌وری ناشی از این ابزارها و سپس شبیه‌سازی سناریوهای بهبودیافته در مدل است. اگر چه سناریوپردازی نوعی تحلیل حساسیت کیفی ارائه می‌دهد، اما برای تعیین دقیق‌تر پارامترهای تأثیرگذار، انجام تحلیل حساسیت پارامتری کمی بر روی متغیرهای کلیدی مدل (مانند نرخ دوباره‌کاری، نرخ بهره‌وری منابع، نرخ پیشرفت و نرخ تأخیر در پرداخت) در نرم‌افزار شبیه‌سازی ضروری است. این امر نیازمند دسترسی مستقیم به فایل‌های شبیه‌سازی و داده‌های اولیه دقیق است که در این پژوهش میسر نبود. برای تعمیم نتایج، مدل باید در تحقیقات آتی بر روی داده‌های تاریخی بیشتری از پروژه‌های مختلف اعتبارسنجی شود تا اطمینان حاصل شود که این ساختار پویایی در سایر محیط‌های ساخت‌وساز نیز صادق است. علاوه بر موارد

مراجع

- [1] H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017. [Online].
- [2] T. Williams, "Assessing extension of time delays on major projects," *International Journal of Project Management*, vol. 21, no. 1, pp. 19–26, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00060-6)
- [3] M. Sambasivan and Y. W. Soon, "Causes and effects of delays in Malaysian construction industry," *International Journal of Project Management*, vol. 25, no. 5, pp. 517–526, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.007>
- [4] Ndekugri, N. Braimah, and R. Gameson, "Delay analysis within construction contracting organizations," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 134, no. 9, pp. 692–700, 2008. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:9\(692\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:9(692))

- [5] G. Sweis, R. Sweis, A. A. Hammad, and A. Shboul, "Delays in construction projects: The case of Jordan," *International Journal of Project Management*, vol. 26, no. 6, pp. 665–674, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.09.009>
- [6] T. Pourrostan and A. Ismail, "Causes and effects of delay in Iranian construction projects," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 1793–8236, 2012. [Online].
- [7] B. Abbasnejad and H. Izadi Moud, "Construction delays in Iranian civil engineering projects: An approach to the financial security of construction business," *Life Science Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 2632–2637, 2013. [Online].
- [8] M. Mukuka, C. Aigbavboa, and W. Thwala, "A theoretical assessment of the causes and effects of construction project delay," in *Proceeding CEE 2013*, pp. 174–177, 2013. [Online]. Available: <https://ceeconference.org>
- [9] J. D. Owolabi, M. A. Lekan, C. O. Oloke, O. Olusanya, P. Tunji-Olayeni, and P. D. Owolabi, "Causes and effect of delay on project construction delivery time," *International Journal of Education and Research*, vol. 2, no. 2, pp. 197–208, 2014. [Online].
- [10] M. Tafazzoli and P. P. Shrestha, "Investigating causes of delay in US construction projects," in *Proc. 53rd ASC Annu. Int. Conf.*, pp. 611–621, 2017. [Online].
- [11] J. M. Lyneis, K. G. Cooper, and S. A. Els, "Strategic management of complex projects: A case study using system dynamics," *System Dynamics Review*, vol. 17, no. 3, pp. 237–260, 2001. [Online].
- [12] P. N. Repenning, "A simulation-based approach to understanding the dynamics of innovation implementation," Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA, USA, Tech. Rep., 1999. [Online].
- [13] S. Howick, *Using System Dynamics Models with Litigation Audiences*. Dept. of Management Science, Univ. of Strathclyde, Glasgow, U.K., 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.041>
- [14] S. Chritamara, S. O. Ogunlana, and N. Bach, "System dynamics modeling of design and build construction projects," *Construction Innovation*, vol. 4, no. 3, pp. 593–603, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5592/otmcj.2012.3.3>
- [15] P. E. Love, "Using systems dynamics to better understand change and rework in construction project management systems," *International Journal of Project Management*, vol. 20, no. 6, pp. 425–436, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00039-4)
- [16] J. M. Bonner, R. W. Ruekert, and O. C. Walker, Jr., "Upper management control of new product development projects and project performance," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 19, no. 3, pp. 233–245, 2002. [Online].
- [17] S. Howick, "Using system dynamics to analyse disruption and delay in complex projects for litigation: Can the modelling purposes be met?," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 54, no. 3, pp. 222–229, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601502>
- [18] C. K. Chang, "Quantifying the impact of schedule compression on labor productivity for mechanical and sheet metal contractor," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 133, no. 4, pp. 287–296, 2007. [Online].
- [19] M. H. Sebt, A. Gereei, and T. H. Naghash, "A comprehensive framework for integrated management of opportunities and threats by using dynamic system," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 161–169, 2009. [Online].

- [20] B. Dangerfield, S. Green, and S. Austin, "Understanding construction competitiveness: The contribution of system dynamics," *Construction Innovation*, vol. 10, no. 4, pp. 408-420, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/14714171011083579>
- [21] M. J. Mawdesley and S. Al-Jibouri, "Modelling construction project productivity using systems dynamics approach," *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 59, no. 1, pp. 18-36, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/17410401011006095>
- [22] S. K. Wan, M. Kumaraswamy, and D. T. Liu, "Dynamic modelling of building services projects: A simulation model for real-life projects in the Hong Kong construction industry," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, nos. 9-10, pp. 2054-2066, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.6106/JCEPM.2013.3.3.035>
- [23] Alvanchi, S. Lee, and S. AbouRizk, "Dynamics of working hours in construction," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 1, pp. 66-77, 2012. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000384)
- [24] G. Ye, "Simulating effects of management measures on the improvement of the environmental performance of construction waste management," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 62, pp. 56-63, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.010>
- [25] W. Yu-jing, "Application of system dynamics in construction project planning and control," in *Proc. 2012 2nd Int. Conf. on Business Computing and Global Informatization (BCGI)*. IEEE, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/BCGIN.2012.20>
- [26] S. Han, P. Love, and F. Peña-Mora, "A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, nos. 9-10, pp. 2044-2053, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.039>
- [27] F. Nasirzadeh and P. Nojedehe, "Dynamic modeling of labor productivity in construction projects," *International Journal of Project Management*, vol. 31, no. 6, pp. 903-911, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.11.003>
- [28] S. P. Warhoe, *Applying Earned Value Management to Design-Bid-Build Projects to Assess Productivity Disruption: A System Dynamics Approach*. Boca Raton, FL, USA: Universal-Publishers, 2013. [Online]. Available: <https://www.universal-publishers.com>
- [29] F. Nasirzadeh, "Modeling quality management in construction projects," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 14-22, 2013. [Online]. Available: <https://ijce.iust.ac.ir>
- [30] Z. Ding, "A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China," *Waste Management*, vol. 51, pp. 130-141, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.001>
- [31] S. Abotaleb and I. H. El-adaway, "Managing construction projects through dynamic modeling: Reviewing the existing body of knowledge and deriving future research directions," *Journal of Management in Engineering*, vol. 34, no. 6, p. 04018033, 2018. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001797](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001797)
- [32] Z. G. Al-Kofahi, A. Mahdavian, and A. Oloufa, "System dynamics modeling approach to quantify change orders impact on labor productivity: Principles and model development comparative study," *International Journal of Construction Management*, pp. 1-12, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1711494>

- [33] S. Mohammadrezaytayebi, M. H. Sebt, and M. R. Afshar, "Introducing a system dynamic-based model of quality estimation for construction industry subcontractors' works," *International Journal of Construction Management*, pp. 1–15, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1899592>
- [34] M. Golshaniman, "Providing a system dynamic model to predict construction status in Iran using sustainable development indicators," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 17, no. 3, pp. 1–19, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.30495/JIEI.2021.1929444.1119>
- [35] C. Wang, "System dynamics tool for entropy-based risk control on sleeve grouting in prefabricated buildings," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no. ?, pp. ?, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2021-0048>
- [36] M. Dadashi Haji and B. Behnam, "An automated BIM and system dynamics tool for assessing safety leading indicators in construction projects," *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, vol. 43, no. 3, pp. 414–439, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2022-0072>
- [37] H. Riaz, K. I. A. Khan, F. Ullah, M. B. Tahir, M. Alqurashi, and B. T. Alsulami, "Key factors for implementation of total quality management in construction sector: A system dynamics approach," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. ?, pp. ?, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101903>
- [38] M. A. Al-Arihshi, S. Alwabel, B. Almansour, and M. Alshahrani, "BIM impact on construction project time using system dynamics in Saudi Arabia's construction," *Buildings*, vol. 13, no. 9, p. 2267, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings13092267>
- [39] L. Zhao, X. Qin, and C. Chen, "Research on risk factors of construction project delays based on system dynamics," *Procedia Computer Science*, in *Proc. 12th Int. Conf. on Information Technology and Quantitative Management (ITQM 2025)*, vol. 266, pp. 349–356, 2025. [Online]. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.08.044>
- [40] Bryman, *Social Research Methods*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2016. [Online].
- [41] K. Brockhoff, "The performance of forecasting groups in computer dialogue and face-to-face discussion," in *Large-Scale Projects: Management Trends for Major Projects*. Addison-Wesley Publishing Co., 1975. [Online].
- [42] D. M. Boje and J. K. Murnighan, "Group confidence pressures in iterative decisions," *Management Science*, vol. 28, no. 10, pp. 1187–1196, 1982. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/mnsc.28.10.1187>
- [43] M. R. Hallowell and J. A. Gambatese, "Qualitative research: Application of the Delphi method to CEM research," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, no. 1, pp. 99–107, 2010. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000137)
- [44] Sushil, *System Dynamics: A Practical Approach for Managerial Problems*. New Delhi, India: Wiley Eastern Ltd., 1993. [Online].
- [45] M. Park, "Model-based dynamic resource management for construction projects," *Automation in Construction*, vol. 14, no. 5, pp. 585–598, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11083681>
- [46] J. D. Sterman, "System dynamics modeling for project management," unpublished manuscript, Cambridge, MA, USA, 1992. [Online].
- [47] D. N. Ford, "The dynamics of project management: An investigation of the impacts of project processes and coordination on performance," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA, 1995. [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu>

- [48] S. A. Assaf and S. Al-Hejji, "Causes of delay in large construction projects," *International Journal of Project Management*, vol. 24, no. 4, pp. 349–357, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.11.010>
- [49] S. Kermanshachi, R. Thakur, and P. Govan, "Discovering the impact of late change orders and rework on labor productivity: A water treatment case study analysis using system dynamics modeling," in *Proc. Construction Research Congress 2018*, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/9780784481295.069>
- [50] F. P. Davidson and G. Huot, "Large-scale projects: Management trends for major projects," *Cost Engineering*, vol. 33, no. 2, p. 15, 1991. [Online].
- [51] J. M. Lyneis and D. N. Ford, "System dynamics applied to project management: A survey, assessment, and directions for future research," *System Dynamics Review*, vol. 23, nos. 2–3, pp. 157–189, 2007. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com>
- [52] M. Loosemore, *Essentials of Construction Project Management*. Sydney, Australia: UNSW Press, 2003. [Online]. Available: <https://www.unswpress.org.au>
- [53] M. Odeh and H. T. Battaineh, "Causes of construction delay: Traditional contracts," *International Journal of Project Management*, vol. 20, no. 1, pp. 67–73, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00037-5)
- [54] M. Sayedyahosseini, "Application of system dynamics model in management of hydroelectric power plants," Iranian Association for Energy Economics (IRAEE), Tehran, Iran, Tech. Rep., 2009. [Online]. Available: <https://iraee.org/en/home-en/>
- [55] J. W. Forrester, *Urban Dynamics*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1969.
- [56] J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2000.



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

The Effect of Installing Semi-circular Rotary Gate in Rectangular Canals on Flow Hydraulics*

Research Article

Mehrdad Kheiraei¹, Hojjat Allah Yonesi² , Babk Shahinejad³, Hassan TorabiPoudeh⁴, Ava Maraashi⁵

DOI: [10.22067/jfcei.2026.94812.1369](https://doi.org/10.22067/jfcei.2026.94812.1369)

1. Introduction

The rotary gate is an innovative structure designed for upstream water level control (Marashi et al., 2019). It operates by rotating around a vertical axis and offers several advantages, including low actuation force, rapid response time, reduced sediment accumulation, and the elimination of sealing requirements during operation. Previous studies have shown that both the gate opening angle and the submergence ratio significantly influence the discharge coefficient. Accordingly, empirical relationships were developed to estimate discharge under varying flow conditions (Marashi et al., 2021). Moreover, experimental investigations involving semi-circular rotary gates installed in rectangular channels with gradual transitions revealed that increasing the opening angle or decreasing the transition length enhances the discharge coefficient (Khairaei et al., 2025).

The present study examines the hydraulic behavior of a semi-circular rotary gate placed in a rectangular channel featuring a gradual transition. The effects of gate opening angle, transition length, and flow discharge on flow distribution and energy loss are analyzed. In addition, empirical relationships are proposed to estimate the discharge passing through both sides of the gate and the associated energy loss under free-flow conditions. These relationships aim to provide a comprehensive evaluation of the gate's performance as a dual-purpose structure for both water level control and flow measurement.

2. Materials and Methods

Experiments were conducted in a rectangular laboratory canal measuring 12 m in length, 0.6 m in width, and 0.5 m in height, with a longitudinal bed slope of 0.00088. Flow was supplied by a centrifugal pump from an underground reservoir to a constant-head tank. The flow rate was measured upstream using an electromagnetic flowmeter with an accuracy of ± 0.01 L/s. A hinged gate

was installed at the downstream end of the flume to maintain free-flow conditions. Flow velocity was measured using a three-dimensional (3D) velocimeter.

Gradual transitions from a rectangular to a semicircular cross-section were fabricated from galvanized steel sheets with a thickness of 0.004 m. Three transition lengths were considered: 0.6, 0.9, and 1.2 m. The transitions were designed to be smooth and continuous in order to minimize geometric discontinuities and associated flow instabilities. The downstream end of each transition was connected to a semicircular frame with a diameter of 0.6 m, which served as the mounting structure for a semicircular rotary gate. The gate was constructed from 2 mm thick steel, and its opening angle was adjusted using a graduated ring. Gate opening angles were tested from 35° to 85° in 5° increments, while flow rates ranged from 0.020 to 0.038 m³/s with an interval of 0.002 m³/s. Figure 1 shows different implementations of the physical model.



Figure 1 Different parts of the physical model

3. Results and Discussion

Analysis of the flow through the rotary gate in a rectangular channel indicates that the impact of the flow on the gate edge causes it to split into left and right sides, each with distinct cross-sectional areas and flow characteristics. The results show that the right-side cross-

* Manuscript received August 08, 2025, Revised December 28, 2025, Accepted February 28, 2026.

¹ Ph.D. Student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran.

² Corresponding author. Associate Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran.

Email: yonesi.h@lu.ac.ir.

³ Assistant Professor, Water Engineering Department, Lorestan University, Lorestan, Iran.

⁴ Professor, Water Engineering Department, Lorestan University, Lorestan, Iran.

⁵ Graduate of Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Lorestan University, Lorestan, Iran.

section is mostly located on the fixed semi-circular transition and is not influenced by the upstream gradual transition length, but increases solely with the gate opening angle. In contrast, the left-side cross-section depends not only on the gate opening angle and flow depth but also on the length of the gradual transition; the shortest transition produces the largest left-side cross-section, while the longest yields the smallest. This difference leads to the right-side cross-section being smaller than the left for a given opening angle, and the total flow through the gate ($A_W = A_R + A_L$) is influenced by both the transition length and opening angle.

The transverse water surface profiles show that increasing the gate opening angle reduces lateral variations, improving flow depth uniformity. The largest depth fluctuations occur at 35° and the smallest at 85° . To control non-uniformity, gradual transitions of different lengths and precise gate angle adjustment proved effective.

The flow velocity distribution differs between the two sides of the gate. On the right side, velocities are higher but decrease as the gate opening angle increases. In contrast, the velocity on the left side remains nearly constant regardless of the opening angle. This indicates that the increased flow rate through the left side is primarily due to the enlargement of its cross-sectional area rather than a change in velocity.

Analysis of the flow split between the two sides reveals that increasing the gate opening angle raises the proportion of flow passing through the left side while reducing that through the right side. Additionally, variations in the gradual transition length alter the flow distribution between the two sides. Despite these changes in flow distribution, the total flow rate through the gate remains nearly constant and exhibits a linear relationship with the opening angle. Figure 2 shows the changes in the percentage of flow passing through the left and right sections of the rotary gate as a function of its opening angle.

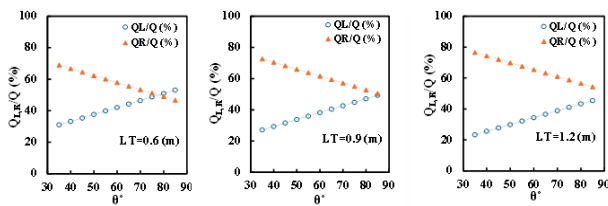


Figure 2 The changes in the percentage of flow passing through the sides of the gate due to changes in the gate opening angle.

Finally, the following equations are proposed to calculate the flow rate passing through the left and right sides of the rotary gate as a function of the gate opening angle and the gradual transition length.

$$\frac{Q_R}{Q} = (0.769 - 0.254\theta + 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (1)$$

$$\frac{Q_L}{Q} = (0.231 + 0.254\theta - 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (2)$$

In these equations, the opening angle (θ) is expressed in radians, the transition length (L_T) in meters, the canal width (B) in meters, and the flow rate ratios as percentages.

Energy loss analysis indicates that the highest losses occur at small gate openings (35°), while the lowest losses are observed at large openings (85°). The gate opening angle is the most significant factor influencing relative energy loss, with the transition length playing a secondary role (Figure 3).

Experimental data and corresponding calculations reveal a nearly linear relationship between flow rate and energy loss. Furthermore, the estimated relative energy loss shows good agreement with laboratory measurements. The following equation is proposed to calculate the relative energy loss of the rotary gate under free-flow conditions.

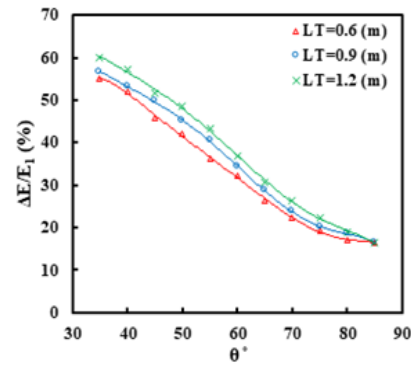


Figure 3 Effect of gradual transition length on relative energy loss

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \xi \quad (3)$$

$$\xi = 0.090 + 0.513\theta - 0.010 \frac{L_T}{B} \quad 35^\circ \leq \theta \leq 85^\circ \quad (4)$$

4. Conclusion

The results indicate that the interaction of the flow with the edge of the rotary gate causes flow separation and lateral variations in the water surface profile. Increasing the gate opening angle reduces these variations, with the most pronounced effects observed at 35° and the least at 85° .

Flow velocity and discharge are higher on the right side of the gate; however, they decrease as the opening angle increases, while the flow on the left side increases correspondingly. The length of the gradual transition also influences the discharge distribution: increasing the transition length reduces the left-side discharge and increases the right-side discharge.

Higher flow rates result in greater energy loss, although this effect diminishes as the gate opening angle increases. Finally, precise empirical relationships are provided for calculating the discharge through both sides of the gate and the associated energy loss under free-flow conditions.



تأثیر کارگذاری دریچه دوار نیم‌دایره‌ای در کانال‌های مستطیلی بر هیدرولیک جریان*

مقاله پژوهشی

مهرداد خیرایی^(۱) حجت الله یونسی^(۲) بابک شاهی نژاد^(۳) حسن ترابی پوده^(۴) آوا مرعشی^(۵)

DOI: 10.22067/jfpei.2026.94812.1369

چکیده در این تحقیق، عملکرد هیدرولیکی یک دریچه دوار نیم‌دایره‌ای با قطر 6/0 متر و به همراه تبدیل تدریجی با سه طول متفاوت در یک کانال مستطیلی بررسی شده است. آزمایش‌ها در دامنه گسترده‌ای از دبی، عمق‌های بالادست و زاویه‌های بازشدگی دریچه انجام شد. برخورد جریان با لبه دریچه دوار موجب تقسیم جریان و تغییرات عرضی در سطح آب می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، این تغییرات کاهش می‌یابد. بیشترین ناپایداری در زاویه ۳۵ درجه و کمترین در ۸۵ درجه رخ می‌دهد. سرعت و دبی در سمت راست بیشتر است، اما با افزایش زاویه، کاهش می‌یابد. در سمت چپ، سرعت تقریباً ثابت مانده و افزایش دبی ناشی از افزایش سطح مقطع جریان است. افزایش زاویه بازشدگی باعث انتقال بیشتر جریان به سمت چپ می‌شود. همچنین، افزایش طول تبدیل تدریجی، دبی سمت راست را افزایش و سمت چپ را کاهش می‌دهد. در مجموع، با افزایش زاویه یا کاهش طول تبدیل، جریان بیشتری از سمت چپ عبور می‌کند. افزایش افت انرژی با میزان افزایش دبی عبوری جریان رابطه مستقیم و با مقدار زاویه بازشدگی دریچه رابطه عکس دارد. بیشترین افت انرژی مربوط به زاویه ۳۵ درجه و کمترین آن به زاویه ۸۵ درجه است. در نهایت، روابطی برای محاسبه دبی عبوری از دو طرف دریچه دوار و افت انرژی در شرایط جریان آزاد ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی دریچه نیم‌دایره‌ای دوار، افت انرژی، جریان آزاد، توزیع جریان، کانال مستطیلی.

The Effect of Installing Semi-circular Rotary Gate in Rectangular Canals on Flow Hydraulics

Mehrdad Kheiraei Hoojjat Allah Yonesi Babk Shahinejad Hassan TorabiPoudeh Ava Maraashi

Abstract In this study, the hydraulic performance of a semi-circular rotary gate, along with a gradual transition with three different lengths in a rectangular canal, was investigated. Experiments were conducted using various flow rates, upstream water depths, and gate opening angles. The interaction of the flow with the edge of the rotary gate causes flow division and lateral variations in the water surface. Results showed that these variations decrease as the gate opening angle increases, with the highest instability occurring at an angle of 35 degrees and the lowest at 85 degrees. The velocity and discharge on the right side of the gate were higher, but both decreased with an increase in the gate angle. The velocity on the left side was almost constant, but the discharge increased due to a larger flow cross-section. More flow was diverted to the left side with an increase in the gate opening angle. The discharge on the right side was increased while the discharge on the left was decreased by increasing the length of the gradual transition. Increasing the gate angle or reducing the transition length resulted in a greater share of flow passing through the left side overall. Energy loss increases directly with flow rate and has an inverse relationship with the gate opening angle. The highest energy loss occurred at a 35-degree opening and the lowest at 85 degrees. Finally, relationships are presented that determine the discharge through both sides of the rotary gate and the energy loss in this structure.

Key words Semi-Circular Rotary Gate, Energy loss, Free Flow, Flow Distribution, Rectangular Canal.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۵/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۲/۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۳) استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۴) استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

(۵) دانش آموخته سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان.

مقدمه

از دیرباز، استفاده و انتقال آب‌های سطحی و زیرزمینی برای آبیاری و تأمین آب، نقشی حیاتی در توسعه جوامع داشته است. با کاهش منابع آب و افزایش تقاضا، اندازه‌گیری دقیق جریان و کنترل سطح آب در سامانه‌های آبیاری و زهکشی اهمیت فزاینده‌ای یافته است. پایش منظم مصرف آب و مدیریت بهینه آن، به ویژه در شبکه‌های توزیع آب، عاملی کلیدی در مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. سازه‌های کنترل جریان، از جمله دریچه‌های کشویی و شعاعی، نقش اساسی در این فرایند ایفا می‌کنند. این دریچه‌ها با ایجاد رابطه‌ای پایدار بین عمق و دبی جریان، امکان تنظیم دقیق سطح آب، اندازه‌گیری جریان و افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی در شبکه‌های آبیاری را فراهم می‌آورند. دریچه‌های کشویی به دلیل طراحی ساده و کارایی بالا، به ویژه در کانال‌های بزرگ، کاربرد گسترده‌ای دارند؛ اما مشکلاتی از قبیل وزن زیاد و اصطکاک در کانال‌های کوچک، عملکرد آن‌ها را محدود می‌کند. در مقابل، دریچه‌های شعاعی با کاهش برخی مشکلات مکانیکی گزینه‌ای مناسب‌تر هستند، اگر چه هزینه ساخت و نگهداری بالاتری دارند. انتخاب نوع دریچه بسته به نیاز پروژه و ملاحظات اقتصادی انجام می‌شود. مطالعات گسترده‌ای توسط پژوهشگران مختلف از جمله هنری [1]، بنجامین [2]، راجاراتنام و سوبرامانیا [3]، سوامی [4]، واندن‌بروک [5]، راث و هاگر [6]، فرو [7]، کیم [8]، لوزانو و همکاران [9]، بلود و همکاران [10]، حبیب‌زاده و همکاران [11] و بیجن‌خان و کوچک‌زاده [12] انجام گرفته است. به عنوان مثال، هنری [1] به بررسی توزیع جریان در پایین‌دست دریچه کشویی در شرایط فشار هیدرواستاتیکی پرداخت و معادله‌ای برای ارتباط ضریب دبی و عمق جریان بالادست ارائه کرد. همچنین، راجاراتنام و سوبرامانیا [3] با استفاده از معادلات انرژی و مومنتوم، روابطی برای محاسبه ضریب دبی در شرایط جریان آزاد و مستغرق توسعه دادند. سوامی [4] نمودارهای هنری را با استفاده از رگرسیون غیرخطی به معادلات کاربردی تبدیل کرد که باعث سهولت در تنظیم جریان و برآورد دبی در کانال‌ها شد. کیم [8] و بنجامین [2] به کمک حل عددی معادلات ناویر-استوکس و تحلیل تابع پتانسیل مختلط، رفتار جریان و ضریب تراکم‌پذیری را در مجاورت دریچه‌ها بررسی کردند. مطالعات بلود و همکاران [10] نیز با به‌کارگیری معادلات انرژی و مومنتوم، تغییرات ضریب دبی

را در حضور پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق تحلیل کردند. با این وجود، مشکلات عملی دریچه‌های کشویی همچون نیروی زیاد لازم برای غلبه بر وزن و اصطکاک در باز و بسته شدن، به خصوص در کانال‌های فرعی، عملکرد آن‌ها را محدود ساخته است؛ بنابراین، دریچه‌های شعاعی به عنوان جایگزینی مطرح شده‌اند. با وجود مزایای دریچه‌های شعاعی، چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالای ساخت، نصب و نگهداری نیز وجود دارد. بیجن‌خان و همکاران [13] با استفاده از تحلیل ابعادی و توسعه روش فرو، دریچه‌های شعاعی را در شرایط جریان آزاد و مستغرق کالبره کرده و روابط بی‌بعد مختلفی را ارائه کردند. همچنین، سلماسی و آبراهام [14] تأثیر زاویه را بر ضریب دبی دریچه‌های کشویی مایل بررسی کردند و نشان دادند که افزایش زاویه مایل، با ایجاد همگرایی جریان، ضریب دبی و ظرفیت جریان را افزایش می‌دهد. خلیلی‌شایان و همکاران [15] روش‌های دقیقی برای تخمین بازشدگی دریچه‌های کشویی و شعاعی ارائه کردند که خطای نسبی را تا حدود ۳ درصد کاهش داد. آن‌ها ضریب انرژی دریچه را نیز معرفی کردند. منگ و همکاران [16] دریچه‌های کشویی دوزنقه‌ای را در کانال‌هایی با شیب جانبی متفاوت بررسی کردند و تأثیر مقیاس بر رژیم جریان و نرخ دبی را مورد مطالعه قرار دادند. هاشم و همکاران [17] نیز با انجام حدود ۲۰۰ آزمایش روی دریچه‌های مثلی، دریافتند که طرح و زاویه داخلی دریچه‌ها تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد و افزایش ضریب دبی دارند. در این میان، دریچه دوار سازه جدیدی است که توسط مرعشی و همکاران [18] و به منظور کنترل تراز سطح آب در بالادست طراحی شده است (شکل ۱). این دریچه‌ها دارای مزایای مهمی چون چرخش حول محور عمودی، نیاز به نیروی اندک برای باز و بسته شدن، زمان کوتاه تغییر وضعیت از حالت باز به بسته، کاهش تجمع رسوبات و مواد شناور، عدم نیاز به آب‌بندی هنگام عملکرد و قابلیت استفاده در مقاطع هندسی مختلف هستند. طراحی چرخشی این دریچه، که تنها در یک نقطه به بستر کانال متصل است، باعث کاهش اختلال در عبور رسوبات می‌شود. مرعشی و همکاران [19] و [20] مطالعات جامعی بر روی هیدرولیک این دریچه‌ها انجام داده‌اند و پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی، تأثیر زاویه بازشدگی دریچه و عمق جریان را در شرایط جریان آزاد و مستغرق بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین معادلات تجربی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برای برآورد دبی

انجام شده است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهایی مانند زاویه بازشدگی دریچه، طول تبدیل و دبی جریان بر توزیع دبی جریان در دو طرف دریچه و افت انرژی مورد تحلیل قرار گرفته است. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی جامع عملکرد این دریچه به عنوان یک سازه دومنظوره برای کنترل سطح آب و اندازه‌گیری جریان است. تا توجه به کاربرد گسترده کانال‌های مستطیلی در شبکه‌های توزیع آب و نیاز حیاتی به اندازه‌گیری دقیق دبی، این پژوهش ضمن بررسی رفتار هیدرولیکی جریان، معادلاتی برای تخمین دبی عبوری از دو سمت دریچه و برآورد افت انرژی آن در شرایط جریان آزاد ارائه می‌دهد.



شکل ۱ دریچه دوار نیم‌دایره‌ای ساخته‌شده توسط مرعشی همکاران [18]

مواد و روش‌ها

تحقیقات آزمایشگاهی در یک کانال (فلوم) مستطیلی با طول ۱۲ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۵ متر انجام شد که با شیب طولی بستر برابر با ۰/۰۰۰۸۸ ساخته شده بود. جریان آب توسط یک پمپ گریز از مرکز تأمین می‌شد که آب را از یک مخزن زیرزمینی به یک مخزن تأمین با تراز ثابت منتقل می‌کرد. دبی جریان ورودی به فلوم با استفاده از یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت ± 0.01 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد که در بالادست ورودی کانال نصب شده بود. نمای شماتیکی از کل سامانه گردش آب، شامل محل دریچه دوار و دبی‌سنج، در شکل (۲) ارائه شده است. در انتهای پایین‌دست کانال آزمایشگاهی، یک دریچه لولادار برای تنظیم تراز آب نصب شد. این دریچه شرایط جریان آزاد را در محل دریچه دوار تضمین می‌کرد و اثر شرایط پایین‌دست بر

در شرایط مستغرق توسعه داده‌اند که نشان می‌دهد زاویه بازشدگی و نسبت استغراق تأثیر قابل توجهی بر ضریب دبی دارند. بهترین مقطع برای این دریچه‌ها نیم‌دایره یا نیم‌بیضی است؛ اما با توجه به رایج بودن کانال‌های مستطیلی، ضرورت استفاده از تبدیل تدریجی مستطیلی به نیم‌دایره برای نصب و به‌کارگیری آن‌ها نمایان می‌شود. خیرایی و همکاران [21] به بررسی آزمایشگاهی کاربرد دریچه‌های دوار نیم‌دایره‌ای در کانال‌های مستطیلی پرداختند. آن‌ها برای تبدیل مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای از سه تبدیل تدریجی با طول‌های ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه دوار یا کاهش طول تبدیل تدریجی، ضریب دبی دریچه افزایش می‌یابد و بالعکس، با کاهش زاویه بازشدگی دریچه دوار یا افزایش طول تبدیل تدریجی، ضریب دبی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها روابط (۱) و (۴) را برای محاسبه دبی و ضریب دبی دریچه دوار در شرایط جریان آزاد، به ترتیب بر مبنای رابطه دبی - اشل و تحلیل ابعادی، ارائه کردند.

$$Q = \kappa y_1^{\omega} \quad (1)$$

$$\kappa = -0.619 + 1.514\theta - 0.291L_T \quad (2)$$

$$\omega = 1.365 + 0.457\theta - 0.048L_T \quad (3)$$

$$C_{dF} = 0.992\eta(\psi)\eta^{0.571} \quad (R^2=0.98) \quad (4)$$

$$\eta = L_T W_T \theta \quad (5)$$

$$\psi = 4.723e^{-0.903L_T} \quad (R^2=0.99) \quad (6)$$

در این روابط Q دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، θ زاویه بازشدگی دریچه دوار بر حسب رادیان، L_T طول تبدیل تدریجی بر حسب متر، L_T^* نسبت طول تبدیل تدریجی به عمق جریان در بالادست دریچه و W_T^* نسبت مجموع عرض سطح آب در طرفین دریچه به عمق جریان در بالادست دریچه دوار می‌باشد.

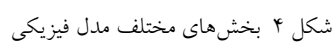
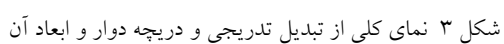
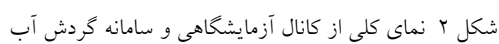
بهترین مقطع برای دریچه‌های دوار، شکل نیم‌دایره یا نیم‌بیضی است؛ اما با توجه به رایج بودن مقطع مستطیلی در کانال‌های انتقال آب، استفاده از تبدیل تدریجی از مقطع مستطیل به نیم‌دایره برای نصب این نوع دریچه‌ها ضرورت می‌یابد. پژوهش حاضر با هدف بررسی رفتار هیدرولیکی دریچه دوار نیم‌دایره‌ای در کانال مستطیلی و با بهره‌گیری از تبدیل تدریجی،

اجزای هندسی و کلیدی دریچه دوار و تبدیل تدریجی در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. برای تنظیم دقیق زاویه بازشدگی دریچه دوار نسبت به محور عرضی کانال، از یک رینگ مدرج استفاده شد.

تعداد آزمایش‌ها و محدوده متغیرهای هندسی و هیدرولیکی در جدول (۱) ارائه گردیده است. در ادامه جهت سهولت در ترسیم نمودارها و تحلیل آزمایش‌ها برای هر آزمایش یک نام اختصاری در نظر گرفته می‌شود. این نام‌گذاری آزمایش‌ها به صورت $Q-\theta-L_T-RG$ است که در آن RG مخفف دریچه دوار، L_T طول تبدیل بر حسب متر، θ زاویه بازشدگی دریچه بر حسب درجه و Q دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه است. در این تحقیق زاویه‌های بازشدگی دریچه دوار از ۳۵ تا ۸۵ درجه، با طول گام ۵ درجه تغییر می‌کرد، در حالی که دامنه دبی‌های مورد آزمایش از ۰/۰۲۰ تا ۰/۰۳۸ مترمکعب بر ثانیه، با اختلاف ۰/۰۰۲ متر مکعب بر ثانیه است. در صورتی که دریچه دوار نیم‌دایره‌ای در حالت کاملاً بسته ($\theta=0$) قرار گیرد، انسداد کامل مسیر جریان می‌تواند موجب ایجاد پس‌زدگی شدید، افزایش تراز آب در بالادست و در نهایت سرریز آب از روی دریچه شود. با این حال، این وضعیت خارج از محدوده بهره‌برداری و اهداف طراحی دریچه در پژوهش حاضر است. در این مطالعه، دامنه زاویه‌های بازشدگی دریچه به صورت آگاهانه در بازه ۳۵ تا ۸۵ درجه انتخاب شده است. زاویه‌های کمتر از این مقدار بررسی نشدند، زیرا حتی در حداقل دبی آزمایشگاهی نیز منجر به سرریز و ناپایداری جریان می‌شدند. علاوه بر این، با توجه به عرض کانال مورد آزمایش (۰/۶ متر) حداقل طول تبدیل ۰/۶ متر انتخاب شد تا تبدیل مؤثر و کاربردی از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای امکان‌پذیر گردد.

عملکرد آن را به حداقل می‌رساند. نسبت عمق پایین‌دست به بالادست نیز همواره در محدوده‌ای قرار داشت که نشان‌دهنده عدم استغراق دریچه و حاکمیت جریان آزاد بود. به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در این تحقیق از سرعت‌سنج سه‌بعدی وکترینو پروفایلر استفاده شد و در نقاطی که امکان استفاده از سرعت‌سنج سه‌بعدی وجود نداشت، سرعت جریان با استفاده از دستگاه میکرومولینه اندازه‌گیری گردید.

برای تبدیل تدریجی از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره، از ورق‌های فولادی گالوانیزه با ضخامت یکنواخت ۰/۰۰۴ متر استفاده شد. تبدیل‌ها در سه طول مختلف ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. طراحی و ساخت یک تبدیل تدریجی، هموار و پیوسته از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای فرایندی چالش‌برانگیز است. از این رو، در پژوهش حاضر عملیات ساخت با دقت بالا و در چند مرحله انجام شد تا از بروز ناپیوستگی هندسی و ناپایداری جریان جلوگیری شود. استفاده از ورق‌های فولادی گالوانیزه با ضخامت یکنواخت ۰/۰۰۴ متر این امکان را فراهم کرد که ضمن حفظ شکل هندسی مطلوب، خم‌کاری با دقت بالا انجام شود و سطح داخلی صاف و یکنواختی ایجاد گردد. در هر سه تبدیل، تغییر شکل مقطع از مستطیل به نیم‌دایره به صورت پیوسته و تدریجی در طول مسیر تبدیل انجام شد. انتخاب سه طول متفاوت این امکان را فراهم ساخت تا اثر طول تبدیل بر رفتار هیدرولیکی جریان بررسی شود. بخش بالادست هر تبدیل به کف و دیواره‌های کانال مستطیلی متصل گردید و بخش پایین‌دست آن به قاب فلزی نیم‌دایره‌ای با قطر ۰/۶ متر (که محل نصب دریچه دوار بود) اتصال یافت. این قاب به عنوان مرجع هندسی ثابت عمل کرده و پیوستگی کامل میان تبدیل و دریچه را تضمین می‌کرد. به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان (بر اساس آزمایش‌های مقدماتی)، مجموعه تبدیل تدریجی و دریچه دوار در فاصله ۶ متری از ابتدای کانال نصب شد. همچنین از محور دریچه تا فاصله ۰/۳ متری در پایین‌دست (معادل شعاع دریچه دوار)، مقطع کانال به صورت نیم‌دایره‌ای در نظر گرفته شد. شماتیکی از دریچه دوار، ابعاد آن و تبدیل تدریجی در شکل (۳) ارائه شده است. دریچه دوار نیم‌دایره‌ای نیز از ورقه آهنی با ضخامت ۲ میلی‌متر برش داده شد.



جدول ۱ محدوده متغیرهای هندسی و هیدرولیکی در این تحقیق

نام آزمایش‌ها	تعداد آزمایش‌ها	محدوده عدد فرود در بالادست دریچه	محدوده عمق جریان بالادست (متر)	محدوده دبی (متر مکعب بر ثانیه)	زاویه بازشدگی دریچه (متر)	طول تبدیل (متر)
RG-0.6-θ-Q	6	0.099-0.103	0.226-0.288	0.020-0.030	35	0.6
	8	0.111-0.117	0.210-0.288	0.020-0.034	40	
	10	0.134-0.146	0.185-0.268	0.020-0.038	45	
	10	0.149-0.164	0.172-0.248		50	
	10	0.174-0.190	0.155-0.225		55	
	10	0.193-0.215	0.145-0.207		60	
	10	0.217-0.242	0.134-0.191		65	
	10	0.235-0.267	0.127-0.179		70	
	10	0.247-0.291	0.123-0.169		75	
	10	0.256-0.310	0.120-0.162		80	
	10	0.266-0.319	0.117-0.159		85	
RG-0.9-θ-Q	4	0.091-0.093	0.239-0.281	0.020-0.026	35	0.9
	6	0.102-0.106	0.221-0.257	0.020-0.030	40	
	10	0.124-0.132	0.195-0.287	0.020-0.038	45	
	10	0.141-0.149	0.179-0.264		50	
	10	0.163-0.171	0.162-0.238		55	
	10	0.183-0.195	0.152-0.221		60	
	10	0.215-0.223	0.135-0.202		65	
	10	0.232-0.250	0.128-0.187		70	
	10	0.238-0.274	0.126-0.176		75	
	10	0.253-0.289	0.121-0.170		80	
	10	0.256-0.299	0.120-0.166		85	
RG-1.2-θ-Q	4	0.083-0.085	0.254-0.298	0.020-0.026	35	1.2
	6	0.095-0.097	0.233-0.300	0.020-0.030	40	
	10	0.116-0.128	0.203-0.292	0.020-0.038	45	
	10	0.130-0.143	0.189-0.271		50	
	10	0.151-0.168	0.171-0.244		55	
	10	0.166-0.188	0.160-0.226		60	
	10	0.191-0.218	0.146-0.205		65	
	10	0.208-0.239	0.138-0.193		70	
	10	0.227-0.263	0.130-0.181		75	
	10	0.241-0.281	0.125-0.173		80	
	10	0.250-0.294	0.129-0.168		85	

نتایج و بحث

تغییرات سطح مقطع جریان در دو طرف دریچه

پس از ورود جریان به کانال مستطیلی، جریان به سمت دریچه حرکت می‌کند و با برخورد به لبه دریچه به دو قسمت تقسیم می‌شود. این تقسیم، علاوه بر ایجاد دو سطح مقطع جریان در طرفین دریچه، دو عرض سطح آب به نام‌های W_R در سمت راست و W_L در سمت چپ ایجاد می‌کند. در شکل (۵)، نحوه

تقسیم جریان بین طرفین دریچه در اثر برخورد آب با لبه آن نمایش داده شده است. شکل (۶) سطح مقطع چپ و راست دریچه را برای سه تبدیل تدریجی و زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، شکل سطح مقطع سمت راست در مرز تبدیل نیم‌دایره‌ای ثابت است، در حالی که در مقطع سمت چپ، مرز تبدیل تدریجی در زاویه‌های مختلف، متفاوت است.

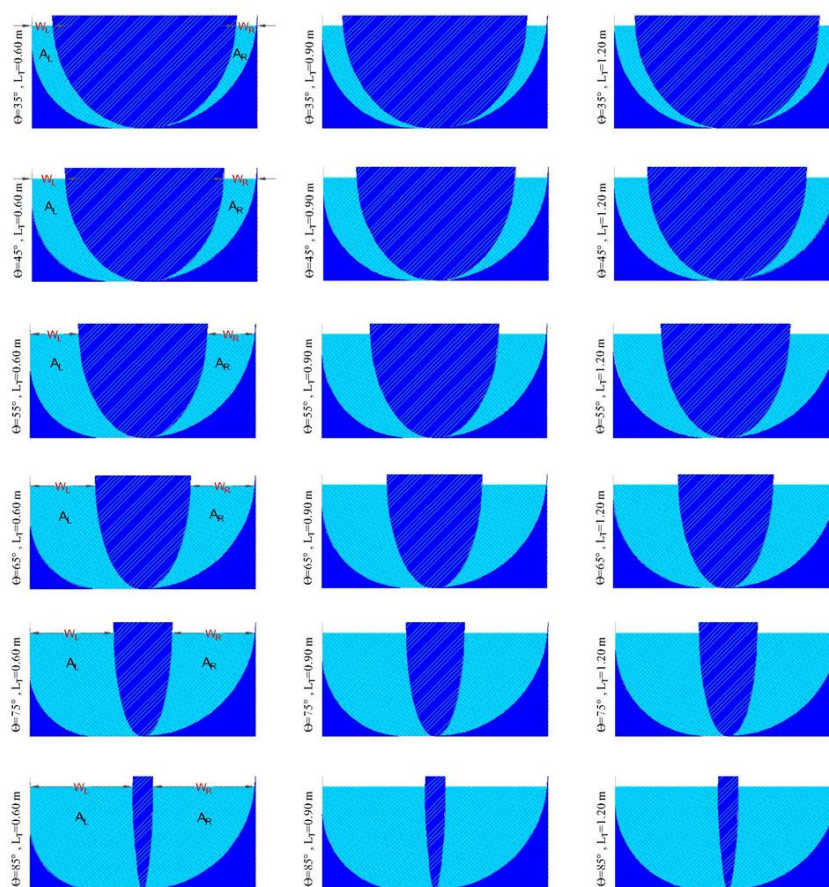
مقطع سمت راست ندارد و تغییرات فقط به واسطه تغییر زاویه بازشدگی دریچه رخ می‌دهد. در این تحقیق، دوران دریچه به صورت پادساعتگرد تعریف شده است، به طوری که مقطع سمت راست دریچه همیشه بر روی قسمت نیم‌دایره‌ای تبدیل (به طول ۰/۳ متر از محور دریچه به سمت پایین‌دست) قرار می‌گیرد. مرکز تبدیل که در تماس با آب است، در تمامی زاویه‌ها ثابت و به شکل نیم‌دایره باقی می‌ماند. اما در مقطع سمت چپ، نیمی از دریچه بر روی تبدیل تدریجی قرار گرفته و مرکز آن بسته به طول تبدیل و زاویه بازشدگی تغییر می‌کند. در شکل (۸) تغییرات سطح مقطع سمت چپ دریچه را نسبت به عمق جریان برای سه طول تبدیل ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن عمق، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، سطح مقطع سمت چپ در تمامی تبدیل‌ها افزایش می‌یابد.

با ثابت بودن عمق و زاویه بازشدگی، بیشترین سطح مقطع سمت چپ به تبدیل تدریجی با طول ۰/۶ متر و کمترین آن به طول ۱/۲ متر مربوط می‌شود.

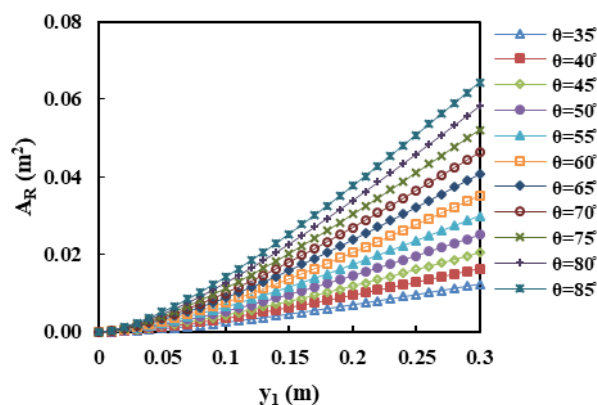


شکل ۵ نحوه تقسیم جریان بین طرفین دریچه‌وار

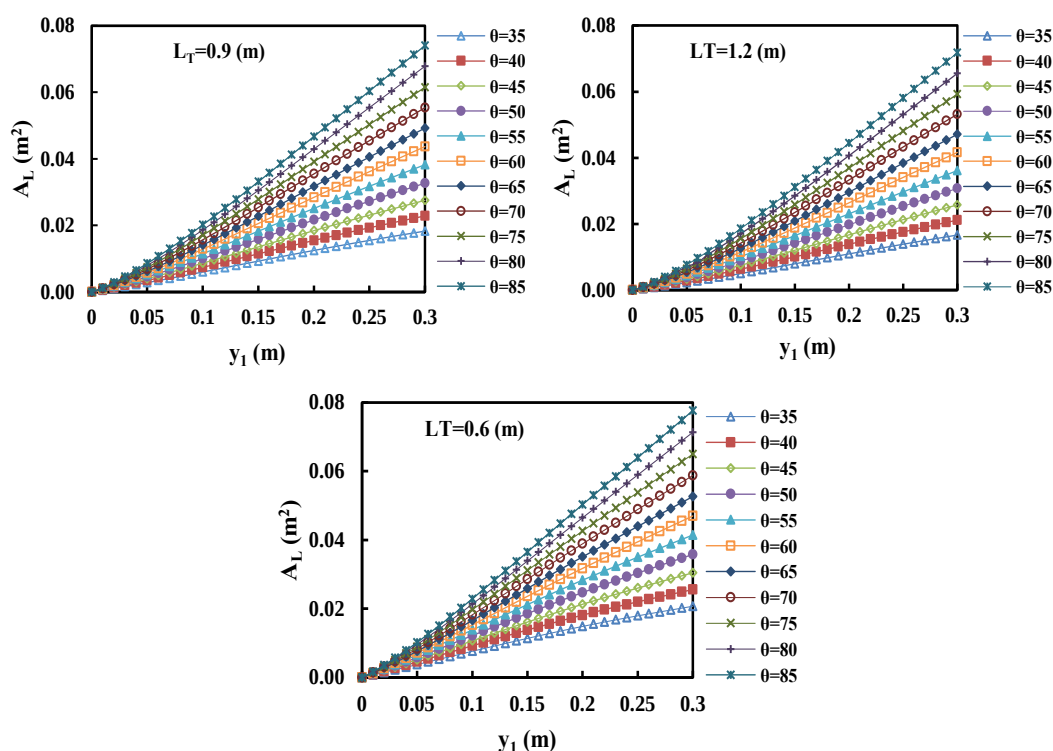
مساحت‌های سمت چپ و راست با استفاده از نرم‌افزار اتوکد محاسبه شده است. تغییرات سطح مقطع سمت راست دریچه نسبت به عمق جریان برای زاویه‌های مختلف بازشدگی در شکل (۷) ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن عمق جریان، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، سطح مقطع جریان افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به اینکه سطح مقطع سمت راست دریچه بر روی تبدیل نیم‌دایره‌ای ثابت قرار دارد، تغییر طول تبدیل تدریجی بالادست دریچه تأثیری بر سطح



شکل ۶ وضعیت بازشدگی سمت راست و چپ دریچه در تبدیل‌ها و زاویه‌های مختلف



شکل ۷ تغییرات سطح مقطع سمت راست دریچه نسبت به عمق جریان



شکل ۸ تغییرات سطح مقطع چپ دریچه با عمق جریان در طول تبدیل‌های مختلف

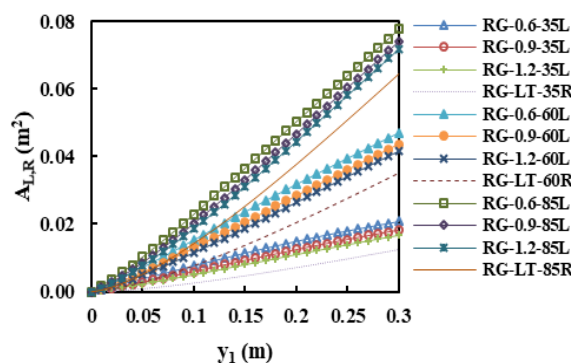
دوار ($A_w = A_R + A_L$) را در برابر دبی جریان در زاویه بازشدگی ۶۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است در شرایط هیدرولیکی و هندسی یکسان (دبی و زاویه بازشدگی ثابت) بیشترین سطح مقطع جریان خروجی از دریچه دوار مربوط به تبدیل تدریجی با طول ۰/۶ متر و کمترین سطح مقطع جریان خروجی از دریچه دوار مربوط به تبدیل تدریجی با طول ۱/۲ متر است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با فرض ثابت بودن زاویه بازشدگی، سطح مقطع سمت راست دریچه کمتر از سطح مقطع سمت چپ است. همچنین، طول تبدیل تدریجی تأثیری بر سطح مقطع سمت راست ندارد و این سطح مقطع فقط به زاویه بازشدگی و عمق جریان وابسته است. در مقابل، سطح مقطع سمت چپ علاوه بر این دو عامل، به طول تبدیل تدریجی نیز وابسته است (شکل ۹).

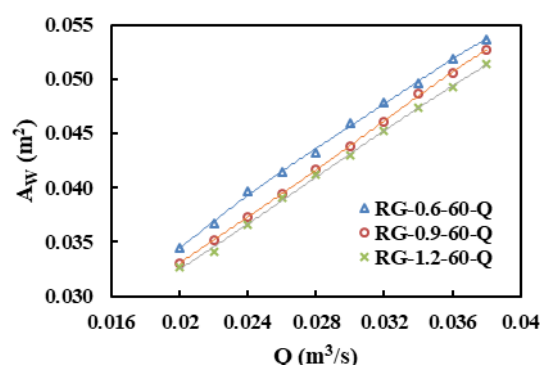
شکل (۱۰) تغییرات سطح مقطع جریان خروجی از دریچه

حداکثر طول برداشت پروفیل (۷ متر) و محور y (عمق جریان) نسبت به حداکثر عمق جریان (۰/۳۰ متر) بی‌بعد گردید به عبارت دیگر برای ترسیم پروفیل‌های سطح آب از طول نسبی و عمق نسبی استفاده گردید. شکل (۱۲) تغییرات عرضی پروفیل سطح آب را برای زاویه‌های مختلف بازشدگی دریاچه دوار برای حداکثر دبی عبوری از تبدیل تدریجی به طول ۰/۹ متر نشان می‌دهند. در این تبدیل، حداکثر دبی عبوری از دریاچه برای زاویه‌های ۳۵ و ۴۰ درجه، ۰/۰۲۶ متر مکعب بر ثانیه و برای سایر زاویه (۴۵ تا ۸۵ درجه) ۰/۰۳۸ متر مکعب بر ثانیه است. همان طور که از پروفیل‌های ترسیم شده مشخص است با افزایش زاویه بازشدگی دریاچه دوار به تدریج تغییرات عرضی پروفیل سطح آب کاهش می‌یابد به عبارتی بیشترین تغییرات عرضی پروفیل سطح آب مربوط به زاویه بازشدگی ۳۵ درجه و کمترین تغییرات عرضی پروفیل سطح آب مربوط به زاویه ۸۵ درجه است. برداشت عمق آب در پایین‌دست دریاچه دوار، با وجود آشفتگی‌های شدید جریان، با دقت کافی انجام شد. نقاط اندازه‌گیری در نواحی با آشفتگی کمتر انتخاب شدند و عمق پایین‌دست در سه نوبت اندازه‌گیری گردید. در نهایت، میانگین این سه مقدار به عنوان عمق پایین‌دست در نظر گرفته شد.

با افزایش زاویه بازشدگی دریاچه، سطح مقطع جریان در دو سمت آن افزایش می‌یابد و برای یک دبی ثابت، عمق جریان در طرفین دریاچه متفاوت می‌شود؛ به گونه‌ای که بیشترین تغییرات در زاویه ۳۵ درجه و کمترین آن در زاویه ۸۵ درجه مشاهده شد. از این رو، یک دبی مشخص می‌تواند در زاویه‌های مختلف عمق‌های متفاوتی ایجاد کند. برای کنترل این مسئله، سه اقدام انجام شد: استفاده از تبدیل تدریجی از مقطع مستطیلی به نیم‌دایره‌ای با طول‌های ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متر به منظور کاهش اختلاف عمق؛ تنظیم زاویه بازشدگی دریاچه که نشان داد زاویه حدود ۸۵ درجه یکنواختی بیشتری ایجاد می‌کند؛ و محاسبه دبی عبوری از دو سمت دریاچه با سرعت‌سنج سه‌بعدی برای تنظیم دقیق زاویه و کاهش نوسانات عمق. در مجموع، با انتخاب مناسب زاویه و طول تبدیل، عدم یکنواختی عمق برای یک دبی معین قابل کنترل است.



شکل ۹ مقایسه سطح مقطع سمت چپ و راست دریاچه در تبدیل‌های تدریجی مختلف

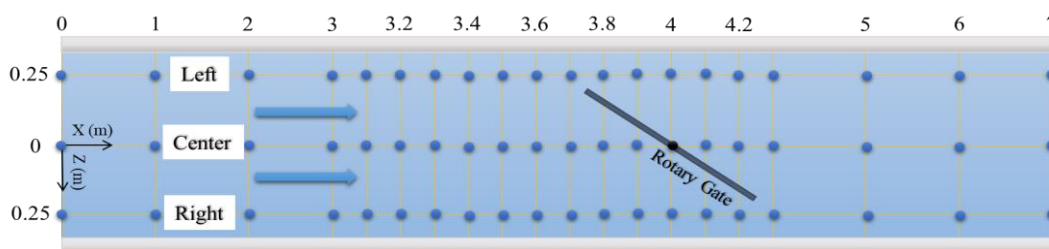


شکل ۱۰ تغییرات سطح مقطع جریان خروجی از دریاچه دوار با دبی جریان برای زاویه بازشدگی 60 درجه

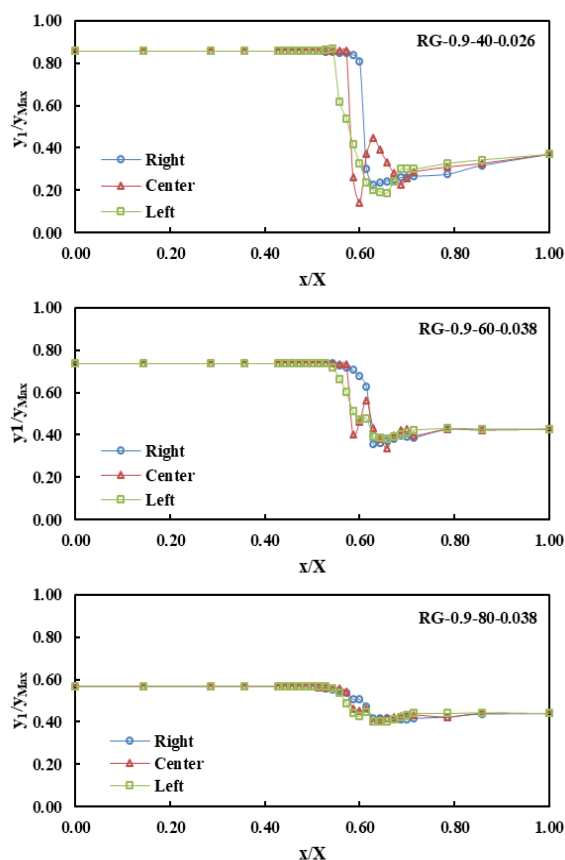
تغییرات عرضی پروفیل سطح آب

به منظور بررسی پروفیل سطح آب در این تحقیق، پروفیل سطح آب در طول ۷ متر و از فاصله ۴ متری بالادست محور دریاچه تا فاصله ۳ متری پایین‌دست دریاچه برداشت گردید. همچنین به منظور بررسی تغییرات عرضی پروفیل سطح آب در سه نقطه در عرض کانال شامل پروفیل سطح آب در مرکز کانال، پروفیل سطح آب در راستای مقطع سمت چپ دریاچه و پروفیل سطح آب در راستای مقطع سمت راست دریاچه برداشت گردید. شکل (۱۱) نقاط اندازه‌گیری عمق جریان را در راستای طولی و عرضی کانال آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

به منظور ترسیم بهتر پروفیل‌های سطح آب و نشان دادن مناسب‌تر تغییرات عمق جریان، در این تحقیق برای ترسیم پروفیل‌های سطح آب محور x (راستای طولی کانال) نسبت به



شکل ۱۱ محل‌های اندازه‌گیری عمق جریان در راستای عرضی و طولی کانال آزمایشگاهی



شکل ۱۲ تغییرات عرضی پروفیل سطح آب در زاویه بازشدگی مختلف

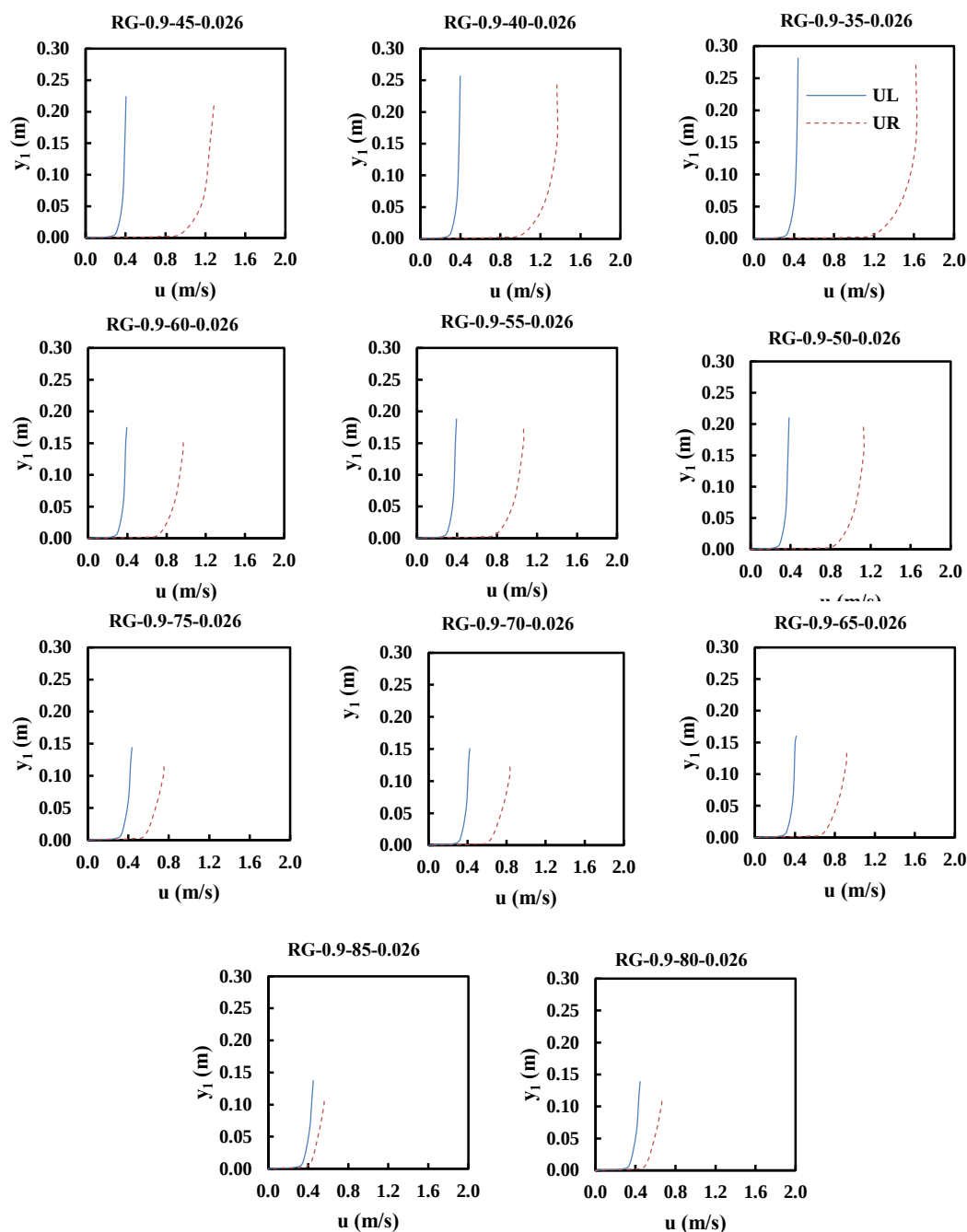
توزیع سرعت جریان در طرفین دریچه

در شکل (۱۳) توزیع عمقی سرعت جریان در محل مقاطع سمت راست و چپ دریچه دوار در تبدیل ۰/۹ متر نشان داده شده است. همان طور که از این نمودارها مشخص است، سرعت جریان در مقطع سمت راست دریچه به مراتب بیشتر از سرعت جریان عبوری از مقطع سمت چپ دریچه است. با مقایسه شکل‌های مذکور می‌توان دریافت که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه سرعت در مقطع سمت راست کاهش و در نتیجه دبی عبوری از مقطع سمت راست کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که، بعد از ورود جریان به کانال جریان به سمت پایین‌دست حرکت

می‌کند و به لبه دریچه دوار برخورد می‌کند و بخش عمده‌ای از دبی جریان از مجرای سمت راست عبور می‌کند. در اثر وجود دریچه دوار خطوط جریان در سمت راست دریچه فشرده می‌شود (شکل ۵)، عمق جریان و سطح مقطع جریان به تدریج در طول مجرای سمت راست دریچه کاهش و سرعت جریان در طول مسیری از ابتدای دریچه تا محل مقطع سمت راست دریچه افزایش می‌یابد. برعکس بخش کمتری از دبی جریان در اثر برخورد جریان به لبه دریچه و موقعیت هندسی دریچه از مقطع سمت چپ دریچه عبور می‌کند و با توجه به اینکه هیچ گونه فشردگی در خطوط جریان در محل مقطع سمت چپ دریچه

افزایش دبی عبوری از مقطع سمت چپ دریاچه در اثر افزایش زاویه بازشدگی دریاچه، افزایش مساحت مقطع جریان با توجه به معادله پیوستگی است. به عبارت دیگر با توجه به معادله پیوستگی، در مقطع سمت چپ دریاچه سرعت ثابت است و دلیل افزایش دبی عبوری از این قسمت، افزایش زاویه بازشدگی دریاچه، افزایش سطح مقطع جریان می‌باشد.

ایجاد نمی‌شود سرعت جریان در مقطع سمت چپ به مراتب کمتر از سرعت جریان در مقطع سمت راست است. همچنین بررسی داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد تغییر زاویه بازشدگی دریاچه تأثیر ناچیزی بر سرعت جریان مقطع سمت چپ دریاچه دارد. به عبارت دیگر سرعت جریان در مقطع سمت چپ دریاچه تحت تأثیر تغییر زاویه بازشدگی دریاچه نیست و دلیل



شکل ۱۳ تغییرات عمقی سرعت در مقاطع سمت راست و چپ دریاچه دوار برای تبدیل تدریجی با طول ۹/۰ متر

تقسیم دبی بین دو طرف دریچه دوار

به منظور بررسی تقسیم دبی دو طرف دریچه دوار و تأثیر پارامترهای هندسی مختلف بر روی میزان دبی عبوری از مقاطع سمت راست و چپ دریچه مراحل زیر به ترتیب انجام شد:

مساحت مقاطع جریان در سمت چپ و راست دریچه برای زاویه‌ها، تبدیل‌ها و دبی‌های مختلف محاسبه شد.

با استفاده از سرعت سنج سه‌بعدی و کترینو پروفایلر سرعت جریان در فواصل عرضی ۰/۳ متری و عمقی ۰/۰۱ متری با فرکانس ۲۰ هرتز و به مدت یک دقیقه (در هر نقطه ۱۲۰۰ داده سرعت) در مقاطع سمت چپ و راست دریچه برداشت گردید. سرعت متوسط در مقاطع سمت چپ و راست دریچه از با استفاده از داده‌های سرعت ثبت‌شده توسط سرعت‌سنج سه‌بعدی برای زاویه‌ها، تبدیل‌ها و دبی‌های مختلف محاسبه گردید.

با مشخص شدن مساحت مقاطع جریان سمت چپ و راست دریچه و مشخص شدن سرعت جریان در این مقاطع دبی جریان عبوری از سمت چپ (Q_L) و راست (Q_R) دریچه در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی محاسبه گردید.

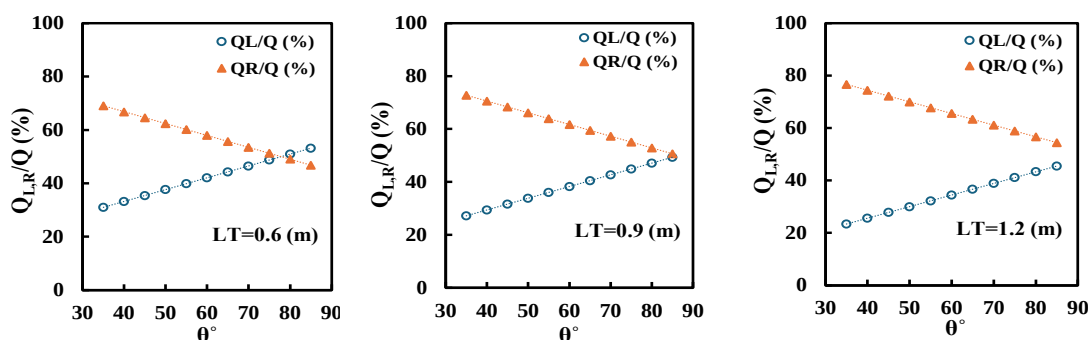
با استفاده از دبی جریان اندازه‌گیری‌شده توسط دبی‌سنج الکترومغناطیسی در آزمایشگاه و دبی جریان سمت راست و چپ دریچه با در دست داشتن داده‌های سرعت و سطح مقطع طرفین دریچه و استفاده از رابطه پیوستگی محاسبه‌شده و در نهایت روابط (۷) و (۸) به ترتیب برای محاسبه نسبت دبی سمت چپ و راست دریچه به دبی کل استخراج گردید.

$$\frac{Q_R}{Q} = (0.769 - 0.254\theta + 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (7)$$

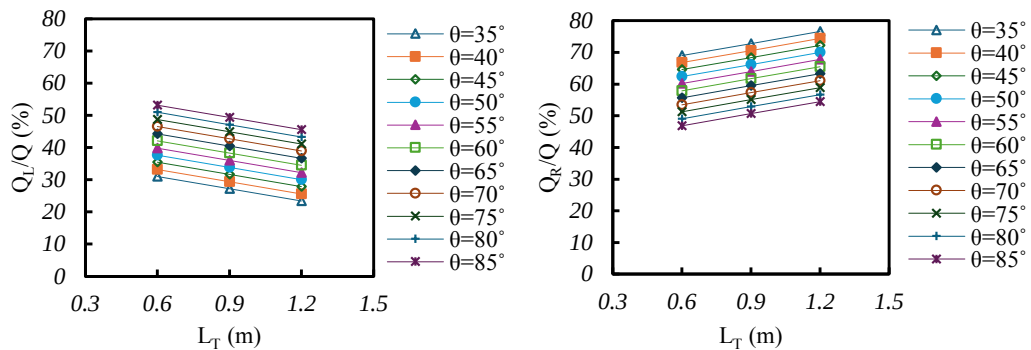
$$\frac{Q_L}{Q} = (0.231 + 0.254\theta - 0.076 \frac{L_T}{B}) \times 100 \quad (8)$$

در این روابط زاویه بازشدگی (θ) بر حسب رادیان، طول

تبدیل (L_T) بر حسب متر، عرض کانال (B) بر حسب متر و نسبت‌های دبی بر حسب درصد است. شکل (۱۴) تغییرات درصد دبی عبوری از مقاطع سمت چپ و راست دریچه دوار را در مقابل تغییر زاویه بازشدگی دریچه دوار نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل نیز مشخص است، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه دبی عبوری از سمت چپ دریچه افزایش و دبی عبوری از سمت راست دریچه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش زاویه بازشدگی دریچه درصد دبی عبوری از سمت چپ دریچه افزایش و برعکس با کاهش زاویه بازشدگی دریچه درصد دبی عبوری از سمت راست دریچه افزایش می‌یابد. همچنین به منظور بررسی تأثیر تغییر طول تبدیل تدریجی بر درصد دبی عبوری از مقاطع سمت چپ و راست دریچه شکل (۱۵) ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای یک زاویه بازشدگی ثابت و با افزایش طول تبدیل تدریجی، میزان جریان عبوری از مقطع سمت چپ کاهش و جریان عبوری از مقطع سمت راست افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان دریافت با افزایش زاویه بازشدگی دریچه و یا کاهش طول تبدیل تدریجی درصد دبی عبوری از مقطع سمت چپ دریچه افزایش و برعکس با کاهش زاویه بازشدگی دریچه و یا افزایش طول تبدیل تدریجی درصد دبی عبوری از مقطع سمت راست دریچه افزایش می‌یابد. دبی کل عبوری از دریچه حاصل جمع دبی عبوری از سمت راست و چپ است و بنابراین دبی کل و دبی هر سمت دارای رابطه مستقیم و تقریباً خطی با یکدیگر هستند. همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، دبی عبوری از سمت چپ دریچه افزایش می‌یابد و به همان مقدار دبی عبوری از سمت راست کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، تغییرات دبی دو سمت به صورت معکوس و برابر هم بوده و حاصل جمع آن‌ها همواره برابر دبی کل است.



شکل ۱۴ نمودار تغییرات درصد دبی عبوری از طرفین دریچه در اثر تغییر زاویه بازشدگی دریچه



شکل ۱۵ نمودار تغییرات درصد دبی عبوری از طرفین دریچه در اثر تغییر طول تبدیل تدریجی

انرژی نسبی تغییر ناچیزی دارد که نشان‌دهنده استقلال تقریباً کامل آن از دبی و حساسیت کمتر به آن است؛ به طوری که افت انرژی نسبی بیشتر تحت تأثیر تغییرات عمق جریان قرار دارد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که زاویه بازشدگی دریچه و طول تبدیل به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل مؤثر بر اتلاف انرژی هستند. با تعریف نسبت عمق جریان پایین‌دست به عمق بالادست دریچه $(\xi = y_2/y_1)$ و صرف نظر از هد سرعت در بالادست و پایین‌دست $(u^2/2g)$ به دلیل کوچک بودن آن (با توجه به سرعت‌های متوسط اندازه‌گیری شده و عمق جریان‌ها، تخمین‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که خطای ناشی از حذف هد سرعت کمتر از ۱ تا ۲ درصد است)، می‌توان تلفات نسبی انرژی را به شرح زیر نوشت:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{(y_1 - y_2)}{y_1} = 1 - \xi \quad (10)$$

تغییرات ξ در برابر زاویه بازشدگی دریچه در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، ضریب ξ افزایش می‌یابد (افت انرژی نسبی کاهش می‌یابد). همچنین این شکل نشان می‌دهد که تأثیر تغییر زاویه بازشدگی دریچه بر روی ضریب ξ بسیار بیشتر از تأثیر تغییر طول تبدیل تدریجی بر ضریب ξ و تلفات نسبی انرژی است. رابطه (۱۱) برای محاسبه ضریب ξ ارائه شده است.

$$\xi = 0.090 + 0.5130 - 0.010 \frac{L_T}{B} \quad 35^\circ \leq \theta \leq 85^\circ \quad (11)$$

در این رابطه زاویه بازشدگی (θ) بر حسب رادیان و طول تبدیل (L_T) و عرض کانال (B) بر حسب متر هستند. این رابطه نشان می‌دهد که افت انرژی نسبی دریچه دوار تحت شرایط جریان آزاد به طور قابل توجهی تحت تأثیر زاویه بازشدگی دریچه دوار می‌باشد (شکل ۱۹).

افت انرژی دریچه دوار

افت انرژی ناشی از نصب دریچه دوار و تبدیل تدریجی مقطع مستطیلی به نیم‌دایره با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

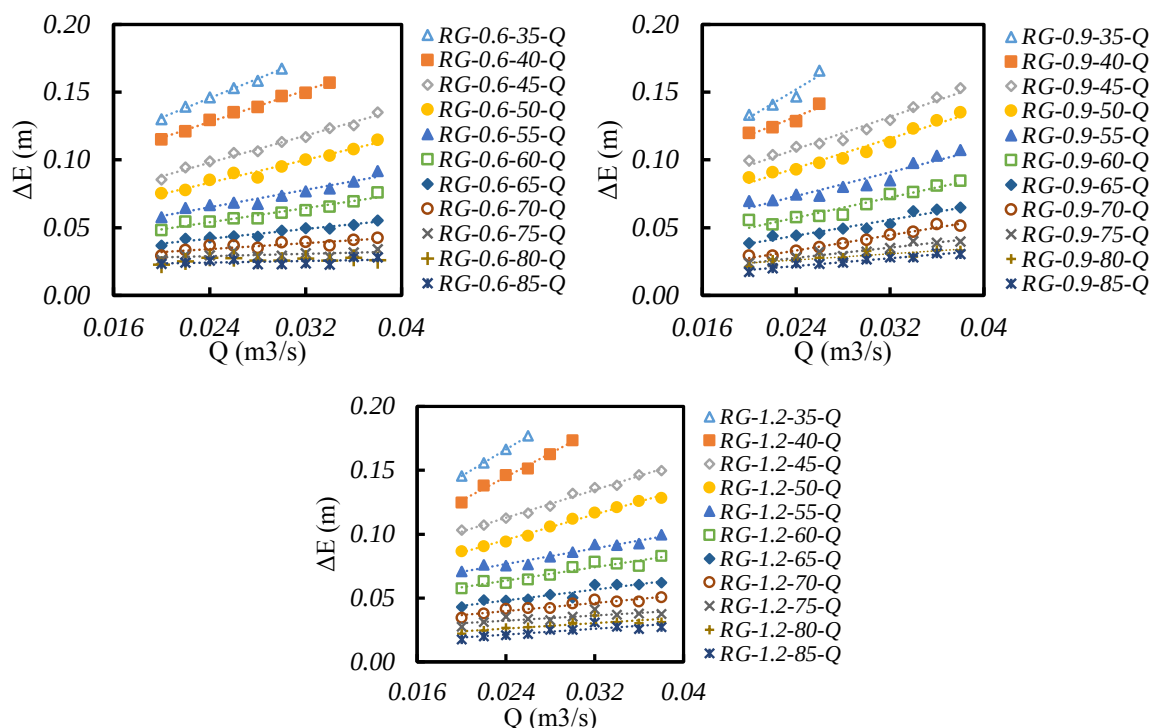
$$\Delta E = E_1 - E_2 = (y_1 + \frac{u_1^2}{2g}) - (y_2 + \frac{u_2^2}{2g}) \quad (9)$$

در این رابطه u_1 و u_2 به ترتیب سرعت متوسط در بالادست

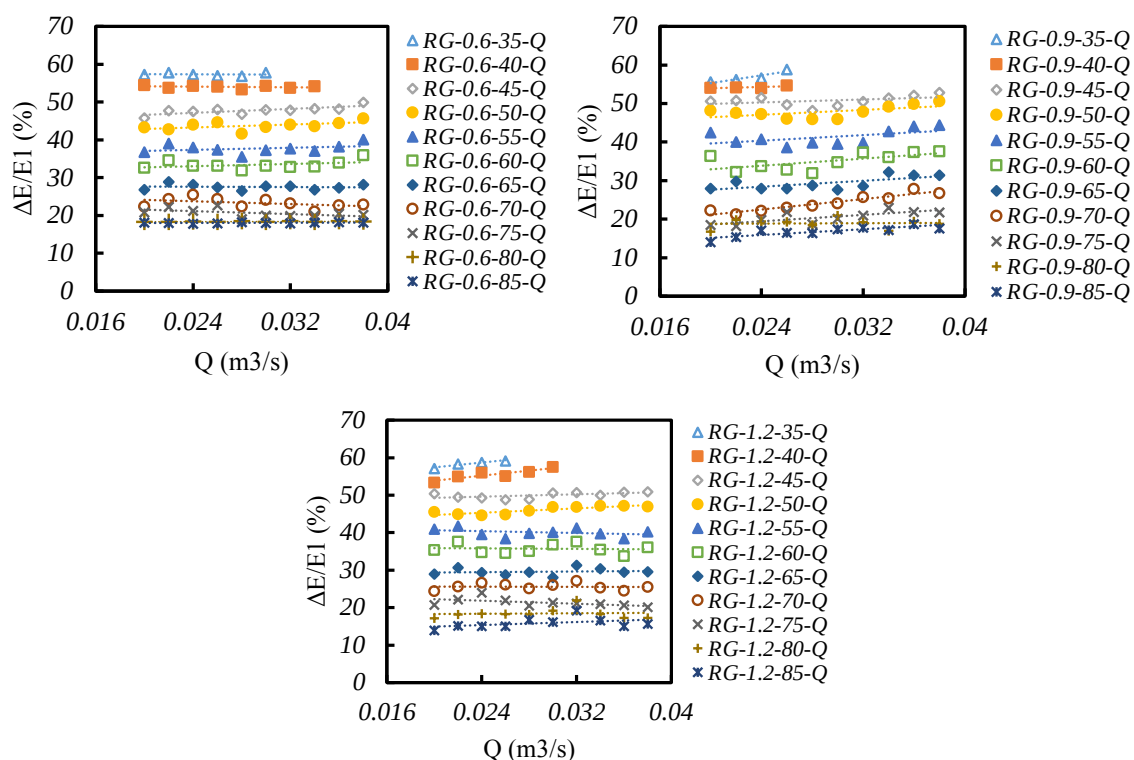
و پایین‌دست دریچه دوار هستند.

برای بررسی افت انرژی دریچه دوار در شرایط جریان آزاد، در شکل (۱۶) تغییرات افت انرژی محاسبه‌شده از رابطه (۹) را برای زاویه‌های مختلف بازشدگی دریچه با هر سه مقدار طول تبدیل تدریجی نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، افت انرژی در تمامی تبدیل‌های تدریجی افزایش می‌یابد، اما تأثیر تغییرات دبی بر افت انرژی با افزایش زاویه بازشدگی تدریجاً کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در تمامی تبدیل‌ها، افت انرژی با افزایش زاویه بازشدگی کاهش می‌یابد، به طوری که برای یک دبی ثابت، بیشترین افت انرژی مربوط به زاویه بازشدگی ۳۵ درجه و کمترین آن به زاویه ۸۵ درجه تعلق دارد. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و محدوده پارامترهای مورد بررسی، رابطه بین دبی عبوری از دریچه و افت انرژی در شرایط جریان آزاد را می‌توان تقریباً به صورت خطی در نظر گرفت. این تقریب امکان تحلیل و ارائه روند کلی تأثیر تغییر زاویه بازشدگی و طول تبدیل تدریجی بر افت انرژی را فراهم می‌کند، هر چند در جزئیات ریز هیدرولیکی ممکن است تغییرات غیرخطی نیز رخ دهد.

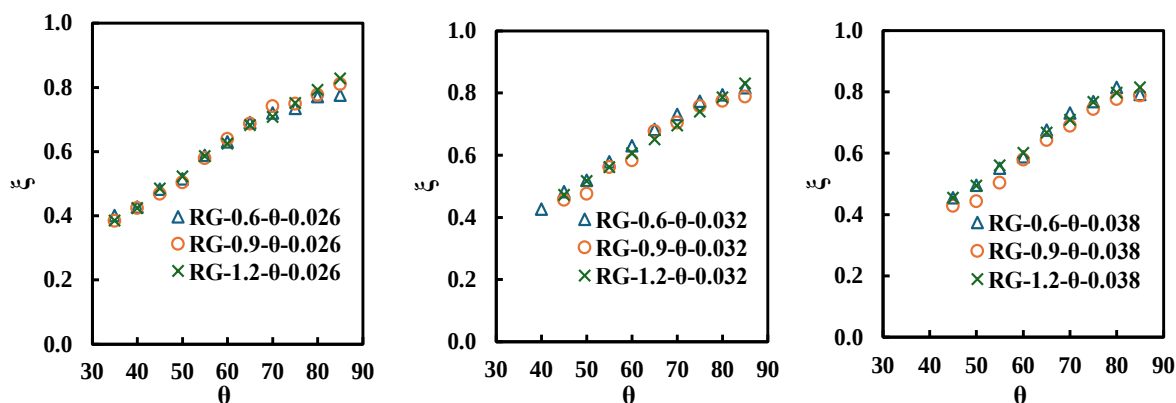
در شکل (۱۷) تغییرات افت انرژی نسبی (نسبت افت انرژی به انرژی در بالادست دریچه) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه دوار و با فرض دبی ثابت، افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین، با تغییر دبی، افت



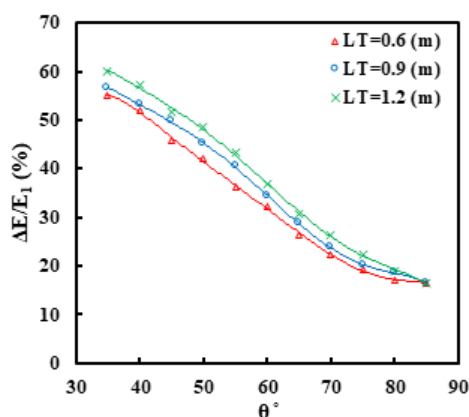
شکل ۱۶ تغییرات افت انرژی محاسبه شده از رابطه



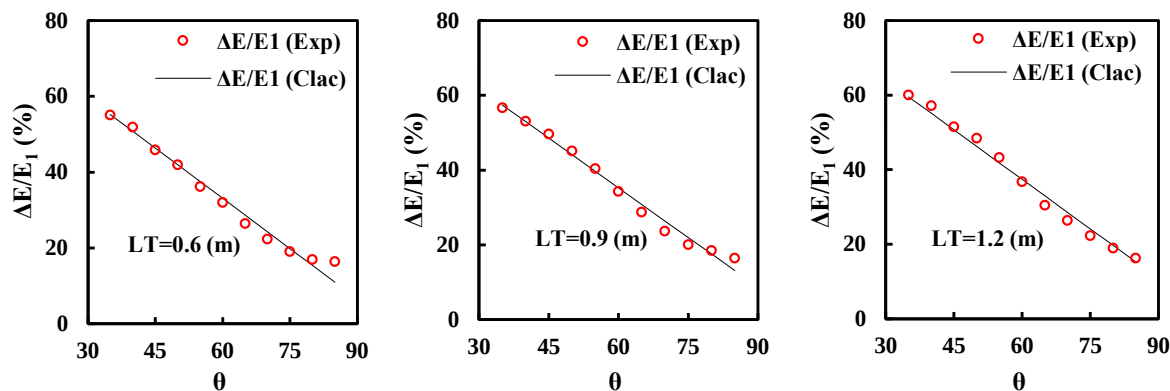
شکل ۱۷ تغییرات افت انرژی نسبی با دبی جریان



شکل ۱۸ تغییر در ضریب $\Delta E/E_1$ در مقابل زاویه بازشدگی دریچه دوار



شکل ۱۹ اثر طول تبدیل تدریجی بر افت انرژی نسبی



شکل ۲۰ مقایسه افت انرژی نسبی به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی با افت محاسبه شده از رابطه (۱۰)

بازشدگی ۳۵ درجه (تقریباً ۶۰ درصد) مشاهده می‌شود، در حالی که کمترین افت انرژی در زاویه ۸۵ درجه (حدود ۱۵ درصد) رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از

افت انرژی نسبی به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی با افت انرژی محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱۰) در شکل (۲۰) مقایسه شده است. همان طور که مشخص است، رابطه (۱۰) تخمین قابل اعتمادی از افت انرژی نسبی دریچه دوار را در شرایط جریان آزاد ارائه می‌دهد. بیشترین افت انرژی در زاویه

هیدرولیکی بهینه، توصیه می‌شود طول تبدیل حداقل برابر با عرض کانال در نظر گرفته شود و از آن کمتر نباشد.

فهرست علائم

L	طول تبدیل تدریجی (متر)
θ	زاویه بازشدگی دریچه دوار (رادیان)
Q	دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)
y_1	عمق آب در بالادست دریچه دوار (متر)
y_2	عمق آب در پایین‌دست دریچه دوار (متر)
g	شتاب گرانشی (متر بر مجذور ثانیه)
W_R	عرض سطح آب در سمت راست دریچه دوار (متر)
W_L	عرض سطح آب در سمت چپ دریچه دوار (متر)
A_R	سطح مقطع سمت راست دریچه دوار (مترمربع)
A_L	سطح مقطع سمت چپ دریچه دوار (مترمربع)
A_w	مجموع سطح مقطع سمت راست و چپ دریچه دوار (مترمربع)
y_{Max}	بیشینه عمق جریان (برابر با ۰/۳ متر)
X	طول اندازه‌گیری پروفیل سطح آب در آزمایش‌ها (برابر با ۷ متر)
Q_R	دبی عبوری از سمت راست دریچه دوار (مترمکعب بر ثانیه)
Q_L	دبی عبوری از سمت چپ دریچه دوار (مترمکعب بر ثانیه)
u	سرعت جریان در راستای جریان (متر بر ثانیه)
ΔE	افت انرژی (متر)
E_1	انرژی در بالادست دریچه دوار (متر)
E_2	انرژی در پایین‌دست دریچه دوار (متر)
$\Delta E/E_1$	افت انرژی نسبی (درصد)
B	عرض کانال آزمایشگاهی (متر)
u_1	سرعت جریان در بالادست دریچه دوار (متر بر ثانیه)
u_2	سرعت جریان در پایین‌دست دریچه دوار (متر بر ثانیه)
	نسبت عمق پایین‌دست به عمق بالادست دریچه در شرایط جریان آزاد

سپاسگزاری

دریچه دوار و کاربرد آن در کانال مستطیلی پرداخته است. این دریچه برای دامنه وسیعی از متغیرهای هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها، نتایج زیر به دست آمد:

برخورد جریان با لبه دریچه دوار، موجب تقسیم جریان و تغییرات عرضی در پروفیل سطح آب می‌شود. نتایج نشان داد با افزایش زاویه بازشدگی دریچه، این تغییرات کاهش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین تغییرات در زاویه ۳۵ درجه و کمترین در زاویه ۸۵ درجه مشاهده شد. سرعت جریان در سمت راست دریچه به طور قابل توجهی بیشتر از سمت چپ است، اما با افزایش زاویه بازشدگی، سرعت و دبی عبوری از سمت راست کاهش می‌یابد.

جریان عمدتاً از سمت راست عبور می‌کند، خطوط جریان در این ناحیه فشرده‌تر می‌شود و سرعت افزایش می‌یابد، در حالی که در سمت چپ، به دلیل عدم فشردگی، جریان کمتر و سرعت پایین‌تر است. تغییر زاویه بازشدگی تأثیر چندانی بر سرعت جریان در مقطع سمت چپ ندارد؛ افزایش دبی در این بخش بیشتر ناشی از افزایش سطح مقطع جریان است که طبق معادله پیوستگی، موجب افزایش دبی می‌شود.

با افزایش زاویه بازشدگی، دبی عبوری از سمت چپ بیشتر و از سمت راست کمتر می‌شود؛ بنابراین، درصد بیشتری از جریان از سمت چپ عبور می‌کند. همچنین، افزایش طول تبدیل تدریجی باعث کاهش دبی در سمت چپ و افزایش آن در سمت راست می‌گردد. به طور کلی، با افزایش زاویه بازشدگی یا کاهش طول تبدیل، درصد دبی عبوری از سمت چپ افزایش می‌یابد و برعکس.

افزایش دبی جریان باعث افزایش افت انرژی در تمام تبدیل‌های تدریجی می‌شود، اما تأثیر آن با افزایش زاویه بازشدگی کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش زاویه بازشدگی، افت انرژی کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که برای دبی ثابت، بیشترین افت مربوط به زاویه ۳۵ درجه و کمترین آن مربوط به زاویه ۸۵ درجه است. در پایان، روابطی دقیق برای محاسبه دبی عبوری از دو سمت دریچه و افت انرژی در شرایط جریان آزاد ارائه شد.

برای نصب دریچه دوار در کانال‌هایی با مقیاس‌های مختلف، سه عامل اصلی شامل عرض کانال، عمق کانال و طول تبدیل تدریجی باید مد نظر قرار گیرد. به منظور حفظ عملکرد

مراجع

- [1] H. R. Henry, "Discussion of diffusion of submerged jets by M. L. Albertson, Y. B. Dai, R. A. Jensen, H. Rouse," *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 115, no. 1, pp. 665–693, 1950. [Online].
- [2] T. B. Benjamin, "On the flow in canals when rigid obstacles are placed in the stream," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 1, pp. 227–248, 1956. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/S0022112056000147>
- [3] N. Rajaratnam and K. Subramanya, "Flow equation for the sluice gate," *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, vol. 93, no. IR3, pp. 167–186, 1967. [Online].
- [4] P. K. Swamee, "Sluice-gate discharge equations," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 118, no. 1, pp. 56–60, 1992. [Online].
- [5] J. Vanden-Broeck, "Numerical calculations of the free-surface flow under a sluice gate," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 330, pp. 339–347, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/S0022112096003849>
- [6] Roth and W. H. Hager, "Underflow of standard sluice gate," *Experiments in Fluids*, vol. 27, no. 4, pp. 339–350, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/S003480050358>
- [7] V. Ferro, "Simultaneous flow over and under a gate," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 126, no. 3, pp. 190–193, 2000. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:3\(190\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(190))
- [8] D. G. Kim, "Numerical analysis of free flow past a sluice gate," *Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 127–132, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF02823856>
- [9] D. Lozano, L. Mateos, G. P. Merkley, and A. J. Clemmens, "Field calibration of submerged sluice gates in irrigation canals," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 135, no. 6, pp. 763–772, 2009. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000085](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000085)
- [10] G. Belaud, L. Cassan, and J. P. Baume, "Calculation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measurement," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 135, no. 12, pp. 1086–1091, 2009. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000122)
- [11] A. Habibzadeh, A. R. Vatankhah, and N. Rajaratnam, "Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 137, no. 9, pp. 1079–1084, 2011. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000406](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000406)
- [12] M. Bijankhan, V. Ferro, and S. Kouchakzadeh, "New stage-discharge relationships for radial gates," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 378–387, 2013. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000556)
- [13] M. Bijankhan and S. Kouchakzadeh, "The hydraulics of parallel sluice gates under low flow delivery condition," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 41, pp. 140–148, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.017>
- [14] F. Salamasi and J. Abraham, "Expert system for determining discharge coefficients for inclined slide gates using genetic programming," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 146, no. 12, pp. 06020013:1–9, 2020. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001520](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001520)

- [15] H. Khalili Shayan, J. Farhoudi, and A. R. Vatankhah, "Solutions for estimating opening of sluice and radial gates for flow regulation," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 147, no. 3, pp. 06021001:1–13, 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001541](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001541)
- [16] W. Meng, L. Li, S. Zhao, and P. Li, "Flow regime discrimination and methodology for calculating discharge in trapezoidal sluice gates," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 100, p. 102710, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w17030456>
- [17] T. Hashem, A. Y. Mohammed, and T. J. Alfatlawi, "Hydraulic characteristics of labyrinth sluice gate," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 96, p. 102556, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102556>
- [18] A. Marashi, "Hydraulics of butterfly gate: determination of specifications and application criteria in the canal," Ph.D. dissertation, University of Lorestan, 2019. [Online]. Available:
- [19] Marashi, H. A. Yonesi, S. Koochakzadeh, and H. Torabi Poudeh, "Evaluation of efficiency of the butterfly gate as a structure for control and flow measurement in semi-circular canals," *Journal of Irrigation and Water Engineering*, vol. 11, no. 42, pp. 1–13, 2020. [Online].
- [20] Marashi, S. Kouchakzadeh, H. A. Yonesi, and H. Torabi Poudeh, "Hydraulics of rotary gate: novel structure for semi-circular canals," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 147, no. 4, pp. 04021003:1–10, 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001537](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001537)
- [21] M. Kheiraie, H. Yonesi, B. Shahinejad, H. Torabi Poudeh, and A. Marashi, "Laboratory investigation of the application of semi-circular rotary gate within a rectangular canal," *Environmental Water Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 485–574, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/ewe.2025.537171.2045>



Ferdowsi
University of
Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



Iranian
Concrete
Institute



Pavement
Engineering
Association of
Iran

Experimental Evaluation of Energy Storage and Rheological Properties of Bitumen Incorporating PANI/CO PCM*

Research Article

Sayyed Hamid Kamali Nasab¹, Sayyed Ali Hosseini² 

DOI: [10.22067/jfcej.2026.97262.1396](https://doi.org/10.22067/jfcej.2026.97262.1396)

1. Introduction

Asphalt mixture is a temperature-sensitive material. High temperatures make asphalt mixture susceptible to rutting and reduce its service life, while low temperatures can lead to thermal cracking in asphalt pavements, primarily due to increased tensile stress as pavement temperature decreases [1-9]. To enhance the properties of pure bitumen and improve asphalt mixture performance, bitumen modifiers are commonly used today. These additives can reduce temperature-induced stresses, thereby increasing the service life and resistance of asphalt pavements [10,11]. One promising approach involves thermal energy storage (TES) systems in asphalt mixtures through phase change materials (PCMs). PCMs can store and release energy based on latent heat during phase transition between melting-freezing cycles [13-21]. In recent years, researchers have employed PCMs for thermal control of asphalt mixtures. Studies indicate that the phase change temperature should be 30-60°C with appropriate melting enthalpy for pavement applications [11,22-27]. Adding PCMs to asphalt mixtures can control temperature fluctuations that might otherwise lead to heat-induced distress such as rutting [3,12,28-30]. Various methods exist for incorporating phase change materials in asphalt pavements, with composite PCMs (CPCM) being one of the most important. CPCM is fabricated by mixing PCMs with porous materials [36,37]. The effectiveness of composite PCMs often depends on stabilization and encapsulation strategies to reduce PCM migration in the molten state and improve heat transfer. Coconut oil, as a natural phase change material, has attracted researchers' attention due to its unique characteristics and environmentally friendly nature. This material exhibits suitable melting point, high thermal capacity, and good thermal stability, making it appropriate for thermal energy storage applications [45]. Polyaniline (PANI), a conductive polymer, has been employed as a conductive and solid phase in the CO/PANI system within a composite PCM framework. This polymer possesses significant electrical and thermal properties that can enhance PCM performance [46]. Based on previous studies and the

pavement industry's need for proper thermal energy storage and release control, this research utilizes coconut oil (CO) as a phase change material and polyaniline (PANI) as a conductive material. This PCM can store and release thermal energy at phase change temperature, providing an appropriate solution for controlling asphalt mixture temperature and ultimately preventing thermal distress in asphalt pavements. This study investigates the chemical properties and Superpave tests of bitumen containing PCM at 3%, 7%, and 10% concentrations.

2. Experimental Program

2.1. Materials

Aniline (C₆H₅NH₂), hydrochloric acid (HCl 37%), and ammonium persulfate [(NH₄)₂S₂O₈] were procured from Aldrich and Merck companies. The bitumen used in this research has a penetration grade of 60/70.

2.2. Synthesis of Polyaniline

For polyaniline (PANI) synthesis, 5 mL of aniline monomer was added to an aqueous solution containing 5 mL of hydrochloric acid (1 M) under continuous stirring to create a homogeneous acidic environment. The mixture was then cooled and maintained at a controlled temperature of 0-5°C to control reaction rate and ensure better uniformity and reproducibility of PANI formation. Subsequently, an ammonium persulfate solution (0.1 M in HCl) was added dropwise over 30 minutes to act as the primary oxidant (oxidative polymerization initiator). The resulting mixture was stirred at controlled temperature for 4 hours to complete the polymerization process, with dark green color indicating PANI formation. The synthesized PANI was separated by centrifugation and washed several times with deionized water to remove unreacted aniline and byproducts. After washing, PANI was dried under vacuum at 40°C for subsequent use.

2.3. Preparation of CO/PANI Composite

To prepare the phase change material, 10 mL of distilled water was added to 10 g of coconut oil. The prepared PANI

* Manuscript received January 02, 2026, Revised February 09, 2026, Accepted July 28, 2026.

¹ Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

² Corresponding author. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: ahosseini@shahroodut.ac.ir.

was then mixed with coconut oil at a 1:1 weight ratio. The mixture was stirred at a controlled temperature of 50°C with a speed of 500 rpm for 2 hours to ensure more uniform dispersion of PANI in the oil phase and formation of a CO/PANI composite system.

2.4. Preparation of PCM-modified Bitumen

The phase change material (PANI/CO-PCM) was incorporated into bitumen at weight percentages of 3%, 7%, and 10%. The mixture was heated to 160°C and stirred in a high-shear mechanical mixer at 3000 rpm for 30 minutes to ensure homogeneity. After mixing, the composite was gradually cooled at room temperature to obtain a stable PCM-bitumen composite (PANI/CO-PCM/B). The cooling process prevents separation and ensures uniform distribution of PCM in the bitumen.

3. Results and Discussion

3.1. Chemical Characterization

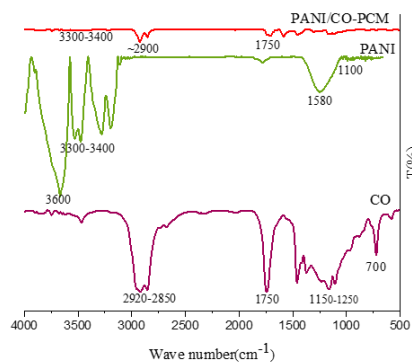


Figure. 1: FTIR analysis results

FTIR spectra confirm successful CO/PANI composite formation with preserved functional groups of both components [47-51]. DSC results show T_g decreases with PCM addition, indicating improved low-temperature flexibility. Melting enthalpy increases by over 90%, demonstrating enhanced thermal energy storage capacity.

3.2. Rheological Characterization

Viscosity remains below the 3 Pa·s standard requirements. DSR results show improved rutting resistance with PCM addition.

Table 1: RV result

Sample	Viscosity (pa.s)
Bitumen	0.407
Bitumen + 7% pcm	0.487
Bitumen + 10% pcm	0.509

Table 2: DSR result

Material	Value	Specification
unaged bitumen	$G^*/\sin\delta$	≥ 1.0 kpa
RTFO residue	$G^*/\sin\delta$	≥ 2.2 kpa
PAV residue	$G^*/\sin\delta$	≤ 5000 kpa

Viscosity remains below the 3 Pa·s standard requirement. DSR results show improved rutting resistance with PCM addition. BBR results indicate pure bitumen performs at -12°C, while PCM-modified bitumen performs at -18°C. MSCR test shows 231% increase in creep recovery for 10% PCM sample, indicating significantly enhanced rutting resistance.

Table 1: BBR results

	-12		-18		-24	
	S_t	m	S_t	m	S_t	m
Specification	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa
Bitumen	171	0.307	309	0.262		
Bitumen + 7% pcm			261	0.312	459	0.263
Bitumen + 10% pcm			229	0.313	440	0.267

4. Conclusions

The results of this research are as follows:

1. PCM addition reduces glass transition temperature (T_g) and improves low-temperature flexibility. BBR results show low-temperature performance grade improves from -12°C in pure bitumen to -18°C in PCM-modified samples.
2. DSC analysis confirms over 90% increase in thermal energy storage capacity, with melting enthalpy increasing from 1.22 J/g to 2.17 J/g for 10% PCM samples.
3. Rotational viscosity remains within acceptable limits (<3 Pa·s), ensuring proper workability for mixing and paving operations.
4. MSCR test demonstrates 231% improvement in creep recovery for 10% PCM samples, with reduced Jnr values indicating enhanced resistance to permanent deformation and rutting.
5. FTIR, XRD, and FESEM analyses confirm successful CO/PANI composite synthesis with preserved functional groups and stable structure within the bitumen matrix.



ارزیابی آزمایشگاهی ذخیره‌سازی انرژی و خواص رئولوژیکی قیر حاوی کامپوزیت ماده تغییر فاز دهنده (PCM) CO/PANI*

مقاله پژوهشی



سید علی حسینی^(۲)

سید حمید کمالی نسب^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2026.97262.1396

چکیده افزایش یا کاهش بیش از حد دمای مخلوط‌های آسفالتی موجب خرابی‌هایی از جمله شیارشدگی و ترک‌های حرارتی در روسازی‌های آسفالتی می‌شود. هدف از این پژوهش ارزیابی اثر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) (Phase Change materials) به عنوان افزودنی قیر جهت کنترل دمای مخلوط‌های آسفالتی است؛ برای این هدف از پلی آنیلین (PANI) به عنوان ماده رسانا و روغن نارگیل (CO) (Coconut) به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و یک ماده طبیعی و دوستدار محیط زیست استفاده شده است. این ماده با درصدهای وزنی ۳٪، ۷٪ و ۱۰٪ با قیر ترکیب شده و آزمایش‌های (Differential Scanning Calorimetry) DSC، (X-ray Diffraction) XRD، (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) FTIR، (Field Emission Scanning Electron Microscopy) FESEM، (Rotational Viscosity) RV، (Dynamic Shear Rheometer) DSR، (Bending Beam Rheometer) BBR، (Pressure Aging Vessel) PAV، (Multiple Stress Creep Recovery) MSCR انجام شده است. نتایج آزمایش DSC نشان می‌دهد ذخیره‌سازی انرژی در قیر افزایش یافته، همچنین موجب افزایش بیش از ۹۰ درصدی جذب انرژی گردیده است. نتایج شاخص‌های m و St از آزمایش BBR نشان می‌دهد که دمای عملکردی قیر خالص 12°C است ولی در نمونه‌های حاوی pcm به 18°C می‌رسد.

واژه‌های کلیدی مواد تغییر فاز دهنده، پلی آنیلین، قیر، روغن نارگیل، ذخیره‌سازی انرژی، خواص رئولوژیکی.

Experimental Evaluation of Energy Storage and Rheological Properties of Bitumen Incorporating PANI/CO PCM

Sayyed Hamid Kamali Nasab, Sayyed Ali Hosseini

Abstract Extreme fluctuations (sharp increases and decreases) in asphalt mixture temperature can cause distress such as rutting at high temperatures and thermal cracking at low temperatures in asphalt pavements. The purpose of this study is to evaluate the impact of incorporating phase-change material (PCM) as an additive in asphalt binder to control the temperature of asphalt mixture. For this purpose, polyaniline (PANI) was utilized as the conductive material, while coconut oil (CO) was employed as the phase change material. This PCM was blended with asphalt binder at weight percentages of 3%, 7%, and 10%. A comprehensive testing program was conducted including Differential Scanning Calorimetry (DSC), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM), Rotational Viscosity (RV), Dynamic Shear Rheometer (DSR), Bending Beam Rheometer (BBR), Pressure Aging Vessel (PAV), RTFO and Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) tests. DSC results confirm an increase in the thermal energy storage capacity of the modified bitumen, demonstrating over 90% improvement in energy absorption. Analysis of the BBR data—specifically the creep stiffness (St) and m -value—indicates that the low-temperature performance grade of the pure bitumen is -12°C , while for the PCM-modified samples, it improves to -18°C .

Key words Phase change material, Polyaniline, Bitumen, Coconut oil, Composite energy storage, Rheological properties.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۱۰/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۵/۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی مقطع دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

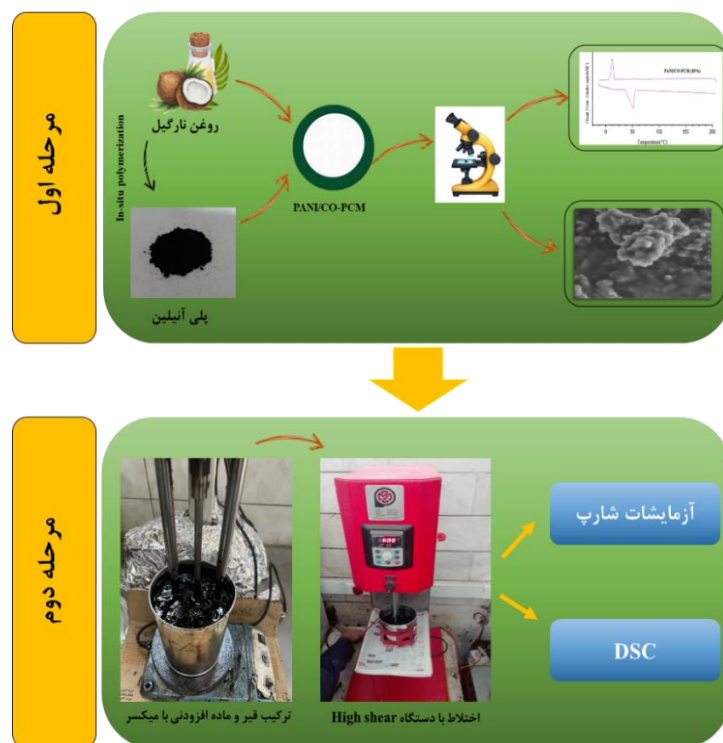
مقدمه

مخلوط آسفالتی یک ماده حساس به دماست و دماهای بالا مخلوط آسفالتی را مستعد شیارشدگی و کاهش دوره سرویس‌دهی می‌کند و دمای پایین می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی حرارتی در روسازی‌های آسفالتی شود که عمدتاً به دلیل افزایش تنش کششی با کاهش دمای روسازی است. زمانی که تنش کششی از مقاومت کششی روسازی آسفالتی بیشتر گردد، ترک‌ها شروع به تشکیل شدن می‌کنند. علاوه بر این، ترک‌خوردگی ناشی از خستگی حرارتی، که در اثر تغییرات دمای چرخه‌ای ایجاد می‌شود، در مناطقی با اختلاف دمای قابل توجه روز و شب رایج است. مکانیسم تشکیل ترک در این موارد به دلیل بیشتر بودن تنش کششی از مقاومت کششی نیست بلکه تنش حرارتی مکرر باعث خستگی در روسازی می‌شود. زمانی که خستگی ناشی از تنش حرارتی مکرر از مقاومت خستگی روسازی آسفالتی بیشتر گردد، ترک‌های ناشی از خستگی حرارتی در آسفالت ایجاد می‌شوند [1-9]. قیر بخش نسبتاً کوچکی از وزن کل مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد، اما نقش حیاتی در بهینه‌سازی عملکرد، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. برای افزایش خواص قیر خالص و بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالت، امروزه معمولاً از اصلاح‌کننده‌های قیر استفاده می‌شود. این افزودنی‌ها می‌تواند موجب کاهش تنش‌های ناشی از دما شود و در نتیجه طول عمر و مقاومت روسازی‌های آسفالتی را افزایش دهند [10، 11]. به دلیل مستعد بودن مخلوط آسفالتی به ایجاد خرابی در دماهای بالا و پایین، تحقیقات زیادی در مورد دمای مخلوط آسفالت انجام شده است [12]. یکی از این تحقیقات استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (Thermal energy storage) (TES) در مخلوط‌های آسفالتی از طریق مواد تغییرفازدهنده (PCM) است. PCM‌ها در بخش‌های ساختمان‌سازی، حوزه پزشکی، تجهیزات الکترونیکی و سایر صنایع به عنوان روشی برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شوند. در واقع، PCM به دلیل آنتالپی و پایداری بالا، می‌تواند انرژی را ذخیره و بر اساس گرمای نهان در طول تبدیل فاز بین چرخه ذوب-انجماد این انرژی را آزاد کند [13-21]. در سال‌های اخیر، محققان از PCM‌ها برای کنترل حرارتی مخلوط آسفالتی استفاده کرده‌اند. مطالعات زیادی انجام شده است که نشان می‌دهد دمای تغییر فاز باید ۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد باشد و آنتالپی ذوب

مناسبی برای استفاده از PCM در روسازی آسفالتی داشته باشد. در مخلوط آسفالتی از PCM‌های جامد - مایع و جامد - جامد در بیشتر موارد استفاده می‌شوند [11، 22-27]. افزودن PCM‌ها در مخلوط‌های آسفالتی، می‌تواند باعث کنترل نوسانات دما گردد که این نوسانات می‌تواند منجر به خرابی‌هایی ناشی از گرما مانند شیارشدگی شود [3، 12، 28-30]. به عبارت دیگر، PCM می‌تواند مقادیر زیادی انرژی حرارتی را با تغییر فاز جذب، ذخیره و آزاد کند که به تنظیم دمای آسفالت کمک می‌کند [31]. PCM‌ها با حفظ دمای پایدارتر در مخلوط آسفالتی، وقوع تنش‌های مرتبط با گرما را کاهش می‌دهند و در نتیجه به طور بالقوه دوام و طول عمر سازه‌های روسازی را افزایش می‌دهند [32]. PCM با تغییر فاز در طول گرمایش، انرژی حرارتی را ذخیره می‌کنند و در طول فرایند خنک‌سازی معکوس، انرژی ذخیره شده را در محیط آزاد می‌کنند [10، 33-35]. روش‌های متفاوتی برای کاربرد مواد تغییرفازدهنده در روسازی آسفالتی وجود دارد و یکی از مهم‌ترین آن‌ها PCM‌های کامپوزیتی (CPCM) است. CPCM با مخلوط کردن مواد تغییرفازدهنده با مواد متخلخل ساخته می‌شود [36، 37]. در یک پژوهش، کاکار و همکارانش از PCM میکروکپسوله شده حاوی تترادکان با نقطه ذوب ۶ درجه سانتی‌گراد، در دو نسبت وزنی مختلف شامل ۱٪ و ۳٪ به منظور بهبود خواص مخلوط آسفالتی استفاده کردند [38]. آزمایش temperature sweep نشان داد که افزودن PCM منجر به کاهش مدول مختلط قیر در دماهای مختلف می‌شود. در این آزمایش ماده تغییرفازدهنده جامد - جامد پلی‌یورتان (PUSSPCM) با دمای تغییر فاز پایین، با استفاده از روش اختلاط مستقیم و با درصد‌های وزنی مختلف ۰٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ به قیر آسفالت اضافه شد [39]. یافته‌ها حاکی از آن بود که افزودن PUSSPCM عملکرد شیارشدگی در دمای بالا را اندکی افزایش می‌دهد و در عین حال سختی خزشی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و منجر به بهبود قابل توجه عملکرد در دمای پایین شده است. ژانگ و همکاران یک PCM ترکیبی با ترکیب گرافیت گسترش‌یافته (EG) و پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) را تولید کردند و کارایی آن را در تنظیم دمای آسفالت اصلاح‌شده نشان دادند [40]. دای و همکاران یک PCM دوگانه ائوتکتیک ساختند که از اسید استیریک (SA) و اسید پالمیتیک (PA) تشکیل می‌شود (SA/PA) (PCM) سپس کاربرد آن را در دوام مخلوط آسفالتی بررسی کردند

است. این پلیمر خواص الکتریکی و حرارتی قابل توجهی دارد که می‌تواند کارایی PCM را بهبود بخشد [46]. با توجه به مطالعات انجام‌شده و نیاز صنعت روسازی به کنترل مناسب ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی در این مقاله از روغن نارگیل (CO) به عنوان یک ماده تغییرفازدهنده و پلی آنیلین (PANI) به عنوان یک ماده رسانا استفاده شده است. این ماده تغییرفازدهنده می‌تواند با ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی در دمای تغییرفاز راهکار مناسبی برای کنترل دمای مخلوط‌های آسفالتی و در نهایت جلوگیری از خرابی‌های حرارتی در روسازی‌های آسفالتی گردد. در این پژوهش خواص شیمیایی و آزمایش‌های شارپ قیر حاوی PCM در مقادیر ۳٪، ۷٪ و ۱۰٪ بررسی شده است. پارامترهای شیمیایی با هدف اثبات تشکیل شدن کامپوزیت CO/PANI مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و پارامترهای رئولوژیکی قیر با هدف اثبات تأثیر مثبت ماده افزودنی در عملکرد قیر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و دو هدف جداگانه بین آزمایش‌های شیمیایی و رئولوژیکی وجود دارد. شکل (۱) مراحل ساخت ماده افزودنی و اختلاط آن با قیر را نمایش می‌دهد.

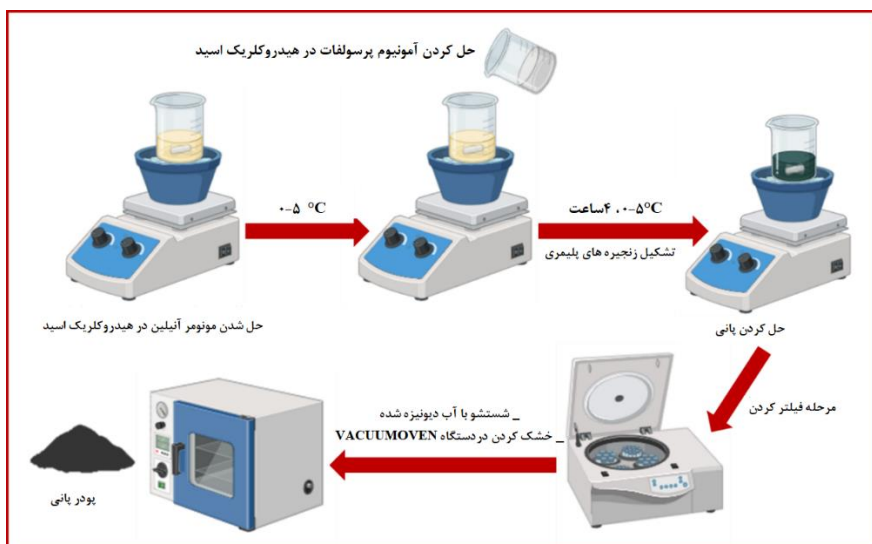
[41]. اثرگذاری PCM‌های کامپوزیتی اغلب به استخدام راهبردهای پایدارسازی و محصورسازی برای کاهش مهاجرت PCM در حالت مذاب و نیز بهبود انتقال حرارت وابسته است. روش‌های مختلفی برای ایجاد میکروکپسوله‌های حاوی PCM مانند روغن نارگیل وجود دارد که می‌توان به پلیمریزاسیون در محیط معلق اشاره کرد [42-44]. روغن نارگیل به عنوان یک ماده تغییرفازدهنده طبیعی، به علت ویژگی‌های منحصر به فرد و به عنوان ماده دوستدار محیط زیست توجه محققان و پژوهشگران زیادی را جلب کرده است. این ماده نقطه ذوب مناسبی دارد، ظرفیت حرارتی بالا و پایداری حرارتی خوبی را از خود نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها، آن را برای کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، مناسب می‌کند. به عنوان نمونه، از رزین ملائینی و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) به عنوان مواد پوسته‌ای برای محصور کردن روغن نارگیل استفاده شده است، که منجر به ایجاد میکروکپسول‌هایی با پایداری حرارتی بالا و پوسته‌ای با کارایی محصورسازی زیاد می‌شود [45]. پلی‌انیلین (PANI)، یک پلیمر هادی، به عنوان یک فاز رسانا و جامد در سامانه CO/PANI و در چارچوب یک ماده تغییرفازدهنده کامپوزیتی به کار گرفته شده



شکل ۱ مراحل آماده‌سازی و اختلاط قیر حاوی PANI/CO-PCM

جدول ۱ خواص فیزیکی قیر خالص

نتیجه آزمایش	محدوده قابل قبول	شماره استاندارد	نام آزمایش
64	60-70	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای 25°C
50.02	49-56	ASTM D36	نقطه نرمی (°C)
2	2.6 ±0.91	ASTM D6084	بازگشت الاستیک (%)
>100	≥100	ASTM D113	کشش پذیری (خاصیت انگمی) (15°C)



شکل ۲ مراحل سنتز کردن PANI

ساخت کامپوزیت قیر / ماده تغییرفازدهنده

مواد آزمایش

مواد این آزمایش عبارتند از آنیلین ($C_6H_5NH_2$)، هیدروکلریک اسید (37 % HCl) و آمونیوم پرسولفات $[(NH_4)_2S_2O_8]$ که از شرکت‌های Aldrich و Merck تهیه شده است. قیر استفاده‌شده در این پژوهش دارای درجه نفوذ ۶۰/۷۰ است که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) نمایش داده شده است.

سنتز کردن پلی آنیلین

برای سنتز کردن پلی آنیلین (PANI) ابتدا ۵ میلی‌لیتر مونومر آنیلین به محلول آب حاوی ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک (۱ مولار) تحت هم زدن مداوم اضافه شد تا یک محیط اسیدی همگن ایجاد شود. سپس مخلوط خنک شد و در دمای کنترل‌شده ۵-۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد تا سرعت واکنش کنترل شود و تشکیل پلی آنیلین با یکنواختی و تکرارپذیری بهتر انجام شود. پس از آن، محلولی از پرسولفات آمونیوم (APS، ۰.۱ مولار در HCl) به

آماده‌سازی ماده تغییرفازدهنده

(روغن نارگیل و پلی آنیلین)

برای تهیه ماده تغییرفازدهنده، ۱۰ گرم روغن نارگیل و ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. سپس PANI آماده‌شده با روغن نارگیل به نسبت وزنی ۱:۱ مخلوط شد. مخلوط در دمای

که روش آزمایش جریان قیر داخل یک لوله موین هست، آزمایش ویسکومتر به روش RV دارای محفظه بزرگتری است و برای قیرهای اصلاح شده همچنین برای قیرهای اصلاح نشده است. از آزمایش (DSR) (Dynamic Shear Rheometer) برای بررسی رفتار ویسکو الاستیک قیر در دماهای متوسط و زیاد برای سه حالت قیر شامل قیرهای پیرنشده، قیر کوتاه مدت پیر شده حاصل از دستگاه (RTFO) (Rolling Thin Film Oven) و قیر بلند مدت پیر شده حاصل از دستگاه (PAV) (Pressure Aging Vessel) استفاده شده است. پارامترهای خروجی دستگاه DSR که در ارزیابی ویژگی ویسکو الاستیک ماده قیری استفاده می شود شامل پارامتر اختلاف فاز δ و پارامتر مدول مختلط G^* است. G^* معیاری از پایداری و مقاومت قیرها در برابر تغییر شکل است و اختلاف فاز معیاری از مقادیر نسبی تغییرات شکل برگشت پذیر و برگشت ناپذیر است. جهت بررسی رفتار قیر در دمای پایین، آزمون رئومتر تیرچه خمشی (Bending Beam Rheometer) BBR انجام شده است. در این آزمایش، رفتار قیر در سردترین دمایی که در طول عمر سرویس دهی متحمل می شود، تحت بار ثابت ارزیابی می گردد. در نهایت از آزمون (Multiple Stress) (Creep Recovery) MSCR برای ارزیابی رفتار قیرها در برابر تغییر شکل های دائمی و یا شیار شدگی استفاده شده است.

نتایج آزمایش های انجام شده در پژوهش

نتایج آزمایش های شیمی

آزمون FTIR برای روغن نارگیل، PANI و کامپوزیت این دو ماده (PANI/CO-PCM) برای بررسی گروه های عاملی و ویژگی های ساختاری مواد انجام شد. نمودار (۱) نتایج آزمون FTIR را نمایش می دهد.

طیف FTIR روغن نارگیل (CO) باندهای شاخص تری گلیسیریدها را نشان داد. باندهای $2850-2920\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن گروه های CH_2 در زنجیرهای آلیفاتیک نسبت داده می شوند. باند قوی در حدود $1740-1750\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی C=O گروه های کربونیل استری موجود در تری گلیسیریدها است و ناحیه $1150-1250\text{ cm}^{-1}$ نیز به ارتعاشات کششی C-O پیوندهای استری نسبت داده می شود. همچنین باندهای ناحیه پایین فرکانس حدود

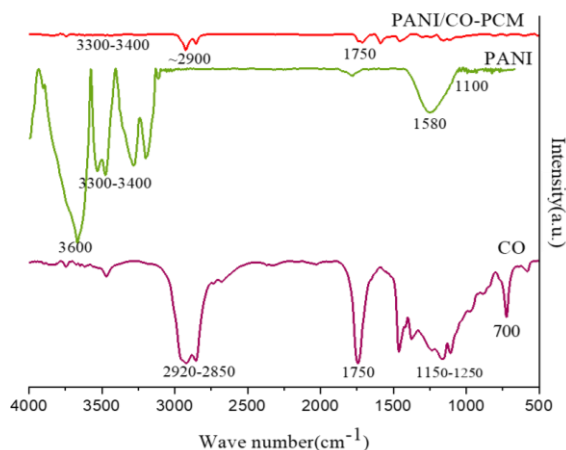
کنترل شده 50°C درجه سانتی گراد با سرعت 500 دور در دقیقه به مدت 2 ساعت به هم زده شد تا از پراکندگی یکنواخت تر PANI در فاز روغنی و تشکیل یک سامانه کامپوزیتی PANI/CO اطمینان حاصل شود.

اختلاط قیر و ماده تغییر فاز دهنده

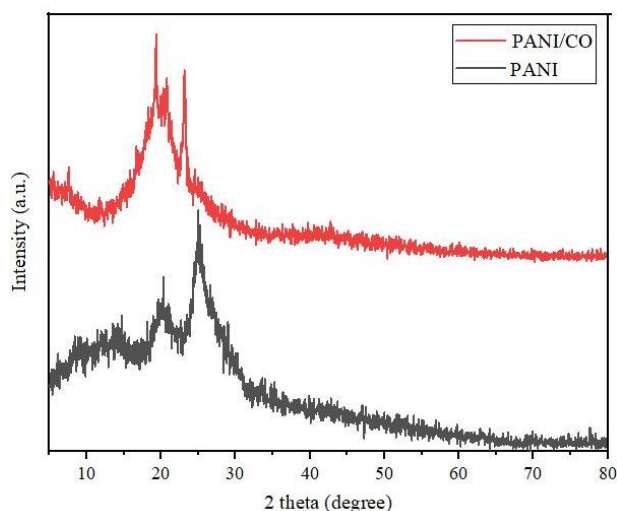
ماده تغییر فاز دهنده (PANI/CO-PCM) با نسبت وزنی 3% ، 7% و 10% در قیر گنجانده و تا دمای 160°C درجه سانتی گراد گرم و در یک مخلوط کن مکانیکی برش بالا با سرعت 3000 دور در دقیقه به مدت 30 دقیقه برای اطمینان از همگنی به هم زده شد. پس از اختلاط، کامپوزیت به تدریج در دمای اتاق خنک شد تا یک کامپوزیت ماده تغییر فاز دهنده - قیر پایدار به دست آید. فرایند خنک سازی برای جلوگیری از جداسازی و اطمینان از توزیع یکنواخت ماده تغییر فاز دهنده در قیر (PANI/CO-PCM/B) است.

آزمایش های انجام شده در پژوهش

ساختار شیمیایی روغن نارگیل و PCM سنتز شده توسط (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) FTIR با استفاده از دستگاه TENSOR 27 در محدوده فرکانس $4000-500\text{ cm}^{-1}$ مشخص شد. مورفولوژی کامپوزیت (PANI/CO-PCM) با استفاده از (Field Emission Scanning Electron Microscopy) TESCAN-MIRA III FE-SEM نشان داده شد. همچنین الگوهای (X-ray Diffraction) XRD با استفاده از دستگاه Dron به دست آمد. دمای ذوب و تبلور، همراه با آنتالپی گرمای نهان CO، PANI/CO-PCM و PANI/CO-PCM/B، با استفاده از آنالیز (Differential Scanning Calorimetry) DSC مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنالیزهای DSC با سرعت گرمایش و سرمایش 10°C درجه سانتی گراد در دقیقه، در محدوده دمایی $10-250^\circ\text{C}$ درجه سانتی گراد، در فضای نیتروژن با سرعت جریان 25 میلی لیتر در دقیقه انجام شد. آزمایش های Superpave خواص رئولوژیکی قیر را در دمای بالا، دمای پایین و دمای متوسط مورد بررسی قرار می دهند. در این پژوهش از آزمایش (Rotational Viscosity) RV برای بررسی ویسکوزیته چرخشی قیر استفاده شده است، برخلاف آزمون های ویسکومتر سینماتیکی و دینامیکی



نمودار ۱ نتایج آزمون FTIR



نمودار ۲ نتایج آزمون XRD

آزمون FE-SEM اطلاعات مفیدی از مورفولوژی و ریزساختار سامانه PANI/CO-PCM ارائه می‌دهد. تصاویر تهیه‌شده در بزرگ‌نمایی‌های مختلف شکل (۳) نشان می‌دهند که فاز پلیمری پلی‌آنیلین دارای مورفولوژی گل‌کلم‌مانند است و در کنار آن نواحی فیلم‌مانند و ساختار شبکه‌ای مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها می‌تواند به تجمع و هم‌جوشی دامنه‌های PANI در فرایند آماده‌سازی و نیز برهم‌کنش‌های بین‌سطحی فیزیکی میان PANI و فاز روغنی؛ از جمله برهم‌کنش‌های قطبی و هیدروژنی ضعیف میان گروه‌های نیتروژنی PANI و گروه‌های استری موجود در تری‌گلیسیریدهای روغن نارگیل و همچنین نیروهای واندروالس نسبت داده شود [54,55]. مشاهده همزمان این ریزساختارها در کنار نتایج FTIR و XRD نشان می‌دهد که سامانه

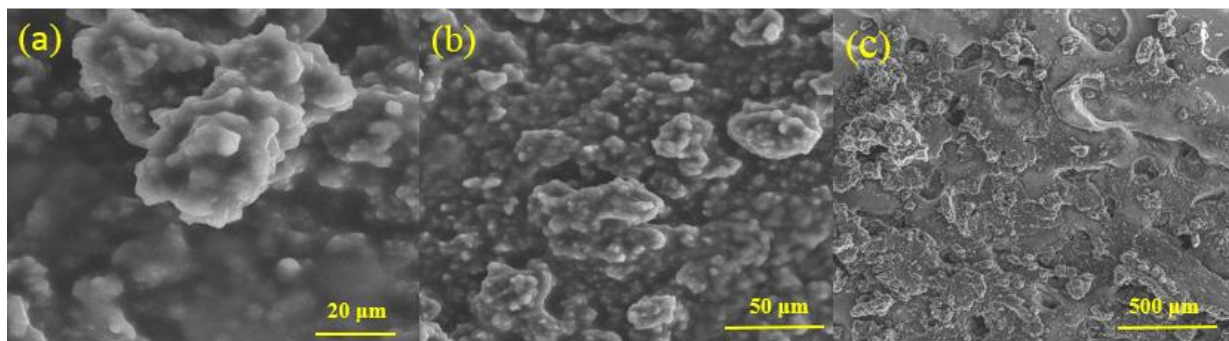
~۷۲۰-۷۰۰ cm^{-1} معمولاً به ارتعاشات rocking گروه‌های $\square(\text{CH}_2)$ در زنجیرهای بلند هیدروکربنی و اسکلت زنجیرهای آلیفاتیک نسبت داده می‌شوند و با ماهیت هیدروکربنی روغن‌های تری‌گلیسیریدی سازگار است [47, 48, 49]. طیف FTIR پلی‌آنیلین (PANI) نیز باندهای مشخصه ساختار آن را نشان داد؛ باندهای حدود ~۱۵۸۰ و ~۱۴۹۰ cm^{-1} به ارتعاشات کششی $\text{C}=\text{C}$ در واحدهای quinoid و benzenoid نسبت داده می‌شوند. باند حدود ~۱۳۰۰ cm^{-1} به ارتعاشات کششی $\text{C}-\text{N}$ (آمین آروماتیک) مرتبط است و باند حدود ~۱۱۴۰ cm^{-1} به عنوان یکی از باندهای شاخص PANI (مرتبط با حالت دوپینگ/ ساختار زنجیر و موده‌های ارتعاشی درون‌صفحه‌ای) گزارش شده است. همچنین باند حدود ~۸۰۰ cm^{-1} به ارتعاشات خمشی خارج از صفحه $\text{C}-\text{H}$ حلقه آروماتیک نسبت داده می‌شود [50, 51]. در طیف کامپوزیت CO/PANI، حضور همزمان باندهای شاخص هر دو جزء (به ویژه باند $\text{C}=\text{O}$ استری روغن و باندهای benzenoid/quinoid پلی‌آنیلین) نشان می‌دهد که گروه‌های عاملی اصلی مواد اولیه تا حد زیادی حفظ شده‌اند و سامانه حاصل یک کامپوزیت CO/PANI است. هر گونه تغییرات جزئی در موقعیت یا پهن شدن برخی باندها می‌تواند ناشی از برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی (مانند برهم‌کنش‌های قطبی/ هیدروژنی ضعیف بین گروه‌های استری روغن و گروه‌های نیتروژنی PANI) باشد [47, 50].

نتایج آزمون XRD انجام‌شده پانی و ماده تغییرناپذیر PANI/روغن نارگیل در نمودار (۲) نمایش داده شده است. طبق نتایج، PANI به دلیل پیک‌هایشان در 2θ حدود 10° ، 15° و 20° که با طرح‌های (۱۲۱)، (۱۱۳) و (۳۲۲) مطابقت دارند [45, 46] (JCPDS No. 00-053-1718)، ساختار نیمه‌بلوری دارد. در الگوی XRD مربوط به روغن نارگیل (CO)، پیک‌هایی در نواحی $2\theta \approx 10^\circ$ و $2\theta \approx 19-23^\circ$ مشاهده شد. این بازه‌ها با الگوهای پراکندگی چربی‌های مبتنی بر TAG سازگارند؛ به طوری که پیک‌های زاویه کوچک می‌توانند به فاصله‌های لایه‌ای و پیک‌های زاویه بزرگ به زنجیرها مرتبط باشند. پیک‌های XRD در چربی‌ها به تاریخچه حرارتی و آماده‌سازی نمونه حساس‌اند [52, 53]. الگوی XRD نشان می‌دهد کامپوزیت PANI/CO با موفقیت سنتز شده است [4].

PCM خالص دمای انتقال شیشه‌ای مشخصی نشان نمی‌دهد که نشان‌دهنده ماهیت کریستالی آن است. با افزایش درصد PCM، دمای انتقال شیشه‌ای کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط در دماهای پایین است. کاهش تدریجی Tg (Thermogravimetry) با افزایش درصد PCM (از $4,14^{\circ}\text{C}$ در قیر خالص به $-0,37^{\circ}\text{C}$ در نمونه با ۱۰٪ PCM) نشان‌دهنده افزایش تحرک زنجیره‌های مولکولی در دماهای پایین است. این پدیده می‌تواند به بهبود انعطاف‌پذیری آسفالت در شرایط سرد منجر شود، که برای مقاومت در برابر ترک‌خوردگی حرارتی بسیار مهم است.

حاصل، یک کامپوزیت CO/PANI است که در آن ارتباط و توزیع فازها در مقیاس میکرو برقرار شده است. از دید کاربردی، حضور فاز جامد و شبکه‌ای PANI در چنین سامانه‌ای می‌تواند در کاهش مهاجرت فاز روغنی در حالت مذاب نقش داشته باشد و به پایداری شکلی PCM در هنگام گذار فاز کمک کند.

جدول (۲) مرحله گرمایش و جدول (۳) پیک ذوب یا نقطه نرم شدن (Phase change) آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) را نشان می‌دهد که تأثیر کامپوزیت پلی‌آنیلین - روغن نارگیل (PANI/CO) را بر رفتار حرارتی قیر در غلظت‌های ۰٪، ۳٪، ۷٪ و ۱۰٪ مشخص می‌کند.



شکل ۳ تصاویر FE-SEM روغن نارگیل / پلی آنیلین

جدول ۲ دمای انتقال شیشه‌ای (Tg)

نمونه	دمای شروع ($^{\circ}\text{C}$)	دمای میانی ($^{\circ}\text{C}$)	دمای پایان ($^{\circ}\text{C}$)	Δcp (J/g·K)
قیر خالص	-۱,۹۲	۴,۱۴	۱۰,۴۵	۰,۲۴
PCM خالص	مشاهده نشد	مشاهده نشد	مشاهده نشد	مشاهده نشد
قیر + ۳٪ PCM	-۲,۶۲	۴,۲۴	۹,۱۵	۰,۱۷
قیر + ۷٪ PCM	-۶,۶۷	۱,۳۶	۸,۰۰	۰,۳۰
قیر + ۱۰٪ PCM	-۸,۵۷	-۰,۳۷	۶,۹۲	۰,۳۴

جدول ۳ پیک ذوب یا نقطه نرم شدن آزمون DSC

نمونه	دمای شروع ($^{\circ}\text{C}$)	دمای اوج ($^{\circ}\text{C}$)	دمای پایان ($^{\circ}\text{C}$)	آنتالپی ذوب (J/g)
قیر خالص	۵۸,۷۸,۳۳,۳۰	۶۳,۷۹,۴۰,۱۳	۷۱,۲۲,۵۷,۲۷	۰,۳۱,۰۰,۹۱
PCM خالص	۴۱,۷۸,۵۸,۸۰	۹۳,۹۸,۲۲,۸۷	۱۰۵,۸۴,۲۵,۸۹	۵۲,۸۱,۴۱,۹۷
قیر + ۳٪ PCM	۲۲,۹۶	۵۱,۴۴	۵۸,۲۹	۰,۷۸
قیر + ۷٪ PCM	۳۳,۸۵	۴۶,۸۵	۷۱,۲۸	۲,۰۲
قیر + ۱۰٪ PCM	۳۴,۹۰	۴۴,۳۵	۷۲,۳۶	۲,۱۷

دلیل حضور فاز جامد/ پلیمری پلی‌آنیلین (PANI) در سامانه کامپوزیتی CO/PANI می‌تواند باعث افزایش ویسکوزیته قیر شود و با افزایش میزان افزودنی ویسکوزیته قیر نیز افزایش یافته است، هر چند این افزایش چشم‌گیر نیست ولی ویسکوزیته قیرهای دارای PCM نسبت به قیر خالص بیشتر است.

جدول ۴ نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی

نمونه	ویسکوزیته (pa.s)
قیر خالص	0.407
7% PCM + قیر خالص	0.487
10% PCM + قیر خالص	0.509

پیرشدگی کوتاه مدت (RTFO) و پیرشدگی بلندمدت (PAV)

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر در آزمایشگاه از آزمایش RTFO طبق استاندارد ASTM D2872 استفاده شده است. از نمونه‌های قیر پیرشده RTFO به منظور انجام آزمایش DSR در دمای بالا در جهت بررسی شیارشدگی استفاده می‌شود. همچنین، پیرشدگی بلندمدت قیر نیز با استفاده از آزمایش PAV و بر روی قیر خروجی از RTFO مطابق با استاندارد ASTM D4402 انجام شده است. از نمونه‌های پیرشده، در آزمایش BBR برای بررسی عملکرد قیر در ترک‌های درجه حرارت پایین و همچنین ارزیابی عملکرد قیر در برابر ترک‌های خستگی با استفاده از دستگاه DSR استفاده شده است. طبق استاندارد باید حداکثر میزان افت وزنی قیر ۱٪ باشد تا بتوان از آن در آزمایش‌های BBR و DSR استفاده کرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد مقدار افت وزنی قیر کمتر از ۱٪ است.

رئومتر برش دینامیکی (DSR)

آزمایش DSR رفتار ویسکوالاستیک قیر را بر اساس استاندارد ASTM D7175 برای قیر پیرنشده، قیر کوتاه‌مدت پیرشده و قیر بلندمدت پیرشده ارزیابی می‌کند. ارزیابی عملکرد قیر در mixture tenderness بر روی قیر پیرنشده، ارزیابی عملکرد قیر در خرابی شیارشدگی بر روی قیر کوتاه‌مدت پیرشده و ارزیابی عملکرد قیر در ترک‌های خستگی بر روی قیر بلندمدت پیرشده انجام می‌شود. نتایج به دست آمده در آزمایش DSR در دمای بالا

PCM خالص دو پیک ذوب مشخص را با آنتالپی ذوب بسیار بالاتر نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. با افزایش درصد PCM، پیک‌های ذوب گسترده‌تر می‌شود و آنتالپی ذوب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی است. PCM خالص دو پیک ذوب مشخص (22.87°C و 93.98°C) با آنتالپی ذوب بالا (مجموعاً 94.78 J/g) نشان می‌دهد. این ویژگی در مخلوط‌های قیر/PCM نیز مشاهده می‌شود، اگر چه با شدت کمتر. افزایش آنتالپی ذوب در مخلوط‌ها (از 1.22 J/g در قیر خالص به 2.17 J/g در نمونه با ۱۰٪ PCM) نشان‌دهنده بهبود قابلیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است. عدم وجود Tg مشخص در PCM خالص و حفظ پیک‌های ذوب مشخص در مخلوط‌ها نشان می‌دهد که PCM خواص کریستالی خود را در مخلوط با قیر حفظ می‌کند. ترکیب خواص حرارتی PCM با قیر منجر به ایجاد ماده‌ای با قابلیت مدیریت حرارتی بهتر می‌شود که می‌تواند در کنترل دمای سطح آسفالت و کاهش تنش‌های حرارتی مؤثر باشد. ترکیب تغییرات در Tg و رفتار ذوب/ تبلور نشان می‌دهد که قیر اصلاح‌شده با PCM می‌تواند در محدوده دمایی وسیع‌تری عملکرد مطلوبی داشته باشد.

نتایج آزمایش Superpave

در این بخش به بررسی و ارزیابی نتایج آزمایش‌های Superpave در قیرهای اصلاح شده با درصد‌های مختلف ماده تغییرفازدهنده و قیر خالص پرداخته می‌شود. هدف از انجام آزمایش‌های Superpave بر روی نمونه‌های قیر، تعیین درجه عملکردی (PG) قیرهای اصلاح شده است.

آزمایش ویسکوزیته دورانی (RV)

این آزمایش طبق استاندارد ASTM D4402 و در دمای 135°C درجه سانتی‌گراد انجام شده است و طبق استاندارد مقدار ویسکوزیته مجاز باید حداکثر ۳ پاسکال ثانیه باشد تا پمپاژ قیر، اختلاط سنگدانه و قیر و عملیات آسفالت‌ریزی و تراکم مخلوط آسفالتی به درستی انجام شود. همان طور که در جدول (۴) قابل مشاهده است ویسکوزیته نمونه‌های حاوی ۷ درصد و ۱۰ درصد ماده تغییرفازدهنده نسبت به قیر خالص بیشتر است به طوری که ویسکوزیته قیر خالص 0.407 pa.s و برای قیر حاوی ۱۰٪ ماده تغییرفازدهنده 0.509 pa.s است. ماده تغییرفازدهنده انتخابی به

بررسی عملکرد قیر در دماهای پایین طبق استاندارد ASTM D6648 و از دمای ۶- تا ۲۴- درجه سانتی گراد انجام می شود. طبق این استاندارد سختی خزشی قیر (S) و نرخ تغییر سختی با زمان (m) دو پارامتری هستند که از این آزمایش بدست می آیند، و نتایج این دو پارامتر به منظور کنترل ترک خوردگی قیر در دمای عملکردی پایین باید طبق جدول (۶) باشد. همچنین این جدول نتایج حاصل از آزمایش BBR در این پژوهش را نیز نشان می دهد. همانطور که مشخص است دو پارامتر m و st در قیر خالص در دمای عملکردی ۱۲- قابل قبول بوده ولی در نمونه های حاوی PCM دو پارامتر مذکور در دمای ۱۸- قابل قبول بوده اند؛ بنابراین افزودن PCM می تواند با کاهش سختی خزشی و بهبود قابلیت ریلکسیشن تنش در دماهای پایین، مقاومت قیر را در برابر ترک های پرودتی افزایش دهد و قیر حاوی PCM می تواند تا دمای ۱۸- مقاومت داشته باشد.

بر روی قیر پیرنشده و کوتاه مدت پیرشده در تعیین درجه عملکردی درجه حرارت قیر مورد استفاده قرار می گیرد. در این آزمایش پارامتر G^* به معنی مقاومت کل در برابر تغییر شکل و δ توزیع نسبی مقاومت بین بخش الاستیک و بخش ویسکوز تعریف می گردد. جدول (۵) مقادیر قابل قبول در آزمایش DRS طبق استاندارد ASTM D7175 و نتایج حاصل از آزمایش DSR در سه مرحله را نشان می دهد. همان طور که نتایج نشان می دهند دمای عملکردی بالای قیر حاوی PCM با قیر خالص یکی و برابر ۶۴ درجه سلسیوس است و با افزایش درصد PCM شاخص $G^*/\sin \delta$ قیر پیرنشده افزایش یافته است و پیش بینی می شود با افزایش مقدار PCM در قیر دمای ۶۴ به ۶۰ تغییر پیدا کند. همچنین نتایج حاصل از آزمایش DSR بر روی قیر به دست آمده از آزمایش PAV نشان از بهبود شاخص $G^*\sin \delta$ و در نتیجه بهبود رفتار خستگی قیر حاوی PCM دارد.

رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

این آزمایش بر روی قیر به دست آمده از آزمایش PAV جهت

جدول ۵ نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی

	قیر پیر نشده $G^*/\sin \delta$		RTFO $G^*/\sin \delta$		PAV $G^*/\sin \delta$	
	64°C	70°C	64°C	70°C	22°C	25°C
Specification	≥ 1.0 kpa		≥ 2.2 kpa		≤ 5000 kpa	
قیر	1.26	0.608	2.297	1.055		2350
7% pcm + قیر	1.71	0.864	2.57	1.25	2899	
10% pcm + قیر	1.96	0.964	2.79	1.36	2729	

جدول ۶ نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

	-12		-18		-24	
	S_t	m	S_t	m	S_t	M
نمونه	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa	≤ 300 Mpa	≥ 0.3 Mpa
قیر	171	0.307	309	0.262		
7% PCM + قیر			261	0.312	459	0.263
10% PCM + قیر			229	0.313	440	0.267

بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR)

به منظور بررسی حساسیت و رفتار قیرها در برابر شیارشدگی و یا تغییرشکل دائمی، روش MSCR طبق استاندارد AASHTOT350 استفاده می‌شود. در این آزمایش یک نمونه قیر حاصل از آزمایش RTFO به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر تحت ۱۰ سیکل اعمال بار به مدت ۱ ثانیه تحت بار خزشی و ۹ ثانیه توقف و استراحت در سطح تنش ۱۰۰ و تنش ۳۲۰۰ پاسکال به وسیله دستگاه DSR قرار می‌گیرد. پس از آن مقدار کرنش اعمالی، مقدار نرمی، مقدار درصد بازگشت کرنش®، و همچنین میزان نرمی خزشی غیر قابل بازگشت (Jnr) در هر ۱۰ سیکل و هر سطح تنش و درصد اختلاف در نرمی خزشی غیر قابل بازگشت (diff-Jnr) قیرهای اصلاح‌شده مختلف محاسبه می‌شود. پارامتر Jnr، نسبتی از مقدار کرنش باقی‌مانده در قیر بعد از باربرداری و بارگذاری به میزان تنش اعمالی است که میزان مقاومت نمونه قیری را در برابر تغییرشکل‌های دائمی نمایش می‌دهد. میزان نرمی خزشی غیر قابل بازگشت می‌تواند مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را پیش‌بینی کند. این پارامتر نسبت به پارامتر $G^* / \sin \delta$ برای مشخص کردن مقاومت نمونه قیری به تغییرشکل دائمی مناسب‌تر است. جدول (۷) پارامترهای مربوط به آزمایش MSCR در این پژوهش را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که در قیر اصلاح‌شده با ۱۰٪ PCM در سطح تنش ۳۲۰۰ pa مقدار بازگشت خزشی قیر ۲۳۱٪ افزایش پیدا کرده است که بر این اساس می‌توان گفت مقاومت آن در برابر شیارشدگی نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. درصد بیشتر بازگشت کرنش در نمونه قیری بیانگر این موضوع است که نمونه قیری توانایی بازگشت مقدار بیشتری از کرنش بعد از بارگذاری را دارد. شایان ذکر است هر مقداری که درصد بازگشت کرنش، بیشتر باشد، نمونه قیری دارای توانایی بیشتر را برای مقابله و

مقاومت با شیارشدگی دارد. همچنین جدول (۷) مقادیر نرمی خزشی غیر قابل بازگشت Jnr را در سطوح کرنش ۱۰۰ pa و ۳۲۰۰ pa نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که پارامتر Jnr با افزودن ۱۰٪ PCM در سطح تنش ۱۰۰ pa حدود ۲۸٪ و در سطح تنش ۳۲۰۰ pa حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد. به طوری که قیر حاوی ۱۰٪ PCM کمترین مقدار Jnr را دارد. مقدار کمتر Jnr بیان‌کننده مقاومت بیشتر مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با آن نمونه قیری با حساسیت کمتر مخلوط آسفالتی نسبت به شیارشدگی است. اگر میزان سطوح تنش در آزمون MSCR یکسان باشد، می‌شود نتیجه گرفت که میزان کرنش دائمی برای نمونه قیری اصلاح‌شده نسبت به نمونه قیری خالص کمتر است. حساسیت قیر نسبت به میزان تنش اعمالی با استفاده از پارامتر نرمی خزشی غیر قابل بازگشت Jnr-diff محاسبه می‌شود. همچنین جدول (۷) نتایج درصد اختلاف بین نرمی خزشی غیر قابل بازگشت را در آزمایش باربرداری و بارگذاری نمایش می‌دهد. درصد اختلاف بیانگر حساسیت نمونه قیری به افزایش در سطح تنش است. در نتیجه، مقادیر کمتر نشان‌دهنده کمتر بودن حساسیت نمونه قیری به تنش است. طبق آیین‌نامه آشتو، حداکثر میزان درصد قابل قبول تغییر در نرمی خزشی غیر قابل بازگشت ۷۵٪ است. این معیار می‌تواند استفاده از نمونه‌های قیری را که نسبت به تغییر تنش حساس هستند و پتانسیل و امکان شیارشدگی زیادی دارند محدود کند، هر چند که در الزامات درجه عملکردی قابل قبول باشد. با توجه به نتایج نمایش داده‌شده در جدول (۷) می‌توان گفت که مقدار پارامتر diff-Jnr برای قیر حاوی ۱۰٪ PCM بالاترین مقدار است. بنابراین، این نوع نمونه قیری اصلاح‌شده می‌تواند یک نمونه قیری با حساسیت بالا نسبت به تنش قرار گیرد.

جدول ۷ نتایج آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش

نمونه	شاخص‌ها					
	R 0.1	R 3.2	J _{nr} 0.1	J _{nr} 3.2	R-diff	J _{nr} -diff
قیر	7.755	0.497	3.462	3.78	93.58	9.17
7% pcm + قیر	5.221	0.946	2.883	3.211	81.87	11.36
10% pcm + قیر	6.138	1.15	2.493	2.826	81.25	13.38

نتیجه گیری

در این پژوهش با هدف کنترل دمای مخلوط‌های آسفالتی از یک نوع ماده تغییرفازدهنده کامپوزیتی بر پایه روغن نارگیل و پلی آنیلین (PANI/CO-PCM) به منظور ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده شده است. پس از سنتز کردن و آماده‌سازی ماده تغییرفازدهنده را با قیر مخلوط کرده و آزمایش‌های شناسایی مواد و Superpave انجام شده است که خلاصه نتایج در زیر ذکر شده است:

۱. افزودن PCM باعث کاهش قابل توجه T_g می‌شود که منجر به بهبود انعطاف‌پذیری قیر در دماهای پایین می‌گردد. این امر موجب افزایش مقاومت در برابر ایجاد ترک در دماهای پایین می‌شود.

۲. PCM خالص آنتالپی ذوب بسیار بالایی دارد (مجموعاً $94,7 \text{ kJ/g}$). افزودن آن به قیر باعث افزایش قابل توجه ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی می‌شود، هر چند به میزان کمتر از PCM خالص. با افزایش درصد PCM، آنتالپی ذوب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود قابلیت ذخیره‌سازی و آزادسازی انرژی حرارتی است. این ویژگی می‌تواند در کنترل دمای سطح آسفالت مؤثر باشد.

۳. افزودن PCM به قیر باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در رفتار حرارتی آن می‌شود. این تغییرات شامل بهبود انعطاف‌پذیری در دمای پایین، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی، گسترش محدوده دمایی عملکرد و تغییر در الگوی ذوب و تبلور است. خواص منحصر به فرد PCM خالص، مانند آنتالپی ذوب بالا و دو پیک ذوب مجزا، به مخلوط قیر و PCM منتقل می‌شود، هر چند با شدت کمتر. این خصوصیات می‌توانند منجر به بهبود عملکرد آسفالت در شرایط آب و هوایی مختلف شوند.

۴. PCM خالص دو پیک ذوب در دماهای متفاوت نشان می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود که مخلوط قیر و PCM در محدوده دمایی وسیع‌تری قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی داشته باشد.

۵. دمای تبلور بالای PCM خالص باعث افزایش دمای شروع تبلور در مخلوط‌های قیر و PCM می‌شود که می‌تواند بر خواص رئولوژیکی قیر در دماهای بالا تأثیر بگذارد.

۶. نتایج آزمایش BBR نشان داد که دمای عملکردی قیر خالص -12°C است ولی در نمونه‌های حاوی PCM به -18°C

می‌رسد.

۷. ویسکوزیته قیر خالص $0,407 \text{ Pa.s}$ و ویسکوزیته قیر حاوی 10% ماده تغییرفازدهنده $0,509 \text{ Pa.s}$ است که نشان از بهبود ویسکوزیته قیر دارد.

۸. می‌بایست حداکثر میزان افت وزنی قیر 1% باشد تا بتوان از آن در آزمایش‌های BBR و DSR استفاده کرد در نمونه حاوی 10% افزودنی مقدار افت وزنی قیر کمتر از 1% است.

۹. طبق آزمایش MSCR قیر اصلاح‌شده با 10% PCM در سطح تنش $3,2 \text{ Pa}$ مقدار بازگشت خزشی قیر 231% افزایش پیدا کرده است که نشان از افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها دارد.

واژه‌نامه

Phase Change Material (PCM)	ماده تغییرفازدهنده
Coconut (co)	روغن نارگیل
	گرماسنج روبشی تفاضلی
Differential Scanning Calorimetry (DSC)	
X-ray Diffraction (XRD)	پراش پرتو ایکس
	طیف‌سنج مادون قرمز
Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	
	میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی
Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)	
Rotational Viscosity (RV)	ویسکوزیته چرخشی قیر
Rolling Thin Film Oven (RTFO)	آون دوار لایه نازک قیر
Dynamic Shear Rheometer (DSR)	رئومتر برشی دینامیکی
Bending Beam Rheometer (BBR)	رئومتر تیرچه خمشی
Pressure Aging Vessel (PAV)	محفظه تسریع پیری
	آزمایش خزش و برگشت قیر در چند سطح تنش
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	
polyaniline (PANI)	پلی آنیلین (پانی)
m	نرخ تغییر سختی با زمان
st	سختی خزشی قیر
	سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی
Thermal energy storage (TES)	
Expanded Graphite (EG)	گرافیت گسترش‌یافته
Polyethylene glycol (PEG)	پلی اتیلن گلیکول

pa. s	پاسکال.ثانیه	Salicylic acid (SA)	اسید سالیسیلیک
Jnr	نرمی خزشی غیر قابل بازگشت	palmitic acid (PA)	پالمیتیک اسید
diff-Jnr	درصد اختلاف در نرمی خزشی غیر قابل بازگشت	APS	آلومینیوم پرسولفات
Jnr-diff	نرمی خزشی غیر قابل بازگشت	HCL	هیدروکلریک اسید
Glass Transition Temperature (Tg)	دمای انتقال شیشه‌ای	Superpave	آزمایش‌های روسازی ممتاز
		δ	پارامتر اختلاف فاز
سیاسگزاری		G*	مدول مختلط
		Performance grade (PG)	درجه عملکردی قیر

مراجع

- [1] L. Zhang, Y. C. Cui, C. Xing, M. Y. Shan, and F. Gao, "Diffusion influence mechanism of virgin and aged asphalt binder system based on molecular dynamics," *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, vol. 150, no. 3, p. 04024022, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1439>
- [2] Y. Du, J. Chen, Z. Han, and W. Liu, "A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods," *Construction and Building Materials*, vol. 168, pp. 893–905, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.151>
- [3] Y. Wang, W. Wang, and L. Wang, "Understanding the relationships between rheology and chemistry of asphalt binders: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 329, p. 127161, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127161>
- [4] A. F. Justino Uchoa, W. da Silva Rocha, J. P. Macedo Feitosa, R. L. Nogueira, D. H. A. de Brito, J. B. Soares, and S. de Aguiar Soares, "Biobased palm oil as an additive for asphalt binder: Chemical characterization and rheological properties," *Construction and Building Materials*, vol. 285, p. 122883, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122883>
- [5] F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, and G. H. Hamed, "Effect of high-density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – a laboratory study," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, no. 3, pp. 746–756, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.876443>
- [6] B. Anupam, U. C. Sahoo, and P. Rath, "Phase change materials for pavement applications: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 247, p. 118553, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118553>
- [7] D. Zhang, M. Chen, S. Wu, and P. Liu, "Effect of expanded graphite/polyethylene glycol composite phase change material (EP-CPCM) on thermal and pavement performance of asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 277, p. 122270, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122270>
- [8] J. Dai, F. Ma, Z. Fu, C. Sangiorgi, P. Tataranni, G. Tarsi, C. Li, Y. Hou, and Y. Guo, "Binary eutectic phase change materials application in cooling asphalt: An assessment for thermal stability and durability," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 700, p. 134790, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134790>
- [9] J. Wang, J. Zhang, Z. Dong, and Y. Wang, "Compatibility of PCM modified asphalt based on naphthenic oil

- modification: A multiscale study,” *Construction and Building Materials*, vol. 426, p. 136206, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136206>
- [10] M. Yang, X. Zhang, X. Zhou, B. Liu, X. Wang, and X. Lin, “Research and exploration of phase change materials on solar pavement and asphalt pavement: A review,” *Journal of Energy Storage*, vol. 35, p. 102246, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102246>
- [11] X. Wang, B. Ma, S. Li, W. Si, K. Wei, H. Zhang, X. Zhou, Y. Fang, X. Kang, and W. Shi, “Review on application of phase change materials in asphalt pavement,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 10, no. 2, pp. 185–229, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.12.001>
- [12] M. Guo, M. Liang, Y. Jiao, W. Zhao, Y. Duan, and H. Liu, “A review of phase change materials in asphalt binder and asphalt mixture,” *Construction and Building Materials*, vol. 258, p. 119565, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119565>
- [13] F. Wang, X. Fang, and Z. Zhang, “Preparation of phase change material emulsions with good stability and little supercooling by using a mixed polymeric emulsifier for thermal energy storage,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 176, pp. 381–390, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.10.025>
- [14] C. Alkan, E. H. Alakara, S. A. Aksoy, and I. Demir, “Cement mortar composites including 1-tetradecanol@PMMA Pickering emulsion particles for thermal energy management of buildings,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 476, p. 146843, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146843>
- [15] C. Baylis and C. A. Cruickshank, “Review of bio-based phase change materials as passive thermal storage in buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, p. 113690, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113690>
- [16] J. Giro-Paloma, M. Martínez, L. F. Cabeza, and A. I. Fernández, “Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1059–1075, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.040>
- [17] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, and H. Di, “Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook,” *Building and Environment*, vol. 42, no. 6, pp. 2197–2209, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.023>
- [18] G. Li, “Review of thermal energy storage technologies and experimental investigation of adsorption thermal energy storage for residential application,” M.S. thesis, University of Maryland, College Park, 2013. [Online]
- [19] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, and H. Mehling, “Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- [20] Y. Chen, H. Wang, Z. You, and N. Hossiney, “Application of phase change material in asphalt mixture – a review,” *Construction and Building Materials*, vol. 263, p. 120219, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120219>
- [21] H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, N. Khordeghah, D. Ahmad, and T. Lipinski, “Latent thermal energy storage technologies and applications: A review,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 5, p. 100039, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>

- [22] X. Zhou, B. Ma, Y. Ren, and X. Wang, "Study on temperature control performance of composite shaped phase change material for asphalt pavement," *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, vol. 37, no. 11, pp. 3611–3616, 2018. (In Chinese)
- [23] Y. Farnam, H. S. Esmaeeli, P. D. Zavattieri, J. Haddock, and J. Weiss, "Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt snow and ice," *Cement and Concrete Composites*, vol. 84, pp. 134–145, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.002>
- [24] O. V. Laukkanen, H. Soenen, T. Pellinen, S. Heyrman, and G. Lemoine, "Creep-recovery behavior of bituminous binders and its relation to asphalt mixture rutting," *Materials and Structures*, vol. 48, pp. 4039–4053, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0464-7>
- [25] M. Yang, X. L. Zhang, X. C. Zhou, B. Liu, X. Wang, and X. W. Lin, "Research and exploration of phase change materials on solar pavement and asphalt pavement: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 35, p. 102246, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102246>
- [26] M. Jia, A. Sha, W. Jiang, X. Li, and W. Jiao, "Developing a solid–solid phase change heat storage asphalt pavement material and its application as functional filler for cooling asphalt pavement," *Energy and Buildings*, vol. 285, p. 112935, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112935>
- [27] Y. Zhou and Z. Liu, "A cross-scale 'material-component-system' framework for transition towards zero-carbon buildings and districts with low, medium and high-temperature phase change materials," *Sustainable Cities and Society*, vol. 89, p. 104378, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104378>
- [28] D. Betancourt-Jimenez, M. Montoya, J. Haddock, J. P. Youngblood, and C. J. Martinez, "Regulating asphalt pavement temperature using microencapsulated phase change materials (PCMs)," *Construction and Building Materials*, vol. 350, p. 128924, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128924>
- [29] M. Guo, M. Liang, Y. Jiao, W. Zhao, Y. Duan, and H. Liu, "A review of phase change materials in asphalt binder and asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 258, p. 119565, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119565>
- [30] S. Wang, K. Wei, W. Shi, P. Cheng, J. Shi, and B. Ma, "Study on the rheological properties and phase-change temperature regulation of asphalt modified by high/low-temperature phase change material particles," *Journal of Energy Storage*, vol. 56, p. 105970, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105970>
- [31] M. Wu, S. Wu, Y. Cai, R. Wang, and T. Li, "Form-stable phase change composites: Preparation, performance, and applications for thermal energy conversion, storage and management," *Energy Storage Materials*, vol. 42, pp. 380–417, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.07.019>
- [32] J. Dai, F. Ma, C. Sangiorgi, G. Tarsi, Z. Fu, P. Tataranni, C. Li, and Y. Hou, "Assessment of high-enthalpy composite eutectic phase change materials efficiency in asphalt binders for cooling pavements," *Journal of Cleaner Production*, vol. 442, p. 140999, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140999>
- [33] S. Zhang, D. Feng, L. Shi, L. Wang, Y. Jin, L. Tian, Z. Li, G. Wang, L. Zhao, and Y. Yan, "A review of phase change heat transfer in shape-stabilized phase change materials (ss-PCMs) based on porous supports for thermal energy storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110127, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110127>

- [34] X. Wang, W. Li, Z. Luo, K. Wang, and S. P. Shah, "A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application," *Energy and Buildings*, vol. 260, p. 111923, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111923>
- [35] Y. Ren and P. Hao, "Modification mechanism and enhanced low-temperature performance of asphalt mixtures with graphene-modified phase-change microcapsules," *Construction and Building Materials*, vol. 320, p. 126301, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126301>
- [36] B. J. Manning, P. R. Bender, S. A. Cote, R. A. Lewis, A. R. Sakulich, and R. B. Mallick, "Assessing the feasibility of incorporating phase change material in hot mix asphalt," *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 11–16, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.005>
- [37] J. Jin, F. Lin, R. Liu, *et al.*, "Preparation and thermal properties of mineral-supported polyethylene glycol as form-stable composite phase change materials (CPCMs) used in asphalt pavements," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, p. 16998, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17224-1>
- [38] M. R. Kakar, Z. Refaa, J. Worlitschek, A. Stamatiou, M. N. Partl, and M. Bueno, "Thermal and rheological characterization of bitumen modified with microencapsulated phase change materials," *Construction and Building Materials*, vol. 215, pp. 171–179, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.171>
- [39] K. Wei, X. Wang, B. Ma, W. Shi, S. Duan, and F. Liu, "Study on rheological properties and phase-change temperature control of asphalt modified by polyurethane solid–solid phase change material," *Solar Energy*, vol. 194, pp. 893–902, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.007>
- [40] D. Zhang, M. Chen, S. Wu, M. Riara, J. Wan, and Y. Li, "Thermal and rheological performance of asphalt binders modified with expanded graphite/polyethylene glycol composite phase change material (EP-CPCM)," *Construction and Building Materials*, vol. 194, pp. 83–91, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.237>
- [41] J. Dai, F. Ma, Z. Fu, C. Li, M. Jia, K. Shi, Y. Wen, and W. Wang, "Applicability assessment of stearic acid/palmitic acid binary eutectic phase change material in cooling pavement," *Renewable Energy*, vol. 175, pp. 748–759, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.016>
- [42] V. Ashok, N. Geetha, S. Rajkumar, and T. Pauline, "Experimental investigations for thermal energy management by encapsulation of nano-enhanced bio phase change material in buildings," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 44, no. 18, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2091715>
- [43] A. Jain and G. Pal, "Development and characterization of saturated fatty acids and biopolymer based novel multilayer encapsulated phase change materials system for buildings," *Construction and Building Materials*, vol. 454, p. 139115, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139115>
- [44] M. Nazari, M. Jebrane, and N. Terziev, "Bio-based phase change materials incorporated in lignocellulose matrix for energy storage in buildings—a review," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3065, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13123065>
- [45] B. Kalidasan, A. Pandey, S. Shahabuddin, M. George, K. Sharma, M. Samykano, V. Tyagi, and R. Saidur, "Synthesis and characterization of conducting Polyaniline@cobalt-Paraffin wax nanocomposite as nano-phase change material:

- Enhanced thermophysical properties,” *Renewable Energy*, vol. 173, pp. 1057–1069, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.042>
- [46] E. G. Saraç, E. Öner, and M. V. Kahraman, “Microencapsulated organic coconut oil as a natural phase change material for thermo-regulating cellulosic fabrics,” *Cellulose*, vol. 26, pp. 8939–8950, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02701-9>
- [47] R. Jamwal, S. Kumari, A. S. Dhaulaniya, B. Balan, and D. K. Singh, “Application of ATR-FTIR spectroscopy along with regression modelling for the detection of adulteration of virgin coconut oil with paraffin oil,” *LWT – Food Science and Technology*, vol. 118, p. 108754, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108754>
- [48] M. De Luca, G. Ioele, F. Grande, M. A. Occhiuzzi, M. Chieffallo, A. Garofalo, and G. Ragno, “Multivariate curve resolution methodology applied to the ATR-FTIR data for adulteration assessment of virgin coconut oil,” *Molecules*, vol. 28, no. 12, p. 4661, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/molecules28124661>
- [49] K. Shiv, A. Singh, L. B. Prasad, R. N. Gautam, M. K. Bharty, and T. Das, “Comparative analysis of edible oils classification using Fourier transform infrared and fluorescence spectroscopy coupled with chemometrics,” *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 129, p. 106056, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106056>
- [50] N. S. Sariciftci, H. Neugebauer, H. Kuzmany, and A. Neckel, “In situ FTIR spectroscopy of polyaniline,” in *Electronic Properties of Conjugated Polymers*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1987, pp. 228–231. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-83284-0_38
- [51] H. Neugebauer, A. Neckel, N. S. Sariciftci, and H. Kuzmany, “In situ FTIR measurements of polyaniline in the non-metallic phase,” *Synthetic Metals*, vol. 29, no. 1, pp. 185–192, 1989. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(89\)90300-4](https://doi.org/10.1016/0379-6779(89)90300-4)
- [52] C. Liu, Z. Meng, P. Cao, J. Jiang, X. Liang, M. Piatko, S. Campbell, S. K. Lo, and Y. Liu, “Visualized phase behavior of binary blends of coconut oil and palm stearin,” *Food Chemistry*, vol. 266, pp. 66–72, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.117>
- [53] B. Mahisanunt, H. Hondoh, and S. Ueno, “Coconut oil crystallization on tripalmitin and tristearin seed crystals with different polymorphs,” *Crystal Growth & Design*, vol. 20, no. 8, pp. 4980–4990, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00087>
- [54] J. Stejskal, J. Dybal, and M. Trchová, “The material combining conducting polymer and ionic liquid: Hydrogen bonding interactions between polyaniline and imidazolium salt,” *Synthetic Metals*, vol. 197, pp. 168–174, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2014.09.008>
- [55] M. R. McCord and H. Baniasadi, “Advancements in form-stabilized phase change materials: Stabilization mechanisms, multifunctionalities, and applications—a comprehensive review,” *Materials Today Energy*, vol. 41, p. 101532, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101532>



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>
Iranian
Concrete
InstitutePavement
Engineering
Association of
Iran

Re-evaluation of Rankine's Theory in Truss Retaining System Design: A Numerical Study on Lateral Earth Pressure Distribution

Research Article

Amirreza Ghodrati¹, Mohammad Hazeghian² DOI: [10.22067/jfcei.2026.96278.1386](https://doi.org/10.22067/jfcei.2026.96278.1386)

1. Introduction

Truss retaining systems are extensively utilized as an effective stabilization technique for urban shallow to medium-depth excavations. In conventional engineering practice, the design of these structures is predominantly governed by Rankine's classical lateral earth pressure theory, which assumes a linear, triangular stress distribution. However, this simplified approach fails to account for the complex, three-dimensional soil-structure interaction, spatial variation in structural rigidity, and the consequential stress redistributions. The primary objective of this extended abstract is to critically re-evaluate Rankine's assumptions for truss systems, highlighting the profound impact of the soil arching effect on the non-linear distribution of lateral earth pressure and its direct implications on structural member design.

2. Numerical Modeling and Methodology

To accurately capture the soil-structure interaction and the non-linear response of the retained soil mass, an advanced three-dimensional continuum modeling approach was adopted using FLAC3D version 6.0. The soil medium was simulated using the **Hardening Soil (HS)** constitutive model, which is highly capable of representing stress-dependent stiffness and yielding phenomena typical in excavation-induced unloading paths.

A comprehensive parametric study comprising 20 distinct scenarios was executed, investigating excavation depths of 4, 7, and 10 meters across four varying soil densities (loose to very dense), as well as different cohesion and surcharge values. Structural components, including vertical piles and inclined braces, were modeled as structural elements, while the soil-structure interface properties were assigned a strength reduction factor of 2/3 relative to the surrounding soil's shear strength. The geometrical configuration and the specific layout of the structural members for varying excavation depths are

thoroughly illustrated in Figure 1.

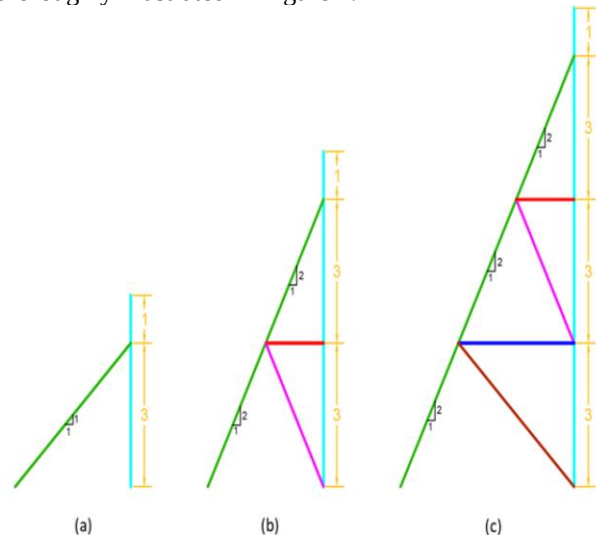


Figure 1: Geometrical configuration and member layout of the truss retaining system for various depths

3. Results and Discussion

3.1. Lateral Pressure Distribution and the Arching Effect

The numerical simulation results reveal a significant departure from classical theories. Rather than following the linear Rankine profile, the actual lateral earth pressure distribution exhibits a pronounced parabolic, non-linear trend. This deviation is primarily driven by the **soil arching effect**. Because the stiffness of the retaining system is non-uniform, active lateral earth pressure is transferred away from the relatively flexible sections of the vertical piles and highly concentrated at the rigid truss joints. This phenomenon and the resulting stress concentration are clearly demonstrated in Figure 2, which

* Manuscript received November 01, 2025, Revised December 28, 2025, Accepted March 10, 2026.

¹ M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

² Corresponding author. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: m.hazeghian@yazd.ac.ir.

compares the numerical pressure profile against the Rankine theory for a 7-meter excavation depth.

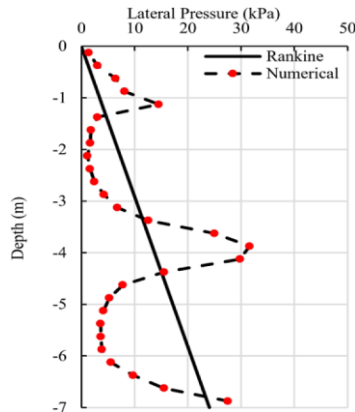


Figure 2: Comparison of lateral earth pressure distribution: Numerical model vs. Rankine theory for a 7m excavation depth

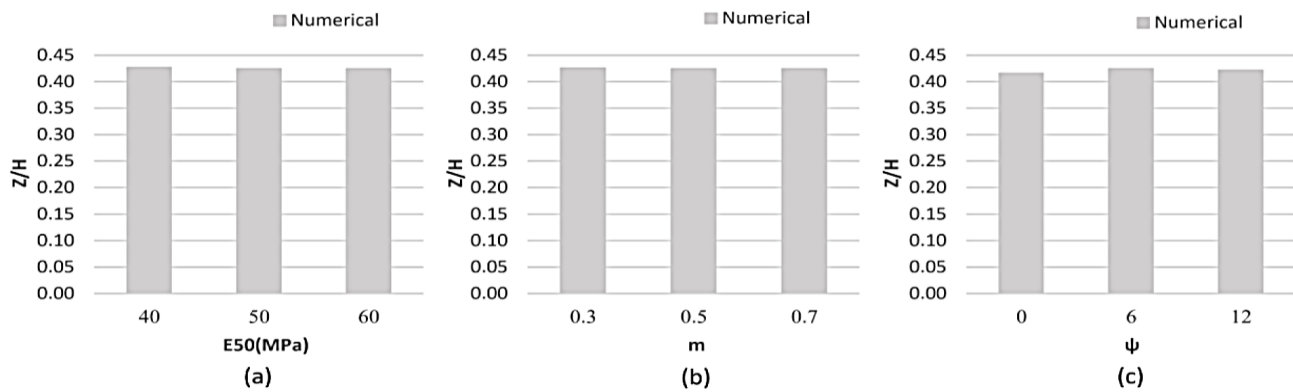


Figure 3: Variation of the resultant force location (Z/H) relative to soil parameters, indicating a constant average of $0.42H$

4. Engineering Implications and Structural Design

The discrepancies in the pressure distribution and the point of action fundamentally impact the final structural design. To quantify this, the internal forces obtained from both the numerical model and Rankine's analytical approach were utilized to design the structural members following the AISC-ASD89 code specifications.

Table 1: Comparison of required structural sections based on Rankine theory vs. Numerical analysis (Medium Soil, Depth=10m)

Structural Member	Rankine-Based Section	Numerical-Based Section
Vertical Pile (Main)	2IPE220	2IPE140 (Economical)
Raker	2IPE300	2IPE330 (Critical)
Middle Horizontal and Diagonal Members	2IPE140	2IPE140
Horizontal and Diagonal Members near the Bottom of the Excavation	2IPE160	2IPE140

3.2. Point of Action of the Resultant Force

Another pivotal finding of this numerical study pertains to the elevation of the resultant lateral force. Classical Rankine theory assumes the resultant force acts at an elevation of $0.33H$ measured from the base of the excavation. Conversely, the numerical analyses demonstrate an upward shift of the pressure center. As explicitly depicted in Figure 3, across a broad spectrum of soil parameters and conditions, the actual point of action consistently stabilizes at an average elevation of $0.42H$. This substantial rise directly amplifies the overturning moment and inherently alters the load transfer mechanism to the supporting braces.

Table 1 provides a comprehensive comparison of the required cross-sections for a 10-meter deep excavation in medium-dense soil. The results are particularly critical for design engineers: applying Rankine's theory leads to over-designed, uneconomical cross-sections for the vertical piles due to an overestimation of bending moments. Conversely, and more alarmingly, it severely underestimates the axial compressive loads on the main inclined braces, resulting in potentially non-conservative and unsafe designs for these critical elements.

5. Conclusion

This advanced numerical evaluation conclusively demonstrates the limitations of applying Rankine's linear earth pressure theory to truss retaining systems. The manifestation of the soil arching effect leads to a parabolic stress distribution with severe stress concentrations at the truss joints, and elevates the resultant force point of action to $0.42H$. Consequently, traditional design approaches may yield uneconomical vertical members while compromising the structural integrity of the bracing system. It is highly recommended that contemporary design codes incorporate modified pressure distribution coefficients that account for these critical, non-linear soil-structure interaction effects in flexible retaining systems.



ارزیابی مجدد تئوری رانکین در طراحی سازه‌های نگهدارنده خرابایی: یک مطالعه عددی بر توزیع فشار جانبی*

مقاله پژوهشی



محمد حاذقیان^(۲)

امیررضا قدرتی^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2026.96278.1386

چکیده طراحی متداول سازه‌های نگهدارنده خرابایی در عمل مهندسی، عمدتاً بر اساس تئوری فشار جانبی رانکین استوار است که اندرکنش واقعی خاک و سازه را در نظر نمی‌گیرد. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی پیشرفته در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ، به مقایسه توزیع فشار جانبی واقعی با تئوری رانکین و ارزیابی پیامدهای آن بر طراحی اعضای سازه می‌پردازد. نتایج تحلیل‌های پارامتریک نشان می‌دهد که توزیع فشار جانبی به دلیل پدیده قوس‌زدگی (Arching) کاملاً غیرخطی است و در محل اتصالات خرابا متمرکز می‌شود. نیروی جانبی کل در گودهای کم‌عمق به مراتب بیشتر از پیش‌بینی تئوری رانکین است، اما این اختلاف با افزایش عمق کاهش می‌یابد. مهم‌تر آنکه، محل اثر نیروی برآیند به طور میانگین در $0.42H$ ارتفاع گود از کف گود قرار دارد که به شکل قابل‌توجهی بالاتر از فرض یک‌سوم ارتفاع گود در تئوری رانکین است. این یافته‌ها آشکار می‌سازد که طراحی سنتی منجر به طراحی غیراقتصادی برای عضو قائم و در عین حال، طراحی بالقوه غیرمحافظة‌کارانه برای عضو کلیدی پشت‌بند می‌شود که این امر بر ضرورت بازنگری در رویکردهای طراحی فعلی تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی سازه نگهدارنده خرابایی، فشار جانبی خاک، اندرکنش خاک و سازه، پدیده قوس‌زدگی، تئوری رانکین.

Re-evaluation of Rankine's Theory in the Design of Truss Retaining Structures: A Numerical Study on Lateral Pressure Distribution

Amirreza Ghodrati

Mohammad Hazeghian

Abstract The conventional design of truss retaining structures in engineering practice is predominantly based on Rankine's lateral earth pressure theory, which neglects the actual soil-structure interaction. This research utilizes advanced three-dimensional numerical modeling in $FLAC^{3D}$ to compare the actual lateral pressure distribution with Rankine's theory and to evaluate its consequences on the design of the structural members. The results of parametric analyses indicate that the lateral pressure distribution is highly non-linear due to the arching phenomenon, concentrating at the truss connection points. The total lateral force in shallow excavations is considerably greater than the predictions of Rankine's theory, though this difference diminishes with increasing depth. More importantly, the resultant force's point of application is, on average, at a height of $0.42H$ from the base, which is significantly higher than the $0.33H$ assumed in Rankine's theory. These findings reveal that the traditional design approach leads to an uneconomical design for the vertical pile while simultaneously resulting in a potentially unconservative design for the critical raker member, thereby underscoring the necessity of revising current design practices.

Key words Truss Retaining Structure, Lateral Earth Pressure, Soil-Structure Interaction, Arching Effect, Rankine Theory

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۸/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۲/۱۹ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموخته، کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دکترای ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

مقدمه

با افزایش روزافزون تراکم جمعیت در مناطق شهری و نیاز به بهره‌برداری حداکثری از فضا، گودبرداری‌های عمیق به امری اجتناب‌ناپذیر در پروژه‌های ساختمانی بدل شده است. تأمین پایداری دیواره‌های این گودها به منظور جلوگیری از ریزش و آسیب به سازه‌های مجاور، از اصلی‌ترین چالش‌های مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. در این میان، روش‌های متعددی برای پایدارسازی گود وجود دارد که از آن جمله می‌توان به انکراژ، مهار متقابل و استفاده از سازه‌های نگهدارنده اشاره کرد [1].

پژوهشگران متعددی به مطالعه عددی و آزمایشگاهی انواع روش‌های پایدارسازی گود پرداختند. مرادی و همکاران [2] به بررسی تأثیر شکل مقطع حفاری بر اصطکاک جدار و رفتار خزشی میخ‌های گروتی در گونه‌ای از خاک مارن پرداختند. عبدلی و همکاران [3] به بررسی مطالعه عددی تأثیر دست‌خوردگی خاک و زاویه انکر بر ظرفیت بیرون کشش انکرهای مارپیچ چند صفحه‌ای در پایدارسازی شیروانی‌ها پرداختند. حاذقیان [4] یک روش طراحی برای دیواره‌های میخ‌گذاری شده و مقایسه آن با روش طراحی سنتی ارائه کرد. عبدل‌اللهی و بلوری بزاز [5] به مطالعه آزمایشگاهی گودبرداری به روش سیستم ترکیبی شمع و انکراژ پرداختند.

سازه نگهدارنده خرابایی، به دلیل مزایایی همچون سادگی اجرا، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و تخصص فنی بالا، یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها، به ویژه در گودبرداری‌های کم‌عمق شهری در ایران است. این سیستم با استفاده از سازه‌های خرابایی که با فواصل معین به دیواره گود تکیه داده می‌شوند، فشار جانبی خاک را تحمل و آن را به زمین منتقل می‌کند و بدین ترتیب، پایداری گود را تأمین می‌کند. اساس طراحی ایمن و اقتصادی این سازه‌ها، برآورد دقیق فشار جانبی وارد بر آن‌هاست [1].

به طور سنتی، طراحی سازه‌های نگهدارنده خرابایی اغلب بر پایه تئوری فشار جانبی رانکین [6] استوار است. این تئوری که وضعیت تنش در خاک را در حالت تعادل خمیری و در آستانه گسیختگی بررسی می‌کند، به دلیل سادگی محاسباتی کاربرد گسترده‌ای یافته است. با این حال، مفروضات این تئوری، از جمله صرف نظر کردن از اصطکاک بین دیوار و خاک و توزیع فشار خطی، ممکن است با رفتار واقعی اندرکنش خاک و سازه

تفاوت‌های قابل توجهی داشته باشد. به ویژه در خاک‌های چسبنده که تئوری رانکین منجر به پیش‌بینی فشار منفی (کشش) در اعماق کم می‌شود؛ موضوعی که بعدها توسط محققانی چون بل (Bell) مورد بازنگری قرار گرفت و منجر به ارائه توزیع فشار اصلاح شده گردید [7].

محدودیت‌های تئوری‌های کلاسیک، پژوهشگران متعددی را در سراسر جهان به سمت بهره‌گیری از روش‌های عددی برای درک بهتر رفتار واقعی دیوارهای حائل و سیستم‌های پایدارسازی سوق داده است. این مطالعات، جنبه‌های گوناگونی از اندرکنش خاک و سازه را که در روش‌های تحلیلی نادیده گرفته می‌شوند، مورد بررسی قرار داده‌اند. برای مثال، شکاریان و همکاران [8] با انجام مدل‌سازی عددی، تأثیر پارامترهایی چون طول، قطر، شیب و فاصله مهارهای سازه‌ای (انکرها) را بر توزیع فشار جانبی وارد بر دیوار در خاکریزهای مسلح ارزیابی کردند. سانگ و همکاران [9] یک سناریوی پیچیده‌تر را مطالعه کردند و فشار خاک بر دیواری که برای مهار یک شیب لغزنده ناشی از بارندگی شدید نصب شده بود را تحلیل کردند. بیلگین [10] با بررسی سه دیوار با ارتفاع‌های متفاوت، نشان داد که شرایط ساخت (اجرای دیوار در شرایط خاک‌برداری در مقابل خاکریزی) تأثیر مستقیمی بر الگوی فشار خاک، میزان تغییر شکل و لنگر خمشی ایجادشده در دیوار دارد.

بخش قابل توجهی از این پژوهش‌ها بر روی استخراج دیگرام‌های فشار جانبی واقعی از نتایج عددی یا مشاهدات صحرایی متمرکز بوده‌اند تا جایگزین‌های دقیق‌تری برای توزیع مثلی رانکین ارائه دهند. در همین راستا، هاش و ویتل [11] با استفاده از روش اجزای محدود، یک گودبرداری مهارشده در خاک رس سفت را مدل‌سازی کردند و با انجام محاسبات معکوس بر اساس نیروهای ایجادشده در مهارها، یک دیگرام فشار جانبی جدید به دست آوردند که تفاوت قابل ملاحظه‌ای با توزیع‌های فشار متداول داشت. کارلسراد و اندرسن [12] نیز با انجام مطالعات پارامتریک بر روی گودبرداری در خاک رس نرم، از طریق محاسبه حداکثر بار مهارها و تحلیل معکوس، فشار ظاهری زمین را برآورد کردند و آن را با مقادیر طراحی موجود مقایسه کردند. همچنین، کاستا و برگس [13] با در نظر گرفتن اثرات تحکیم همزمان با گودبرداری و مهارگذاری در رس نرم، نشان دادند که در نظر گرفتن فرایندهای وابسته به زمان تا چه

نتایج با تئوری رانکین مقایسه شده و تفاوت‌های طراحی اعضای سازه مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، بخش پنجم به جمع‌بندی یافته‌ها و ارائه نتایج کلیدی پژوهش می‌پردازد.

روش‌شناسی و مشخصات مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، برای مطالعه توزیع فشار جانبی خاک در سیستم سازه نگهبان خرابایی و مقایسه آن با تئوری کلاسیک رانکین، از روش تفاضل محدود سه‌بعدی بهره گرفته شده است. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار تخصصی ژئوتکنیک $FLAC^{3D}$ نسخه ۶٫۰ انجام پذیرفته است [20]. این نرم‌افزار به دلیل قابلیت بالا در شبیه‌سازی مسائل غیرخطی بزرگ و مدل‌سازی دقیق اندرکنش خاک و سازه، برای اهداف این تحقیق انتخاب گردید. در ادامه این بخش، جزئیات کامل مدل‌سازی عددی تشریح می‌شود؛ این جزئیات شامل مشخصات هندسی مدل، شرایط مرزی، مبانی مدل رفتاری خاک و نحوه تعریف المان‌های سازه‌ای، مراحل گام‌به‌گام تحلیل و در نهایت، فرایند صحت‌سنجی مدل برای اطمینان از اعتبار نتایج می‌باشد.

مشخصات هندسی و ابعاد مدل

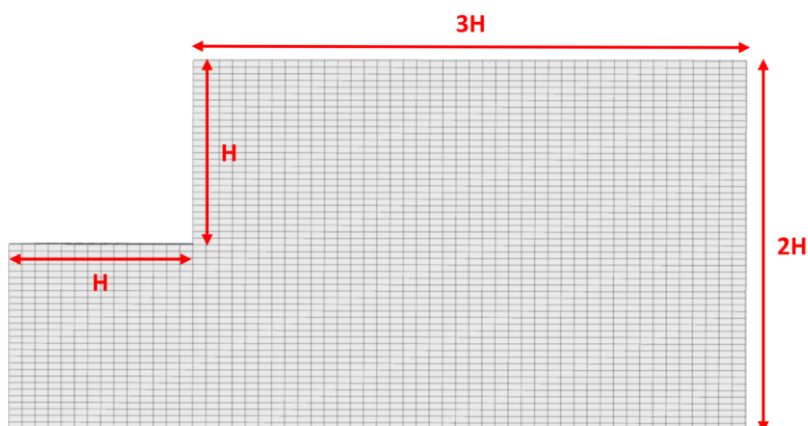
به منظور جلوگیری از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج تحلیل در محدوده گودبرداری، ابعاد مدل به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است. مطابق پیشنهادها مراجع فنی [21]، طول کل مدل برابر با چهار برابر عمق گود (H_4) و ارتفاع کل آن برابر با دو برابر عمق گود (H_2) انتخاب گردید که ابعاد کلی مدل عددی سه‌بعدی در شکل ۱ مشخص شده است. تحلیل‌ها با فرض شرایط کرنش مسطح انجام شده و بعد سوم مدل (عمود بر صفحه تحلیل) برابر با فاصله مرکز به مرکز خراباها، معادل ۴ متر، در نظر گرفته شده و جابه‌جایی در این راستا مقید شده است. در این پژوهش، سه عمق گودبرداری ۴، ۷ و ۱۰ متر مورد مطالعه قرار گرفته که شماتیک و ابعاد سازه‌های نگهبان خرابایی متناظر با هر عمق در شکل ۲ نمایش داده شده است.

حد می‌تواند بر برآورد فشار جانبی زمین در دو وجه دیواره تأثیرگذار باشد.

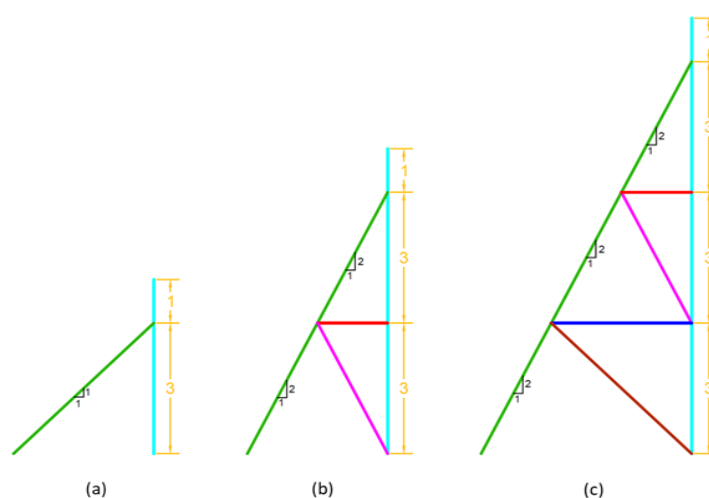
در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در ایران به طور مشخص بر روی رفتار سیستم سازه نگهبان خرابایی، به عنوان یک روش بومی و پرکاربرد، متمرکز شده‌اند. این مطالعات به تدریج درک ما را از رفتار این سیستم خاص عمیق‌تر کرده‌اند. فلاورجانی و همکاران [14] در یک مطالعه پارامتریک، اثر عواملی چون سربار، چسبندگی، زاویه اصطکاک و مدول الاستیسیته خاک را بر تغییر مکان ساختمان مجاور گود بررسی کردند و نشان دادند که در روش‌های رایج طراحی به تأثیر تغییر مکان‌ها توجه کافی نمی‌شود. امامزاده [15] با مقایسه عددی سیستم خرابایی و سیستم تیرک مایل و با استفاده از شاخص پتانسیل خرابی (DPI)، نتیجه گرفت که سازه خرابایی به دلیل درجات نامعینی بالاتر، ایمنی بیشتری را در مجاورت ساختمان همسایه فراهم می‌کند. صفرزاده و نجف‌پور [16] نشان دادند که استفاده از این سیستم باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی سطحی مجاور گود می‌شود. صفرزاده و مهری‌فر [17] نیز با مدل‌سازی یک گود ۴ متری، دریافتند که زاویه اصطکاک داخلی خاک تأثیر قابل توجهی بر تغییر مکان دیواره دارد. در نهایت، پژوهش‌های جدیدتر توسط عزیززاده و اسلامی حقیقت [18] به مقایسه کارایی مدل‌های رفتاری پیشرفته خاک (موهر - کولمب در مقابل خاک سخت‌شونده) و توسط پیرمحمدی علیشاه و همکاران [19] به روش‌های معادل‌سازی خاک چندلایه در تحلیل این سازه‌ها پرداخته‌اند.

با وجود پژوهش‌های ارزشمند انجام‌شده، خلأ یک تحقیق جامع که به صورت ویژه به توزیع واقعی فشار جانبی خاک در سیستم نگهبان خرابایی پرداخته و آن را با مبانی طراحی سنتی (تئوری رانکین) مقایسه کند، کماکان احساس می‌شود. بر همین اساس، نوآوری اصلی این پژوهش، مطالعه دقیق توزیع فشار جانبی در این سیستم با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی پیشرفته و ارزیابی تأثیر مستقیم تفاوت‌های این توزیع با تئوری رانکین بر طراحی بهینه و اقتصادی تک‌تک اعضای سازه (عضو قائم، پشت‌بند و اعضای میانی) است.

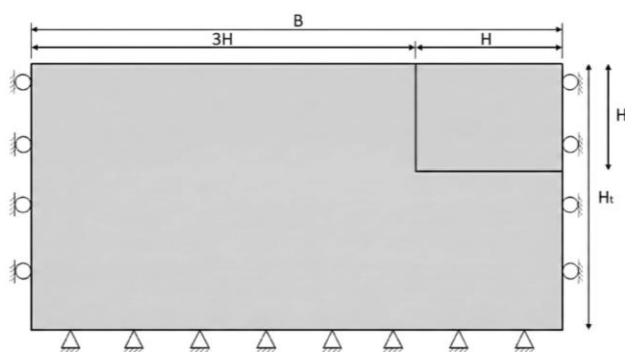
در راستای دستیابی به اهداف مذکور، ساختار این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است: در بخش دوم، فرضیات و جزئیات مدل‌سازی عددی تشریح می‌شود. بخش سوم به ارائه نتایج حاصل از تحلیل‌های پارامتریک اختصاص دارد. در بخش چهارم،



شکل ۱ ابعاد کلی مدل عددی سه‌بعدی و نسبت آن به عمق گود (H)



شکل ۲ هندسه و ابعاد سازه نگهدارنده خرابایی برای عمق گود: (a) ۴ متر، (b) ۷ متر و (c) ۱۰ متر



شکل ۳ شماتیک شرایط مرزی اعمال شده بر مدل عددی

شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل با هدف شبیه‌سازی یک توده خاک نیمه‌بی‌نهایت تعریف شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مرزهای قائم (جانبی) مدل دارای قید جابه‌جایی در راستای افقی (عمود بر مرز) هستند. مرز افقی در کف مدل به صورت تکیه‌گاه ثابت در نظر گرفته شده و در تمامی جهات مقید است. سطح فوقانی مدل که معرف سطح زمین است، به عنوان یک مرز آزاد و بدون هیچ‌گونه قیدی در نظر گرفته شده تا امکان تغییر شکل آزادانه آن فراهم باشد. با توجه به اینکه آنالیزها با فرض مدل دوبعدی و کرنش صفحه‌ای انجام شده‌اند، در نظر گرفتن اثرات سه‌بعدی، از محدودیت‌های این مدل است. لازم به ذکر است در نظر گرفتن مدل سه‌بعدی، می‌تواند به بررسی دقیق‌تر سازه نگهدارنده خرابایی بپردازد.

مدل‌سازی رفتاری خاک و سازه

قبل از انجام مراحل تحلیل و بارگذاری، بایستی مدل رفتاری مناسب برای خاک و نیز المان مناسب برای اعضای سازه نگهدارنده خرابایی انتخاب شود.

مدل رفتاری خاک

انتخاب یک مدل رفتاری مناسب که بتواند رفتار تنش - کرنش واقعی خاک را شبیه سازی کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، از مدل پیشرفته الاستوپلاستیک خاک سخت شونده (Hardening Soil) برای توصیف رفتار مکانیکی خاک استفاده شده است. این مدل به دلیل قابلیت بالا در شبیه سازی رفتار پیچیده خاک تحت مسیرهای بارگذاری مختلف، گزینه ای بسیار مناسب برای تحلیل مسائل گودبرداری است [20]. دو ویژگی بنیادین این مدل، در نظر گرفتن وابستگی سختی به سطح تنش و استفاده از یک رابطه هیپربولیک برای توصیف منحنی تنش - کرنش در بارگذاری اولیه است. رابطه هیپربولیک برای یک آزمایش سه محوری زهکشی شده به صورت رابطه (۱) تعریف می شود:

$$\square_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} \text{ for } q < q_f \quad (1)$$

در رابطه (۱)، q تنش انحرافی، q_f تنش انحرافی نهایی در لحظه گسیختگی، و q_a مقدار مجانبی مقاومت برشی است. برای اطلاع بیشتر در مورد فرمولاسیون و روش مدل رفتاری خاک سخت شونده، به راهنمای نرم افزار FLAC3D [20] مراجعه شود. سختی اولیه، E_i ، با مدول سختی سکانت، E_{50} ، از طریق رابطه (۲) مرتبط است:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، R_f نسبت گسیختگی است. مهم ترین ویژگی مدل، وابستگی سختی به سطح تنش است که برای مدول سکانت (E_{50})، بر اساس یک فشار مرجع (p^{ref}) معادل ۱۰۰ kPa، به صورت رابطه (۳) تعریف می شود:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{ccos\varphi - \sigma_r \sin\varphi}{ccos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (3)$$

در رابطه (۳)، E_{50}^{ref} مدول سختی مرجع، c و φ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک مؤثر، σ_3 تنش اصلی کوچک مؤثر (فشار همه جانبه) و m توان وابستگی سختی به تنش است. در این پژوهش، توان وابستگی سختی به تنش، m ، بر اساس پیش فرض های معتبر برای خاک های دانه ای برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. تنش انحرافی نهایی (q_f) نیز از طریق معیار گسیختگی

موهر - کولمب محاسبه می گردد.

مدل خاک سخت شونده همچنین بین مسیر بارگذاری اولیه و مسیر باربرداری - بارگذاری مجدد تمایز قائل می شود. برای باربرداری و بارگذاری مجدد، از یک مدول سختی مجزا و وابسته به تنش، E_{ur} ، مطابق رابطه (۴) استفاده می شود:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{ccos\varphi - \sigma_r \sin\varphi}{ccos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (4)$$

در رابطه (۴)، مقدار مدول باربرداری - بارگذاری مجدد مرجع، E_{ur}^{ref} ، مطابق با پیش فرض نرم افزار، ۴ برابر مدول سکانت مرجع ($E_{ur}^{ref} = 4E_{50}^{ref}$) در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون، ν ، نیز برای تمامی انواع خاک برابر با ۰/۳ فرض گردید. پارامترها برای خاک های مختلف مورد استفاده در این پژوهش، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ پارامترهای ژئوتکنیکی انواع خاک های مورد استفاده در تحلیل های عددی

نوع خاک	Dr (%)	نسبت تخلخل	γ (KN/m ³)	E_{50}^{ref} (MPa)	(درجه) φ	ψ
سست	۳۵	۰/۷۶	۱۶/۲	۳۰	۳۰	۰
متوسط	۶۵	۰/۶۴	۱۷/۴	۵۰	۳۶	۶
متراکم	۸۵	۰/۵۶	۱۸/۳	۶۵	۴۱	۱۱
خیلی متراکم	۱۰۰	۰/۵	۱۹	۸۰	۴۵	۱۵

مدل سازی المان های خراب و اندرکنش

اعضای سازه نگهبان خرابایی (عضو قائم، پشت بند و اعضای میانی) با استفاده از المان های تیر - ستون سازه ای «عضو قائم» (Pile) در نرم افزار مدل سازی شده اند. این المان ها قابلیت تحمل نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی را دارا هستند. اندرکنش بین این المان ها و توده خاک از طریق فنرهای برشی و قائم در فصل مشترک آن ها شبیه سازی می شود. پارامترهای مقاومتی این فصل مشترک، مطابق با پیشنهاد کتب مرجع مهندسی پی [22]، برابر با دو سوم مقادیر متناظر در توده خاک اطراف در نظر گرفته شده است.

مراحل تحلیل و سناریوهای بارگذاری

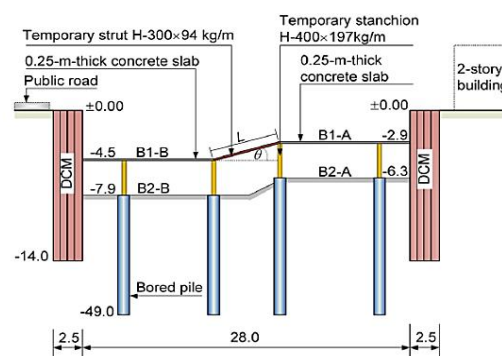
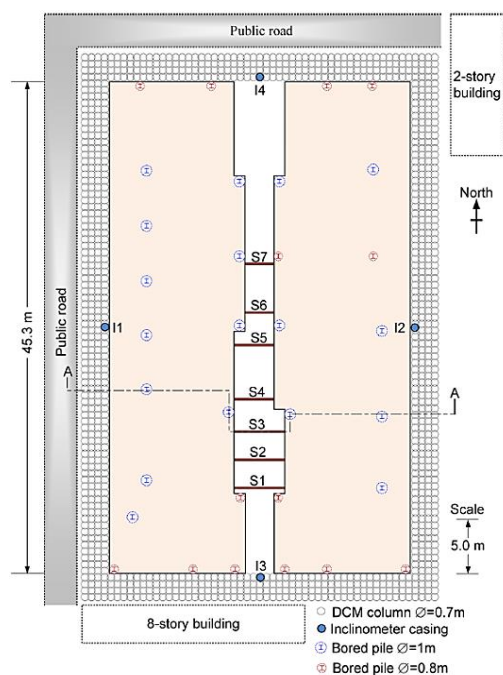
فرایند تحلیل عددی به صورت مرحله ای و مطابق با واقعیت

مقایسه می‌گردد.

صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور صحت‌سنجی فرضیات و همچنین مراحل مدل‌سازی عددی، از نتایج به دست آمده در یک پروژه ساختمان ۱۸ طبقه با ۲ طبقه زیرزمین واقع در مرکز شهر بانکوک استفاده شده است. در سیستم سازه‌نگهبان این ساختمان، چهار ردیف دیوار با ستون-های سیمانی درجاریز به قطر ۷۰ سانتی‌متر، دو ردیف دال بتنی با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و ۷ عدد استرات به کار رفته که برای انتقال نیروی جانبی استفاده می‌شوند. (شکل ۴). همچنین نحوه لایه‌بندی خاک محل پروژه، در جدول ۲) مشاهده می‌شود [23].

اجرای پروژه‌های گودبرداری شبیه‌سازی شده است. این فرایند شامل گام‌های ایجاد تعادل اولیه، نصب عضو قائم و گودبرداری لایه‌به‌لایه (با حداکثر ارتفاع ۲ متر) و نصب همزمان اعضای خرابا است. به منظور ارزیابی جامع، مجموعه‌ای از تحلیل‌های پارامتریک انجام شد. این تحلیل‌ها شامل ۱۲ سناریوی اصلی (۳ عمق گود $\times$ نوع خاک) با چسبندگی و سربار ثابت ۱۰ کیلوپاسکال بودند. علاوه بر این، به جهت بررسی تأثیر تغییرات چسبندگی و سربار بر روی مدل عددی، تحلیل با سربارهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوپاسکال و نیز چسبندگی‌های مختلف ۵، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ کیلوپاسکال، بر روی خاک متوسط در عمق گود ۱۰ متر انجام می‌شود. در کل در این مرحله ۲۰ تحلیل عددی انجام می‌شود و نتایج به دست آمده از این روش با نتایج تئوری رانکین



شکل ۴ پلان و برش گودبرداری ساختمان ۱۸ طبقه [23]

جدول ۲ مشخصات خاک محل پروژه [23]

عمق (m)	خاک بستر	w_n (%)	LL (%)	PL (%)	γ (kN/m ³)	G_s	e_0	s_u (kPa)
۲-۰	پوسته هوازده	۴۰	۵۸	۲۷	۱۵,۵	۲,۶۵	۱,۱	۲۵
۱۳-۲	رس نرم	۷۲-۵۵	۷۶-۶۳	۳۲-۲۷	۱۶,۲-۱۴,۵	۲,۶۸-۲,۶۲	۱,۹-۱,۴	۲۰-۱۵
۱۶-۱۳	رس با سفتی متوسط	۵۵-۴۸	۷۳-۶۰	۳۲-۲۹	۱۸,۱-۱۶,۶	۲,۶۸-۲,۶۶	۱,۴-۱,۲	۵۰-۲۵
۳۰-۱۶	رس سخت تا بسیار سخت	۳۶-۲۲	۷۰-۴۰	۳۲-۲۷	۱۸,۸-۱۸,۱	۲,۷۰-۲,۶۵	۱,۰-۰,۶	۲۰۰-۷۵

انجام گرفت. کانتور جابه‌جایی افقی دیواره گود و همچنین مقایسه پروفیل‌های مقادیر عددی و تجربی برای جابه‌جایی جانبی دیوار، به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به مقایسه صورت گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که فرضیات و شرایط در نظر گرفته‌شده برای مدل‌سازی دوبعدی این پروژه، برآورد نسبتاً دقیقی را از تغییرشکل‌های ایجادشده در اثر گودبرداری، به خصوص در محل تاج گود ارائه می‌دهند.

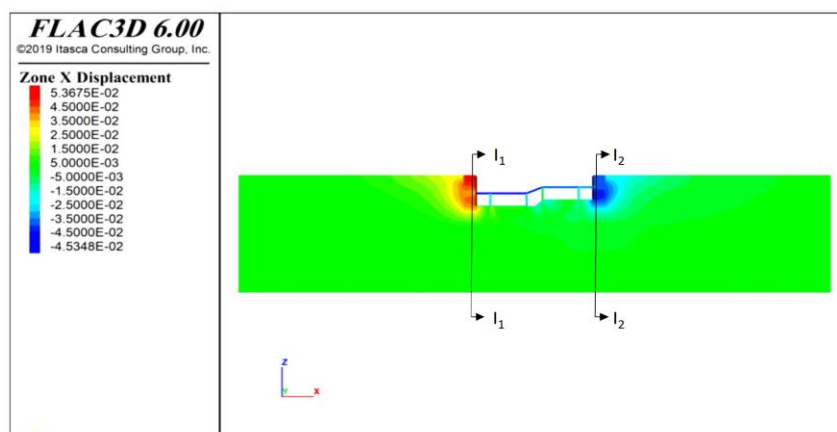
جامساوانگ و همکاران در بررسی میدانی این پروژه، به منظور اندازه‌گیری تغییرشکل جانبی دیواره گود، از شیب‌سنج‌های تعبیه‌شده در گمانه‌های عمودی حفرشده در اطراف گود استفاده کردند و در نهایت مقادیر اندازه‌گیری شده را با نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی در نرم‌افزار پلکسیس سه‌بعدی مقایسه کردند. با توجه به اطلاعات ذکرشده در جدول (۳) و جدول (۴) و همچنین فرضیات ذکرشده برای مدل‌سازی عددی، تحلیل تغییرشکل دوبعدی دیواره این پروژه در نرم‌افزار فلک سه‌بعدی

جدول ۳ پارامترهای مدل خاک سخت‌شونده [23]

پارامتر و مشخصه ژئوتکنیکی	پوسته هوازده	رس نرم	رس با سفتی متوسط	رس سخت	ستون اختلاط عمیق (DCM)
وزن مخصوص، γ (kN/m ³)	۱۶	۱۵	۱۷	۱۹	۱۶
مدول سکانت مرجع، E_{50}^{ref} (kPa)	۱۰,۰۰۰	۱,۲۰۰	۱۰,۰۰۰	۲۰,۰۰۰	۲۰۰,۰۰۰
مدول اتودومتري مرجع، E_{oe}^{ref} (kPa)	۱۲,۰۰۰	۹۶۰	۱۲,۰۰۰	۲۵,۰۰۰	۱۵۰,۰۰۰
مدول باربرداری و بارگذاری مجدد مرجع، E_{ur}^{ref} (kPa)	۳۵,۰۰۰	۴,۰۰۰	۴۵,۰۰۰	۹۵,۰۰۰	۶۰۰,۰۰۰
توان وابستگی سختی به تنش، m	۱	۱	۰,۹	۰,۹	۰,۹
ضریب پواسون باربرداری-بارگذاری مجدد، ν_{ur}	۰,۲	۰,۲	۰,۲	۰,۲	۰,۲
چسبندگی موثر، c (kPa)	۱۵	۲	۹	۳۰	۵۱۰
زاویه اصطکاک داخلی موثر، (درجه) ϕ'	۲۷	۲۳	۲۶	۲۸	۳۶
زاویه اتساع (انبساط)، (درجه) ψ	۰	۰	۰	۰	۰
نسبت پیش‌تحکیمی، OCR	۲	۱,۵	۲	۲,۴	—
نوع رفتار مصالح	زهکشی‌نشده (Undrained)	زهکشی‌نشده (Undrained)	زهکشی‌نشده (Undrained)	زهکشی‌نشده (Undrained)	زهکشی‌نشده (Undrained)

جدول ۴ مشخصات مقاطع مورد استفاده در پروژه [23]

پارامتر و مشخصه سازه‌ای	دال بتنی (Concrete slab)	شمع درجا (Bored pile)	مهار متقابل موقت (Temporary strut)	ستون میانی (Stanchion)
وزن مخصوص، γ (kN/m ³)	۲۴	۲۴	۷۸	۷۸
ممان اینرسی، I (m ⁴)	$1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^4 / \text{m}$	0.012–0.020	2.0×10^{-4}	7.1×10^{-4}
مساحت مقطع، A (m ²)	0.25 m ² /m	0.38–0.50	0.012	0.025
مدول الاستیسیته، E (kPa)	2.8×10^7	2.0×10^7	2.1×10^8	2.1×10^8
ضریب پواسون، ν	0.15	0.15	—	—
نوع رفتار مصالح / المان	المان صفحه (Plate)	مصالح غیرمتخلخل (Non-porous)	المان تیر (Beam)	المان تیر (Beam)



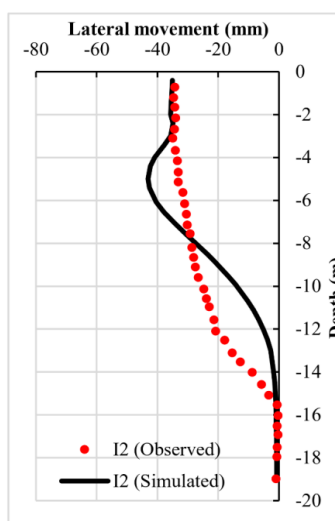
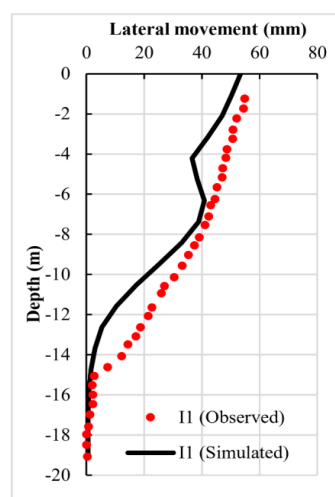
شکل ۵ کانتور جابه‌جایی افقی دیواره گود

کنترل نیروی داخلی اعضای سازه نگهدارنده خرابایی، برای اطمینان از منطقی بودن رفتار مدل انجام شده است.

کنترل جابه‌جایی‌ها

پس از انجام تحلیل، به منظور حصول اطمینان از صحت کدنویسی و نتایج به دست آمده از نرم‌افزار، جابه‌جایی کل مدل بررسی می‌شود. حداکثر مقدار جابه‌جایی مجاز که در آیین‌نامه‌ها یا تجربیات عملی وجود دارد، در حدود ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ ارتفاع گود است. به عنوان مثال، جابه‌جایی در گود به عمق ۷ متر، به صورت تقریبی نباید از حدود دو الی سه سانتی‌متر فراتر رود. هدف از بیان این موضوع صرفاً حصول اطمینان از صحت نتایج تحلیل است و محاسبه مقدار دقیق جابه‌جایی و مقایسه آن با مقادیر مجاز، موضوع این پژوهش نمی‌باشد. (در شکل ۷) جابه‌جایی کل مدل با عمق گود ۷ متر در خاک متوسط مشاهده می‌شود.

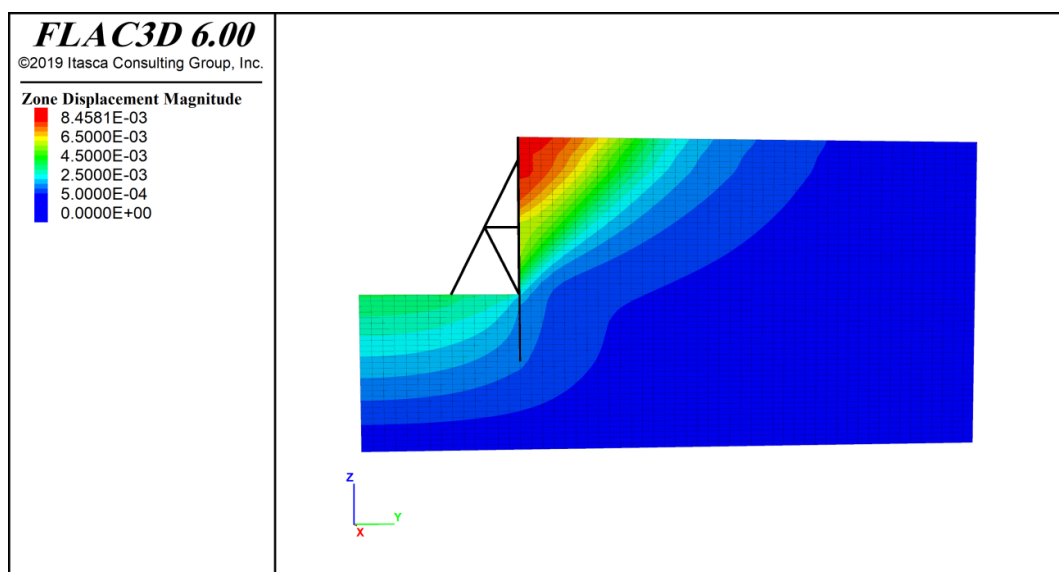
همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، حداکثر جابه‌جایی کل گود، در گود با عمق ۷ متر، در حدود ۸/۵ میلی‌متر است؛ بنابراین مقدار جابه‌جایی گود در این مدل، کمتر از مقدار مجاز بیان شده (دو الی سه سانتی‌متر) است و از این حیث نتایج نرم‌افزار منطقی است.



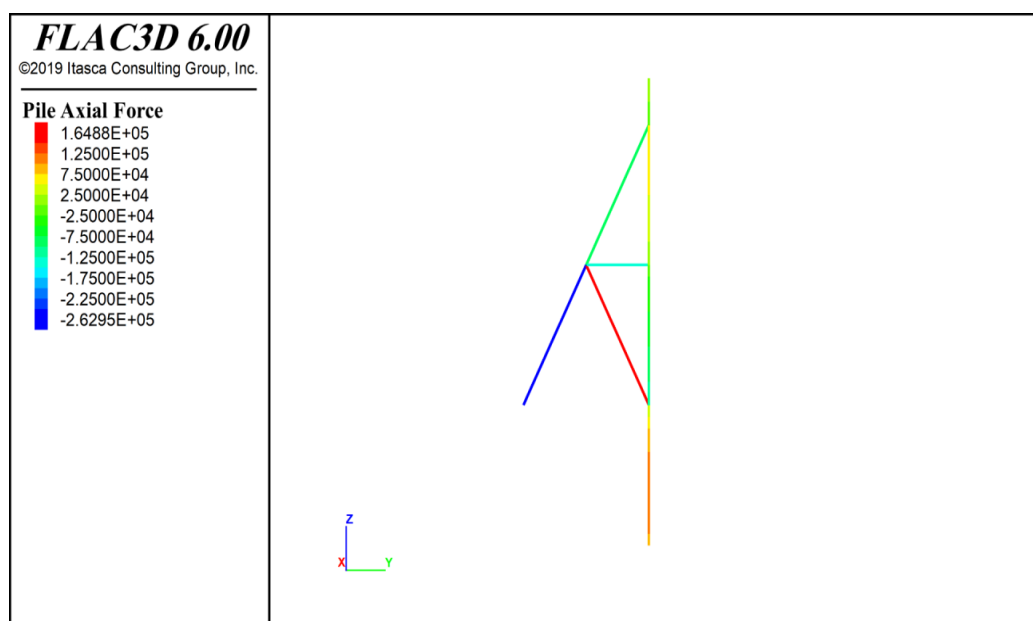
شکل ۶ مقایسه مقادیر عددی با مقادیر تجربی ثبت شده توسط شیب-

سنج‌های I1 و I2 برای جابه‌جایی جانبی دیوار

همچنین قبل از استخراج نتایج نهایی، کنترل جابه‌جایی‌ها و



شکل ۷ جابه‌جایی کل گود ۷ متر در خاک متوسط



شکل ۸ نیروی محوری ایجادشده در اعضای سازه نگهدارنده خرابایی به عمق گود ۷ متر در خاک متوسط برای مدل عددی

کنترل نیروهای داخلی اعضا

صورت کششی و نیز نیروی محوری ایجادشده در عضو پشت‌بند و عضو افقی به صورت فشاری است و همچنین مقدار نیروی فشاری ایجادشده در قسمت پایین پشت‌بند به نسبت نیروهای ایجادشده در سایر اعضای سازه نگهدارنده خرابایی مقدار بیشتری دارد؛ بنابراین نوع و مقادیر نیروی محوری ایجادشده در اعضای این سازه نگهدارنده خرابایی، کاملاً با مفاهیم و نحوه عملکرد سیستم

نیروی محوری ایجادشده در اعضای سازه نگهدارنده خرابایی، از موارد دیگری است که بایستی پس از تحلیل مورد بررسی قرار گیرد تا از صحت کدنویسی و نتایج تحلیل نرم‌افزار اطمینان حاصل شود. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق انتظار، نیروی محوری ایجادشده در عضو قائم و عضو قطری به

مشاهده است. در این حالت، در حالی که تئوری رانکین فشاری کمتر از ۲۰ کیلوپاسکال را در عمق ۴ متری پیش‌بینی می‌کند، مدل عددی به دلیل تمرکز تنش، فشاری بیش از ۳۰ کیلوپاسکال را در این عمق نشان می‌دهد. این الگوی غیرخطی با چندین نقطه اوج موضعی، مشخصه اصلی نتایج عددی است.

این الگوی غیرخطی به دلیل پدیده «قوس‌زدگی» (Arching) در توده خاک پشت دیوار رخ می‌دهد. در این پدیده، خاک به جای اعمال فشار یکنواخت، بار خود را به نقاط سخت‌تر سازه منتقل می‌کند. در نقاطی که سختی جانبی سازه نگهدارنده بیشتر است، مانند محل اتصال پشت‌بند به عضو قائم و تراز اتصال اعضای میانی خرپا، فشار خاک متمرکز می‌شود و افزایش می‌یابد. در مقابل، در نواحی با سختی کمتر (بین نقاط اتکا)، فشار کاهش پیدا می‌کند. این پدیده در تمام سناریوهای تحلیل‌شده با اعماق مختلف (۴، ۷ و ۱۰ متر) و انواع خاک‌های مختلف (سست، متوسط، متراکم و خیلی متراکم) به وضوح مشاهده می‌شود و یک رفتار پایدار و قابل تکرار را نشان می‌دهد (شکل ۱۰ تا شکل ۱۲).

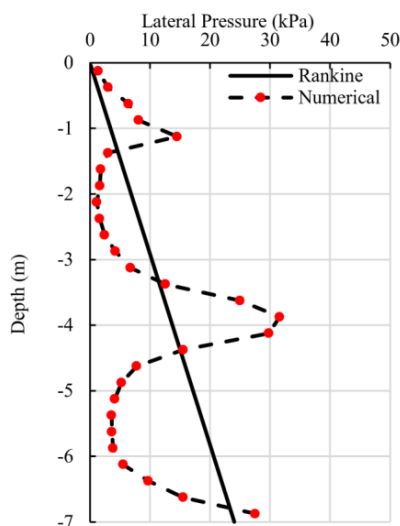
سازه نگهدارنده خرابایی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که مدل از نظر استاتیکی رفتار درستی دارد.

ارائه و تحلیل نتایج

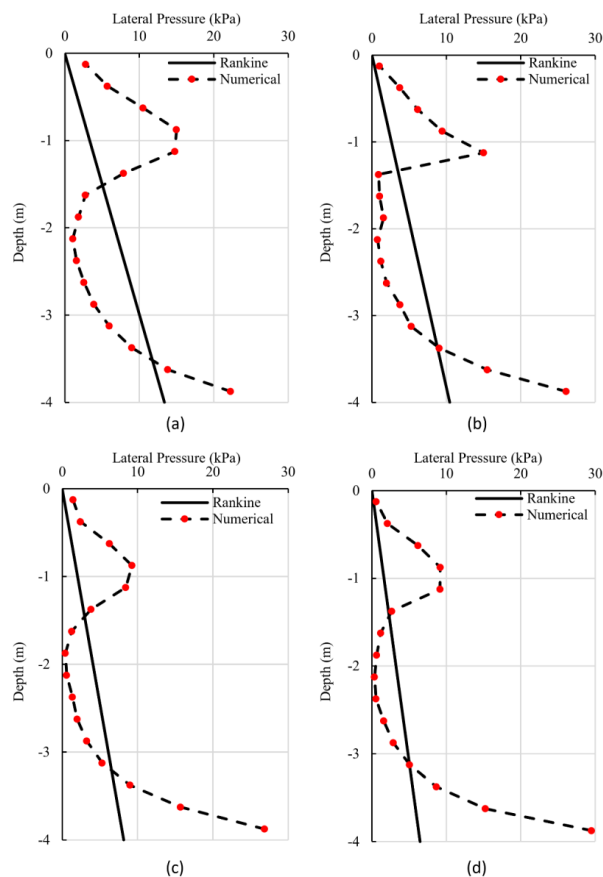
در این بخش، نتایج کلیدی حاصل از تحلیل‌های عددی پارامتریک ارائه می‌گردد. این یافته‌ها در سه حوزه اصلی شامل توزیع فشار جانبی، مقدار نیروی جانبی کل و محل اثر نیروی برآیند موردبررسی قرار گرفته و در تمام موارد، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با پیش‌بینی‌های تئوری رانکین مقایسه شده است.

توزیع فشار جانبی: مقایسه مدل عددی و تئوری رانکین

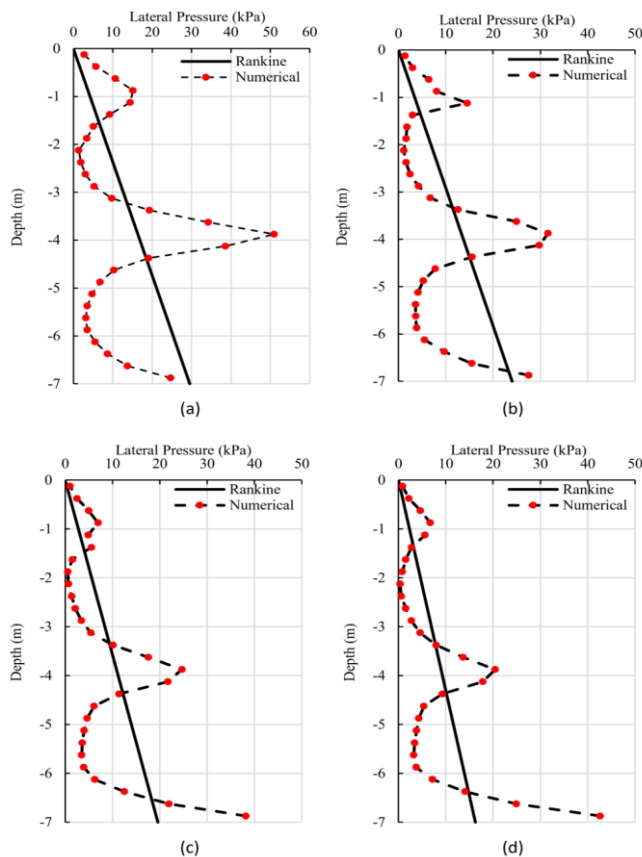
اولین و بنیادی‌ترین تفاوت مشاهده‌شده بین نتایج عددی و تئوری کلاسیک، در الگوی توزیع فشار جانبی در عمق دیواره گود است. برخلاف توزیع خطی و مثلثی تئوری رانکین، مدل عددی یک توزیع فشار غیرخطی را به دست می‌دهد که نشان‌دهنده اندرکنش پیچیده‌تر خاک و سازه است. این تفاوت در نمودار نمونه برای یک گود ۷ متری در خاک متوسط (شکل ۹) به وضوح قابل



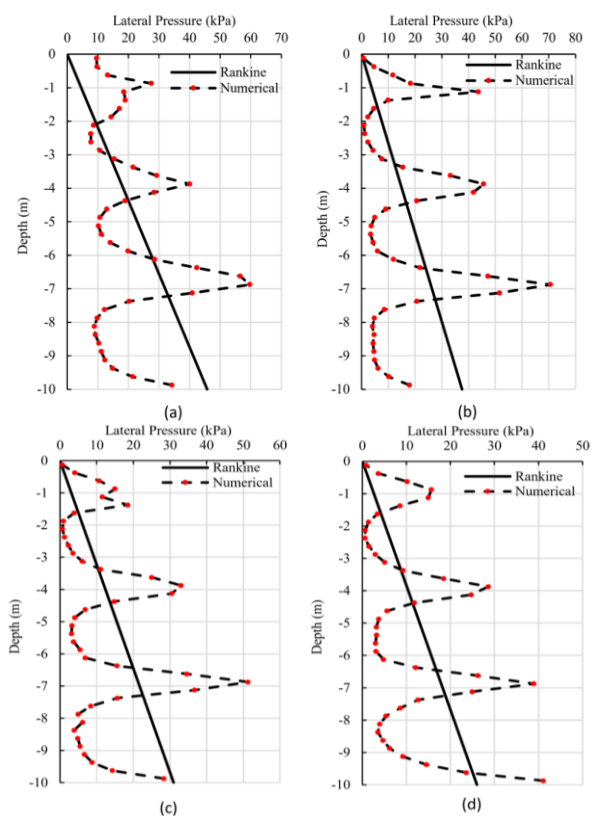
شکل ۹ توزیع فشار جانبی مدل عددی و رانکین برای گود با عمق ۷ متر در خاک متوسط



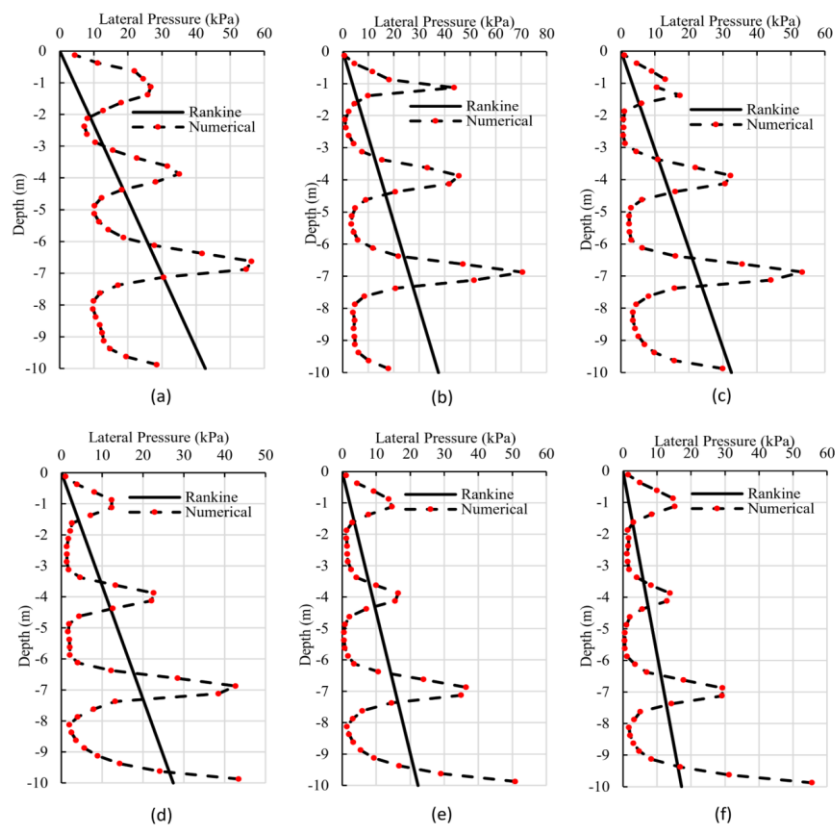
شکل ۱۰ تغییر فشار جانبی عددی و رانکین برای گود به عمق ۴ متر با نوع خاک: (a) سست، (b) متوسط، (c) متراکم و (d) خیلی متراکم



شکل ۱۱ تغییر فشار جانبی عددی و رانکین برای گود به عمق ۷ متر با نوع خاک: (a) سست، (b) متوسط، (c) متراکم و (d) خیلی متراکم



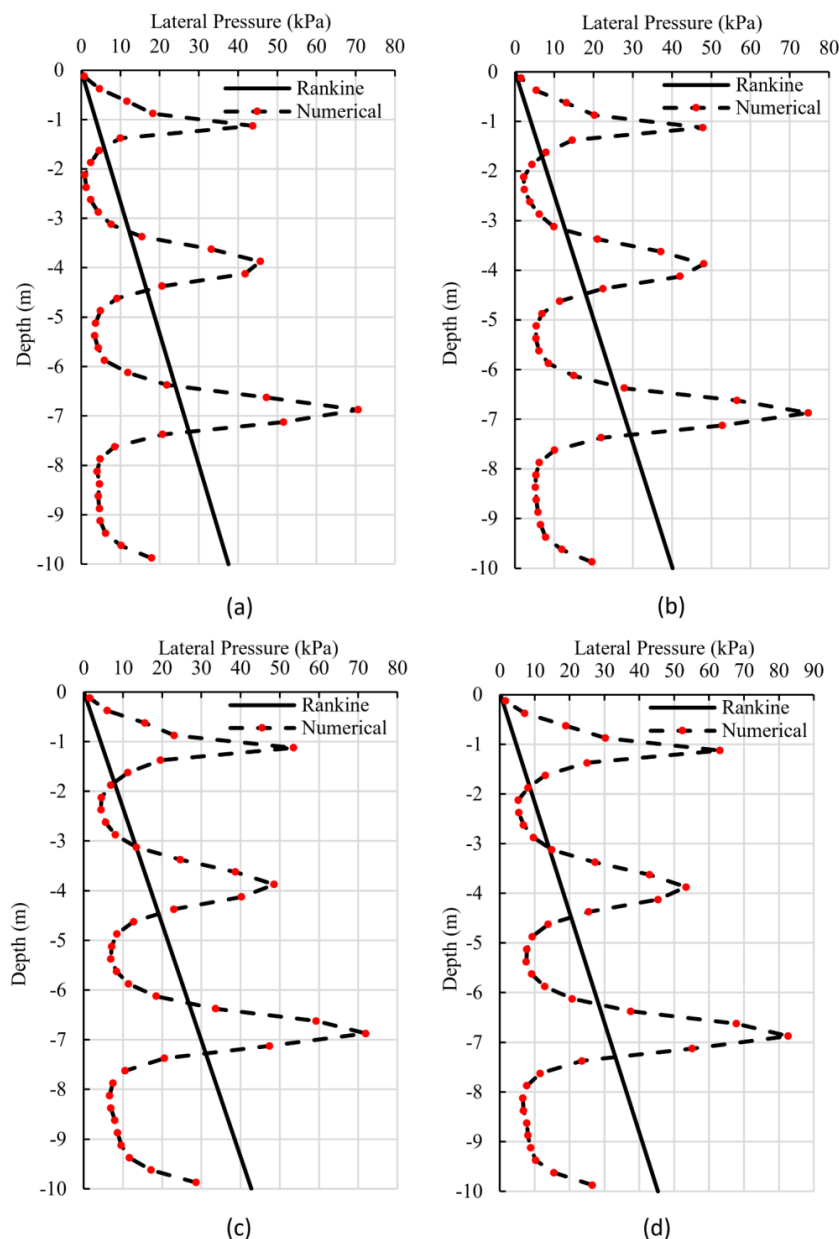
شکل ۱۲ تغییر فشار جانبی عددی و رانکین برای گود به عمق ۱۰ متر با نوع خاک: (a) سست، (b) متوسط، (c) متراکم و (d) خیلی متراکم



شکل ۱۳ تغییر فشار جانبی عددی و رانکین برای گود به عمق ۱۰ متر در خاک متوسط با چسبندگی: (a) $C=5\text{kPa}$ (b) $C=10\text{kPa}$ (c) $C=15\text{kPa}$ (d) $C=20\text{kPa}$ (e) $C=25\text{kPa}$ و (f) $C=30\text{kPa}$

جانبی تأثیر می‌گذارد. شکل ۱۴) تأثیر افزایش سربار از ۱۰ کیلوپاسکال به ۴۰ کیلوپاسکال را برای گود ۱۰ متری در خاک متوسط نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سربار منجر به افزایش تقریباً یکنواخت فشار در تمام عمق دیوار می‌شود. برای مثال، فشار در عمق ۴ متری با افزایش سربار از ۱۰ به ۴۰ کیلوپاسکال، از حدود ۴۵ به ۵۵ کیلوپاسکال افزایش یافته است. در این حالت نیز، الگوی غیرخطی و پدیده قوس‌زدگی به وضوح پایدار و قابل مشاهده است.

تغییر پارامترهای خاک نیز بر شدت این توزیع فشار تأثیرگذار است. همان‌طور که در شکل ۱۳) برای گود ۱۰ متری در خاک متوسط نشان داده شده است، با افزایش چسبندگی از ۵ کیلوپاسکال به ۳۰ کیلوپاسکال، فشار جانبی در تمام اعماق کاهش می‌یابد. برای مثال، فشار حداکثر در عمق ۷ متری از حدود ۶۰ کیلوپاسکال در خاک با چسبندگی ۵، به حدود ۳۰ کیلوپاسکال (حدود نصف) در خاک با چسبندگی ۳۰ کاهش پیدا کرده است. با این حال، الگوی کلی قوس‌زدگی در تمام موارد حفظ می‌شود. علاوه بر خواص خاک، سربار اعمالی نیز مستقیماً بر فشار



شکل ۱۴ تغییر فشار جانبی عددی و رانکین برای گود به عمق ۱۰ متر در خاک متوسط با سربار: (a) $q=10\text{kPa}$ ، (b) $q=20\text{kPa}$ ، (c) $q=30\text{kPa}$ و (d) $q=40\text{kPa}$

مقایسه نیروی جانبی کل

پس از انتگرال‌گیری از نمودارهای توزیع فشار، نیروی جانبی کل وارد بر دیواره برای هر سناریو محاسبه گردید. لازم به ذکر است، با توجه به فاصله ۴ متری بین خرابی‌ها، نیروی به دست آمده، نیروی کل وارد بر یک فریم خرابی است. شکل (۱۵) نتایج مقایسه این نیرو بین مدل عددی و تئوری رانکین اصلاح‌شده را برای عمق‌ها و خاک‌های مختلف نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود، روند کلی در هر دو روش بیانگر کاهش نیروی جانبی با افزایش تراکم و مقاومت خاک (از سست به خیلی متراکم) است. یک یافته کلیدی و قابل تأمل در این پژوهش، وابسته بودن نتیجه مقایسه به عمق گود است. در گود کم عمق (۴ متر)، نیروی جانبی حاصل از مدل عددی برای تمام انواع خاک به طور قابل توجهی بیشتر از نیروی تئوری رانکین اصلاح‌شده است. برای مثال در خاک سست، نیروی عددی حدود ۱۲۰ کیلونیوتن و نیروی رانکین ۱۰۵ کیلونیوتن است. این اختلاف در خاک خیلی متراکم به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد و نیروی عددی (۹۵ کیلوپاسکال) تقریباً دو برابر نیروی رانکین (۵۰ کیلوپاسکال) است. در مقابل، برای گودهای عمیق‌تر (۷ و ۱۰ متر)، این روند معکوس شده و نیروی محاسبه‌شده از تئوری رانکین اصلاح‌شده، مقادیر بیشتری را نسبت به مدل عددی نشان می‌دهد.

این تفاوت ظاهراً متناقض، ریشه در نحوه اعمال تئوری رانکین در عمل برای خاک‌های چسبنده دارد. به طور معمول در صورتی که سربار با مقدار قابل توجه وجود نداشته باشد، به دلیل وجود چسبندگی در خاک، مقدار فشار جانبی رانکین در سطح زمین، کوچک‌تر از صفر (منفی) به دست می‌آید. بل در سال ۱۹۱۵ [7]، تئوری رانکین را اصلاح می‌کند و مقدار فشار منفی در سطح زمین را برابر با صفر در نظر می‌گیرد؛ بنابراین در تئوری رانکین اصلاح‌شده، توزیع فشار جانبی به شکل مثالی در می‌آید. این اصلاح، مساحت نمودار فشار و در نتیجه نیروی کل را به صورت مصنوعی افزایش می‌دهد.

اگر توزیع فشار واقعی تئوری رانکین (بدون اصلاح فشار منفی) در نظر گرفته شود، نتایج مقایسه به شکل قابل توجهی تغییر می‌کند.

لازم به ذکر است، رویکرد اصلی این پژوهش، مطابق با متد طراحی و بر اساس تئوری رانکین اصلاح‌شده (بل) است. حال صرفاً به منظور بررسی جامع‌تر در این پژوهش، مطابق شکل (۱۶)

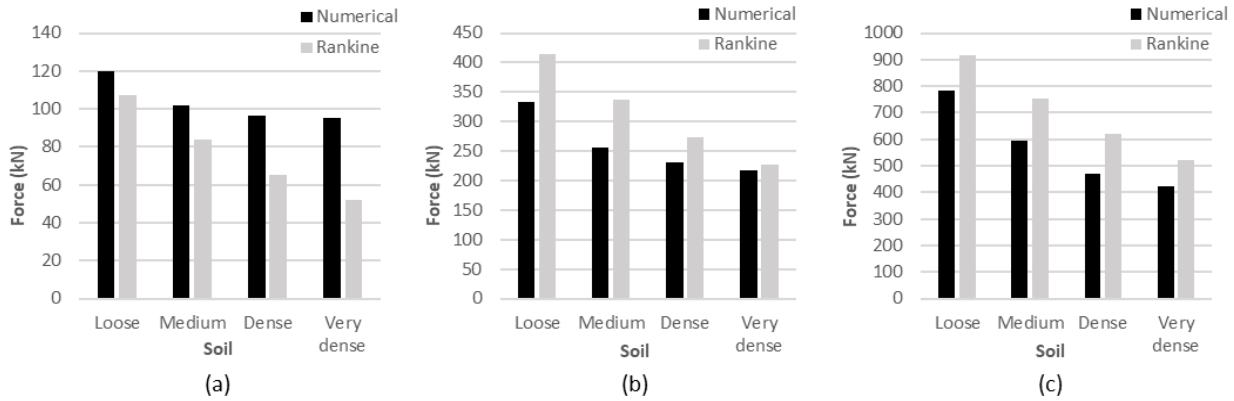
برای چند حالت، فشار واقعی تئوری رانکین (با در نظر گرفتن فشار منفی تاج گود و ترک کششی) نیز با مدل عددی مقایسه شد. همان طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، نیروی جانبی حاصل از مدل عددی تقریباً در تمام حالات از نیروی رانکین واقعی بیشتر است، اما نکته کلیدی در این مقایسه، روند همگرایی این دو مقدار با افزایش عمق گود است. این پدیده به وضوح در نتایج کمی قابل مشاهده است؛ به عنوان مثال در خاک سست، برای گود ۴ متری نیروی عددی (حدود ۱۲۰ کیلونیوتن) تقریباً سه برابر نیروی رانکین واقعی (حدود ۴۰ کیلونیوتن) است. این اختلاف در عمق ۷ متر به شدت کاهش می‌یابد و نیروی عددی (۳۳۰ کیلونیوتن) تنها حدود ۱۰ درصد از نیروی رانکین واقعی (۳۰۰ کیلونیوتن) بیشتر است. در نهایت، در عمق ۱۰ متر، این دو مقدار به هم بسیار نزدیک می‌شود و اختلاف آن‌ها به کمتر از ۵ درصد می‌رسد.

این روند همگرایی، ریشه در مبانی تئوریک فشار اکتیو خاک و اندرکنش خاک و سازه دارد. تئوری رانکین فشار خاک را در حالت حدی فعال (Active) محاسبه می‌کند؛ حالتی که برای وقوع آن، دیواره سازه نگهدارنده باید به اندازه کافی از خاک دور شود تا گوه گسیختگی در پشت آن تشکیل گردد. در گودبرداری‌های کم عمق (مانند حالت ۴ متری)، کل سیستم (خاک و سازه) از سختی نسبی بالایی برخوردار است و جابه‌جایی‌های دیواره به اندازه‌ای نیست که خاک بتواند به طور کامل به حالت فعال برسد. در نتیجه، فشار جانبی واقعی در مدل عددی، مقداری بین حالت سکون (at-rest) و فعال باقی می‌ماند که به مراتب از فشار اکتیو رانکین بیشتر است. اما با افزایش عمق گود (مانند حالت‌های ۷ و ۱۰ متری)، انعطاف‌پذیری سیستم افزایش یافته و جابه‌جایی‌ها در بالای دیواره بزرگ‌تر می‌شود. این جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر به خاک اجازه می‌دهد تا به حالت حدی فعال نزدیک‌تر شود و در نتیجه، نیروی جانبی حاصل از مدل عددی به نیروی تئوری رانکین واقعی همگرا شود. از این تحلیل می‌توان یک نتیجه مهم مهندسی گرفت: فرض فشار جانبی اکتیو رانکین برای طراحی سازه‌های نگهدارنده در گودهای کم عمق و صلب، یک فرض غیرمحافظة‌کارانه است و می‌تواند منجر به برآورد کمتر از واقعیت نیروهای وارده شود.

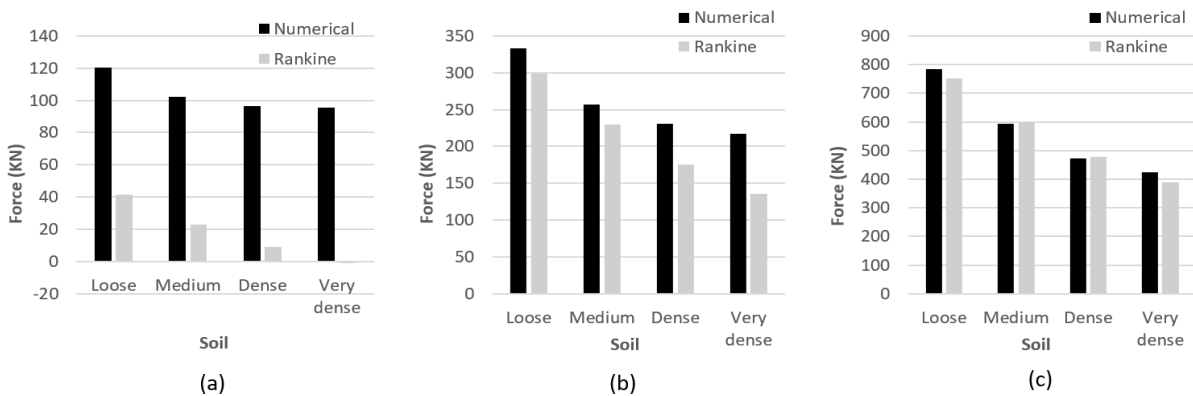
تأثیر پارامترهای چسبندگی و سربار نیز بر نیروی کل در شکل (۱۷) برای گود ۱۰ متری در خاک متوسط مورد ارزیابی قرار

سربار از ۱۰ به ۴۰ کیلوپاسکال، نیروی جانبی عددی از حدود ۵۹۰ به ۸۶۰ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد که بیانگر تأثیر مستقیم سربار بر افزایش نیروی رانش خاک است.

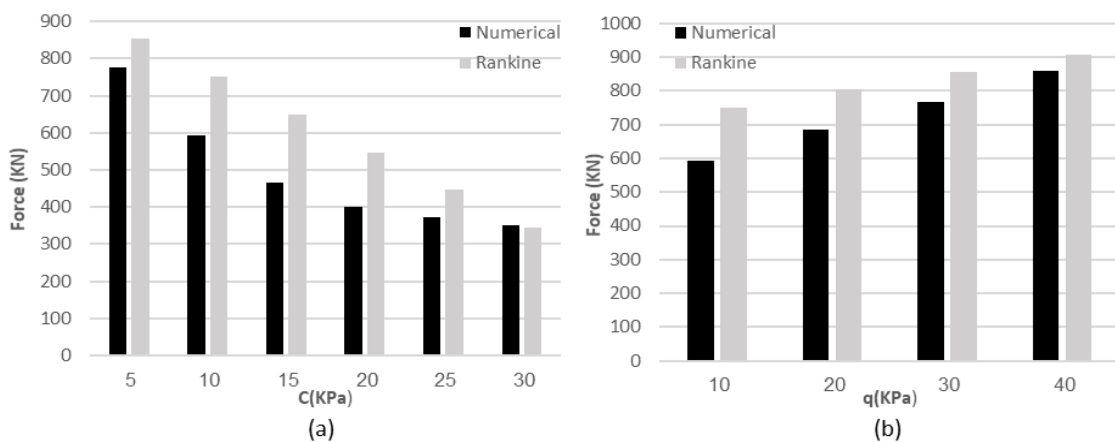
گرفته است. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که با افزایش چسبندگی از ۵ به ۳۰ کیلوپاسکال، نیروی جانبی در مدل عددی از حدود ۷۸۰ به ۳۵۰ کیلونیوتن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه چسبندگی در کاهش فشار جانبی است. در مقابل، با افزایش



شکل ۱۵ تغییر نیروی جانبی عددی و رانکین اصلاح‌شده با نوع خاک برای خرپا در گود با عمق: (a) ۴ متر، (b) ۷ متر و (c) ۱۰ متر



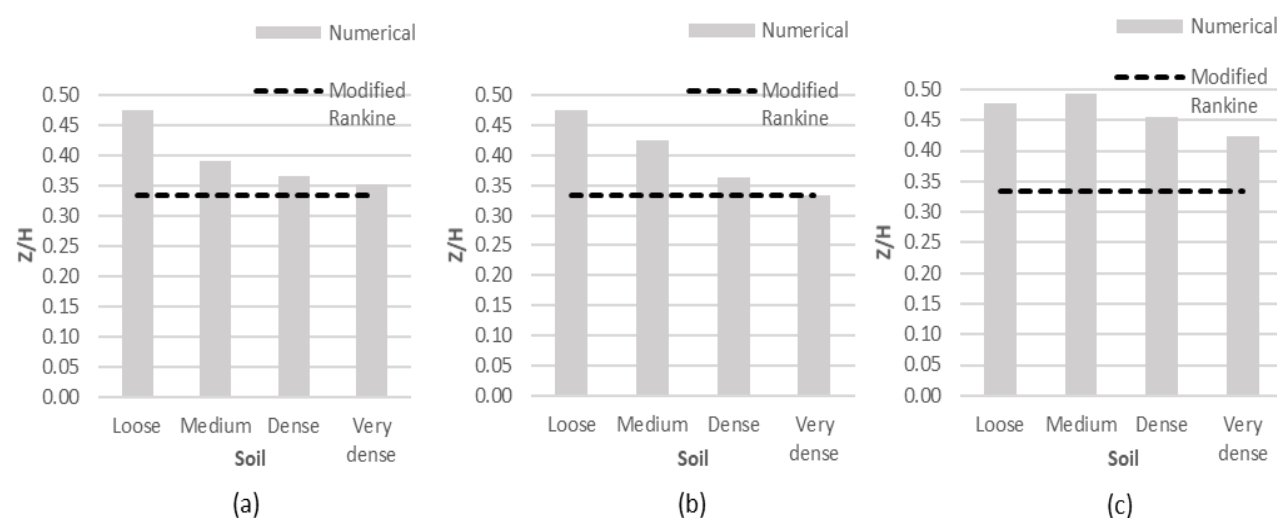
شکل ۱۶ تغییر نیروی جانبی عددی و رانکین واقعی با نوع خاک برای خرپا در گود با عمق: (a) ۴ متر، (b) ۷ متر و (c) ۱۰ متر



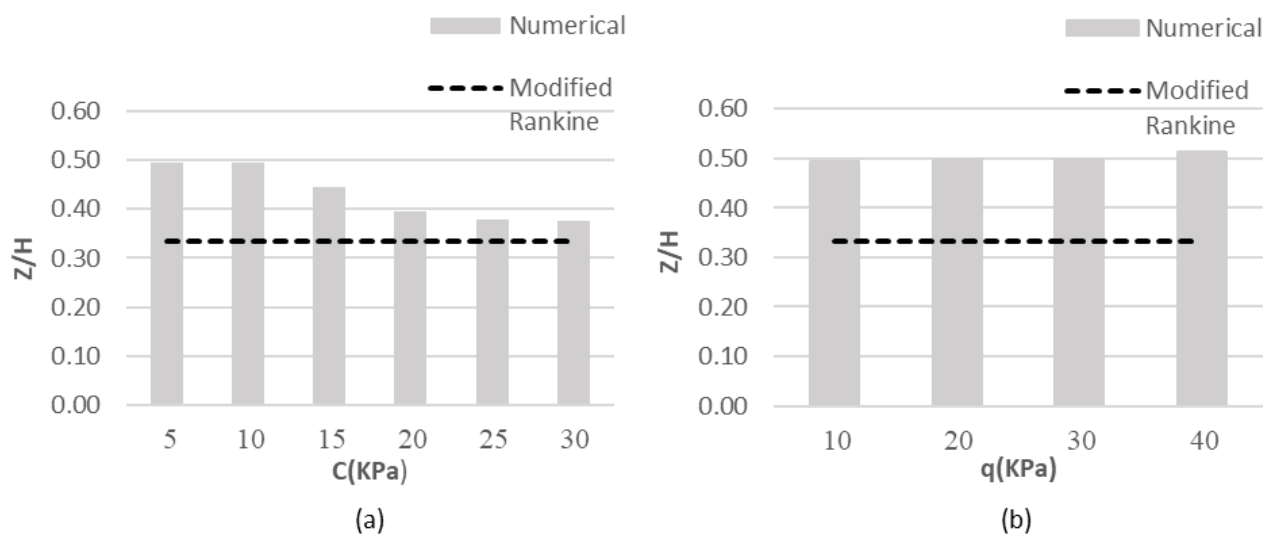
شکل ۱۷ تغییر نیروی جانبی عددی و رانکین اصلاح‌شده برای گود به عمق ۱۰ متر در خاک متوسط نسبت به: (a) چسبندگی و (b) سربار

مقایسه محل اثر نیروی جانبی

محل اثر نیروی برآیند، پارامتری کلیدی در محاسبه لنگر واژگونی و طراحی سازه است. همان طور که شکل ۱۸ به وضوح نمایش داده شده است، در تمام مدل‌های تحلیل‌شده، محل اثر نیروی جانبی در مدل عددی به طور قابل توجهی بالاتر از محل اثر آن در تئوری رانکین قرار دارد. به طور میانگین، محل اثر نیرو در مدل عددی در ارتفاعی حدود ۰/۴۲ برابر عمق گود از کف گود قرار دارد، در حالی که محل اثر نیرو از کف گود در تئوری رانکین



شکل ۱۸ محل اثر نیروی جانبی از کف گود، تقسیم بر ارتفاع گود، در خاک‌های با مشخصات متفاوت در گود با عمق: (a) ۴ متر، (b) ۷ متر و (c) ۱۰ متر



شکل ۱۹ تغییر محل اثر نیروی جانبی از کف گود تقسیم بر ارتفاع گود، در خرابی با عمق گود ۱۰ متر در خاک متوسط با: (a) چسبندگی خاک و (b) سربار

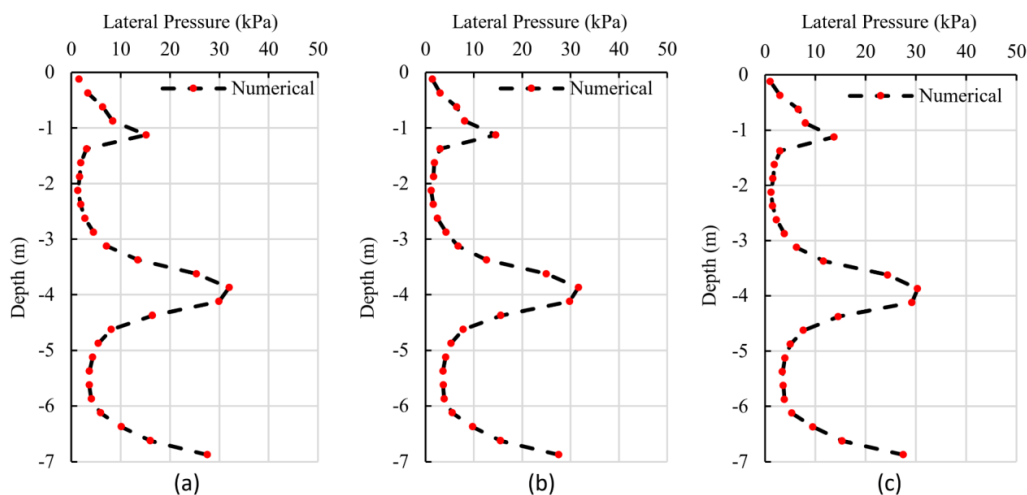
بررسی تأثیر سایر پارامترها بر فشار جانبی خاک، نیرو و محل اثر نیرو

در این پژوهش، با توجه به سایر مقالات و نیز راهنمای نرم افزار FLAC3D مطابق

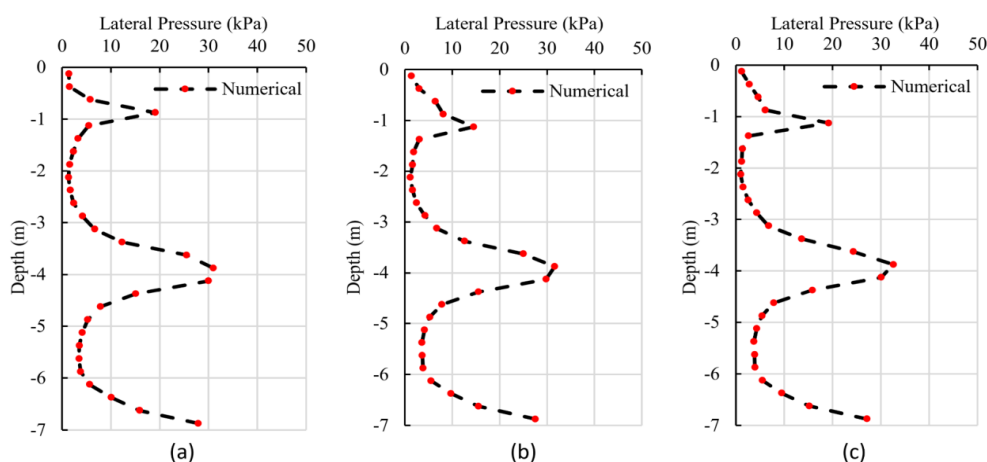
جدول (۱)، مقادیر ثابتی برای مدول سکانت (E_{50})، توان وابستگی سختی به تنش (m) و زاویه اتساع (ψ) در هر نوع خاک در نظر گرفته شده است. در این قسمت به بررسی تأثیر این پارامترها شامل E_{50} ، m و ψ به صورت مستقل بر روی توزیع فشار جانبی، نیرو و محل اثر نیرو برای گود ۷ متری در خاک متوسط پرداخته می شود. در شکل (۲۰)، شکل (۲۱) و شکل (۲۲) به ترتیب تغییرات فشار جانبی در گود با عمق ۷ متری در خاک متوسط نسبت به مدول سکانت (E_{50})، توان وابستگی سختی به تنش (m) و زاویه

اتساع (ψ)، مشاهده می شود. همان طور که انتظار می رود، در نقاطی سختی سازه نگهبان بیشتر است، فشار جانبی خاک بیشتر می شود که بیانگر پدیده قوس زدگی است.

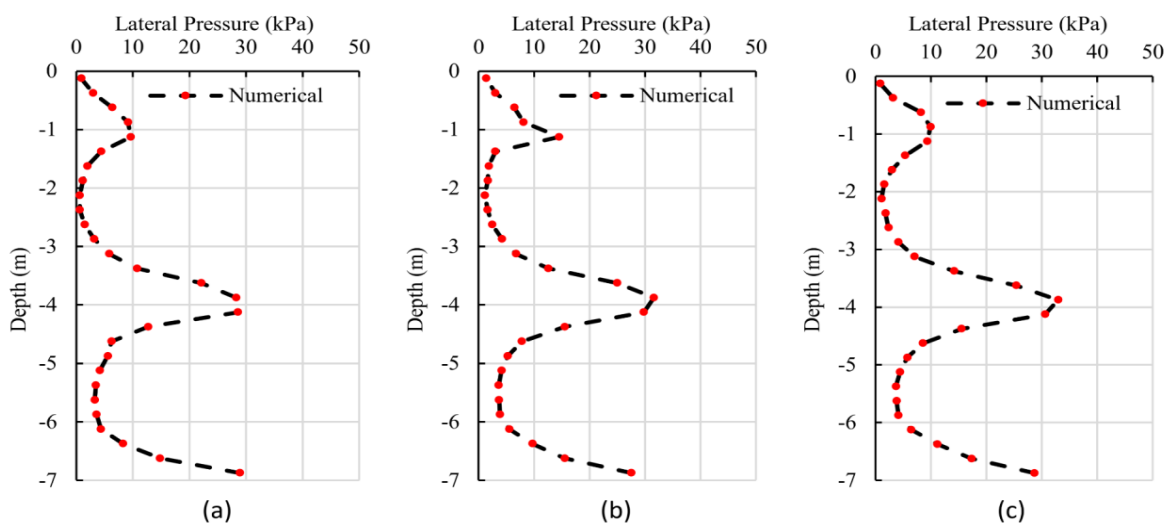
تغییر نیروی جانبی مدل عددی برای گود ۷ متری در خاک متوسط نسبت به مدول سکانت (E_{50})، توان وابستگی سختی به تنش (m) و زاویه اتساع (ψ)، در شکل (۲۳) مشاهده می شود. با افزایش هر ۱۰ مگاپاسکال مدول سکانت، نیروی جانبی مدل عددی به طور متوسط به میزان ۲/۹ درصد کاهش می یابد. همچنین با افزایش هر ۶ درجه در زاویه اتساع خاک، نیروی جانبی به طور متوسط ۷/۵ درصد افزایش می یابد. لازم به ذکر است با تغییر توان وابستگی سختی به تنش، تغییر محسوسی در نیروی جانبی مدل عددی، ایجاد نمی شود.



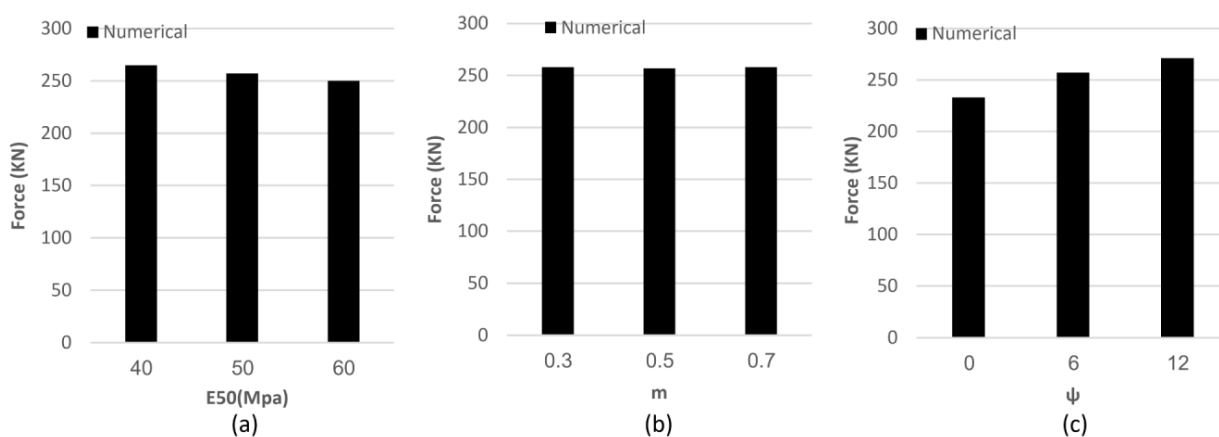
شکل ۲۰ تغییر فشار جانبی عددی برای گود ۷ متری در خاک متوسط با مدول سکانت: (a) $E_{50} = 40(\text{MPa})$ ، (b) $E_{50} = 50(\text{MPa})$ و (c) $E_{50} = 60(\text{MPa})$



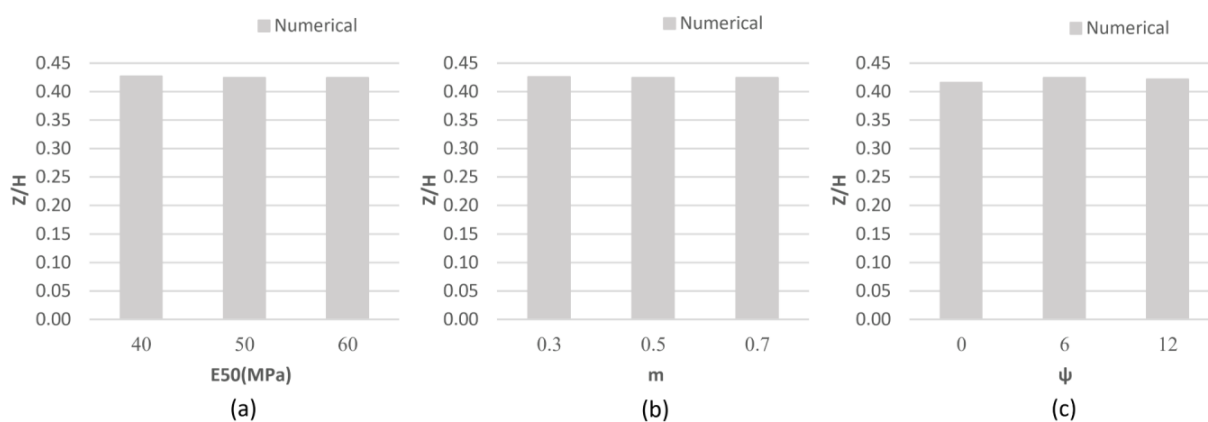
شکل ۲۱ تغییر فشار جانبی عددی برای گود ۷ متری در خاک متوسط با توان وابستگی سختی به : (a) $m = 0.3$ ، (b) $m = 0.5$ و (c) $m = 0.7$



شکل ۲۲ تغییر فشار جانبی عددی برای گود ۷ متری در خاک متوسط با زاویه اتساع: (a) $\psi=0$ ، (b) $\psi=6$ و (c) $\psi=12$



شکل ۲۳ تغییر نیروی جانبی مدل عددی در خرابای با عمق گود ۷ متر در خاک متوسط نسبت به: (a) E_{50} ، (b) m و (c) ψ



شکل ۲۴ تغییر محل اثر نیروی جانبی مدل عددی از کف گود تقسیم بر ارتفاع گود، در خرابای با عمق گود ۷ متر در خاک متوسط نسبت به: (a) E_{50} ، (b) m و (c) ψ

مقاطع کوچکتر در بازار، حداقل مقطع برای طراحی اعضای سازه نگهبان، 2IPE140 در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به طول ۱۲ متری شاخه‌های پروفیل و طول کم عضو افقی و قطری خرپا، عموماً در اجرای سازه نگهبان خرابایی، از یک مقطع یکسان برای عضو افقی و قطری استفاده می‌شود، تا از پرت مصالح جلوگیری شود. بنابراین در این پژوهش نیز مقاطع عضو افقی و قطری ۱ به صورت یکسان و نیز مقاطع عضو افقی و قطری ۲ نیز به صورت یکسان طراحی و در نظر گرفته شدند.

۱. تحلیل طراحی عضو قائم: نتایج به طور مشخص در

جدول ۵ (جدول ۵)، جدول ۶ و جدول ۷) نشان می‌دهد که مقطع طراحی شده برای عضو قائم در مدل عددی، به طور کلی کوچکتر و اقتصادی‌تر از مقطع متناظر در مدل رانکین است. علت این امر به تفاوت در توزیع لنگر خمشی باز می‌گردد. در تئوری رانکین، توزیع مثلی فشار باعث ایجاد حداکثر لنگر خمشی در قسمت‌های پایینی عضو قائم می‌شود. اما در مدل عددی، پدیده قوس‌زدگی، فشار را به سمت اتصالات صلب خرپا منتقل می‌کند و لنگر خمشی حداکثر دهانه‌های عضو قائم را کاهش می‌دهد.

۲. تحلیل طراحی پشت‌بند (عضو مایل): برخلاف عضو قائم، مقطع طراحی شده برای پشت‌بند در مدل عددی، عموماً بزرگتر از مقطع حاصل از طراحی با روش رانکین است. این موضوع مستقیماً به بالاتر بودن محل اثر نیروی برآیند در مدل عددی مرتبط است که باعث می‌شود بخش بزرگ‌تری از نیروی جانبی به صورت فشاری به عضو مایل (پشت‌بند) منتقل شود.

۳. تحلیل طراحی اعضای میانی (افقی و قطری): بر اساس نتایج مندرج در جدول ۵، جدول ۶ و جدول ۷، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مقاطع طراحی شده برای اعضای افقی و قطری بین دو روش مشاهده نمی‌شود.

تغییر محل اثر نیروی جانبی مدل عددی برای گود ۷ متری در خاک متوسط نسبت به مدل سکانت (E_{50})، توان وابستگی سختی به تنش (m) و زاویه اتساع (ψ)، در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با تغییر مدل سکانت، توان وابستگی سختی به تنش و زاویه اتساع، تغییر محسوسی در محل اثر نیروی جانبی مدل عددی ایجاد نمی‌شود.

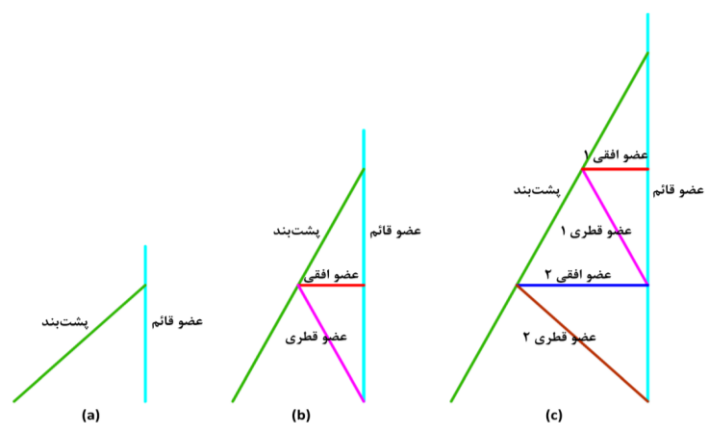
بحث و مقایسه طراحی

نتایج ارائه شده در بخش قبل، تفاوت‌های بنیادینی را بین رفتار پیش‌بینی شده توسط تئوری رانکین و شبیه‌سازی عددی اندرکنش خاک و سازه آشکار ساخت. مشخص شد که توزیع فشار جانبی در واقعیت به دلیل پدیده قوس‌زدگی، غیرخطی است و محل اثر نیروی برآیند نیز در ارتفاعی بالاتر از پیش‌بینی تئوری رانکین قرار دارد. در این بخش، تأثیر مستقیم این تفاوت‌ها بر طراحی مهندسی و ابعاد اعضای مختلف سازه نگهبان خرابایی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد تا مشخص شود رویکرد طراحی سنتی تا چه میزان بهینه و ایمن است.

مقایسه طراحی اعضای سازه نگهبان

به منظور ارزیابی کمی تأثیر الگوهای مختلف بارگذاری، اعضای سازه نگهبان خرابایی برای سناریوهای مختلف، یک بار تحت بارگذاری حاصل از نمودار فشار رانکین و بار دیگر تحت بارگذاری حاصل از مدل عددی طراحی شدند. لازم به ذکر است طراحی با روش تنش مجاز (کد طراحی AISC-ASD89) انجام شده و ضرایب همه ترکیب بارها، ۱ است. ترکیب بارها نیز شامل بار مرده و فشار جانبی خاک است که اثر سربار نیز در فشار جانبی خاک دیده شده است. نام‌گذاری اعضای مختلف خرپا در این بخش مطابق با شکل ۲۵ انجام شده و نتایج مقایسه طراحی مقاطع برای خاک‌های سست، متوسط و متراکم به ترتیب در جدول ۵، جدول ۶ و جدول ۷ ارائه گردیده است.

با توجه به لزوم اجرایی بودن طرح و با توجه به اینکه تنوع مقاطع، منجر به صعوبت اجرای کار، افزایش پرت مصالح و در نهایت غیراقتصادی شدن طرح می‌شود، در این پژوهش از مقاطع 2IPE استفاده شد. با توجه به ملاحظات اجرایی و عدم وجود



شکل ۲۵ نام اعضای مختلف سازه نگهدارنده خرابایی در گودهای به عمق: (a) ۴ متر، (b) ۷ متر و (c) ۱۰ متر

جدول ۵ طراحی مقاطع سازه خرابایی در خاک سست

عمق گود (متر)	عضو خرابا	طراحی بر اساس مدل عددی	طراحی بر اساس تئوری رانکین
۴	عضو قائم	2IPE140	2IPE140
	پشت‌بند	2IPE140	2IPE140
۷	عضو قائم	2IPE140	2IPE180
	پشت‌بند	2IPE200	2IPE200
	عضو افقی	2IPE140	2IPE140
	عضو قطری	2IPE140	2IPE140
۱۰	عضو قائم	2IPE220	2IPE270
	پشت‌بند	2IPE360	2IPE300
	عضو افقی ۱	2IPE140	2IPE140
	عضو قطری ۱	2IPE140	2IPE140
	عضو افقی ۲	2IPE180	2IPE180
	عضو قطری ۲	2IPE180	2IPE180

جدول ۶ طراحی مقاطع سازه خرابایی در خاک متوسط

عمق گود (متر)	عضو خرابا	طراحی بر اساس مدل عددی	طراحی بر اساس تئوری رانکین
۴	عضو قائم	2IPE140	2IPE140
	پشت‌بند	2IPE140	2IPE140
۷	عضو قائم	2IPE140	2IPE160
	پشت‌بند	2IPE180	2IPE180
	عضو افقی	2IPE140	2IPE140
	عضو قطری	2IPE140	2IPE140
۱۰	عضو قائم	2IPE140	2IPE220
	پشت‌بند	2IPE330	2IPE300
	عضو افقی ۱	2IPE140	2IPE140
	عضو قطری ۱	2IPE140	2IPE140
	عضو افقی ۲	2IPE140	2IPE160
	عضو قطری ۲	2IPE140	2IPE160

جدول ۷ طراحی مقاطع سازه خرابایی در خاک متراکم

عمق گود (متر)	عضو خرابا	طراحی بر اساس مدل عددی	طراحی بر اساس تئوری رانکین
۴	عضو قائم	2IPE140	2IPE140
	پشت‌بند	2IPE140	2IPE140
۷	عضو قائم	2IPE140	2IPE160
	پشت‌بند	2IPE160	2IPE180
	عضو افقی	2IPE140	2IPE140
	عضو قطری	2IPE140	2IPE140
۱۰	عضو قائم	2IPE140	2IPE200
	پشت‌بند	2IPE270	2IPE270
	عضو افقی ۱	2IPE140	2IPE140
	عضو قطری ۱	2IPE140	2IPE140
	عضو افقی ۲	2IPE140	2IPE140
	عضو قطری ۲	2IPE140	2IPE140

پیامدهای عملی و پیشنهادها برای طراحی

تحلیل مقایسه‌ای طراحی اعضا نشان می‌دهد که رویکرد سنتی مبتنی بر تئوری رانکین می‌تواند به یک طرح غیربهینه منجر شود: طراحی بیش از حد محافظه‌کارانه (غیراقتصادی) برای عضو قائم، و درعین حال طراحی کمتر از حد محافظه‌کارانه (بالقوه نایمن) برای عضو کلیدی پشت‌بند. تئوری رانکین، علی‌رغم سادگی، قادر به مدل‌سازی صحیح رفتار سیستم‌های انعطاف‌پذیر مانند سازه خرابایی که در آن‌ها پدیده قوس‌زدگی و بازتوزیع تنش حاکم است، نمی‌باشد.

بر این اساس، پیشنهادهای کاربردی زیر برای جامعه مهندسی ارائه می‌گردد:

۱. ارجحیت تحلیل عددی: برای طراحی بهینه و ایمن سازه‌های نگهدارنده خرابایی، به ویژه در پروژه‌های مهم و گودهای عمیق، استفاده از تحلیل‌های عددی که قادر به مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه هستند، بر روش‌های ساده تئوریک ارجحیت دارد.

۲. توجه ویژه به عضو پشت‌بند: در صورت استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری رانکین، طراحان باید آگاه باشند که نیروی واقعی در عضو پشت‌بند می‌تواند بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده باشد و لازم است ضرایب اطمینان بالاتری برای این عضو در نظر گرفته شود.

۳. اصلاح محل اثر نیرو: به عنوان یک قاعده سرانگشتی اصلاحی

برای محاسبات اولیه، پیشنهاد می‌شود طراحان محل اثر نیروی جانبی را به جای یک سوم ارتفاع (۰/۳۳۳ ارتفاع گود)، نزدیک به ۰/۴۲ ارتفاع گود از کف گود در نظر بگیرند. این کار به برآورد دقیق‌تری از لنگر واژگونی و توزیع نیرو بین اعضای اصلی خرابا منجر خواهد شد.

نتیجه‌گیری

یافته اصلی این پژوهش آن است که طراحی سازه نگهدارنده خرابایی بر مبنای تئوری کلاسیک رانکین، به دلیل نادیده گرفتن اندرکنش واقعی خاک و سازه، منجر به یک طرح غیربهینه و بالقوه نایمن می‌گردد. نتایج نشان داد که رویکرد سنتی، مقاطع عضو قائم را به صورت غیراقتصادی و بزرگ‌تر از حد نیاز برآورد می‌کند، در حالی که مقاطع عضو حیاتی پشت‌بند را به صورت غیرمحافظه‌کارانه و کوچک‌تر از مقدار مورد نیاز تخمین می‌زند. این نتیجه‌گیری توسط سه یافته کلیدی پشتیبانی می‌شود: نخست، توزیع فشار جانبی واقعی برخلاف فرض خطی رانکین، به دلیل پدیده قوس‌زدگی کاملاً غیرخطی است و در محل اتصالات سازه‌ای تمرکز می‌یابد. دوم، محل اثر نیروی برآیند جانبی به طور میانگین در ارتفاع ۰/۴۲ ارتفاع گود از کف گود قرار دارد که به شکل معناداری بالاتر از فرض یک سوم ارتفاع گود در تئوری رانکین است و این امر مستقیماً منجر به افزایش نیروی فشاری در عضو پشت‌بند می‌شود. سوم، مشخص شد که

و نتایج عددی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ اعتبارسنجی شوند. همچنین می‌توان به ارائه نمودارهای طراحی اصلاح‌شده و ضرایب اصلاحی برای نیروها به عنوان پیشنهادی عملی در تحقیقات آتی اشاره کرد.

واژه‌نامه

Numerical Analysis	آنالیز عددی
Code of Practice	آیین‌نامه
Retaining Structure	سازه نگهدارنده
Truss Retaining Structure	سازه نگهدارنده خرپایی
Failure	گسیختگی
Modulus of Elasticity	مدول الاستیسیته
Shear Strength	مقاومت برشی

سپاسگزاری

فرض فشار اکتیو رانکین برای گودهای کم‌عمق و صلب، یک فرض غیرمحافظه‌کارانه است، زیرا جابه‌جایی‌های ناکافی دیواره مانع از رسیدن خاک به حالت حدی فعال می‌شود.

پیامد عملی این پژوهش، هشدار برای مهندسان طراح است که استفاده از دیاگرام فشار رانکین برای این نوع سازه‌ها باید با احتیاط فراوان صورت گیرد. برای دستیابی به طرح‌های ایمن و بهینه، به ویژه در پروژه‌های حساس شهری، استفاده از تحلیل‌های عددی اندرکنش خاک و سازه اکیدا توصیه می‌شود. این پژوهش دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد؛ از جمله می‌توان به استفاده از یک مدل رفتاری خاص برای خاک (Hardening Soil) و در نظر نگرفتن اثرات سه‌بعدی کامل و رفتار وابسته به زمان خاک (مانند تحکیم) اشاره کرد. همچنین در این پژوهش، اثر نرم‌شوندگی در انتخاب پارامتر زاویه اتساع خاک (۱۷)، برای خاک‌های خیلی متراکم، در نظر گرفته نشده است. برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود تأثیر هندسه‌های مختلف خرپا بر الگوی فشار جانبی بررسی گردد، مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تری برای فصل مشترک خاک و سازه به کار گرفته شود،

مراجع

- [1] H. Ashrafi, *Principles and Foundations of Excavation and Guard Structures*. Tehran, Iran: Bahineh Publications, 2014. (In Persian). [Online].
- [2] G. Moradi, S. Zadkarim, and H. Katebi, "Field study of the effect of drilling type on tensile strength and creep behavior of soil nails in Tabriz Green Marl," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, pp. 47–60, 2017. (In Persian). [Online]. Available: <https://doi.org/10.22067/civil.v29i2.46276>
- [3] M. Abdoli, H. Mehrnahad, and M. Hazeghian, "Numerical study of installation effect and inclination angle on the pullout capacity of helical multiple anchors on excavation support," 2023. (In Persian). [Online]. Available: https://road.bhrc.ac.ir/article_153798.html?lang=en
- [4] M. Hazeghian, "Proposing a design method for soil-nailed walls and comparing it with the conventional design method," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 37–52, 2022. (In Persian). [Online]. Available: <https://doi.org/10.22067/jfpei.2022.76614.1142>
- [5] J. Bolouri Bazaz and M. Abdollahi, "An experimental investigation into the excavation using pile-anchorage system," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 79–96, 2018. (In Persian). [Online]. Available: <https://doi.org/10.22067/civil.v31i4.63763>
- [6] W. J. M. Rankine, "On the stability of loose earth," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, no. 147, pp. 9–27, 1857. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/108608>
- [7] A. L. Bell, "The lateral pressure and resistance of clay and the supporting power of clay foundations," in *Minutes of*

- the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1915. [Online].
- [8] S. Shekarian, A. Ghanbari, and M. Makarchian, "Earth pressure on retaining walls with reinforced backfill," in *Proceedings of the 12th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 2008. [Online].
- [9] Y. S. Song, J.-M. Yun, and B. Chae, "Lateral earth pressure acting on the anchored walls installed in cut slopes," *Journal of the Geological Society of London*, 2006. [Online]. Available: https://media.geolsoc.org.uk/iaeg2006/PAPERS/IAEG_175.PDF
- [10] Ö. Bilgin, "Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions," *Computers and Geotechnics*, vol. 37, no. 3, pp. 399–407, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.01.002>
- [11] Y. M. Hashash and A. J. Whittle, "Mechanisms of load transfer and arching for braced excavations in clay," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, no. 3, pp. 187–197, 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:3\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:3(187))
- [12] K. Karlsrud and L. Andresen, "Loads on braced excavations in soft clay," *International Journal of Geomechanics*, vol. 5, no. 2, pp. 107–113, 2005. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2005\)5:2\(107\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2005)5:2(107))
- [13] P. A. Costa, J. L. Borges, and M. M. Fernandes, "Analysis of a braced excavation in soft soils considering the consolidation effect," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 25, no. 6, pp. 617–629, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9134-7>
- [14] H. Mohamadi Flavarjane, K. Barkhordari, and M. Hazeghian, "Numerical study of truss supported excavation considering combination of both vertical and lateral displacements," in *1st International Conference on Civil, Architectural and Sustainable Green City*, Hamedan, Iran, 2017. (In Persian). [Online].
- [15] S. S. Emamzadeh, "Numerical analysis of inclined struts and truss structure in excavation stabilization based on the damage potential index (DPI)," *Journal of Structural and Construction Engineering*, pp. 306–327, 2022. (In Persian). [Online]. Available: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.271828.2356>
- [16] Z. Safarzadeh and F. Najafpour, "Investigation of the effect of deep excavation by the truss guard structure method on the settlement and the bearing capacity of the adjacent foundation," in *Second National Conference on Civil Engineering, Intelligent Development and Sustainable Systems*, Gorgan, Iran, 2022. (In Persian). [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/1575884/>
- [17] Z. Safarzadeh and S. Mehrifar, "Investigating the wall displacement of excavation in the truss guard structure system," in *Second National Conference on Civil Engineering, Intelligent Development and Sustainable Systems*, Gorgan, Iran, 2022. (In Persian). [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/1575886/>
- [18] M. Alizade and A. Eslami Haghighat, "Investigating the efficiency of the design charts of the truss supporting systems by comparing the models of Mohr–Coulomb and hardening soil," in *5th Iranian Conference on Geotechnical Engineering and 2nd International Conference on Earthquake and Seismic Geotechnical Engineering*, 2023. (In Persian). [Online]. Available: <https://en.civilica.com/doc/2061484/>
- [19] F. Pirmohammadi Alishah, M. Motalbian, and M. Mohammadrezaei, "Modeling deformation and design of truss

- retaining structures in multi-layered soil using an equivalent single-layer soil with the finite element method,” *Civil and Project*, vol. 7, no. 2, 2025. (In Persian). [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.508117.1347>
- [20] Itasca Consulting Group, *FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 6.0. Minneapolis, MN, USA: Itasca Consulting Group, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11020260>
- [21] A. Lees, *Geotechnical Finite Element Analysis*. London, U.K.: ICE Publishing, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/gfea.60876>
- [22] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1988. [Online].
- [23] P. Jamsawang, P. Voottipruex, P. Tanseng, P. Jongpradist, and D. T. Bergado, “Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: Case study and 3D simulation,” *Acta Geotechnica*, vol. 14, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0660-7>



Replacing Natural Filler with Foundry Waste Filler and Adding Nanosilver: Performance Enhancement of Asphalt Mastics for Slurry Seal

Research Article

Vahid Bagheri Mofrad¹, Mahmood Jazayeri Moghaddas², Amin Tohidi³ , Hassan Divandari⁴, Mehdi Mahdavi Adeli⁵

DOI: [10.22067/jfcej.2026.94593.1365](https://doi.org/10.22067/jfcej.2026.94593.1365)

1. Introduction

Growing environmental concerns related to the extraction of natural aggregates and the increasing volume of industrial waste have strongly motivated the use of alternative materials in pavement preservation. Slurry seal, as a highly effective cold preventive maintenance treatment, plays a crucial role in reducing life-cycle costs and mitigating environmental pollutants. However, distresses such as raveling, bleeding, stripping, and rutting are frequently observed in these overlays, primarily stemming from inappropriate mix design, poor adhesion between the bitumen and aggregates, and the selection of substandard mineral fillers. The mineral filler, comprising particles smaller than 0.075 mm, significantly affects the adhesion, abrasion resistance, and deformation behavior of the asphalt mastic. Simultaneously, the extraction of natural limestone aggregates leads to severe environmental consequences, including vegetation destruction, landscape alteration, and dust generation, while high-quality natural resources are becoming increasingly limited and expensive. Conversely, the rapid growth of urbanization and industrial activities has resulted in a massive accumulation of industrial wastes, exceeding landfill capacities. Foundry waste, particularly from CO₂ molding sand processes, represents a significant industrial by-product that is typically discarded. Utilizing such materials in pavement engineering not only conserves natural resources but also resolves waste disposal challenges. Furthermore, the incorporation of nanomaterials, specifically silver nanoparticles (Ag NPs), has emerged as a promising approach to enhance the microstructural integrity, thermal stability, and mechanical resistance of bituminous mastics due to their high surface area and unique physicochemical properties. Despite these potentials, limited research has addressed the combined effects of foundry waste fillers and nanosilver in cold

asphalt mastics. Therefore, this study evaluates the technical feasibility, microstructural characteristics, and functional performance of replacing natural limestone filler with foundry waste filler and improving the mastic behavior using nanosilver in slurry seal applications.

2. Methodology

A comprehensive laboratory matrix was designed to evaluate the combined effects of foundry waste filler and nanosilver on slurry seal mastics. The primary binder used was a cationic slow-setting emulsion (CSS-1h), selected for its excellent compatibility with slurry seal applications and ambient-temperature workability. The natural filler consisted of industrial limestone powder (calcium carbonate dominant), while the foundry waste filler was obtained from recycled CO₂ molding sand, processed, and sieved to pass the 0.075 mm sieve. Silver nanoparticles (Ag NPs) with an average particle size of 40–70 nm and >99% purity were utilized as the nano-modifier. The aggregate gradation was designed according to the ISSA TB-112 standard for Type II slurry seal. The experimental matrix included five levels of natural filler replacement with foundry waste filler (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%) and three residual binder contents (8.0%, 8.5%, and 9.0%). In the nano-modified series, nanosilver was incorporated at a fixed dosage of 10% by the total weight of the filler. To ensure uniform dispersion, the nanosilver was pre-mixed with the dry filler in a high-speed mixer for 3 minutes, subsequently added to the emulsion at 60–70°C, and stirred using a hotplate magnetic stirrer for 10 minutes. Chemical and microstructural characterizations of the fillers and mastics were conducted using X-ray Fluorescence (XRF) for elemental composition, X-ray Diffraction (XRD) for crystalline phase identification, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) for

* Manuscript received July 23, 2025, Revised October 06, 2025, Accepted February 17, 2026.

¹ PhD Candidate, Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

³ Corresponding author. Assistance Professor, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Email: a.tohidi@aut.ac.ir.

⁴ Associate Professor, Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

⁵ Associate Professor, Department of Civil Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

functional group analysis, and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) for surface morphology evaluation. Performance-related indicators were assessed through standardized slurry seal functional tests, including the Wet Track Abrasion Test (WTAT) for abrasion resistance, the Wet Cohesion Test for adhesion and setting time, and the Loaded Wheel Test (LWT) for deformation and rutting resistance, all consistent with ISSA and ASTM evaluation frameworks.

3. Results

XRF and XRD results confirmed a fundamental compositional and structural difference between the fillers. The natural filler exhibited a carbonate-dominant nature with highly crystalline Quartz and Calcite phases, indicating physical stability but lower chemical reactivity. In contrast, the foundry waste filler was highly rich in silica and iron-bearing phases (e.g., Magnetite and Hematite, with Fe_2O_3 reaching 45.3%), exhibiting a semi-amorphous structure that indicates a higher surface reactivity potential and stronger initial adhesion with the bitumen.

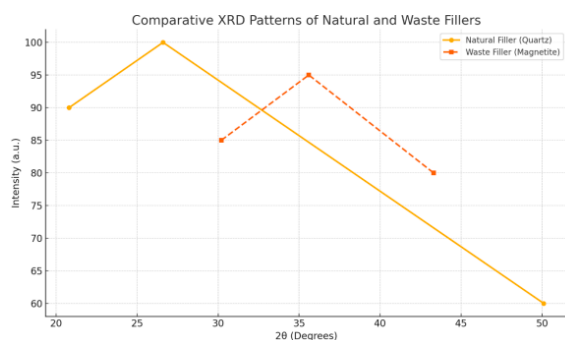


Figure 1: XRD patterns of natural and foundry waste fillers

FT-IR analysis revealed the presence of Fe-O bonds in the waste filler. More importantly, the combination of waste filler and nanosilver strengthened active functional interactions within the mastic, specifically enhancing the Si-O-Si networks and indicating the formation of a more stable structural matrix with increased hydrogen bonding potential. FESEM imaging showed that while the natural filler had a relatively smooth and uniform surface, the waste filler possessed rougher surfaces, higher texture irregularity, and micro-porosities resulting from the rapid cooling in the casting process. The addition of nanosilver

effectively filled these micro-voids, significantly improving particle distribution, reducing nano-scale agglomeration, and enhancing the overall structural integrity of the mastic. Overall, the mixture containing 50% waste filler with nanosilver (NWP50) demonstrated the most balanced response. This optimal blend reflected improved wet cohesion, reduced deformation tendency in the LWT, and more favorable abrasion resistance in the WTAT compared to other replacement levels and the control sample.

4. Conclusion

Foundry waste filler, when used as a partial replacement of natural filler and combined with nanosilver, can significantly enhance the structural and functional performance of slurry seal mastics while strongly supporting sustainability goals. The microstructural analyses (XRF, XRD, FT-IR, and FESEM) proved that the siliceous and iron-rich semi-amorphous nature of the foundry waste provides excellent surface reactivity. The incorporation of silver nanoparticles effectively mitigated the potential drawbacks of the waste filler's heterogeneous surface by improving particle dispersion, filling micro-voids, and reinforcing the bitumen-filler interfacial transition zone. The optimum observed condition in this study corresponded to the mixture containing 50% foundry waste filler and 10% nanosilver, which yielded the highest resistance to abrasion, rutting, and moisture damage. These findings highlight the potential of utilizing industrial by-products in producing high-performance, environmentally sustainable cold-applied slurry seal asphalt, thereby reducing the ecological footprint of natural aggregate extraction and diverting industrial waste from landfills. However, this study was primarily conducted under controlled laboratory conditions. Future work is highly recommended to examine different nanosilver dosages and to validate the long-term durability of these nano-modified mastics under field-like cyclic loading, environmental exposure, and freeze-thaw cycles. Additionally, conducting a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) and techno-economic analysis is suggested to fully quantify the environmental and financial benefits of scaling this sustainable pavement preservation technology for widespread industrial application.



جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و افزودن نانوقره بر عملکرد ماستیک‌های آسفالتی*

مقاله پژوهشی

وحید باقری مفرد^(۱) سید محمود جزایری مقدس^(۲) امین توحیدی^(۳) حسن دیواندری^(۴) مهدی مهدوی عادل^(۵)

DOI: 10.22067/jfcej.2026.94593.1365

چکیده با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از استخراج سنگ‌دانه‌های طبیعی و افزایش ضایعات صنعتی، این پژوهش با هدف بررسی فنی و عملکردی استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و نانوذرات نقره در ماست یک‌های قیری آسفالت حفاظتی نوع اسلاری سیل انجام شد. ترکیباتی با درصدهای مختلف جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی (۰ تا ۱۰۰٪) و با یا بدون نانوقره (۱۰٪ وزنی نسبت به فیلر کل) در سه سطح قیر باقی‌مانده طراحی گردید. ارزیابی ترکیبات شامل آزمون‌های فیزیکی، شیمیایی و فلورسانس پرتو ایکس XRF، پراش پرتو ایکس XRD، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه FT-IR و میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان گسیل FESEM و نیز آزمون‌های عملکردی نظیر سایش مرطوب، چسبندگی مرطوب و چرخ بارگذاری بود. نتایج نشان داد فیلر ضایعاتی، به دلیل وجود ترکیبات سیلیسی و فازهای آهن‌دار، واکنش‌پذیری سطحی مناسبی دارد و افزودن نانوقره موجب بهبود توزیع ذرات، انسجام ساختاری و مقاومت سایشی شد. ترکیب حاوی ۵۰٪ فیلر ضایعاتی و نانوقره بهترین عملکرد را نشان داد. یافته‌ها بر قابلیت استفاده از پسماندهای صنعتی برای تولید آسفالت‌های حفاظتی سرد با عملکرد بالا و سازگاری زیست‌محیطی تأکید دارند.

واژه‌های کلیدی اسلاری سیل، پودر ضایعات ریخته‌گری، نانوذرات نقره، قیر امولسیون، آزمایش FESEM.

Performance Evaluation of Slurry Seal Mastics Containing Foundry Waste and Silver Nanoparticles

Vahid Bagheri Mofrad Mahmood Jazayeri Moghaddas Amin Tohidi Hassan Divandari Mehdi Mahdavi Adeli

Abstract Considering the growing environmental concerns associated with natural aggregate extraction and the increasing accumulation of industrial waste, this study aimed to evaluate the technical and functional performance of bituminous mastics used in slurry seal surface treatments incorporating foundry waste filler and silver nanoparticles. Mixtures were formulated with varying replacement levels of natural filler by waste filler (0–100%), with and without the addition of silver nanoparticles (10% by weight of total filler), across three residual bitumen contents. The prepared mixtures were subjected to physical, chemical, and microstructural characterization using X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM). Performance was assessed through Wet Track Abrasion, Wet Cohesion, and Loaded Wheel tests. Results showed that the waste filler, characterized by siliceous and iron-rich phases, provided good surface reactivity. The incorporation of silver nanoparticles enhanced particle dispersion, structural cohesion, and abrasion resistance. The optimal performance was achieved with the mixture containing 50% waste filler and silver nanoparticles. These findings highlight the potential of utilizing industrial by-products in producing high-performance, environmentally sustainable cold-applied slurry seal asphalt.

Key words Slurry seal, Foundry waste powder, Silver nanoparticles, Bitumen emulsion, FESEM test.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۵/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۱/۲۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

Email: a.tohidi@aut.ac.ir

(۳) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

(۴) دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۵) دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مقدمه

با توجه به نقش مؤثر اسلاری سیل در کاهش هزینه‌های چرخه عمر روسازی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، و با در نظر گرفتن امکان اجرای این فناوری در کشور، آشنایی دقیق‌تر با آن می‌تواند زمینه بهره‌گیری از مزایای متعددش را فراهم کند [1]. با وجود این مزایا، خرابی‌هایی مانند شن‌زدگی، قیرزدگی، عریان‌شدگی و شیارشدگی در این نوع آسفالت حفاظتی مشاهده می‌شود [2] که عمدتاً ناشی از اجرای نادرست، شرایط نامناسب جوی، کیفیت پایین طراحی مخلوط، چسبندگی ضعیف قیر و سنگ‌دانه و انتخاب مصالح نامناسب است [3].

در ساخت اسلاری سیل پلیمری از مصالح سنگی شکسته با دانه‌بندی کنترل‌شده، قیر امولسیون کاتیونیک اصلاح‌شده با پلیمر، آب و فیلر معدنی فعال استفاده می‌شود [4]. فیلر، یکی از اجزای اصلی مخلوط آسفالتی، تأثیر قابل توجهی بر خواص عملکردی دارد [5]. این ماده که از ذرات کوچک‌تر از ۰.۰۷۵ میلی‌متر تشکیل شده است، می‌تواند از منابع طبیعی یا مصنوعی مانند خاکستر بادی، آهک، فیلر ضایعاتی و پودرهای سرمایی بازیافتی تأمین شود [6].

استخراج سنگ‌دانه‌های طبیعی پیامدهای زیست‌محیطی جدی از جمله تخریب پوشش گیاهی، نابودی مناظر طبیعی و تولید گرد و غبار دارد. در بسیاری از مناطق، منابع سنگ‌دانه‌ای باکیفیت محدود و هزینه تأمین آن‌ها در حال افزایش است [7]. همزمان، رشد ساخت‌وساز و شهرنشینی موجب افزایش تولید ضایعات شده و ظرفیت دفن آن‌ها پاسخگوی نیاز نیست [8]. بنابراین، مدیریت بهینه منابع و انرژی در ساخت و نگهداری راه‌ها ضرورتی انکارناپذیر است [9].

در این راستا، افزایش هزینه‌های مواد خام و کاهش منابع طبیعی موجب شده که پژوهشگران بسیاری به بررسی امکان استفاده از ضایعات صنعتی به عنوان جایگزین مصالح مخلوط آسفالتی روی آورند، با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهره‌برداری بهینه‌تر از منابع موجود.

بخش زیادی از این پژوهش‌ها بر بهره‌گیری از پسماندهای صنعتی و مواد دورریز متمرکز بوده‌اند؛ رویکردی که ضمن کاهش مشکلات مرتبط با دفع زباله، به صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی و محدود نیز کمک می‌کند [10].

ارتقای دوام و عملکرد روسازی‌های آسفالتی از چالش‌های اصلی مهندسی حمل‌ونقل است. در این زمینه، بهره‌گیری از مصالح بازیافتی و ضایعات صنعتی با هدف کاهش هزینه،

صرفه‌جویی در منابع و بهبود ویژگی‌های مکانیکی، به ویژه در آسفالت‌های حفاظتی، اهمیت یافته است. یکی از این مصالح، پودر ضایعات ریخته‌گری است که می‌تواند جایگزین فیلر طبیعی در ماستیک‌های قیری شود. همچنین نانومواد به دلیل سطح ویژه بالا و ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی، موجب بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت حرارتی و مکانیکی مخلوط‌ها می‌گردند. با این حال، پژوهش‌های محدودی به بررسی همزمان اثر فیلر ضایعاتی و نانومواد بر عملکرد آسفالت سرد حفاظتی پرداخته‌اند.

در این پژوهش، استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری به عنوان جایگزین فیلر طبیعی و افزودن نانونقره با هدف ارتقای عملکرد مکانیکی، چسبندگی و دوام لایه‌های اسلاری سیل مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر فیلر ضایعاتی و نانونقره بر عملکرد مکانیکی و رفتاری مخلوط‌های اسلاری سیل است. اهداف فرعی این مطالعه شامل ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ریزساختاری ترکیبات حاوی فیلر ضایعاتی و نانونقره با استفاده از آزمون‌های XRD، XRF، FT-IR و FESEM، و تحلیل عملکرد مکانیکی مخلوط‌ها شامل مقاومت سایشی، چسبندگی مرطوب و پایداری تحت بارگذاری بر اساس آیین‌نامه‌های ASTM و ISSA است.

مطالعات پیشین

جیانگ در پژوهشی به بررسی استفاده از ۳۰ درصد آسفالت خردشده در ترکیب مخلوط اسلاری سیل پرداخت. با این وجود، نتایج حاصل از آزمون پیوستگی نشان‌دهنده عملکرد ضعیف نمونه‌ها بود، به گونه‌ای که در آزمون پیوستگی ۶۰ دقیقه، هیچ یک از ترکیبات موفق به کسب حداقل الزامات آیین‌نامه نشدند. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در حضور تنها ۳۰ درصد آسفالت خردشده، بهینه‌سازی بیشتر در طراحی مخلوط برای دستیابی به چسبندگی مناسب و عملکرد رضایت‌بخش ضروری است [11]. پورسلطانی و حسامی در پژوهشی جامع، عملکرد آسفالت خردشده را در ترکیب مخلوط‌های اسلاری سیل بررسی کردند؛ نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از آسفالت خردشده به عنوان جایگزین سنگ‌دانه طبیعی در اسلاری سیل می‌تواند الزامات آیین‌نامه‌ای را در بسیاری از موارد برآورده سازد [12]. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از فیلر ضایعاتی فولاد می‌تواند برخی خصوصیات فنی مخلوط آسفالت را بهبود دهد [13]. در مطالعه‌ای، پاستو و بالدو عملکرد مقاومت شیارشدگی

چسبندگی و دوام کمک کرده و الزامات عملکردی را برآورده می‌کند [18].

به‌کارگیری بهینه مواد پسماند به عنوان جایگزینی بخشی از سنگ‌دانه‌ها نه تنها مزایای زیست‌محیطی به همراه دارد، بلکه می‌تواند موجب ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و بتنی نیز شود [19]. در همین راستا، پژوهشگران مطالعاتی را در زمینه استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین فیلر در ترکیبات آسفالتی انجام داده‌اند.

میستری و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، به بررسی خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی به عنوان فیلرهای جایگزین در مخلوط آسفالت گرم (HMA) پرداختند. یافته‌ها نشان داد که افزودن این فیلرهای ضایعاتی موجب بهبود خواص عملکردی HMA شده و در عین حال موجب کاهش مقدار بهینه قیر نسبت به مخلوط شاهد گردید [20].

افضلی و همکاران در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی خواص آسفالت حفاظتی حاوی الیاف کورتاسیرجان» بیان کردند آسفالت حفاظتی الیافی نوعی جدید از زیرگروه آسفالت‌های حفاظتی است که در آن از خواص مثبت الیاف در بهبود عملکرد لایه حفاظتی کمک گرفته می‌شود. در این پژوهش مزایا و نکات اجرایی در خصوص آسفالت حفاظتی الیافی تشریح شده و همچنین نتایج عملکردی استفاده از الیاف مدول و مقاومت بالای کورتاسیرجان در آسفالت حفاظتی گزارش شده است [21].

جیانگ در پژوهشی به بررسی تأثیر به‌کارگیری ۳۰ درصد آسفالت بازیافتی در ترکیبات آسفالت حفاظتی پرداخت. نتایج حاصل از آزمون پیوستگی پس از ۶۰ دقیقه نشان داد که مقدار پیوستگی زیر حد قابل قبول آیین‌نامه قرار دارد. در مقابل، عملکرد نمونه‌ها در آزمون‌های سایش مرطوب و چسبندگی ماسه‌ای مطابق با معیارهای استاندارد ارزیابی شد [22].

گرفا و همکاران در پژوهشی به بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی حاوی ۱۰۰ درصد آسفالت بازیافتی در سه نوع دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد تمامی نمونه‌ها در آزمون پیوستگی نسبت به نمونه‌های شاهد ضعیف‌تر است و در اغلب موارد از حداقل الزامات آیین‌نامه کمتر است. هیچ یک از نمونه‌ها موفق به کسب معیارهای لازم برای آزمون پیوستگی در بازه زمانی ۶۰ دقیقه نشدند [23].

پورسلطانی و حسامی در پژوهشی، به بررسی استفاده از آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین کامل یا جزئی برای مصالح سنگی در مخلوط آسفالت حفاظتی پرداختند و عملکرد آن را با

مخلوط آسفالتی SMA حاوی فیلر ضایعاتی فولاد و خاکستر زغال‌سنگ را مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با نمونه‌هایی بر پایه سنگ‌دانه‌های آهکی مقایسه کردند. ارزیابی مقاومت در برابر تغییر شکل این مخلوط‌ها از طریق آزمون بارگذاری محوری تکرارشونده و آزمایش اثر چرخ صورت گرفت. یافته‌ها نشان داد که جایگزینی حداکثر ۴۰ درصد از سنگ‌دانه‌های طبیعی با فیلر ضایعاتی حاصل از کوره قوس الکتریکی، مقاومت شیارشدگی را نسبت به مخلوط‌های متداول افزایش می‌دهد [14].

حسامی و زال‌نژاد در پژوهشی به ارزیابی عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل با استفاده از مصالح فیلر ضایعاتی فولادی پرداختند و نتایج را با نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه‌های سیلیسی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که افزایش درصد فیلر ضایعاتی فولاد منجر به افزایش مصرف قیر و همچنین افزایش وزن مخصوص مخلوط شد، که این عوامل باعث افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و اجرایی می‌شوند [15].

چنگ زنگ و همکارانش به بررسی تأثیر استفاده از پودر لاستیک بر ویژگی‌های کششی و شکست لایه اسلاری سیل پرداختند. آن‌ها عملکرد این مخلوط را به عنوان لایه‌ای محافظ بر روی روسازی آسفالتی در دو دمای متفاوت، یعنی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰- درجه سانتی‌گراد، مورد ارزیابی قرار دادند. هدف از این پژوهش، ارتقای عملکرد اسلاری سیل از نظر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و افزایش دوام در شرایط دمایی مختلف با استفاده از مصالح بازیافتی همچون پودر لاستیک بود [16].

ژائو و همکاران پژوهشی را به منظور بررسی اثر افزودن پودر لاستیک به مصالح اسلاری سیل، با تمرکز بر مکانیزم‌های کاهش نویز و نظریه جذب و تعدیل ارتعاش، انجام دادند. نتایج نشان داد که به طور کلی عملکرد سطح روسازی تا حدی بهبود یافته است. با این حال، باید توجه داشت که اگرچه طرح اختلاط پایه استاندارد و بهینه بوده است، اما طرح جدید حاوی پودر لاستیک از منظر بهینگی بررسی نشده است [17].

حسامی و عطاءاللهی در پژوهشی به بررسی تأثیر استفاده از پودر لاستیک در مخلوط اسلاری سیل پرداختند. در این مطالعه، مقادیر ۵،۰ تا ۳ درصد پودر لاستیک نسبت به وزن مصالح سنگی به عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌ها در ترکیب مخلوط مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که بهترین عملکرد مخلوط مربوط به نمونه‌هایی است که حاوی ۵،۰ درصد پودر لاستیک هستند. استفاده از این مقدار به بهبود

بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از زغال‌سنگ مس به عنوان جایگزین شن طبیعی در آسفالت حفاظتی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی منجر شود و به عنوان یک راهکار مؤثر برای مدیریت پسماند زغال‌سنگ مس محسوب می‌شود [28].

علیها و همکاران مقاومت شکستگی آسفالت اسلاری سیل رنگی را در دماهای پایین و حالت‌های بارگذاری مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت شکست نمونه‌ها ابتدا کاهش یافت و سپس با افزایش بار برشی در حالت مختلط I/II افزایش یافت. از حالت خالص I تا III، مقاومت مخلوط‌های رنگی با رشد ترک با افزایش بخش حالت III در نوک ترک کاهش یافت. علاوه بر این، دماهای پایین‌تر منجر به عملکرد شکست بهتر بین مخلوط‌ها شد، به ویژه در دمای منفی ۲۰ درجه سانتی‌گراد. عملکرد شکست مخلوط‌ها تحت تأثیر کاهش دما به دلیل ویژگی‌های استحکام قیر به طور مثبت تأثیر پذیرفت [29].

زیاری و همکاران مقاله‌ای با موضوع تحلیل عملکرد آسفالت حفاظتی رنگی با استفاده از زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی به عنوان جایگزین شن ارائه کردند. در این تحقیق، اثر استفاده از زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی به عنوان جایگزین ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی شن طبیعی در آسفالت حفاظتی رنگی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی به عنوان جایگزین شن طبیعی در آسفالت حفاظتی رنگی می‌تواند به افزایش مقاومت در برابر خستگی و آب شستگی و بهبود رنگ‌پذیری منجر شود و به عنوان یک راهکار پایدار برای استفاده از پسماند زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی محسوب می‌شود [30].

ایزدی و همکاران پژوهشی را با هدف بررسی اثر فیلر ضایعاتی کوره آهن‌گدازی بر عملکرد مخلوط آسفالت حفاظتی اسلاری سیل انجام دادند. یافته‌ها نشان دادند که به‌کارگیری فیلر ضایعاتی کوره آهن‌گدازی می‌تواند موجب بهبود عملکرد مخلوط اسلاری سیل گردد. در این میان، مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی نسبت به نمونه شاهد عملکرد برتری داشت [31].

روش شناسی

فرایند طراحی و ارزیابی ترکیبات آسفالت حفاظتی، به ویژه اسلاری سیل، نیازمند یک برنامه آزمایشگاهی دقیق و ساختاریافته است که امکان بررسی اثرگذاری متغیرهای مختلف بر عملکرد

نمونه‌های متداول مقایسه کردند. در این مطالعه، مخلوط‌هایی با درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی شامل ۴۳، ۶۹ و ۹۵ درصد، همراه با یک نمونه مرجع حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه تازه، و در ترکیب با مقادیر مختلف قیر امولسیون تهیه شده و تحت آزمون‌های طراحی مخلوط و ارزیابی عملکرد قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی در آزمون‌های پیوستگی و سایش عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند [24].

حسامی و زال‌نژاد در پژوهشی به ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالت حفاظتی با استفاده از مصالح فیلر ضایعاتی فولادی پرداختند و نتایج آن را با مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌های سیلیسی مقایسه کردند. یافته‌ها نشان داد که افزایش میزان فیلر ضایعاتی فولادی، به ویژه در حالت جایگزینی کامل با سنگ‌دانه طبیعی، منجر به بهبود پارامترهایی نظیر وزن مخصوص، مقاومت در برابر رطوبت و مقاومت لغزندگی سطحی می‌شود [25].

کی‌منش و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی طرح اختلاط و عملکرد مخلوط آسفالت حفاظتی حاوی فیلر ضایعاتی فولادی حاصل از کوره قوس الکتریکی (EAF) پرداختند. در این پژوهش، پنج نوع مخلوط شامل مقادیر صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد فیلر فیلر ضایعاتی فولادی به عنوان جایگزین مصالح عبوری از الک ۰٫۰۷۵ میلی‌متر ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که مخلوط حاوی ۵۰ درصد فیلر فیلر ضایعاتی فولادی بهترین عملکرد را در میان گزینه‌های مورد مطالعه داشته است [26].

ایزدی و همکاران مطالعه‌ای انجام دادند که هدف آن بررسی امکان‌پذیری استفاده از رنگ‌دانه‌های قرمز اکسید آهن طبیعی در طراحی مخلوط اسلاری سیل برای تغییر رنگ این نوع آسفالت و ارزیابی عملکرد آن بود. نتایج طراحی نشان داد که مخلوط حاوی ۹ درصد رنگ‌دانه بهترین عملکرد را در بین مخلوط‌ها داشت. بر اساس نتایج، رنگ‌دانه قرمز اکسید آهن بهبود چسبندگی امولسیون قیر به دانه‌بندی سنگی، مقاومت در برابر سایش و همچنین تغییر شکل عمودی را به همراه داشت [27].

زال‌نژاد و همکاران مقاله‌ای با عنوان «امکان‌سنجی استفاده از زغال‌سنگ مس به عنوان جایگزین شن طبیعی در آسفالت حفاظتی برای بهبود کیفیت: تحلیل میکروسکوپی و مکانیکی» منتشر کردند. در این تحقیق، اثر استفاده از زغال‌سنگ مس به عنوان جایگزین ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی شن طبیعی در آسفالت حفاظتی بر روی خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی

می‌باشد. یکی از مراحل بنیادین در انجام مطالعات آزمایشگاهی مواد قیری، طراحی ترکیبات مخلوط‌ها بر مبنای متغیرهای اصلی تأثیرگذار است. جدول (۱) ترکیبات مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. در این پژوهش، هدف بررسی اثرات ترکیبی استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری به جای فیلر طبیعی و همچنین افزودن نانومواد به ماستیک قیری در آسفالت حفاظتی از نوع اسلاری سیل است. به منظور انجام این ارزیابی، ترکیبات مختلفی بر اساس دو عامل کلیدی طراحی شدند:

۱. درصد جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی (در ۵ سطح)

۲. درصد قیر باقی‌مانده در مخلوط (در ۳ سطح)

علاوه بر این، به منظور تحلیل اثر نانوقره، برای هر ترکیب فوق، یک نمونه متناظر حاوی نانوقره نیز ساخته شده است. بنابراین ماتریسی کامل از ترکیبات شامل دو وضعیت نانویی و غیرنانویی ایجاد شد تا اثرات هر متغیر به صورت مجزا و ترکیبی بررسی گردد.

نهایی روسازی را فراهم آورد. در این بخش، چارچوب کامل آزمایشگاهی پژوهش ارائه می‌شود که شامل طراحی نمونه‌ها، معرفی مصالح مصرفی، شرح مراحل آماده‌سازی، توصیف آزمون‌های انجام‌شده و روش‌های تحلیل نتایج است. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی اثر جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی حاصل از صنایع ریخته‌گری و افزودن نانومواد بر خواص عملکردی، ساختاری و مکانیکی ماستیک قیری در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل می‌باشد. بر این اساس، نمونه‌های آزمایشی در دو گروه اصلی (دارای نانومواد و فاقد نانومواد) و با درصد‌های مختلف فیلر جایگزین و قیر باقی‌مانده طراحی و ساخته شدند.

با توجه به تنوع متغیرهای تأثیرگذار، برای ارزیابی جامع خواص ترکیبات، مجموعه‌ای از آزمون‌های فیزیکی، شیمیایی، ریزساختاری، و عملکردی طراحی شد. این آزمون‌ها شامل تحلیل شیمیایی فیلرها (XRF)، شناسایی ساختار بلوری (XRD)، بررسی ساختار مولکولی (FT-IR)، تحلیل ریزساختار (FESEM)،

جدول ۱ ترکیبات مطالعه حاضر با دسته‌بندی درصد نانو، درصد فیلر ضایعاتی و درصد قیر باقی‌مانده

نوع مخلوط	درصد جایگزینی فیلر ضایعاتی	درصد نانو (%)	درصد قیر باقی‌مانده (%)
WFP0	فقط فیلر طبیعی	۰	۸,۰
	فقط فیلر طبیعی	۰	۸,۵
	فقط فیلر طبیعی	۰	۹,۰
NWFP0	فقط فیلر طبیعی	۱۰	۸,۰
	فقط فیلر طبیعی	۱۰	۸,۵
	فقط فیلر طبیعی	۱۰	۹,۰
NWFP25	۷۵ درصد فیلر طبیعی و ۲۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۷۵ درصد فیلر طبیعی و ۲۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۷۵ درصد فیلر طبیعی و ۲۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰
NWFP50	۵۰ درصد فیلر طبیعی و ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۵۰ درصد فیلر طبیعی و ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۵۰ درصد فیلر طبیعی و ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰
NWFP75	۲۵ درصد فیلر طبیعی و ۷۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۲۵ درصد فیلر طبیعی و ۷۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۲۵ درصد فیلر طبیعی و ۷۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰
NWFP100	۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰

جدول ۲ مشخصات فیرومولسیون مطالعه حاضر با توجه به استانداردهای مختلف

آزمایش	روش آزمایش	نتیجه آزمایش
کندروانی سی بولت - فورل در دمای ۲۵°C، ثانیه	AASHTO T59	۲۱
نشست (پایداری) در انبار کردن فیرومولسیون، ۲۴ ساعت، %	ASTM D6930	۰,۱
تقطیر فیرومولسیون، جرم وزنی %	ASTM D7497	۶۲
الک، %	ASTM D244	۰,۱
اندود، %	AASHTO T59	۹۹
بار ذرات	AASHTO T59	مثبت
آزمایش‌های بر روی فیرو باقی‌مانده از تقطیر فیرومولسیون		
نقطه نرمی فیرو با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۵۵
درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۰

مصالح مصرفی

فیرومولسیون و مشخصات آن

فیرومولسیون مورد استفاده در این تحقیق از نوع کاتیونیک با تنظیم آهسته (CSS-1h) انتخاب شده است. این نوع امولسیون به دلیل سازگاری بالای آن با کاربردهای اسلاری‌سیل و مخلوط‌های سرد، و همچنین قابلیت پخش‌پذیری مناسب و کارایی مطلوب در دمای محیط، در پروژه حاضر مورد استفاده قرار گرفت. به‌کارگیری این فیرومولسیون در راستای اهداف زیست‌محیطی پروژه است؛ چرا که نیازی به حرارت‌دهی بالا ندارد و موجب کاهش انتشار گازهای آلاینده می‌شود.

فیرومولسیون از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل درصد باقی‌مانده، درجه نفوذ، نقطه نرمی و طیف FT-IR مورد ارزیابی قرار گرفت. این خصوصیات به منظور سنجش مناسب بودن فیرو برای اختلاط با فیلهای مختلف و افزودنی‌های نانویی ضروری بوده‌اند. جدول (۲) مشخصات اصلی فیرومولسیون را بر اساس استانداردهای رایج نشان می‌دهد.

فیلر طبیعی

فیلر طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، پودر سنگ آهک با منشأ کربناته است که به صورت صنعتی از طریق آسیاب مصالح سنگی حاصل می‌شود. این نوع فیلر به دلیل در دسترس بودن، هزینه پایین و سازگاری با فیلهای امولسیونی، به طور گسترده در صنایع آسفالت حفاظتی و ریزدانه استفاده می‌شود.

هدف از استفاده این فیلر به عنوان مرجع پایه در پژوهش حاضر، بررسی عملکرد فیلهای جایگزین و اثرگذاری آن‌ها در حضور نانومواد بوده است. برای این منظور، فیلر طبیعی از جنبه‌های فیزیکی، شیمیایی و ساختاری مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل شیمیایی فیلر طبیعی با استفاده از آزمون XRF (طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس) انجام شد که نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی این فیلر عمدتاً شامل اکسید کلسیم و کلسیم کربنات است. حضور مقادیر بالای کلسید اکسید نشان‌دهنده طبیعت آهکی آن است که می‌تواند در ایجاد پیوند قوی‌تر با فیرومولسیونی مؤثر باشد.

تحلیل ساختاری فیلر طبیعی که با استفاده از آزمون پراش پرتو ایکس صورت گرفته است و نتایج آن نشان می‌دهد که فاز غالب در این فیلر، کلسیت (CaCO_3) می‌باشد. همچنین در طیف پراش، پیک‌های مشخص مربوط به دولومیت نیز مشاهده شد، که بیانگر حضور مقادیر جزئی از این کانی است.

برای شناخت دقیق‌تر ساختار مولکولی و گروه‌های عاملی سطح فیلر، از طیف‌سنجی FT-IR استفاده شد. طیف ثبت‌شده شامل پیک‌هایی در نواحی زیر بود:

۱. $1420-1470 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به کشش گروه‌های کربنات CO_3^{2-} .
۲. 875 cm^{-1} ارتعاش خمشی خارج صفحه کربنات.
۳. 710 cm^{-1} ارتعاش خمشی درون صفحه.

این ترکیب نشان‌دهنده ماهیت سیلیسی و شبه‌سرامیکی این فیلر است که با خواص قلیایی فیلر طبیعی تفاوت دارد.

آزمون XRD برای بررسی ساختار بلوری این فیلر که نتایج آن نشان می‌دهد الگوی پراش به دست آمده حضور کوارتز (SiO_2) را به عنوان فاز غالب تأیید کرد. همچنین پیک‌های مشخصی مربوط به کانی‌های فرعی مانند مولایت و آثار کائولینیت نیز در برخی نمونه‌ها مشاهده شد.

همچنین طیف FT-IR فیلر ضایعاتی دارای پیک‌های مشخص زیر بود:

۱. Si-O-Si ارتعاش کششی 1080 cm^{-1}

۲. Si-O ارتعاش خمشی 795 cm^{-1} و 470 cm^{-1}

۳. OH گروه‌های 1630 cm^{-1} و 3400 cm^{-1} جذب آب سطحی و

این نتایج تأیید می‌کند که ترکیب غالب فیلر از نظر مولکولی نیز از خانواده سیلیکاتی است و فاقد گروه‌های کربناتی فعال (مشابه فیلر طبیعی) است.

با توجه به ماهیت سیلیسی این فیلر، انتظار می‌رود که رفتار چسبندگی آن با قیر متفاوت باشد. تحلیل نتایج آزمایش‌های ماستیک نشان داد که در غیاب نانومواد، افزایش درصد جایگزینی فیلر ضایعاتی ممکن است موجب کاهش اولیه چسبندگی شود. اما در حضور نانومواد، این اثر بهبود یافت و فیلر ضایعاتی عملکرد مناسبی از خود نشان داد. در برخی نمونه‌ها مانند NWFP50، بهبود قابل توجهی در مقاومت سایشی و کاهش جابه‌جایی مشاهده شد.

در مجموع، فیلر ضایعاتی ریخته‌گری با دارا بودن ساختار سیلیکاتی، دانه‌بندی مناسب و در دسترس بودن به عنوان یک گزینه جایگزین پایدار و فنی برای فیلرهای سستی مطرح است. با اصلاح ساختار آن از طریق نانومواد، می‌توان به خواص مکانیکی و دوام بالاتری در ترکیبات آسفالت حفاظتی دست یافت.

نانومواد (نوع، درصد مصرف، نحوه اختلاط)

در راستای ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی و بهبود خواص مکانیکی و رئولوژیکی ماستیک قیری، در این تحقیق از نانونقره (Ag nanoparticles) به عنوان افزودنی اصلاح‌کننده

۴. 3400 cm^{-1} وجود گروه‌های OH سطحی ناشی از جذب رطوبت.

این طیف‌ها حضور غالب کربنات کلسیم و طبیعت معدنی غیرآلی فیلر را به خوبی تأیید می‌کند.

به طور کلی، نتایج نشان داد که اگر چه فیلر طبیعی عملکرد قابل قبولی دارد، اما در مقایسه با فیلر ضایعاتی اصلاح‌شده با نانو، در برخی پارامترها همچون مقاومت سایشی و جابه‌جایی، در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد.

در مجموع، فیلر طبیعی به عنوان ماده مرجع در این تحقیق، بستر مناسبی برای مقایسه با فیلرهای جایگزین فراهم کرده و نقش کلیدی در ارزیابی تأثیر نانوذرات و ضایعات صنعتی بر عملکرد ترکیبات آسفالت حفاظتی ایفا کرده است.

فیلر ضایعاتی ریخته‌گری

فیلر ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق، از پسماندهای ماسه قالب‌گیری CO_2 حاصل از فرایند ریخته‌گری فلزات استخراج شده است. این پسماندها که به طور معمول در صنایع فلزی به عنوان مواد دورریز تلقی می‌شوند، با فرآوری مناسب می‌توانند به عنوان جایگزینی برای فیلر طبیعی در ترکیبات آسفالت حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند. به‌کارگیری این نوع فیلر، علاوه بر کاهش هزینه‌ها و مصرف منابع طبیعی، موجب ارتقاء پایداری زیست‌محیطی در صنعت راه‌سازی می‌گردد.

فیلر ضایعاتی پس از جمع‌آوری از کارگاه‌های ریخته‌گری، خشک، آسیاب و از الک 0.075 میلی‌متر عبور داده شد تا دانه‌بندی آن با مشخصات فیلر طبیعی هماهنگ گردد. این ماده دارای رنگ خاکستری روشن، سطح زبرتر و دانه‌بندی ناهمگن‌تری نسبت به فیلر کربناته طبیعی است.

آنالیز XRF نشان داد که ترکیب شیمیایی آن با فیلر طبیعی تفاوت قابل توجهی دارد. اجزای اصلی این فیلر شامل موارد زیر است:

۱. SiO_2 اکسید سیلیسیم (به میزان بالا، بیش از ۶۰٪).

۲. Al_2O_3 و Fe_2O_3 در مقادیر قابل توجه.

۳. مقادیر ناچیز از CaO ، MgO و سایر اکسیدهای فلزی.

باشد. به عبارت دیگر، در نمونه‌های حاوی نانومواد (مانند NWFP50، ۱۰٪ از وزن کل فیلر (شامل فیلر طبیعی و ضایعاتی) با نانونقره جایگزین شده است.

به‌منظور دستیابی به پراکنش یکنواخت نانونقره در مخلوط، فرایند اختلاط به شرح زیر انجام شد:

۱. پیش‌مخلوط کردن نانونقره با فیلر خشک در میکسر دور بالا به مدت ۳ دقیقه.

۲. افزودن این ترکیب به قیر امولسیون در دمای ۶۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد.

۳. استفاده از همزن مغناطیسی (Hotplate Stirrer) به مدت ۱۰ دقیقه برای تسهیل پراکنش نانوذرات در ماتریس قیر.

این روش سبب شد تا نانونقره به صورت یکنواخت در ساختار ماستیک توزیع شود و پیوستگی و پایداری مخلوط بهبود یابد.

مصالح سنگی

مطابق با الزامات استاندارد ISSA TB-112 برای طراحی اسلاری‌سیل، مصالح باید عمدتاً در محدوده اندازه‌ای ریز (الکی عبوری: ۸) باشند. توزیع دانه‌بندی نهایی مصالح در جدول (۴) ارائه شده است. درصد فیلر عبوری از الک ۰,۰۷۵ میلی‌متر در این تحقیق، از ترکیب فیلر طبیعی و/یا ضایعاتی + نانوماده تشکیل شده و در بخش جداگانه‌ای بررسی شده است. ویژگی‌های فیزیکی مصالح سنگی پس از نمونه‌برداری و تحلیل در آزمایشگاه مصالح به شرح جدول (۵) است.

جدول ۴ دانه‌بندی مصالح سنگی اسلاری‌سیل با توجه به آیین‌نامه ISSA

درصد حدود رواداری نسبت به دانه‌بندی کارگاهی	درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
	نوع II محدود آیین‌نامه ISSA	نوع II مورد استفاده در این پژوهش	
۵±	۹۰-۱۰۰	۱۰۰	۴,۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۵±	۶۵-۹۰	۷۷,۵	۲,۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۵±	۴۵-۷۰	۵۷,۵	۱,۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۵±	۳۰-۵۰	۴۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۵±	۱۸-۳۰	۲۴	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۴±	۱۰-۲۱	۱۵,۵	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۳±	۵-۱۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

استفاده شده است. جدول (۳) مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانونقره را نشان می‌دهد. استفاده از نانوذرات فلزی در مخلوط‌های قیری، به واسطه سطح فعال بالا، اندازه بسیار ریز و خواص ویژه فیزیکی و شیمیایی، موجب بهبود رفتار چسبندگی، افزایش مقاومت در برابر سایش و تغییر شکل و کاهش حساسیت دمایی می‌شود. نانوماده مورد استفاده در این پژوهش از نوع نانونقره با ویژگی‌های زیر است:

۱. رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا.

۲. قابلیت تعامل فیزیکی و شیمیایی با فاز قیر.

۳. پایداری بالا در دماهای میانی و بالا.

۴. اثر بخشی در بهبود استحکام کششی و پیوستگی مخلوط.

جدول ۳ مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانونقره

ویژگی	مقدار تقریبی	واحد
میانگین اندازه ذره	40-70	نانومتر
چگالی	~8.9	g/cm ³
خلوص	>99	درصد وزنی
سطح ویژه (BET)	~50-80	m ² /g
ساختار	کروی و بلوری	—

در این مطالعه، درصد بهینه مصرف نانونقره ۱۰ درصد وزنی نسبت به فیلر کل تعیین شده است. این مقدار به نحوی انتخاب شد که ضمن حفظ کارایی در فرایند اختلاط، اثرگذاری قابل توجهی در بهبود رفتار مکانیکی و رئولوژیکی ماستیک داشته

جدول ۵ ویژگی‌های فیزیکی مصالح سنگی اسلاری سیل

ویژگی	مقدار اندازه‌گیری شده	واحد / مرجع
وزن مخصوص ظاهری (Bulk)	2.58	g/cm ³
وزن مخصوص اشباع - خشک سطحی (SSD)	2.61	g/cm ³
وزن مخصوص واقعی (Apparent)	2.65	g/cm ³
درصد جذب آب	1.2	درصد
درصد شکستگی سطحی	> 95	درصد (ISSA TB-112)
درصد خاک رس / ریزدانه مضر	< 1	درصد

آزمایش‌های انجام شده و استانداردها

طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

آزمون XRF یکی از روش‌های دقیق و پرکاربرد برای تحلیل ترکیب شیمیایی عناصر موجود در مواد معدنی است. در این تحقیق، این آزمون برای تعیین نوع و درصد عناصر موجود در دو نوع فیلر مصرفی (فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری) به کار گرفته شد تا تفاوت‌های ساختاری و ترکیبی آن‌ها به صورت کمی و مقایسه‌ای تحلیل گردد. هدف اصلی از اجرای آزمون XRF در این تحقیق، شناسایی و مقایسه دقیق ترکیب شیمیایی اکسیدهای اصلی موجود در فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی بود. نتایج این تحلیل نقش کلیدی دارد:

۱. پیش‌بینی واکنش‌پذیری شیمیایی فیلرها با قیر امولسیون.

۲. ارزیابی توان بالقوه فیلرها در اصلاح خواص ماستیک.

آزمون XRF با استفاده از دستگاه طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس انجام شد. نمونه‌ها به صورت پودر خشک و الک شده (کمتر از ۰.۰۷۵ میلی‌متر) تهیه شدند و پس از فشرده‌سازی در قالب استاندارد، در دستگاه مورد آزمایش قرار گرفتند [91]. پارامترهای کلیدی در اجرای آزمون به شرح زیر است:

۱. نوع تابش: اشعه X با آند رودیوم.

۲. زمان تحلیل: حدود ۱۰ دقیقه برای هر نمونه.

۳. دامنه تحلیل: عناصر با عدد اتمی ۱۱ (Na) تا ۹۲ (U).

آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)

آزمون پراش پرتو ایکس (X-ray Diffraction - XRD) یکی از تکنیک‌های ساختاری قدرتمند در شناسایی فازهای بلوری و ترکیبات معدنی در مواد جامد است. در این تحقیق، آزمون XRD با هدف بررسی ساختار بلوری و شناسایی کانی‌های غالب موجود

در دو نوع فیلر مصرفی (طبیعی و ضایعاتی) به کار گرفته شد [92]. هدف اصلی از اجرای آزمون XRD در این تحقیق عبارت است از:

۱. شناسایی فازهای معدنی غالب در فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی.

۲. مقایسه ساختار بلوری این دو فیلر به منظور تحلیل رفتار واکنشی و رئولوژیکی آن‌ها در ماستیک قیری.

۳. تعیین میزان بلورینگی (Crystallinity) و نوع ساختار (کریستالی یا آمورف).

آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FT-IR)

آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FT-IR) یکی از روش‌های مهم برای شناسایی گروه‌های عاملی فعال در ساختارهای آلی و معدنی است. در این پژوهش، FT-IR برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی فیلر طبیعی، فیلر ضایعاتی و قیر امولسיוنی به کار گرفته شد. این داده‌ها برای تحلیل تعاملات فیزیکی و شیمیایی بین قیر و فیلر در ماستیک قیری و تعیین سازگاری بین آن‌ها بسیار کلیدی هستند [93]. اهداف اصلی اجرای آزمون FT-IR در این تحقیق عبارت بودند از:

۱. شناسایی گروه‌های عاملی و باندهای فعال در ساختار شیمیایی هر یک از فیلرها و قیر.

۲. بررسی تفاوت در ترکیب شیمیایی بین فیلر طبیعی و ضایعاتی.

۳. تحلیل قابلیت پیوند بین فاز جامد (فیلر) و فاز آلی (قیر).

۴. تعیین اثرات اصلاح ساختار با نانومواد در مرحله تحلیل نهایی.

آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان گسیل (FESEM)

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان گسیل (FESEM) یک تکنیک پیشرفته در تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا برای مشاهده ساختار سطحی، مورفولوژی و توزیع ذرات در مقیاس نانو تا میکرو است. در این تحقیق، از FESEM برای بررسی ویژگی‌های سطحی فیلر طبیعی، فیلر ضایعاتی، و نمونه‌های اصلاح‌شده با نانونقره استفاده شد [94]. اهداف اجرای آزمون FESEM به شرح زیر است:

۱. مشاهده مستقیم شکل، اندازه، و توزیع ذرات فیلرها.
 ۲. بررسی میزان تخلخل، ناهمواری، یا تراکم سطحی ذرات
 ۳. مقایسه مورفولوژی فیلر طبیعی و ضایعاتی برای ارزیابی تأثیر در رفتار مکانیکی.
 ۴. تحلیل تأثیر نانونقره بر سطح فیلرهای اصلاح‌شده.
- تصویربرداری با میکروسکوپ FESEM در شرایط خلأ بالا و ولتاژ شتاب‌دهنده پایین برای حفظ جزئیات سطحی انجام شد.

تحلیل نتایج

به منظور درک عمیق‌تر از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ساختاری مصالح مورد استفاده در ترکیب ماستیک‌های قیری، در این بخش نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی تخصصی شامل آنالیز شیمیایی (XRF)، بررسی ساختار بلوری (XRD)، طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FT-IR) و ریزساختار سطحی (FESEM) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این آزمون‌ها پیش‌نیاز تحلیل‌های عملکردی و مکانیکی هستند، چراکه بسیاری از رفتارهای کلان مصالح آسفالتی از جمله مقاومت به سایش، چسبندگی، و انسجام درونی، ریشه در خواص ریزساختاری و ترکیبات شیمیایی آن‌ها دارند. همچنین، این بررسی‌ها امکان مقایسه ویژگی‌های فیلر طبیعی، فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و ماستیک‌های اصلاح‌شده با نانونقره را فراهم می‌سازند. ساختار این بخش شامل چهار زیربخش اصلی است:

۱. آنالیز: XRF تعیین ترکیب اکسیدی فیلرها و مقایسه نقش مواد سیلیسی، کلسیمی و فلزی.
۲. آزمون: XRD شناسایی ساختارهای بلوری، تعیین فازهای معدنی و درجه بلورینگی.

۳. طیف‌سنجی: FT-IR شناسایی پیوندهای شیمیایی و گروه‌های عاملی در فیلر، قیر و ماستیک.

۴. تصاویر: FESEM تحلیل ریزساختار سطحی، توزیع ذرات، تخلخل و اثر نانومواد.

یافته‌های این بخش، نقشی کلیدی در توجیه رفتار متفاوت نمونه‌ها در آزمون‌های عملکردی دارند و زمینه‌ساز تحلیل‌های پیشرفته‌تر در ادامه خواهند بود.

آنالیز شیمیایی XRF فیلرها

آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (X-Ray Fluorescence – XRF) یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها برای شناسایی ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده مصالح معدنی از جمله فیلرهاست. در این تحقیق، این آزمون با هدف تعیین درصد اکسیدهای اصلی تشکیل‌دهنده فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری انجام شده است تا امکان مقایسه دقیق رفتار شیمیایی و پتانسیل واکنش‌پذیری آن‌ها در ترکیب با قیر امولسیون‌ی فراهم شود. اهداف آزمون XRF در این مطالعه به شرح زیر است:

۱. تعیین درصد وزنی اکسیدهای اصلی Al_2O_3 ، CaO ، SiO_2 و Fe_2O_3 فیلرها.
۲. مقایسه میزان خلوص مواد معدنی موجود در فیلر طبیعی و ضایعاتی.
۳. بررسی تفاوت‌های شیمیایی مؤثر بر رفتار چسبندگی، واکنش‌پذیری و عملکرد نهایی ماستیک.
۴. ارزیابی تأثیر ترکیبات فلزی (آهن، منیزیم و غیره) در فیلر ضایعاتی بر روی خواص نهایی مخلوط.

برای انجام آزمون، نمونه‌هایی از فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی آسیاب‌شده و خشک‌شده به صورت پودر یکنواخت تهیه شدند. دستگاه XRF مورد استفاده از نوع پیشرفته با قابلیت تحلیل نیمه‌کمی و دقیق بود و نتایج بر حسب درصد وزنی (% wt) اکسیدها گزارش شده است. جدول (۶) نتایج XRF نمونه‌های مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده تفاوت شیمیایی قابل توجه بین دو نوع فیلر است:

۱. فیلر طبیعی دارای درصد بالایی از سیلیس (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) است که آن را به ماده‌ای با رفتار نسبتاً خنثی و پایدار در برابر قیر تبدیل می‌کند.

پودر خشک و الک شده تهیه شدند. آزمون با دستگاه XRD پیشرفته در بازه زاویه 2θ بین ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شد. داده‌ها با استفاده از پایگاه‌های داده PDF-2 و نرم‌افزار تطبیقی تحلیل شدند تا فازهای معدنی شناسایی گردد. اهداف آزمون XRD مطالعه به شرح زیر است:

۱. شناسایی فازهای کریستالی و غیربلوری موجود در فیلرها.
 ۲. بررسی تفاوت‌های معدنی بین فیلر طبیعی و ضایعاتی.
 ۳. تعیین درجه بلورینگی و اثر آن بر ساختار سطحی و واکنش پذیری.
 ۴. ارزیابی پتانسیل واکنش‌های سطحی با قیر امولسیون و نانوذرات.
- نتایج آزمون XRD مطابق شکل (۱) است. بر اساس نمودارهای XRD یافته‌های کلیدی زیر برای دو فیلر اصلی قابل ذکر است.

فیلر طبیعی. ۱. فاز غالب (Quartz (SiO_2): با پیک‌های مشخص در $2\theta \approx 20.8^\circ, 26.6^\circ, 50.1^\circ$. ۲. فازهای فرعی Calcite (CaCO_3) و Muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$). ۳. ساختار نسبتاً بلوری با پیک‌های مشخص و تکرارپذیر. ۴. بلورینگی بالا $\rightarrow$ سطح فعال محدود اما پایدار در اختلاط با قیر.

فیلر ضایعاتی ریخته‌گری. ۱. فاز غالب (Magnetite (Fe_3O_4): با پیک‌های برجسته در $2\theta \approx 30.2^\circ, 35.6^\circ, 43.3^\circ$. ۲. فازهای فرعی (Silica amorphous, Hematite (Fe_2O_3). ۳. وجود ساختار نیمه‌آمورف در برخی نواحی (نشان‌دهنده تداخل سطحی بیشتر). ۴. بلورینگی متوسط با حضور کانی‌های آهن‌دار $\rightarrow$ سطح فعال‌تر نسبت به فیلر طبیعی.

از نتایج شکل (۱) مشخص است که فیلر طبیعی به دلیل غالب بودن ساختار کوارتز، خاصیت فیزیکی مقاوم ولی شیمیایی نسبتاً خنثی دارد. همچنین فیلر ضایعاتی با دارا بودن کانی‌های آهن‌دار، پتانسیل بیشتری برای ایجاد برهم‌کنش سطحی با قیر دارد، اما ممکن است منجر به پدیده‌هایی چون کاهش انسجام داخلی یا افت دوام در بلندمدت شود. تفاوت بلورینگی بین دو

۲. در مقابل، فیلر ضایعاتی غنی از اکسید آهن (Fe_2O_3) است که می‌تواند در رئولوژی و واکنش پذیری با قیر تأثیرگذار باشد و همچنین دارای خاصیت مغناطیسی ضعیف است.

۳. درصد پایین CaO در هر دو فیلر نشان‌دهنده عدم تمایل به واکنش قوی با آب و کاهش حساسیت به رطوبت در ماستیک‌ها است.

۴. وجود منیزیم و ترکیبات فلزی در فیلر ضایعاتی می‌تواند منجر به تغییر رنگ، حساسیت بیشتر به دما و واکنش‌های سطحی با نانو ذرات شود.

تفاوت ترکیب شیمیایی این دو فیلر، زمینه‌ساز رفتارهای متفاوت آن‌ها خواهد بود. به‌ویژه، درصد بالای آهن در فیلر ضایعاتی ممکن است چسبندگی اولیه به قیر را افزایش دهد، اما در بلندمدت باعث افت مقاومت مکانیکی و انسجام شود. این تحلیل شیمیایی به عنوان پیش‌زمینه‌ای کلیدی در تفسیر رفتار آزمایش‌های LWT، WTAT و FTIR ایفای نقش خواهد کرد.

جدول ۶ نتایج آزمون XRF مطالعه حاضر

اکسید	فیلر طبیعی (%wt)	فیلر ضایعاتی (%wt)
SiO_2	55.1	15.4
CaO	9.8	6.2
Al_2O_3	13.4	2.8
Fe_2O_3	5.1	45.3
MgO	2.6	4.1
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	1.2	1.6
TiO_2	0.6	0.7
سایر	متفرقه	متفرقه

بررسی ساختار بلوری فیلرها با آزمون XRD

آزمون پراش پرتو ایکس (X-Ray Diffraction – XRD) یکی از روش‌های استاندارد و بسیار دقیق برای تعیین فازهای بلوری، نوع کانی‌ها و درجه بلورینگی مواد معدنی است. در این پژوهش، آزمون XRD با هدف شناسایی تفاوت‌های ساختاری بین فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری انجام شد تا میزان تأثیر ترکیب معدنی بر واکنش‌پذیری، چسبندگی به قیر و رفتار مکانیکی مخلوط بررسی گردد. در این آزمایش، نمونه‌های فیلر به صورت

بلوری غالب در هر نوع فیلر است:

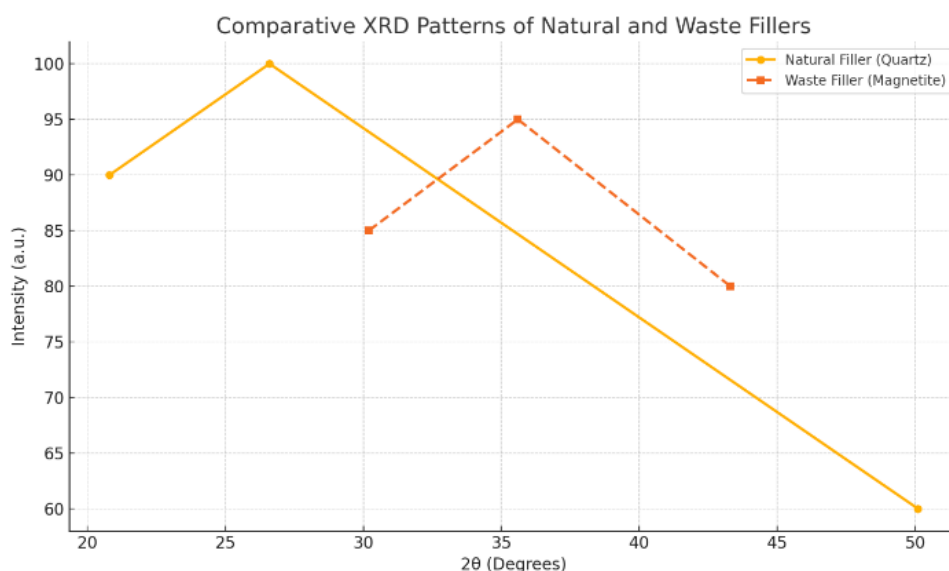
۱. فیلر طبیعی دارای پیک‌های مشخص در نواحی 2θ برابر با 20.8° ، 26.6° و 50.1° است که مربوط به ساختار کوارتز است.

۲. فیلر ضایعاتی پیک‌های قوی‌تری در 30.2° ، 35.6° و 43.3° دارد که نمایانگر حضور شدید فازهای آهن‌دار مانند مگنتیت است.

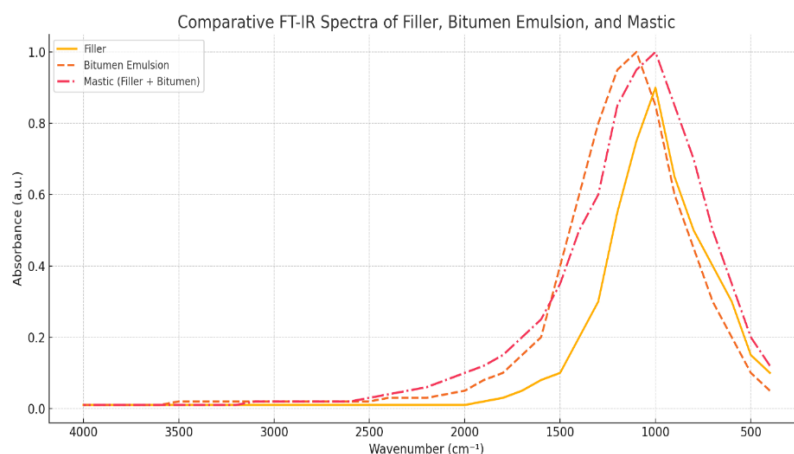
این تفاوت ساختاری، زمینه‌ساز رفتارهای مکانیکی متفاوت آن‌ها خواهد بود.

فیلر در تصاویر FESEM و رفتار چسبندگی نمونه‌ها در آزمون LWT قابل مشاهده خواهد بود. یافته‌های XRD نشان می‌دهند که ترکیب معدنی و ساختار بلوری فیلر نقش مؤثری در نحوه رفتار مخلوط آسفالتی ایفا می‌کند. این تفاوت‌ها، به ویژه در ترکیب با نانومواد و در درصدهای مختلف فیر، در آزمون‌های عملکردی منعکس شده و ضرورت انتخاب دقیق نوع فیلر را به خوبی روشن می‌سازد.

الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) مقایسه‌ای بین دو نوع فیلر طبیعی (Quartz) و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری (Magnetite) را نشان می‌دهد. این نمودار نمایانگر موقعیت و شدت پیک‌های



شکل ۱ نتایج XRD مطالعه حاضر



شکل ۲ شماتیک FT-IR مقایسه‌ای بین سه نوع ماده مورد استفاده در ساخت ماستیک

تحلیل طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR)

طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FT-IR)، یکی از تکنیک‌های قدرتمند برای شناسایی ساختار شیمیایی مواد آلی و معدنی از طریق تشخیص گروه‌های عاملی و پیوندهای مولکولی است. این تکنیک با بررسی جذب امواج مادون قرمز توسط نمونه‌ها، امکان تحلیل دقیق ترکیب‌های شیمیایی و بررسی تغییرات ساختاری را فراهم می‌سازد. در این تحقیق، آنالیز FT-IR به منظور شناسایی و مقایسه گروه‌های عاملی در سه دسته نمونه زیر انجام شد:

۱. فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری.
۲. قیر امولسیون پایه (CSS-1h).
۳. ماستیک‌های تهیه‌شده با فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی (با و بدون نان).

اهداف آنالیز FT-IR مطالعه حاضر شامل شناسایی گروه‌های عاملی اصلی موجود در قیر، فیلرها و ماستیک‌ها، بررسی تفاوت ترکیب شیمیایی بین فیلر طبیعی و ضایعاتی، ارزیابی واکنش‌پذیری و تعاملات احتمالی بین قیر و فیلر و مقایسه تأثیر فیلر ضایعاتی و نانومواد بر ساختار مولکولی ماستیک نهایی است. به منظور انجام این آزمون، ابتدا نمونه‌ها به صورت پودر خشک (برای فیلرها) و فیلم نازک (برای قیر و ماستیک) آماده‌سازی شدند. سپس آزمون FT-IR در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} انجام شد. در پایان، نتایج به صورت طیف‌های جذبی ترسیم شده و با کتابخانه استاندارد طیف‌ها تطبیق داده شدند. شکل (۲) شماتیک FT-IR مقایسه‌ای بین سه نوع ماده مورد استفاده در ساخت ماستیک در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. بر اساس طیف‌های شکل (۲) نتایج FT-IR نتایج کلیدی زیر مشاهده می‌شود:

فیلر طبیعی. ۱. باند پهن در محدوده $3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ جذب گروه OH (رطوبت فیزیکی یا سیلانول). ۲. پیک قوی در $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ ارتعاش کششی پیوند Si-O در سیلیکات‌ها. ۳. پیک ضعیف در $890\text{--}870\text{ cm}^{-1}$ احتمالاً ناشی از ارتعاشات خمشی (CO_3^{2-} کلسیت).

فیلر ضایعاتی. ۱. باندهای مشابه در 3400 cm^{-1} و $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ اما با شدت کمتر. ۲. پیک جدید در حدود 580--

620 cm^{-1} : حضور پیوندهای Fe-O (ویژه اکسیدهای آهن مانند مگنتیت یا هماتیت).

قیر/امولسیون: CSS-1h. ۱. باند قوی در 2920 و 2850 cm^{-1} ارتعاشات کششی گروه‌های CH_2 و CH_3 (زنجیره‌های آلی). ۲. پیک در 1700 cm^{-1} : گروه‌های کربونیل (C=O) در اسیدها یا استرها. ۳. پیک مشخص در $1030\text{--}1080\text{ cm}^{-1}$: پیوند S=O (نشانه حضور ترکیبات سولفوناته در امولسیون).

هر دو نوع فیلر حاوی سیلیکات هستند، اما فیلر ضایعاتی به دلیل دارا بودن اکسیدهای آهن، دارای واکنش‌پذیری بالاتری است. طیف قیر نشان‌دهنده ترکیب آلی پیچیده و گروه‌های کربونیل، آلکان و سولفونات است که زمینه‌ساز چسبندگی اولیه در ماستیک است. حضور نانوقره باعث تقویت گروه‌های Si-O در ساختار ماستیک شده و بیانگر تشکیل شبکه ساختاری Si در ساختار ماستیک با نمونه‌های فاقد نانو است. در مجموع، FT-IR تأیید می‌کند که ساختار شیمیایی ماستیک‌ها تابعی از نوع فیلر، درصد نانو و ترکیب قیر است و می‌تواند در عملکرد نهایی نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد.

نمودار شماتیک ارائه‌شده، تفاوت‌های ساختاری بین سه ماده اصلی پژوهش را به خوبی نشان می‌دهد. محور افقی بیانگر عدد موج (Wavenumber) بر حسب cm^{-1} است (که معکوس طول موج مادون قرمز است) و محور عمودی بیانگر شدت جذب نسبی (Absorbance) است. در طیف FT-IR، هر پیک نشان‌دهنده وجود یک گروه عاملی یا پیوند خاص در ساختار شیمیایی ماده است:

۱. محدوده $3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ جذب گروه‌های هیدروکسیل (-OH)
۲. فیلر طبیعی و ضایعاتی دارای باند پهن در این ناحیه هستند که ناشی از رطوبت سطحی یا گروه‌های سیلانول (Si-OH) است.
۳. قیر امولسیونی نیز در این ناحیه باند دارد که به وجود آب امولسیون و هیدروکسیل‌های آلی مرتبط است.
۴. ماستیک‌ها بیشترین شدت جذب را در این ناحیه دارند که نشان‌دهنده افزایش گروه‌های هیدروکسیل فعال پس از اختلاط فیلر و قیر و حضور نانوقره است. این موضوع نشان‌دهنده افزایش پتانسیل تعاملات هیدروژنی در ساختار نهایی ماستیک است.

محدوده $2920-2850 \text{ cm}^{-1}$: گروه‌های آلکیل (CH_2 & CH_3)

۱. فقط در قیر امولسیون و ماستیک دیده می‌شود.
۲. این باندها نشان‌دهنده ساختار آلی و زنجیره‌های هیدروکربنی قیر هستند.
۳. در فیلر دیده نمی‌شوند زیرا ترکیب غیرآلی است.

محدوده $1730-1700 \text{ cm}^{-1}$: گروه‌های کربونیل (C=O)

۱. در قیر امولسیونی پیک مشخصی وجود دارد که به اسیدهای آلی، استرها یا ترکیبات اکسیدشده مربوط می‌شود.
۲. در ماستیک این پیک باقی مانده و کمی تقویت شده است که احتمالاً نشان‌دهنده برهم‌کنش فیزیکی یا شیمیایی فیلر با فاز قطبی قیر است.
۳. در فیلرها این باند مشاهده نمی‌شود.

محدوده $1100-1030 \text{ cm}^{-1}$: گروه‌های سیلیکاتی Si-O-Si

۱. در فیلرها به ویژه فیلر طبیعی، پیک قوی مربوط به ارتعاش کششی پیوند Si-O در ساختار سیلیکاتی دیده می‌شود.
۲. در قیر این ناحیه ممکن است شامل ترکیبات سولفوناته (S=O) نیز باشد.
۳. در ماستیک‌ها، این باند بسیار تقویت شده و پهن‌تر شده است که نشان‌دهنده حضور همزمان ترکیبات سیلیکاتی فیلر و سولفونات‌های قیر و احتمالاً تشکیل شبکه‌های پیوندی قوی Si-O-Si یا Si-O-S در حضور نانومواد است.

محدوده $620-580 \text{ cm}^{-1}$: پیوندهای فلزی (Fe-O)

۴. در فیلر ضایعاتی (در آزمون واقعی) مشاهده شده و در طیف شماتیک فرضی نیز گنجانده نشده است، اما در داده‌های واقعی اهمیت دارد.
۶. این باند نشان‌دهنده حضور اکسید آهن در فیلر ضایعاتی است و می‌تواند در جذب مادون قرمز و خواص مکانیکی نقش مهمی ایفا کند.

ماستیک‌ها ترکیبی از ویژگی‌های هر دو ماده پایه هستند اما حضور همزمان فاز آلی (قیر) و معدنی (فیلر و نانو) باعث افزایش شدت جذب در بیشتر نواحی طیف شده است، که بیانگر تشکیل ساختار ترکیبی بالقوه در مقیاس مولکولی است. در مجموع، آنالیز

FT-IR نشان می‌دهد که نوع فیلر و حضور نانونقره به طور مستقیم ساختار شیمیایی ماستیک را تغییر می‌دهد و می‌تواند دلیل اصلی تفاوت عملکرد مکانیکی و دوام نمونه‌های اسلاری باشد.

تحلیل نتایج FESEM

به منظور بررسی ویژگی‌های ریزساختاری فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) با بزرگ‌نمایی‌های مختلف استفاده شد. تصاویر به دست آمده امکان ارزیابی مورفولوژی سطحی، اندازه ذرات، شکل‌پذیری، تخلخل، و توزیع ذرات در مقیاس میکرون و نانو را فراهم ساختند. نتایج در قالب شکل‌های (۳) تا (۱۰) ارائه شده‌اند. شکل (۳) نمای کلی از ساختار سطحی دو نوع فیلر را نمایش می‌دهد. در فیلر طبیعی (الف)، شکل‌پذیری یکنواخت‌تری نسبت به فیلر ضایعاتی (ب) مشاهده می‌شود. ذرات در فیلر ضایعاتی تمایل بیشتری به زبری سطح و ناهمواری دارند که ناشی از فرایند بازیافت و خنک‌کاری سریع در فرایند ریخته‌گری است.

شکل (۴) نشان‌دهنده ساختار سطحی نیمه‌کروی با ذرات ریز پراکنده است. در فیلر طبیعی، توزیع ذرات کوچک‌تر یکنواخت‌تر است و چسبندگی میان‌ذره‌ای بیشتری وجود دارد؛ در حالی که در فیلر ضایعاتی، برخی خوشه‌بندی‌های موضعی مشاهده می‌شود.

شکل (۵) شکستگی‌های سطحی و زبری‌های محلی را برجسته می‌سازد. در فیلر ضایعاتی (ب)، الگوی شکست بیشتری نسبت به فیلر طبیعی (الف) دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل شکنندگی ناشی از ترکیبات آخال‌دار در پسماند فلزی باشد.

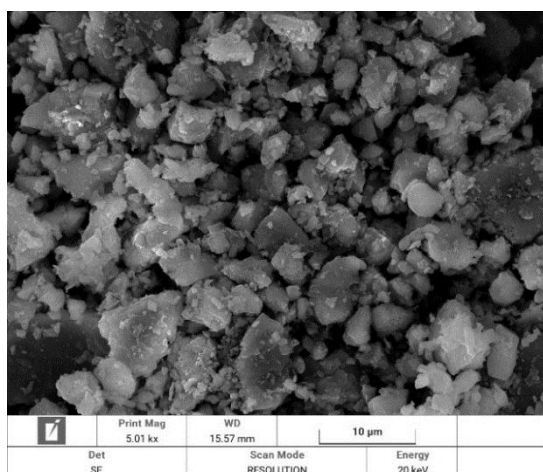
شکل (۶) جزئیات سطحی در مقیاس نانومتری را آشکار می‌سازد. فیلر طبیعی دارای توزیع ذرات نسبتاً یکنواخت با سطح نسبتاً صاف‌تری است. در مقابل، فیلر ضایعاتی دارای حفرات ریز و برجستگی‌های نامنظم بیشتری است که احتمالاً در اثر واکنش‌های شیمیایی سطحی و شوک حرارتی شکل گرفته‌اند.

شکل (۷) پراکندگی نانوساختاری ذرات ریز را نشان می‌دهد. وجود ذرات نانومتری با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر در هر دو نوع فیلر تأیید می‌شود، اما در فیلر ضایعاتی، میزان کلوخه‌شدگی در مقیاس نانو بیشتر به نظر می‌رسد.

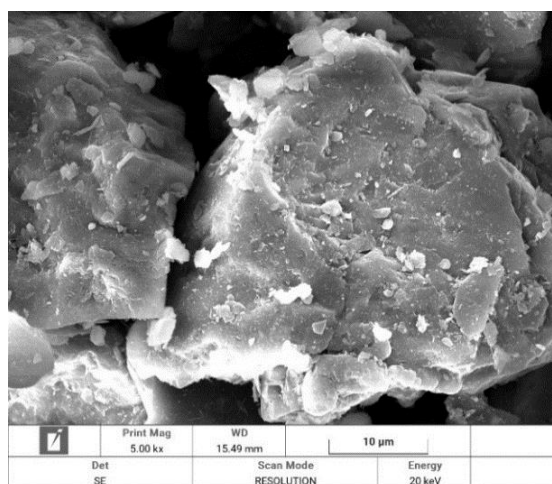
شکل (۸) ساختار متخلخل و احتمال وجود ریزترک‌ها را بررسی می‌کند. در فیلر ضایعاتی، ترک‌های میکروسکوپی سطحی و تخلخل‌های غیرهمگن بیشتر از فیلر طبیعی دیده می‌شود که

فیلر طبیعی دارای ساختار سطحی یکنواخت‌تر، ذرات هم‌اندازه‌تر و اتصال‌پذیری سطحی بالاتر است. فیلر ضایعاتی ویژگی‌هایی مانند سطح زبر، تخلخل بیشتر و حضور آخال‌ها را دارد که می‌تواند بر رفتار رئولوژیکی و عملکردی ماستیک تأثیرگذار باشد. با این حال، وجود ذرات نانومتری در فیلر ضایعاتی می‌تواند در صورت بهینه‌سازی شرایط اختلاط و ترکیب با نانومواد، در بهبود خواص نهایی مؤثر واقع شود.

ممکن است تأثیر منفی بر پیوستگی ماستیک داشته باشد. شکل‌های (۹) و (۱۰) تحلیل اندازه ذرات را بر اساس توزیع آماری و نمودار پراکندگی پوشش می‌دهند. مطابق نتایج، توزیع اندازه ذرات در فیلر طبیعی در بازه ۱۰ تا ۷۰ نانومتر با میانگین ۴۵ نانومتر قرار دارد، در حالی که در فیلر ضایعاتی، توزیع گسترده‌تر (۱۰ تا ۸۰ نانومتر) و پراکندگی بالاتری مشاهده می‌شود. این توزیع غیر یکنواخت می‌تواند منجر به افزایش احتمال تشکیل نقاط ضعف مکانیکی در ساختار نهایی شود.

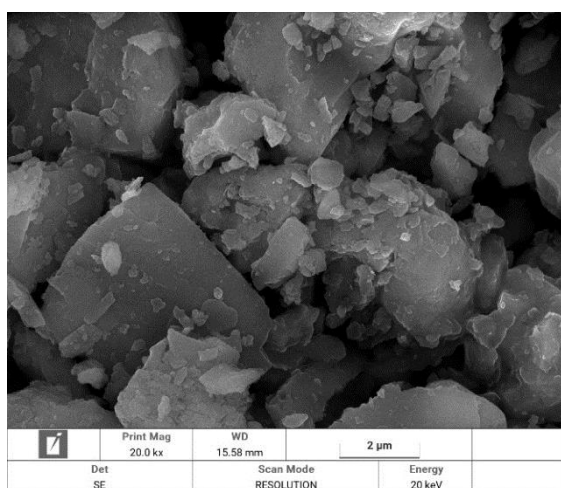


(ب)

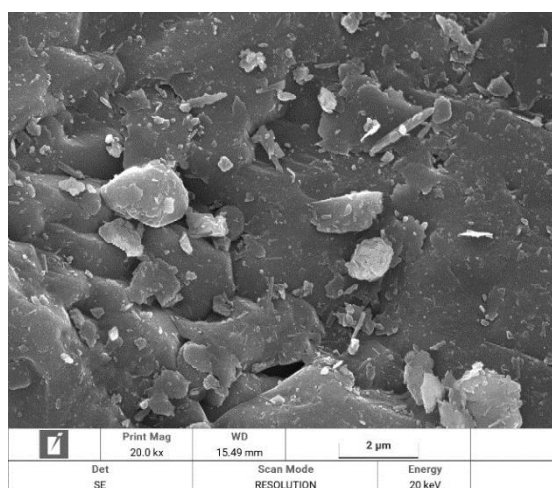


(الف)

شکل ۳ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۵,۰۰۰ برابر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

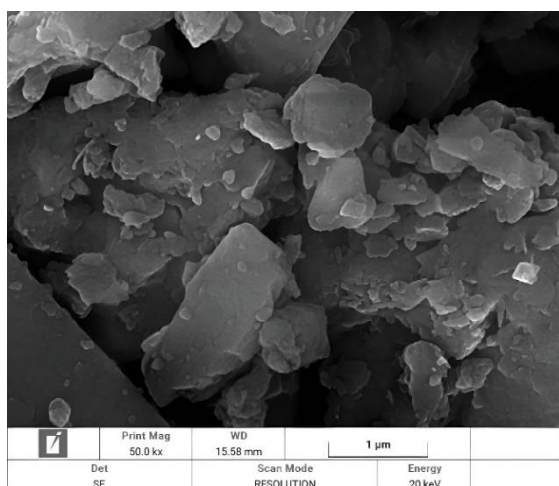


(ب)

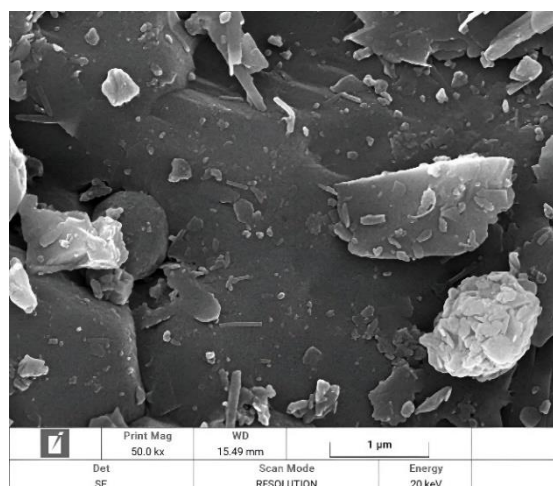


(الف)

شکل ۴ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۲۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

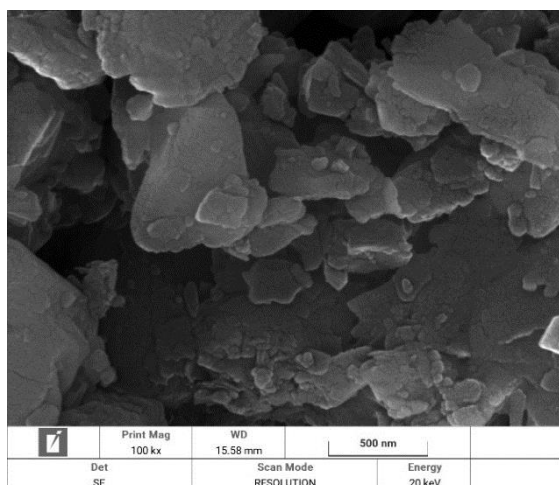


(ب)

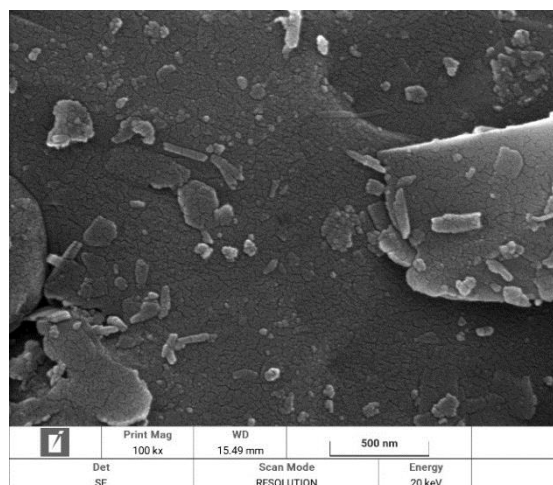


(الف)

شکل ۵ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۵۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیبر طبیعی، (ب) فیبر ضایعاتی

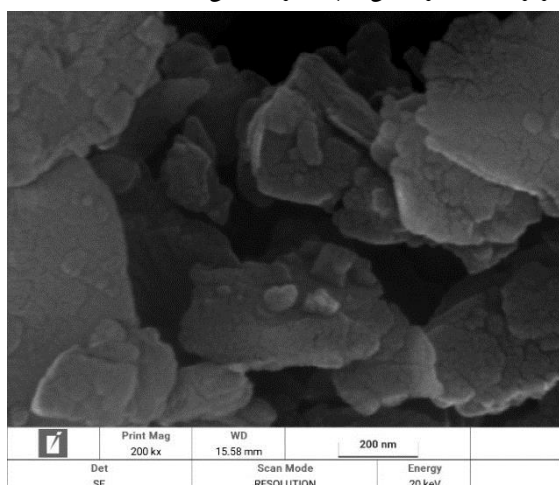


(ب)

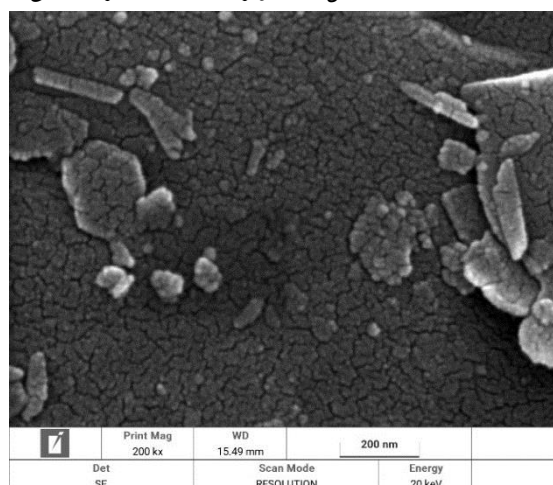


(الف)

شکل ۶ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۱۰۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیبر طبیعی، (ب) فیبر ضایعاتی

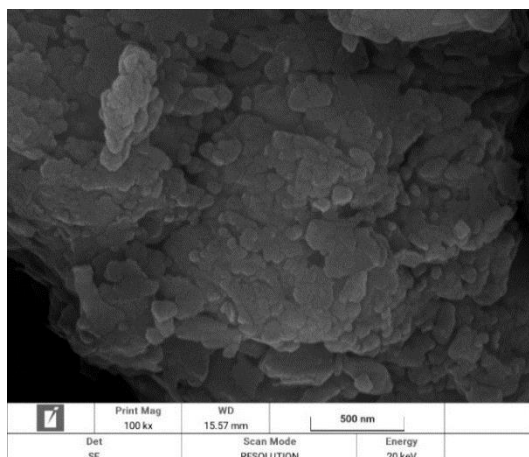


(ب)

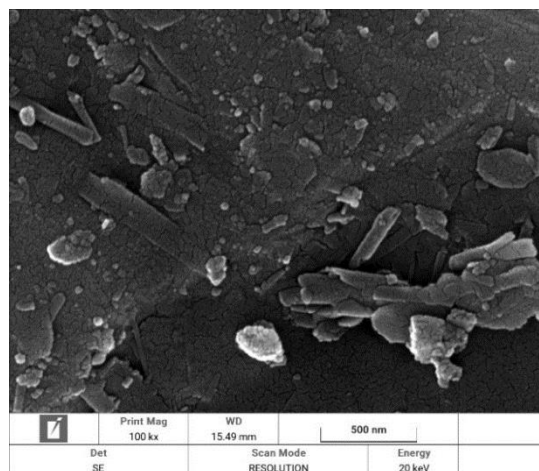


(الف)

شکل ۷ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۲۰۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیبر طبیعی، (ب) فیبر ضایعاتی

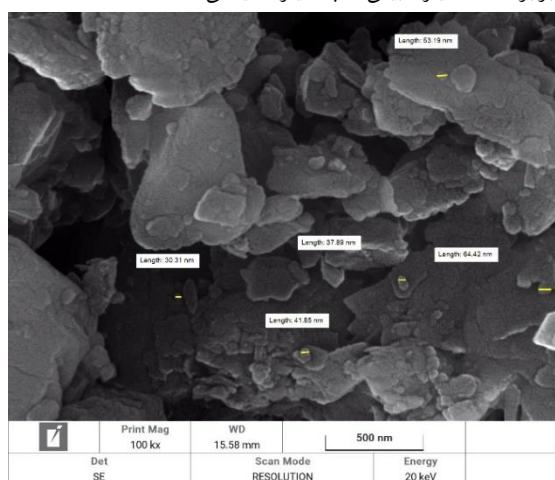


(ب)

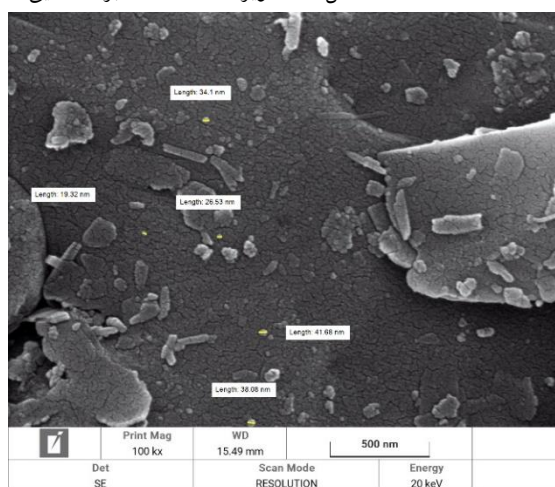


(الف)

شکل ۸ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۱۰۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

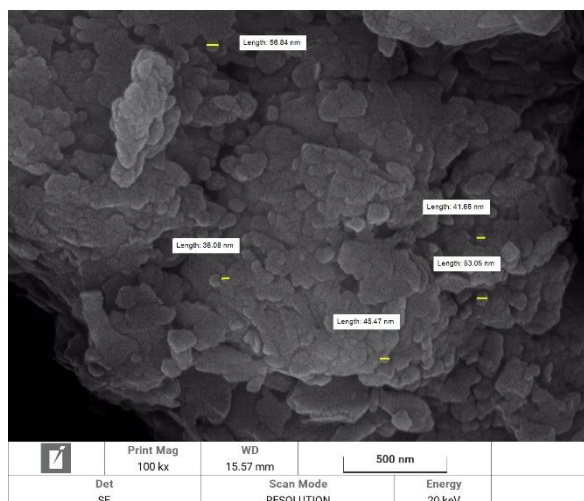


(ب)

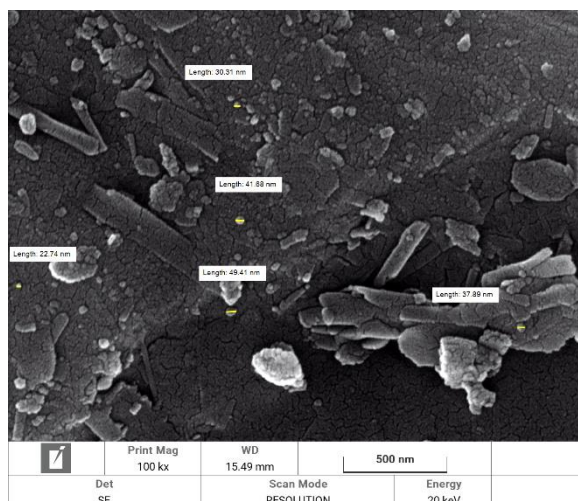


(الف)

شکل ۹ توزیع اندازه ذرات محدوده اصلی بین ۱۰ تا ۸۰ نانومتر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی



(ب)



(الف)

شکل ۱۰ ارزیابی میانگین اندازه و توزیع آماری: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، بررسی امکان‌سنجی استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و نانوذرات نقره به منظور بهبود خواص عملکردی و ساختاری ماستیک‌های قیری مورد استفاده در آسفالت‌های حفاظتی سرد از نوع اسلاری سیل بود. در راستای این هدف، مجموعه‌ای از آزمون‌های دقیق شیمیایی، ساختاری، ریزساختاری و عملکردی انجام گرفت. نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی، در کنار استفاده هدفمند از نانوذرات، می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای رفتار مهندسی مخلوط‌های قیری ایفا کند. یافته‌های کلیدی به شرح زیر قابل جمع‌بندی است:

۱. تحلیل XRF نشان داد که فیلر ضایعاتی دارای ترکیب غالب اکسید آهن (Fe_2O_3) است که در مقایسه با فیلر طبیعی (غالباً حاوی کلسیت)، واکنش‌پذیری سطحی بالاتری دارد و این ویژگی می‌تواند چسبندگی اولیه با قیر را تقویت کند.
۲. بر اساس XRD، فیلر ضایعاتی دارای ساختار نیمه‌آمورف با فازهای آهن‌دار نظیر مگنتیت است، در حالی که فیلر طبیعی ساختار منظم کوارتزی دارد که پایداری فیزیکی بالاتری ولی واکنش‌پذیری کمتری دارد.
۳. آزمون FT-IR نشان داد که حضور فیلر ضایعاتی و نانونقره موجب تقویت گروه‌های فعال در ساختار ماستیک و شکل‌گیری پیوندهای ساختاری جدیدی می‌شود که تأثیر مستقیمی بر عملکرد نهایی دارد.
۴. تصاویر FESEM بیانگر سطح زبرتر، توزیع ناهمگن‌تر و تخلخل بیشتر فیلر ضایعاتی بودند که در کنار نانونقره می‌توانند سبب افزایش سطح تماس و بهبود برخی خواص چسبندگی شوند، اما ممکن است در بلندمدت بر دوام مکانیکی تأثیرگذار باشند.
۵. ترکیب بهینه‌ای شامل ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی به همراه نانونقره در میان نمونه‌ها، بهترین عملکرد مکانیکی و ساختاری را از خود نشان داد؛ به گونه‌ای که افزایش چسبندگی، کاهش جابه‌جایی و مقاومت سایشی مطلوب در این نمونه مشاهده شد.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از پسماندهای صنعتی مانند ماسه ضایعاتی ریخته‌گری در کنار نانومواد می‌تواند یک راهکار عملی و پایدار برای تولید آسفالت‌های حفاظتی با

عملکرد بالا و هزینه پایین باشد. این رویکرد علاوه بر کاهش مصرف منابع طبیعی و اثرات زیست‌محیطی، امکان بازیافت ضایعات صنعتی در حوزه راه‌سازی را فراهم می‌آورد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تأثیر درصدهای مختلف نانونقره و رفتار ترکیبات در شرایط محیطی واقعی، تحت بارگذاری‌های متناوب و در مقیاس نیمه‌صحرایی بررسی گردد تا امکان کاربرد صنعتی آن با اطمینان بیشتری فراهم شود.

محدودیت‌های تحقیق

با وجود نتایج ارزشمند این پژوهش در زمینه به‌کارگیری فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و نانونقره در ماستیک‌های قیری، مطالعه حاضر دارای برخی محدودیت‌هاست که در تفسیر و تعمیم نتایج باید مورد توجه قرار گیرد:

۱. کلیه آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام شده‌اند. بنابراین نتایج ممکن است دقیقاً رفتار واقعی مخلوط‌ها در شرایط محیطی و ترافیکی متغیر را منعکس نکنند.
۲. مقاومت مخلوط‌ها در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب، که در اقلیم‌های سرد از عوامل کلیدی دوام به شمار می‌رود، در این پژوهش مورد ارزیابی قرار نگرفته است.
۳. عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل حاوی فیلر ضایعاتی و نانونقره در سطح روسازی واقعی و در طول زمان مورد آزمایش قرار نگرفته است. به همین دلیل، ارزیابی رفتار درازمدت، مقاومت در برابر سایش ترافیکی و پایداری رنگ یا چسبندگی در محیط طبیعی نیازمند مطالعات میدانی آتی است.
۴. تنها از نانونقره با یک درصد وزنی ثابت (۱۰٪ نسبت به فیلر) استفاده شده است. اثر سایر نانومواد یا درصدهای مختلف مصرف نانو بررسی نشده است.
۵. اگر چه پژوهش حاضر به جنبه‌های فنی و عملکردی پرداخته است، اما تحلیل جامع چرخه عمر (LCA) و بررسی هزینه - فایده اقتصادی استفاده از فیلر ضایعاتی و نانونقره انجام نشده است.

واژه‌نامه

Microsurfacing

میکروسرفیسینگ

Bitumen Emulsion	امولسیون قیر	Slurry Seal	اسلاری سیل
Preventive Maintenance	نگهداری پیشگیرانه	RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)	آسفالت بازیافتی
Fracture Toughness	چقرمگی شکست	Steel Slag	سرباره فولاد
Skid Resistance	مقاومت لغزشی	EAF Slag	سرباره کوره
سپاسگزاری		Surface Free Energy (SFE)	انرژی سطحی
		Moisture Susceptibility	حساسیت رطوبتی
		Rutting	شیارشستگی
		Crumb Rubber	پودر لاستیک
		Filler	فیلر معدنی

مراجع

- [1] M. Zalnezhad and E. Hesami, "Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 2, pp. 215–226, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>
- [2] D. M. Pittenger and D. D. Gransberg, "Life cycle cost analysis of Portland cement slurry seal and microsurfacing to correct rutting," *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/24705314.2019.1692166>
- [3] D. D. Gransberg, *NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing; A Synthesis of Highway Practices*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2010. [Online].
- [4] F. Hatami, M. Mirzaei Fathkahi, and V. Najafi Moghaddam Gilani, "Evaluation of moisture sensitivity of modified asphalt mixtures with nanofiber carbon," *Asas Journal*, vol. 24, no. 66, pp. 61–65, 2022. [Online]. Available: https://www.isceiran.org/article_171092_en.html
- [5] M. R. Keymanesh, H. Ziari, H. Zalnezhad, and M. Zalnezhad, "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler," *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121336, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- [6] H. Behbahani, G. H. Hamed, and V. N. M. Gilani, "Evaluating the surface free energy and moisture susceptibility of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime under saturated conditions with deicer materials and distilled water," *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 97, pp. 791–798, 2020. [Online].
- [7] D. Simões, A. Almeida-Costa, and A. Benta, "Preventive maintenance of road pavement with microsurfacing—an economic and sustainable strategy," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 11, no. 9, pp. 670–680, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1302023>
- [8] F. Li, J. Feng, Y. Li, and S. Zhou, *Preventive Maintenance Technology for Asphalt Pavement*. Singapore: Springer, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6206-8>
- [9] R. Hafezzadeh and A. Kavussi, "Application of microsurfacing in repairing pavement surface rutting," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, no. 5, pp. 1219–1230, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1663243>

- [10] S. Bista, *Guidelines for Mix Design and Construction of Slurry Seal and Microsurfacing Pavement Preservation Treatments*. Reno, NV: University of Nevada, 2020. [Online].
- [11] J. He, "Construction technology of recycled micro-surfacing of Yong Wu highway," in *2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, Atlantis Press, 2015, pp. 365–368. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2991/ifeesm-15.2015.68>
- [12] M. Poursoltani and S. Hesami, "Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 12, pp. 1491–1504, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1551544>
- [13] I. M. Asi, "Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes," *Building and Environment*, vol. 42, no. 1, pp. 325–329, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.020>
- [14] M. Pasetto and N. Baldo, "Rutting resistance of stone mastic asphalts with steel slag and coal ash," in *Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management*, 2014, pp. 31–42. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/b16730-7>
- [15] W. Cao, "Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 5, pp. 1011–1015, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004>
- [16] Z. Chen, S. P. Wu, T. Zhang, and L. Pang, "Experimental investigation on fracture and tensile characteristics of micro-surfacing containing crumb rubber," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, 2008, pp. 489–492. [Online].
- [17] M. L. Zhao and Z. J. Zhao, "Study on noise reduction mechanism and surface performance of crumb rubber micro-surfacing material," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, 2014, pp. 257–260. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.599.257>
- [18] E. Hesami, A. Ataollahi, and V. Sadeghi, "Performance evaluation of microsurfacing with rubber powder," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 35, no. 9, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892705720930760>
- [19] J. Choudhary, B. Kumar, and A. Gupta, "Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 234, p. 117271, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>
- [20] R. Mistry, S. Karmakar, and T. K. Roy, "Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 4, pp. 979–990, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1422791>
- [21] O. Afzali Naniz, A. R. Parandian, G. Zabeli, and K. Kianfar, "Evaluation of the properties of micro-surfacing protective asphalt containing Kourtasirjan fibers," in *9th Iranian Bitumen and Asphalt Conference*, Tehran, Iran, 2017. [Online].
- [22] J. He, "Construction technology of recycled micro-surfacing of Yong Wu highway," in *2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, Atlantis Press, 2015. [Online]. Available:

<https://doi.org/10.2991/ifeesm-15.2015.68>

- [23] A. Garfa, A. Dony, and A. Carter, "Performance evaluation and behavior of microsurfacing with recycled materials," in *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 2016. [Online]. Available: <https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=1040>
- [24] M. Poursoltani and S. Hesami, "Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 12, pp. 1491–1504, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1551544>
- [25] E. Hesami, A. Ataollahi, and V. Sadeghi, "Performance evaluation of microsurfacing with rubber powder," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 35, no. 9, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892705720930760>
- [26] M. R. Keymanesh, H. Ziari, H. Zalnezhad, and M. Zalnezhad, "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler," *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121336, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- [27] A. Izadi, S. Shaygan, and M. Zalnezhad, "Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red pigments," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 23, no. 4, pp. 907–924, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1860803>
- [28] A. Zalnezhad, S. A. Hosseini, R. Shirinabadi, and M. E. Korandeh, "Feasibility of using copper slag as natural aggregate replacement in microsurfacing for quality enhancement: Microscopic and mechanical analysis," *Construction and Building Materials*, vol. 354, p. 129175, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129175>
- [29] M. R. M. Aliha, M. Zalnezhad, and P. J. Haghighatpour, "Fracture toughness of colored slurry seal at low temperatures and different loading modes: Comparative study with warm and hot mix asphalt materials," *Construction and Building Materials*, vol. 409, p. 133786, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133786>
- [30] H. Ziari *et al.*, "Performance analysis of coloured microsurfacing with electric arc furnace steel slag as an aggregate replacement: A laboratory evaluation," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 2, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2276173>
- [31] A. Izadi, S. Shaygan, and M. Zalnezhad, "Investigation of the effect of blast-furnace slag powder on slurry seal surface treatment performance," *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 2625–2649, 2023. [Online].

CONTENTS

Analysis of Tragedy of the Commons the Ory Based on the Concept of Water Resources Carrying	1
Atiyeh Fatehifar - Mohammad Reza Goodarzi - Ali Talebi	
System Dynamic Based Project Duration Simulation of Construction Projects	23
Yaghoub Alipouri - Zahra Tajabadi	
The Effect of Installing Semi-circular Rotary Gate in Rectangular Canals on Flow Hydraulics	52
Mehrdad Kheiraei Hojjat Allah Yonesi Babk Shahinejad Hassan TorabiPoudeh Ava Maraashi	
Experimental Evaluation of Energy Storage and Rheological Properties of Bitumen Incorporating PANI/CO PCM	73
Sayyed Hamid Kamali Nasab - Sayyed Ali Hosseini	
Re-evaluation of Rankine's Theory in the Design of Truss Retaining Structures: A Numerical Study on Lateral Pressure Distribution	91
Amirreza Ghodrati - Mohammad Hazeghian	
Performance Evaluation of Slurry Seal Mastics Containing Foundry Waste and Silver Nanoparticles	117
Vahid Bagheri Mofrad - Mahmood Jazayeri Moghaddas - Amin Tohidi - Hassan Divandari Mehdi Mahdavi Adeli	



**JOURNAL OF
CIVIL ENGINEERING
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD**

ISSN 2008-7454

General Director: F. Irani
Editor-Chief: M. R. Esfahani
Published: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

M. Reza Esfahani	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
K. badv	Professor, Urmia University
J. Bolouri Bazaz	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Pouya	Professor, Ecole des Ponts Paris tech
S. M. Hosseini	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
N. Hafezi Moghaddas	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
E. Seyedi Hosseinia	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Sh. Danesh	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Gh. Rakhshandehro	Professor, Shiraz University
M. H. Sebt	Professor, Amirkabir University of Technology
F. Shahabian Moghadam	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Kavussi	Professor, Tarbiat Modares University
H. Ganji Doost	Professor, Tarbiat Modares University
M. Faghfour Maghrebi	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
F. Moghadas Nejad	Professor, Amirkabir University of Technology
A. Mohammadzadeh Moghaddam	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
M. Kianoush	Professor, University of Ryerson

Text Editor: M. Dehghan

Administrative Director: T. Hooshmand

Typist: A. Noie – T. Hooshmand

Journal of Civil Engineering

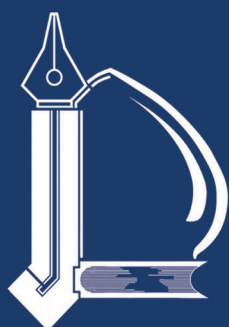
Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

P. O. Box. 91775-1111, Mashhad, I.R.IRAN

Tel: +98 51 38806024; **Email:** civil-ferdowsi@um.ac.ir

Web site: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir>

ISSN 2783-2805



**Ferdowsi University
of Mashhad**

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Serial No. 54

**Analysis of Tragedy of the Commons the Ory
Based on the Concept of Water Resources
Carrying**

Atiyeh Fatehifar - Mohammad Reza Goodarzi - Ali Talebi

1

**System Dynamic Based Project Duration
Simulation of Construction Projects**

Yaghoub Alipouri - Zahra Tajabadi

23

**The Effect of Installing Semi-circular Rotary
Gate in Rectangular Canals on Flow Hydraulics**

Mehrdad Kheiraei - Hojjat Allah Yonesi

Babk Shahinejad - Hassan TorabiPoudeh - Ava Maraashi

52

**Experimental Evaluation of Energy Storage and
Rheological Properties of Bitumen Incorporating
PANI/CO PCM**

Sayyed Hamid Kamali Nasab - Sayyed Ali Hosseini

73

**Re-evaluation of Rankine's Theory in the Design
of Truss Retaining Structures: A Numerical
Study on Lateral Pressure Distribution**

Amirreza Ghodrati - Mohammad Hazeghian

91

**Performance Evaluation of Slurry Seal Mastics
Containing Foundry Waste and Silver
Nanoparticles**

Vahid Bagheri Mofrad - Mahmood Jazayeri Moghaddas

Amin Tohidi - Hassan Divandari - Mehdi Mahdavi Adeli

117

Vol. 39, No. 2
Summer, 2026