



نشریه مهندسی عمران فردوسی (نشریه دانشکده مهندسی)

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۳۰

- ۱ شبیه سازی سه بعدی پدیده رهایی متناوب گردابه ها و انتقال رسوب بستر
حول موانع در معرض جریان با استفاده از Flow3D
نازیلا کاردان - حبیب حکیم زاده - یوسف حسن زاده
- ۲۱ راهکار نوین برای ارزیابی شرایط کارگاه های ساختمان های بلندمرتبه مشهد
با رویکرد HSE (مطالعه موردی پروژه های ساخت و ساز)
پوریا ایلدرآبادی - امیررضا مهردوست - جواد علامتیان
- ۳۹ تحلیل پایداری یک تونل در شرایط هیدروستاتیک با استفاده از روش های مختلف
قابلیت اعتماد در نرم افزارهای Risk@ و RT
هادی فتاحی - فاطمه جیریایی شراهی
- ۵۵ بررسی اثر آهک و نانو آهک بر ویژگی های تراکمی و مقاومتی ماسه ساحلی چالوس
رضا رضوانی توچاهی - میلاد عزیزی - پژمان نوپارس - علی نبی زاده
- ۷۷ مطالعه آزمایشگاهی پروفیل های سرعت و غلظت جریان غلیظ در قوس رودخانه
مرضیه محمدی - مهدی قمشی
- ۸۹ بررسی رفتار لرزه ای ساختمان های فلزی مجهز به مهاربند مرکزگرایی
تلسکوپی دوطرفه
محمدحسین برادران خلخالی - عباس کرم الدین



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 فریدون ایرانی	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 شهابیان مقدم	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر امیر کاووسی	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر حسین 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 محمدرضا کیانوش	استاد، University of Ryerson

ویراستار ادبی: دکتر یوسف بینا

مسئول دفتر نشریه: تکتّم هوشمند

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

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز (ISC) نمایه می‌شود. <http://www.srlst.com>

نشانی: مشهد - دفتر نشریه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی: 91775-1111

تلفاکس: 051-38806024 پست الکترونیکی: ejour@um.ac.ir وب سایت: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir>

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

- شبيه‌سازی سه‌بعدی پدیده‌ رهایی متناوب گردابه‌ها و انتقال رسوب بستر حول موانع در معرض جریان با استفاده از Flow3D
- ۱ نازیلا کاردان - حبيب حکيم زاده - يوسف حسن زاده
- راهکار نوین برای ارزیابی شرایط کارگاه‌های ساختمان‌های بلندمرتبه مشهد با رویکرد HSE (مطالعه موردی پروژه‌های ساخت‌وساز)
- ۲۱ پوريا ایلدرآبادی - امیررضا مهر دوست - جواد علامتیان
- تحليل پایداری يك تونل در شرایط هیدروستاتیک با استفاده از روش‌های مختلف قابلیت اعتماد در نرم‌افزارهای RT و @Risk
- ۳۹ هادی فتاحی - فاطمه جیریایی شراهی
- بررسی اثر آهک و نانوآهک بر ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی ماسه ساحلی چالوس
- ۵۵ رضا رضوانی توچاهی - میلاد عزیزی - پژمان نوپارس علی نبی زاده
- مطالعه آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ در قوس رودخانه
- ۷۷ مرضیه محمدی - مهدی قمشی
- بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فلزی مجهز به مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه
- ۸۹ محمدحسین برادران خلخالی - عباس کرم‌الدین

شبیه‌سازی سه‌بعدی پدیده‌های متناوب گردابه‌ها و انتقال رسوب بستر حول موانع در معرض جریان با استفاده از Flow3D*

مقاله علمی - پژوهشی

نازیلا کاردان^(۱) حبیب حکیم زاده^(۲) یوسف حسن زاده^(۳)

چکیده پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی ارتباطی به شمار می‌روند. برخورد جریان به پایه پل‌ها فرسایش اطراف پایه و آسیب‌دیدگی آن را به دنبال دارد. از این رو یکی از مباحث مهم در زمینه ایمنی پل‌ها، کنترل فرسایش بستر اطراف پایه‌ها است. تاکنون مدل‌های فیزیکی مختلفی در آزمایشگاه برای بررسی رفتار جریان و فرسایش بستر پیرامون آن ساخته شده‌اند که صرف‌نظر از هزینه و زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، مشکلات ناشی از تغییرات مقیاس را نیز به همراه داشته‌اند. امروزه با استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی کارآمدتر، رفتار هیدرودینامیکی سیالات به‌طور گسترده‌تری بررسی می‌شود. در این تحقیق برای این منظور از نرم‌افزار Flow3D استفاده شده است. این پژوهش به شبیه‌سازی جریان اطراف مدل پایه‌های پل مختلف پرداخته و الگوی جریان و فرسایش بستر را بررسی می‌نماید. با توجه به حساسیت مدل‌های عددی به تعداد سلول‌های شبکه در میدان محاسباتی، صحت‌سنجی تعداد مختلف شبکه، با مقایسه نیمرخ‌های سرعت انجام یافته است. سه مدل آشفتگی مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفته و پس از بررسی نیمرخ‌های سطح آزاد آب، الگوی جریان اطراف پایه و عدد استروهل، شبیه‌سازی جریان با مدل آشفتگی LES انجام گردیده است. تعداد ۱۵ مدل نیز برای ارزیابی دو پارامتر مهم عامل آب‌شستگی، جدایش جریان و جریان رو به پایین، انتخاب شده‌اند. ابزارهای انتخابی در این راستا، سکو، مقطع هندسی پایه و شکاف می‌باشند. نتایج نشان داد در اغلب موارد استفاده از یک ابزار کنترل آب‌شستگی بهتر از ترکیب ابزارهای مختلف عمل می‌کند. با به‌کارگیری شکل عدسی به‌عنوان مقطع هندسی پایه، عمق آب‌شستگی تا ۵۸ درصد کاهش و با مدل ترکیبی مقطع مستطیلی گردگوشه، سکو و شکاف بیشینه عمق فرسایش یافته تا ۵۰ درصد کاهش نشان داد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که کنترل جدایش جریان و پدیده شکست گردابه به‌مراتب بیش از کنترل جریان رو به پایین در کاهش فرسایش بستر مؤثر است.

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی عددی، رهایی متناوب گردابه‌ها، نرم‌افزار Flow3D، مدل آشفتگی، آب‌شستگی، پایه پل.

Three Dimensional Simulation of Vortex Shedding Phenomenon and Sediment Transport around Obstacles subjected to flow, Using Flow3D

N. kardan H. Hakimzadeh Y. Hassanzadeh

Abstract Bridges are known as one of the most important communicational hydraulic structures. This is particularly so important in bridge piers exposed to river currents. The flow contact with bridge piers causes erosion around them and would result in damage. Therefore, controlling the erosion around the piers is one of the most important objects in the bridge safety. Many different experimental models have been prepared so far to investigate the flow pattern and local scour around this structure. Regardless of the cost and time of the experiments, problems resulting from changes in scale are also available. Nowadays, the Hydrodynamic behavior of the fluid is more extensively investigated by using the more efficient codes of computational fluid dynamic (CFD). The Flow3D software is used for this regard. This study focuses on the simulation of flow around the different bridge piers and studied the flow pattern and bed erosion around them. In this regard, the assumption of incompressible fluid is used and the sharp free surface is modeled by Volume of Fluid (VOF). Considering the sensitivity of numerical models to the number of cells in the computational domain, verifying the number of cells has been done by comparing the velocity profiles. Three different turbulence models also are investigated, and the free surface profiles, flow pattern around the pier and the Strouhal number are compared. Finally, the flow simulation is done by LES turbulence model. For investigation the two key factors causing local scouring, flow separation and downward flow in upstream of the pier, the 10 models is selected. The countermeasures that considered in this regard include berm, cross-section and middle slot. The results show that the effect of flow separation control in reducing the bed erosion is much more than controlling the downward flow. Also the results revealed that in most cases using one countermeasure may be acts more better than situations different countermeasures was applied. In using lenticular cross-section, the scouring depth was decreased up to 58% and with using the combined round-nosed rectangular cross-section, berm, and slot, the scouring depth showed decreasing up to 50%. Also, it was concluded that controlling the flow separation from the pier in boundary layer and the vortex shedding affect the bed erosion much more than the downward flow in pier upstream.

Key Word Numerical simulation, Vortex shedding, Flow3D software, Turbulence model, Scour, Bridge pier.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۷/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۶/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.

Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir

(۲) استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز.

(۳) استاد، گروه مهندسی آب، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

مقدمه

آب‌شستگی پدیده‌ای است که در اثر فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد بستر توسط نیرویی که این جریان به مواد بستر وارد می‌کند، به وجود می‌آید [1]. رادکیوی و اتما آب‌شستگی را پدیده‌ای طبیعی تعریف کرده‌اند که در نتیجه عمل فرسایش بستر توسط جریان و حمل مواد جدا شده از آن توسط این جریان رخ می‌دهد [2]. سومر و فردسو بین آب‌شستگی و فرسایش کلی، تفاوت قائل شده و آب‌شستگی را فرسایش مصالح بستر به سبب حضور یک سازه در معرض جریان دانسته‌اند [3].

مطالعات آزمایشگاهی فراوانی در زمینه مدل‌سازی جریان و آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل توسط پژوهشگران مختلف صورت گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات لارسن و تاج، شن و همکاران، ملویل و درگاهی، بروسرز و رادکیوی، گراف و ایسرائو، دریسدل، گریمالدی و همکاران، گادیو و همکاران و گیهمو و همکاران اشاره نمود [4-12]. اغلب این مطالعات آزمایشگاهی مبتنی بر شرایط ایده‌آل‌سازی شده هستند لیکن اعمال شرایط پیچیده در مدل‌سازی آزمایشگاهی مشکل خواهد بود. از این رو یک فرایند رضایت‌بخش جهت بررسی جریان و انتقال رسوب، بهره‌گیری از مدل‌های عددی است. نرم‌افزار Flow3D یک مدل عددی برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در هندسه‌های پیچیده است که توسط شرکت FlowScience در سال ۲۰۰۸ ارائه گردیده است.

ریچاردسون و پانچانگ حفره آب‌شسته ایجاد شده در اطراف پایه پل استوانه‌ای را با Flow3D مورد مطالعه قرار داده و نتایج عددی به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی ملویل و رادکیوی مقایسه نمودند. ایشان به اهمیت استفاده از اندازه سلول‌های مناسب در شبکه‌بندی مدل تأکید کردند [13]. ین و همکاران جریان رو به پایین در بالادست پایه را در شرایط بستر صاف محاسبه نمودند تا با مقیاس‌بندی سرعت جریان در بالادست پایه، شدت جت جریان در حفره آب‌شسته را به دست آورند [14].

واسکو و والش به بررسی فرسایش بستر پیرامون پایه‌های مرکب با استفاده از این نرم‌افزار پرداختند. ایشان نشان دادند نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی اختلاف بسیار اندکی با نتایج تجربی موجود دارد [15]. عبدالعزیز و همکاران به مطالعه عددی الگوی جریان و فرسایش بستر پیرامون پایه پل استوانه‌ای با نرم‌افزار Flow3D پرداختند [16]. مهرزاد به بررسی پدیده آب‌شستگی حول پایه‌های مخروطی شکاف‌دار و بدون شکاف پرداخته و نشان داد که نتایج عددی و تجربی تطابق خوبی داشتند [۱۷]. اسدی و همکاران به بررسی اثر قطر پایه پل بر الگوی جریان در کانال مستقیم پرداخته و دریافتند انطباق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی مؤید دقت بالای نرم‌افزار Flow3D در شبیه‌سازی الگوی جریان و گردابه‌های اطراف پایه است [۱۸]. حمیدی‌فر و امید (۱۳۹۱) شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی در آب‌راه‌های با مقطع مرکب را انجام دادند [۱۹]. توحیدی (۱۳۹۲) به صورت عددی به بررسی تأثیر پایه‌های با منحنی لگاریتمی در کاهش فرسایش بستر پرداخت. ایشان کاهش ۴۰ درصدی در عمق آب‌شستگی را گزارش نمود [۲۰]. حسن‌زاده و همکاران تأثیر استفاده از مدل ترکیبی مقطع هندسی و شکاف را به صورت تجربی بررسی و نشان دادند به دلیل احتمال گرفتگی شکاف در زمان وقوع سیلاب، این ابزار نمی‌تواند گزینه مناسبی برای کنترل آب‌شستگی باشد [۲۱].

در پژوهش حاضر، سه ابزار مقطع هندسی پایه، سکو و شکاف میانی به صورت منفرد و نیز به صورت ترکیبی جهت کنترل آب‌شستگی پیشنهاد شده‌اند. هدف از انتخاب این ابزارها مطالعه تأثیر دو پارامتر اصلی آب‌شستگی، جدایش جریان از وجوه جانبی و جریان رو به پایین، بر آغاز و گسترش آب‌شستگی است. در ترکیب سکو و شکاف، جریان رو به پایین کنترل شده و با به کارگیری مقطع هندسی پایه، جدایش جریان از وجوه جانبی پایه کمینه می‌گردد. ترکیب این روش‌ها نیز در راستای کنترل توأمان دو پارامتر فوق بوده است. هر کدام

تک معادله‌ای، مدل دومعادله‌ای $(k-\epsilon)$ ، مدل RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در این نرم‌افزار معرفی شده است [22].

معادلات مورد استفاده در نرم‌افزار Flow3D

مدل هیدرودینامیک بر مبنای حل معادلات ناویراستوکس سه‌بعدی و معادله پیوستگی است. معادلات ناویراستوکس و پیوستگی مورد استفاده در Flow3D برای جریان‌های غیرقابل تراکم در ادامه آمده است [22]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i A_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i - k u_i \quad (2)$$

که u_i سرعت متوسط، P فشار، A_i کسر مساحت باز برای جریان در راستای i ، V_f کسر حجم باز برای جریان، G_i شتاب ناشی از نیروهای وزنی، f_i شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز، k ترم دراگ بین ذرات رسوب و ρ دانسیته سیال است. تنش برشی بستر با استفاده از تابع دیواره برای جریان‌های آشسته سه‌بعدی محاسبه می‌گردد [22,23]:

$$u = u_\tau \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{Y}{\frac{v}{u_\tau} + \kappa_s} \right) \right] \quad (3)$$

که u سرعت جریان، u_τ سرعت برشی، τ تنش برشی بستر، Y فاصله از دیواره، v ویسکوزیته سینماتیکی، $\kappa = 0.4$ ضریب فن-کارمن و κ_s ضریب زبری نیکورادزه است.

مدل آب‌شستگی Flow3D. مدل آب‌شستگی نرم‌افزار Flow3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادله انتقال رسوب پخش (انتشار) - انتقال، میزان انتقال رسوب و آب‌شستگی بستر را برآورد می‌کند و با استفاده از روش کسر حجم سیال ارتفاع سطح بستر در هر سلول محاسباتی را پیش‌بینی می‌نماید. مدل آب‌شستگی این نرم‌افزار شامل انتقال رسوبات بستر و رسوبات معلق

از ترکیب‌ها تأثیراتی در کنترل آب‌شستگی داشته و حتی برخی توانسته‌اند کاهش قابل توجهی در عمق آب‌شستگی ایجاد نمایند، با این وجود دارای ضعف‌هایی بوده‌اند که شاید به لحاظ سازه‌ای و یا عوامل اجرایی برای زمان حال توجیه‌پذیر نباشند. این ترکیبات، شامل این مواردند:

۱. مقاطع هندسی پایه (مقاطع دایره‌ای، مستطیلی

گردگوشه و عدسی)؛

۲. پایه استوانه‌ای با سکو (ارتفاع‌های مختلف برای

سکو بررسی شده است)؛

۳. ترکیب سکو، مقطع هندسی پایه و شکاف میانی.

بنابراین در مجموع تعداد ۱۵ مدل با نرم‌افزار

Flow3D مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. عمده‌ترین هدف تحقیق، بررسی دو عامل ایجادکننده آب‌شستگی است.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار Flow3D

جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر جریان‌های آشسته، از بسته نرم‌افزاری Flow3D استفاده شده است که توانایی محاسبات بالا در جریان کانال‌های باز را دارد. در این مدل، معادلات حاکم بر جریان با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌شوند. در این روش میدان محاسباتی به شبکه‌هایی با سلول‌های مستطیلی تقسیم‌بندی شده که برای هر سلول میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد؛ یعنی تمامی متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی حجم سیال (VOF) و روش کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی هندسی مرزها استفاده می‌شود. روش حجم سیال برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد آب (مرز آب‌وهوا) و روش کسر مساحت - حجم مانع برای شبیه‌سازی سطوح و مرزهای هندسی احجام صلب (مرز آب و جامد) کاربرد دارد. برای شبیه‌سازی اثرات آشفتگی، پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پرانتل، مدل

در این مدل پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری هر دو پدیده‌های متقابل میکرو هستند که به صورت هم‌زمان رخ می‌دهند. ترکیب این دو پدیده به منظور بررسی تغییرات خالص بین رسوب بستر و رسوب معلق انجام می‌گیرد. برای محاسبه فرسایش بستر، سرعت بلند شدن و کنده شدن هر ذره رسوب از سطح بستر، $u_{Lift,n}$ که از سرعت برشی بحرانی بستر بیشتر است بر اساس معادله وینرپ و همکاران (۱۹۹۲) حاصل می‌شود:

$$u_{Lift,n} = n_b \alpha_n d_{*,n}^{0.3} (\theta - \theta_{cr,n})^{1.5} \sqrt{g d_n (S_n - 1)} \quad (9)$$

α_n ضریب بلند شدن هر ذره رسوب و n_b بردار نرمال بر سطح بستر رسوبات است. در محاسبه ته‌نشینی رسوبات، سرعت ته‌نشینی ارائه شده توسط سالبوی (۱۹۹۷) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$u_{settle,n} = \frac{1}{g} \left[(10.36^2 + 1.049 d_{*,n}^3)^{1/2} - 10.36 \right] \frac{V_f}{d_n} \quad (10)$$

که g شتاب ثقل و $u_{settle,n}$ هم‌راستا با شتاب ثقل در نظر گرفته می‌شود. فرم بی‌بعد معادله انتقال رسوب برای ذره رسوب n به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{[g(S_n - 1)d_n^3]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$q_{b,n}$ نرخ انتقال رسوب حجمی به ازای واحد عرض بستر و Φ_n بر اساس معادله میسرپیتز-مولر (۱۹۸۴) محاسبه می‌شود [26]:

$$\Phi_n = B_n (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} c_{b,n} \quad (12)$$

B_n ضریب بار بستر بوده و مقدار آن برای نرخ انتقال رسوب پایین بین ۵ تا ۵/۷، برای نرخ انتقال متوسط حدود ۸ و برای نرخ انتقال بالا برابر ۱۳ اختیار می‌گردد. $c_{b,n}$ جزء حجمی ذره رسوب n در بستر است. رابطه ون-رایان (۱۹۸۴) برای محاسبه ضخامت لایه رسوبی h_n مورد استفاده قرار می‌گیرد [27]:

رسوبات بستر که توسط ذرات محصور شده‌اند به راحتی نمی‌توانند جابه‌جا شوند و در صورتی که فرسایش یابند و در سطح مشترک سیال و رسوب به صورت معلق درآیند می‌توانند حرکت کنند. با فرض جریان دو فازی ذرات رسوب در سیال و برقراری رابطه مومتم در فاز پیوسته سیال، معادله (۴) و فاز ناپیوسته ذرات رسوبی معادله (۵) و از تفاضل معادله (۴) و معادله (۵)، رابطه (۶) حاصل می‌شود [22]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla P + F \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_s = -\frac{1}{\rho_s} \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_{drift}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_{drift} = \left(\frac{1}{\bar{\rho}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (6)$$

که u_s سرعت ذرات رسوب، $\bar{u} = (1 - f_s)u + f_s u_s$ سرعت متوسط حجمی سیال، F نیروهای وزنی، $u_r (= u_s - u)$ سرعت نسبی ذرات رسوب و سیال، $u_{drift} (= u_s - \bar{u})$ سرعت رانشی ذرات رسوب است. رابطه بقای جرم برای جریان با سرعت متوسط حجمی سیال $\nabla \bar{u} = 0$ نیز باید برقرار باشد. تنش برشی سبب فرسایش و جابه‌جا شدن رسوبات در سطح بستر می‌گردد. این فرسایش تابعی از تنش برشی بحرانی τ_{cr} و دانسیته سیال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی θ_{cr} کمینه تنش برشی جهت بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد [24]:

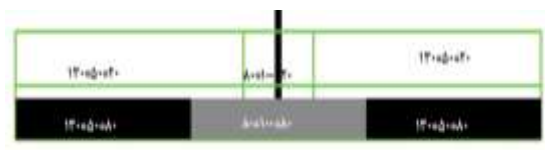
$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g(\rho_s - \rho)d_n} \quad (7)$$

d_n قطر ذره رسوب و اندیس n به n امین ذره رسوب اشاره دارد. مقدار پایه برای عدد شیلدز بحرانی در بسترهای صاف افقی تعریف و معمولاً برابر مقدار ثابت ۰/۰۵ در نظر گرفته شده و یا از رابطه سالبوی و وایت‌هاوس مقدار دقیق آن تعریف می‌گردد [25]:

$$\theta_{cr,n} = \frac{0.3}{1 + 1.2 d_{*,n}} + 0.055 (1 - e^{-0.02 d_{*,n}}) \quad (8)$$

$d_{*,n}$ اندازه بی‌بعد n امین ذره رسوب است.

حاضر از یک بلوک شبکه‌بندی استفاده شده و تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف مورد آزمون واقع شده‌اند. در محدوده اطراف پایه نیز به دلیل اینکه تمامی برجستگی‌های سازه توسط مدل عددی شناخته شوند و هیدرودینامیک مدل با دقت بیشتری شبیه‌سازی گردد، نیاز به استفاده از شبکه‌بندی ریزتر است. تعداد سلول‌ها و استفاده از سلول‌های ریز در اطراف پایه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): تعداد سلول‌ها در نقاط مختلف شبکه‌بندی میدان محاسباتی

به منظور انتخاب تعداد سلول مناسب، مدل‌سازی تغییرات سطح آزاد آب در وسط کانال با استفاده از چهار تعداد مختلف سلول، با مقادیر ۱۳۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰۰، ۳۶۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰۰ انجام یافته و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی ملویل (۱۹۷۵) مقایسه شد (شکل ۲). در شبیه‌سازی حاضر مدل آشفتگی LES به کار برده شده است. در جدول (۱) ارتفاع محاسبه شده سطح آب توسط نرم‌افزار با داده‌های تجربی ملویل (۱۹۷۵) مقایسه شده و برای هر کدام از شبکه‌بندی‌ها، مقدار خطا در مقطع عرضی معین شده، محاسبه شده است. برای محاسبه خطا از رابطه زیر استفاده شده است:

$$R = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - y_i}{Y_i} \right| \times 100 \quad (14)$$

که در آن Y_i عمق تجربی سطح آب و y_i عمق جریان به دست آمده از شبیه‌سازی عددی است.

$$h_n = 0.3 d_n d_{*,n}^{0.7} \left(\frac{\theta_n}{\theta_{cr,n}} - 1 \right)^{0.5} \quad (13)$$

هندسه مدل

به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، از نتایج تجربی ملویل (۱۹۷۵) استفاده گردیده و کانال مورد آزمایش در پژوهش ملویل با طول ۶ متر، عرض ۰/۴۵۶ متر و عمق جریان ۰/۱۵ متر شبیه‌سازی شده است. دبی جریان ۱۷/۱۲ لیتر بر ثانیه، میانگین سرعت جریان ۰/۲۵ متر بر ثانیه، قطر پایه استوانه‌ای ۵/۱ سانتی‌متر، متوسط قطر رسوبات بستر ۰/۳۸۵ میلی‌متر، زاویه ایستائی ذرات رسوب ۳۲ درجه و چگال نسبی آن‌ها ۲/۶۸ است [6]. در مطالعه عددی پایه دایره‌ای در وسط کانال تعبیه شده است تا در این فاصله، جریان قبل از رسیدن به پایه به حالت توسعه یافته رسیده باشد.

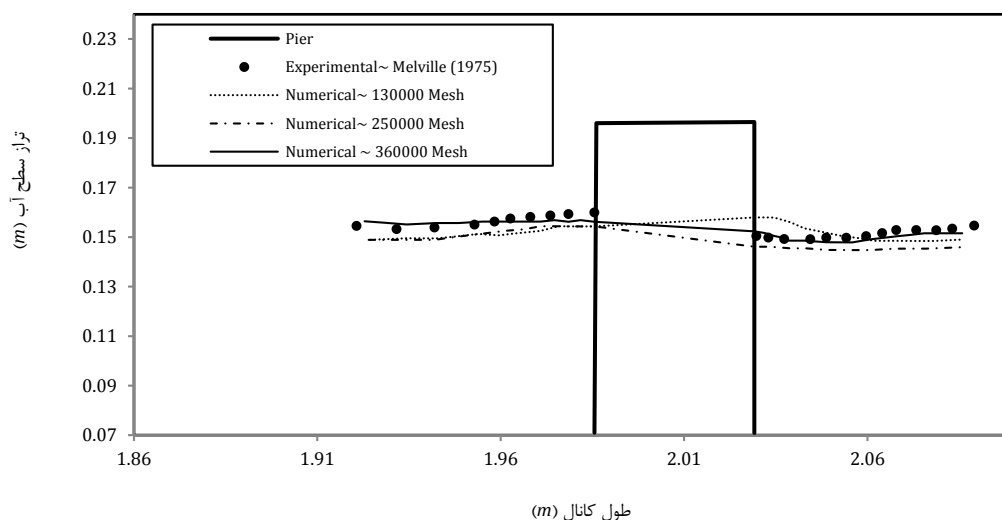
صحت‌سنجی نتایج عددی

تعریف شرایط مرزی

در بلوک محاسباتی به طور جداگانه شرایط مرزی شش-گانه تعریف می‌گردد. برای دیواره‌ها شرط مرزی غیر لغزشی دیواره، برای ورودی کانال شرط مرزی فشار معین با اعمال تراز سطح آب و سرعت جریان در راستای x ، شرط مرزی جریان خروجی برای خروجی کانال و برای سطح آزاد جریان شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده است.

بررسی اندازه سلول‌های میدان محاسباتی

حساسیت‌های مدل عددی به شبکه‌بندی و انفعال میدان، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی عددی بوده است. برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌های مستطیلی شکل در نرم‌افزار Flow3D ارائه شده است که کلیه اندازه‌های سازه مورد نظر و فضای اشغال شده توسط سیالات در داخل آن‌ها تعریف می‌شود. برای مدل عددی



شکل (۲): مقایسه نیم‌رخ طولی سطح آب محاسباتی با داده‌های تجربی ملویل (۱۹۷۵) برای تعداد سلول: الف) ۱۳۰۰۰۰، ب) ۲۵۰۰۰۰، ج) ۳۶۰۰۰۰

جدول (۱): مقایسه ارتفاع محاسباتی سطح آب با داده‌های تجربی ملویل (۱۹۷۵) برای شبکه‌های مختلف

خطای R (%)	تعداد شبکه	
۱۴/۲۵۱	۱۳۰۰۰۰	شبکه‌بندی درشت
۵/۹۰۴	۲۵۰۰۰۰	شبکه‌بندی متوسط
۱/۹۰۸	۳۶۰۰۰۰	شبکه‌بندی ریز
۱/۸۷۳	۴۵۰۰۰۰	شبکه‌بندی بسیار ریز

بررسی مدل‌های آشفتگی منحنی‌های سرعت جریان

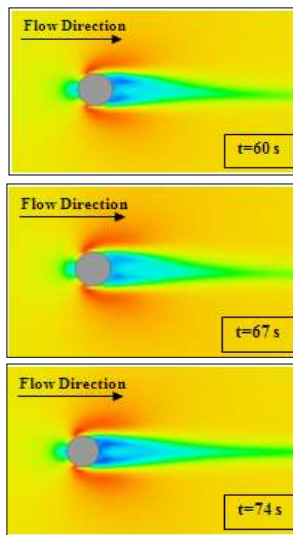
پس از انتخاب شبکه‌بندی مناسب، بررسی منحنی سرعت و الگوی جریان برای انتخاب مدل آشفتگی انجام شده است. در شبیه‌سازی عددی جریان‌های ثانویه پیرامون پایه، اعمال اثر آشفتگی بسیار حائز اهمیت است؛ از این رو سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، RNG و LES انتخاب گردیده و مورد آزمون قرار گرفته‌اند. شکل (۳) مقایسه نتایج عددی و تجربی منحنی‌های سرعت در صفحه XZ را نمایش می‌دهد. این منحنی‌ها در فاصله $5D$ در بالادست محل پایه در نظر گرفته شده‌اند که D قطر پایه است.

از نتایج جدول فوق می‌توان دریافت خطای شبکه‌بندی درشت نسبت به دو شبکه‌بندی متوسط و ریز بسیار زیاد است که در نتیجه برای سایر شبیه‌سازی‌ها، از آن صرف‌نظر می‌شود. از طرفی میزان بهبود خطا در شبکه‌بندی ریز نسبت به شبکه‌بندی متوسط بسیار محسوس نیست.

این موضوع نشان می‌دهد با افزایش تعداد شبکه به مقداری بیش از آن و افزایش حجم سلول‌های محاسباتی، مقدار جواب مستقل از تعداد سلول‌ها باقی می‌ماند. پس تعداد ۳۶۰۰۰۰ سلول با اطمینان خوبی برای سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

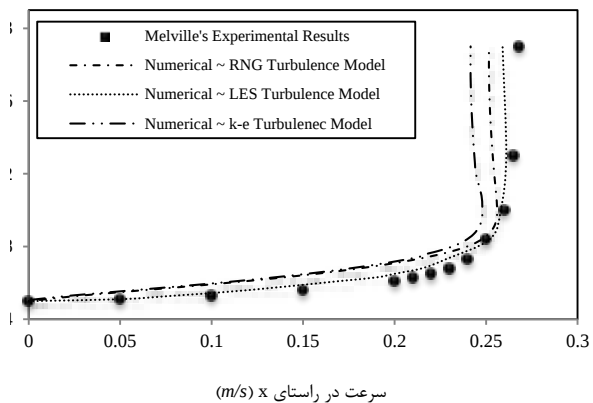
بررسی الگوی جریان

برای ارزیابی بیشتر مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار Flow3D، کانتورهای سرعت جریان و گردابه‌های برخاستگی ناحیه دنباله پایه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل (۵) کانتورهای به‌دست‌آمده با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ را در تراز بستر نمایش می‌دهد. برای بررسی تناوب گردابه‌ها، اجرای مدل تا ۸۰ ثانیه به طول انجامیده است. در شکل (۶) گردابه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ نشان داده شده است. در اعداد رینولدز بسیار کوچک ($Re < 2$) جریان اطراف پایه‌ها کاملاً به پایه چسبیده و جدایش جریان از مرزهای پایه رخ نمی‌دهد.



شکل (۵): کانتورهای سرعت جریان در راستای طولی با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ در بازه‌های زمانی ۷ ثانیه‌ای

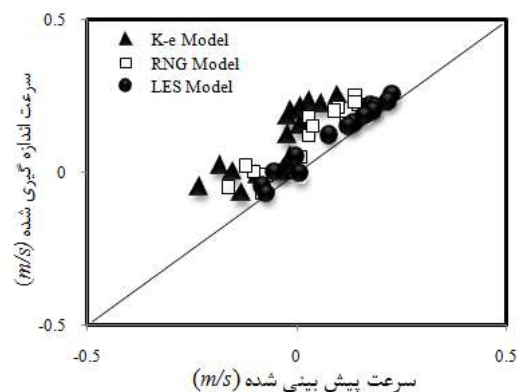
با افزایش عدد رینولدز، جریان از لبه‌های پایه جدا شده و یک جفت گردابه متقارن در پشت پایه به وجود می‌آید. با افزایش عدد رینولدز، گردابه‌های متقارن پشت پایه از حالت دائم خارج شده و به‌صورت نوسانی درآمده و به‌طور متناوب در جریان پخش می‌شوند. در این مدل، عدد رینولدز برای جریان عبوری از اطراف پایه، برابر $Re = 35 \times 10^3$ است که با توجه به بالا بودن عدد رینولدز، تشکیل گردابه‌های متقارن و عدم پخش آن‌ها در جریان منطقی نیست. مشاهده می‌گردد که در زمان‌های ۶۰ و ۷۶



شکل (۳): مقایسه منحنی‌های سرعت حاصل‌شده با سه مدل آشفتگی با منحنی سرعت مدل تجربی ملویل (۱۹۷۵)

برای منحنی به‌دست‌آمده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، مقدار خطا برابر $8/109$ درصد، با مدل آشفتگی RNG برابر $4/564$ درصد و با استفاده از مدل LES برابر $1/052$ است. مشاهده می‌شود استفاده از مدل آشفتگی LES موجب نتایج دقیق‌تر شده و از این‌رو در سایر شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۴) مقایسه سرعت جریان محاسباتی با داده‌های تجربی ملویل را در نقاط مختلف بستر نمایش می‌دهد.

تطابق قابل قبول مقادیر محاسباتی و تجربی سرعت برای مدل آشفتگی LES تا اندازه زیادی در شکل مشخص است. شبیه‌سازی دقیق جریان به‌ویژه در نزدیکی مرز پایه بسیار حائز اهمیت است زیرا نقش قابل توجهی در انتقال بار بستر و فرسایش بستر پیرامون پایه خواهد داشت.



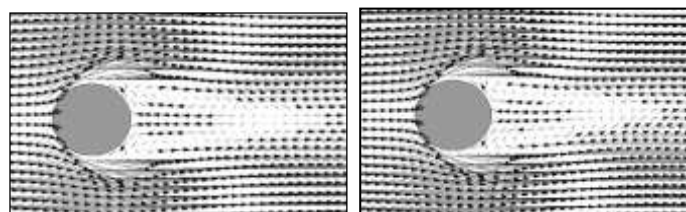
شکل (۴): مقایسه مقادیر محاسباتی و تجربی سرعت در نقاط مختلف پیرامون پایه با استفاده از سه مدل آشفتگی

لیکن نوسان گردابه‌ها در پشت پایه، در مقایسه با شکل (۶) محسوس است. در مدل‌سازی عددی با مدل آشفتگی RNG، گردابه‌ها در زمان ۱۰ و ۲۰ ثانیه حالت متقارن دارند. در زمان ۶۷ ثانیه، حالت متقارن گردابه‌ها حذف گردیده و رشد و گسترش گردابه‌ها در کناره‌های پایه مشاهده می‌گردد، ابعاد گردابه‌ها در زمان ۷۴ ثانیه نسبت به زمان ۶۷ ثانیه کاهش یافته است لیکن در وجوه جانبی پایه نوسانی مشاهده نمی‌گردد. همچنین فرآیند انتشار گردابه‌ها نیز درست نبوده و ناحیهٔ برخاستگی گردابه‌ها تنها به فاصلهٔ کمی از پایین دست پایه محدود شده است.

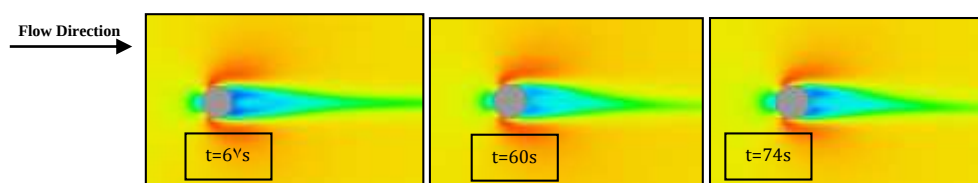
ثانیه، گردابه‌های برخاستگی کاملاً متقارن باقی‌مانده و نوسان گردابه در آن‌ها رخ نمی‌دهد.

حالت متقارن گردابه‌ها و عدم پخش آن‌ها در جریان، نشان می‌دهد این مدل آشفتگی نمی‌تواند شکست گردابه‌ها در پشت پایه را به درستی شبیه‌سازی نماید. شکل (۷) کانتورهای سرعت جریان در تراز بستر و گردابه‌های جریان شبیه‌سازی شده با مدل آشفتگی RNG را نمایش می‌دهد.

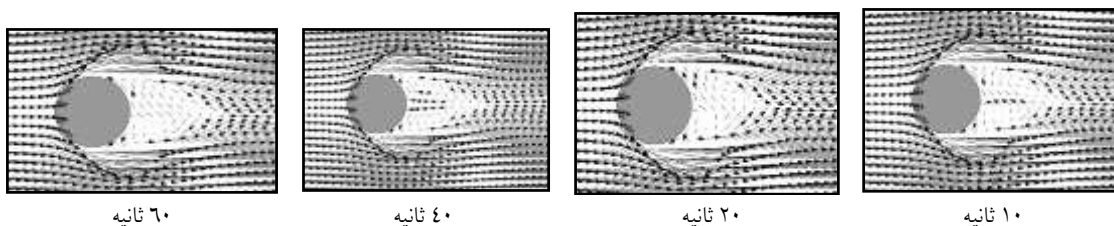
در این مدل نیز تغییر قابل توجهی در کانتورهای سرعت نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ حاصل نشده است،



شکل (۶): فرم متقارن گردابه برخاستگی در ناحیهٔ دنبالهٔ جریان شبیه‌سازی شده با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$

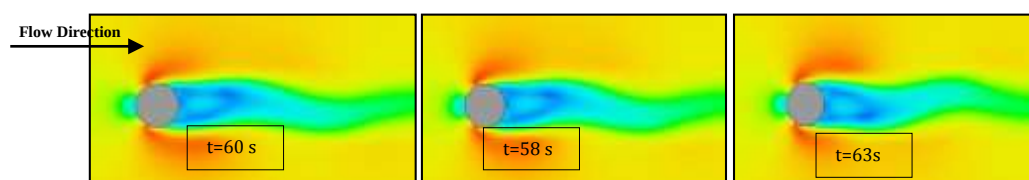


(الف)



(ب)

شکل (۷): (الف) کانتورهای سرعت جریان شبیه‌سازی شده و (ب) گردابه برخاستگی در ناحیهٔ دنبالهٔ جریان با مدل آشفتگی RNG در زمان‌های مختلف



شکل (۸): کانتورهای سرعت جریان شبیه‌سازی شده با مدل آشفتگی LES

عاطفی (۱۳۹۰)، در محدوده $350 < Re < 150$ ، حساسیت نتایج محاسبات به نوع شبکه‌بندی وجود دارد اما با افزایش عدد رینولدز و در محدوده $Re > 350$ ، عدد استروهاال مستقل از تعداد سلول‌های شبکه باقی می‌ماند. علت تأثیر قابل توجه نوع شبکه‌بندی بر نتایج مربوط به عدد استروهاال در محدوده $350 < Re < 150$ را می‌توان به تغییر الگوی جریان و نفوذ جریان‌های گردابه‌ای از پایین-دست پایه به سمت لبه‌های جلویی، مربوط دانست [۲۸]. در این پژوهش، با توجه به بالا بودن عدد رینولدز جریان (350×10^3)، عدد استروهاال مستقل از عدد رینولدز و تعداد سلول‌های شبکه است. مقایسه فرکانس نوسان جریان گردابه‌ای و عدد استروهاال برای نتایج تجربی ملویل و نتایج عددی حاضر در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مقایسه مقادیر تجربی و عددی پارامترهای هیدرودینامیکی جریان

پارامتر	نماد	تجربی	عددی
دوره تناوب (ثانیه)	T	۶/۳۷	۷
فرکانس (هرتز)	f	۰/۹۸۵	۰/۸۹۷
عدد استروهاال	St	۰/۲	۰/۱۸۳

عمق آب‌شستگی بستر

عمق آب‌شستگی یک ساعت اول با توجه به نتایج تجربی ملویل (۱۹۷۵) صحت‌سنجی شده و سپس بدون تغییر در پارامترهای رسوب مدل عددی، سایر مدل‌سازی‌ها انجام یافته‌اند. پارامتر شیلدز بحرانی، ضریب دراگ، ضریب انتقال ذرات، ضریب بار بستر و زاویه ایستایی از مهم‌ترین پارامترهای رسوب به شمار می‌روند که باید در تنظیمات اولیه مقدار صحیح آن‌ها از طریق سعی و خطا مشخص گردد. محدوده مناسب برای عدد شیلدز بحرانی $0/02 \sim 0/1$ است که بر حسب نمودار شیلدز، مقدار آن برابر $0/۰۳۴$ به دست آمده است. مقدار ضریب دراگ برابر $0/۵$ برای ذرات کروی است. انگلاند و هانسون در سال

در شکل (۸) کانتورهای سرعت جریان در تراز بستر و یک سیکل شماتیک از مراحل ایجاد، رشد و پخش گردابه‌های برخاستگی با به‌کارگیری مدل آشفتگی LES نشان داده شده است.

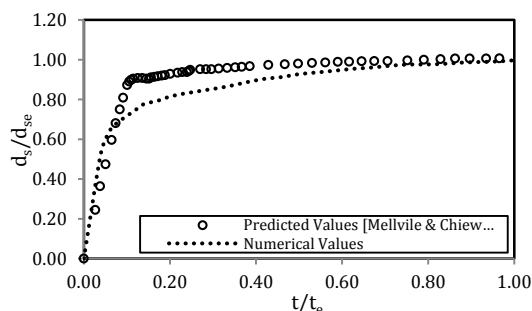
شکل بالا نشان می‌دهد گردابه‌ها در مدل آشفته LES به صورت نوسانی شبیه‌سازی شده و وقوع پدیده‌های متناوب گردابه‌ها مشاهده می‌گردد. در فاز ۱ نوسان، گردابه کوچکی در وجه بالایی پایه ایجاد شده و گردابه بزرگ وجه پایینی از مرز پایه جدا شده و در حال پخش در جریان است. در فاز ۲ و با گذشت ۲ ثانیه از فاز ۱، گردابه کوچک بالایی رشد یافته و در حال پخش به سمت پایین‌دست است. هم‌زمان با رشد و انتشار گردابه بالایی به پایین‌دست، گردابه کوچکی در وجه پایینی در حال رشد کردن بوده تا اینکه به بیشینه توان خود برسد. در فاز ۳، گردابه بزرگ بالایی کاملاً پخش شده و گردابه پایینی رشد پیدا کرده است. در فاز ۴، گردابه پایینی پس از رشد به سمت پایین در حال انتشار بوده و گردابه بالایی در حال تشکیل است. در نهایت در فاز ۵ و پس از گذشت ۷ ثانیه، الگوی یکسانی از رشد و گسترش گردابه‌ها (در فاز ۱) مشاهده می‌گردد. فرکانس نوسان این گردابه‌ها (f)، در حدود $0/۸۹۷$ هرتز است. با شروع پدیده نوسان گردابه‌ها، نیروهای نوسانی برآ و پسا از طرف جریان بر پایه وارد می‌گردد، ماهیت نوسانی این نیروها به گونه‌ای است که می‌توان عملکرد این نیروها را در یک سیکل کامل ۷ ثانیه‌ای (دوره تناوب T) منطبق بر سیکل نوسان گردابه‌ها در نظر گرفت.

یکی دیگر از مشخصه‌های جریان غیردائمی، عدد استروهاال جریان است. در پدیده‌های متناوب گردابه‌ها، عدد استروهاال به عنوان اندازه فرکانس بی‌بعد پدیده شکست گردابه در نظر گرفته می‌شود. عدد استروهاال به صورت $St = fd/U$ تعریف می‌شود که St عدد استروهاال، f فرکانس گردابه‌ها، D قطر استوانه و U سرعت جریان است. عدد استروهاال به عدد رینولدز جریان و تعداد شبکه بسیار حساس بوده و با تغییر در مقدار آن‌ها، دچار تغییر می‌گردد. طبق نتایج عبداللّهی و

جدول (۳): مقایسه مقادیر تجربی و عددی عمق فرسایش در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای

زمان (دقیقه)	عمق آب‌شستگی (cm)	
	عددی	تجربی
۵	۰/۹۱	۱
۱۰	۱/۳۷	۱/۵
۱۵	۱/۴۷	۱/۶۰
۲۰	۱/۶۶	۱/۸۰
۲۵	۲/۶۱	۲/۸
۳۰	۳	۳/۲
۳۵	۳/۷۰	۳/۹
۴۰	۴/۰۱	۴/۲
۴۵	۵/۵۸	۵/۸
۵۰	۶/۴۴	۶/۶۰
۵۵	۷/۲۸	۷/۴
۶۰	۷/۹۲	۸
	خطای متوسط کل (%)	
	۵/۴۴	

در شکل (۹) مقایسه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی و نیز داده‌های به‌دست‌آمده از رابطه (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل (۹): مقایسه داده‌های حاصل از رابطه ملویل و چپو (۱۹۹۹) و نتایج عددی

مدل پایه‌ها

پس از اطمینان از صحت نتایج هیدرودینامیکی و رسوبی، سایر مدل‌های انتخابی مورد بررسی قرار می‌گیرند. مدل‌های پیشنهادی در چهار گروه کلی طبقه‌بندی می‌شوند.

۱۹۶۷ پیشنهاد کردند که برای شن و ماسه، مقدار ۱/۵ مناسب است و سایر مقادیر معمول آزمایشگاهی بین ۰/۷۵ تا ۱/۵ است. در این بررسی، مقدار ضریب دراگ برابر ۱/۲ وارد شده است. ضریب بار بستر که در رابطه میرپیتر-مولر وجود دارد نرخ انتقال بار بستر به ازای تنش برشی بیش از تنش برشی بحرانی است. مقدار این ضریب بین ۵ تا ۱۳ است؛ به‌طوری‌که مقدار ۵ برای شدت انتقال پایین و مقدار ۱۳ برای شدت بالای انتقال ماسه تعریف می‌شود. پس از بررسی مقادیر مختلف، مقدار ۸ برای این ضریب تعیین شده است. یکی از پارامترهای مهم در مدل آب‌شستگی-رسوب، زاویه ایستایی ذرات رسوب است. این پارامتر برای مدل صحت‌سنجی ملویل برابر مقدار آزمایشگاهی آن یعنی ۳۲ درجه وارد شده است.

در مطالعه آزمایشگاهی ملویل، مقدار عمق آب‌شستگی تعادلی برای مدل مبنا برابر ۱۵ سانتی‌متر و عمق آب‌شستگی ۱ ساعته معادل ۸ سانتی‌متر است. در جدول (۳) مقایسه داده‌های تجربی و نتایج عددی ارائه شده است. مقدار خطا در شبیه‌سازی یک‌ساعته برابر ۵/۴ درصد به‌دست‌آمده است. این موضوع نشان‌دهنده تطابق قابل قبول مقادیر عددی و مقادیر تجربی ملویل است.

برای بررسی و مقایسه کامل‌تر نتایج تجربی و عددی، از رابطه ارائه شده توسط ملویل و چپو (۱۹۹۹) استفاده شده است. رابطه تجربی ملویل و چپو (۱۹۹۹) به شکل زیر است [29]:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{V_c}{V} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (15)$$

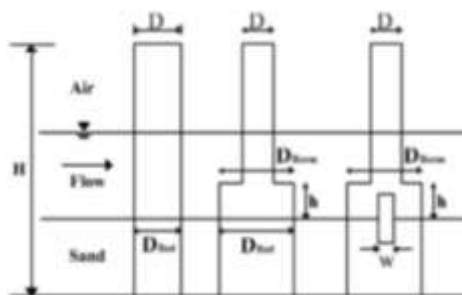
که زمان تعادل از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$t_e(\text{days}) = \begin{cases} 30.89 \frac{D}{U} \left(\frac{U}{U_c} \right) \left(\frac{y}{D} \right)^{0.25} & \frac{y}{D} \geq 6 \\ 48.26 \frac{D}{U} \left(\frac{U}{U_c} - 0.4 \right) & \frac{y}{D} < 6 \end{cases} \quad (16)$$



(ب)

شکل (۱۰): (الف) مدل‌های گروه A، (ب) مدل‌های سکویی گروه B، (پ) مدل پایه‌های شکاف‌دار گروه D



شکل (۱۱): ابعاد مدل پایه‌ها

در شبیه‌سازی این گروه از مدل‌ها، تعداد سلول‌های شبکه ۳۶۰۰۰۰، مدل آشفتگی LES و زاویه ایستائی ذرات ۳۲ درجه در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

مدل مبنا

در شکل (۱۲) فرسایش بستر و بردارهای سرعت جریان پیرامون مدل مبنا نشان داده شده است.

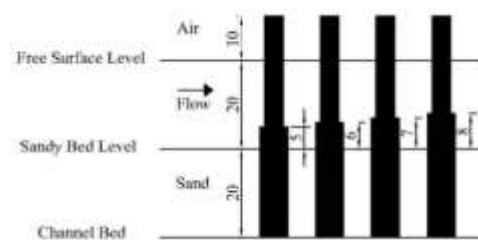
مشاهده می‌شود جریان نزدیک شونده پس از برخورد به پایه به سمت بستر منحرف شده و جت جریان در مجاورت آن تشکیل شده است. با برخورد جت جریان به بستر بالادست، گردابه‌های نعل‌اسبی تشکیل شده و در پایین‌دست پایه نیز بازگشت جریان و تشکیل گردابه‌های برخاستگی مشاهده می‌گردد.

گروه اول (A) پایه‌های با مقاطع هندسی مختلف (دایره-ای، مستطیلی گرد گوشه، بیضی و عدسی) و گروه دوم (B) پایه‌های سکویی با چهار ارتفاع ۵، ۶، ۷ و ۸ سانتی‌متر برای ارتفاع سکو را شامل می‌شوند. این اعداد از بررسی پیشنهاد پژوهشگران مختلف انتخاب شده است. در گروه سوم (گروه C)، مدل مرکب سکو و مقطع هندسی پایه و در گروه (D)، ترکیب مدل‌های گروه (C) با شکاف بررسی شده است. در تمامی مدل‌ها، پایه استوانه‌ای با مقطع دایره به‌عنوان مدل مبنا بوده و بیشینه فرسایش ۱ ساعته بستر در بالادست مدل‌ها، به دست آمده است. پایه‌های مورد بررسی دارای عرض ۴ سانتی‌متر، نسبت طول به عرض ۳، متوسط قطر رسوبات ۰/۷۲ میلی‌متر، سرعت جریان ۰/۳۲۵ متر بر ثانیه، عمق جریان ۲۰ سانتی‌متر، زاویه ایستائی ذرات ۳۲ درجه و چگالی نسبی ذرات ۲/۶۷ است.

گروه اول، شامل مقاطع هندسی دایره، مستطیل گرد گوشه، بیضی و عدسی است (شکل ۱۰-الف). در گروه دوم، پایه‌های سکویی دارای سکویی به قطر ۶ سانتی‌متر بوده (از هر طرف ۱ سانتی‌متر بیرون آمدگی) و ارتفاع ۵، ۶، ۷ و ۸ سانتی‌متر نسبت به تراز بستر می‌باشند (شکل ۱۰-ب). در پایه‌های شکاف‌دار نیز عرض شکاف ۲ سانتی‌متر و ارتفاع آن با توجه به ارتفاع سکو در بالای تراز بستر تعیین شده است (شکل ۱۰-پ). در جدول (۴) و شکل (۱۱) جزئیات مدل پایه‌ها ارائه گردیده است.

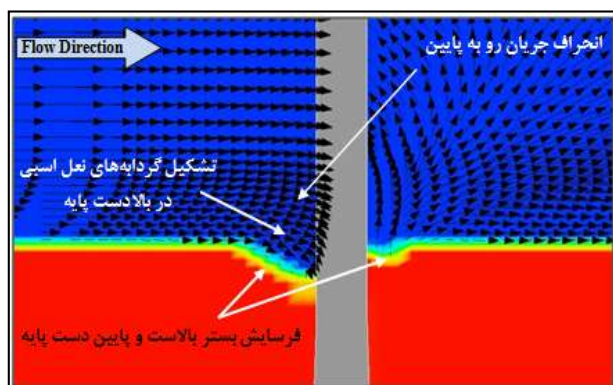


(الف)



(ب)

برای مدل مبنا، بیشینه عمق آب‌شستگی یک‌ساعته برابر ۲۹ میلی‌متر است. برای محاسبه درصد کاهش آب‌شستگی مدل‌های پیشنهادی، رابطه $r_{de} = (d_{s0} - d_s)/d_{s0}$ به کار برده شده است؛ که d_{s0} بیشینه عمق آب‌شستگی پایه مبنا و d_s بیشینه عمق آب‌شستگی مدل‌های مورد بررسی است.

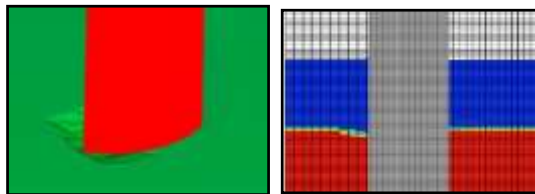


شکل (۱۲): فرسایش بستر بالادست و پایین‌دست پایه به همراه تشکیل گردابه‌های نعل‌اسبی و برخاستگی

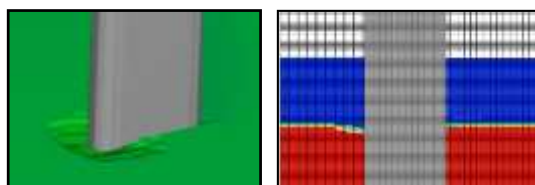
جدول (۴): مشخصات مدل پایه‌های پل

گروه	شماره مدل	نام اختصاری مدل	مدل پایه	D (cm)	D _{Bed} (cm)	D _{Berm} (cm)	h (cm)	W (cm)	t (s)
A	۱	C	دایره‌ای	۴	۴	--	--	--	۳۶۰۰
	۲	R	مستطیلی گرد گوشه	۴	۴	--	--	--	۳۶۰۰
	۳	E	بیضی	۴	۴	--	--	--	۳۶۰۰
	۴	L	عدسی	۴	۴	--	--	--	۳۶۰۰
B	۵	CB1	دایره‌ای با سکوی ۵ سانتی‌متری	۴	۶	۶	۵	--	۳۶۰۰
	۶	CB2	دایره‌ای با سکوی ۶ سانتی‌متری	۴	۶	۶	۶	--	۳۶۰۰
	۷	CB3	دایره‌ای با سکوی ۷ سانتی‌متری	۴	۶	۶	۷	--	۳۶۰۰
	۸	CB4	دایره‌ای با سکوی ۸ سانتی‌متری	۴	۶	۶	۸	--	۳۶۰۰
C	۹	RB	مستطیلی گرد گوشه با سکو	۴	۶	۶	؟	--	۳۶۰۰
	۱۰	EB	بیضی با سکو	۴	۶	۶	؟	--	۳۶۰۰
	۱۱	LB	عدسی با سکو	۴	۶	۶	؟	--	۳۶۰۰
D	۱۲	CBS	دایره‌ای با سکو و شکاف میانی	۴	۶	۶	۶	۲	۳۶۰۰
	۱۳	RBS	مستطیلی گرد گوشه با سکو و شکاف میانی	۴	۶	۶	۶	۲	۳۶۰۰
	۱۴	EBS	بیضی با سکو و شکاف میانی	۴	۶	۶	۶	۲	۳۶۰۰
	۱۵	LBS	عدسی با سکو و شکاف میانی	۴	۶	۶	۶	۲	۳۶۰۰

آب‌شستگی (جدایش جریان و جت جریان رو به پایین) به میزان قابل توجهی از شدت آب‌شستگی کاسته می‌گردد.



شکل (۱۳): فرسایش بستر پیرامون مدل L



شکل (۱۴): فرسایش بستر پیرامون مدل R

شکل (۱۵) تغییرات آب‌شستگی یک‌ساعته پیشینه را برای مدل‌های گروه A نشان می‌دهد. در مدل‌های C و R تغییرات فرسایش بستر در انتهای یک ساعت قابل ملاحظه است؛ لیکن در مدل‌های E و L تمایل برای رسیدن به تعادل در زمان یک ساعت مشاهده می‌شود. به عبارتی نمودار فرسایش در این مدل‌ها سریع‌تر به مجانب افقی میل کرده و تغییرات فرسایش بستر در این مدل‌ها تنها در لحظات اولیه قابل ملاحظه است.

مدل‌های گروه B

در شکل (۱۶) تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی برای مدل پایه‌های گروه B در بازه زمانی ۱ ساعته نمایش داده شده است. نتایج حاصل‌شده نیز در جدول (۱۶) ارائه گردیده است.

نتایج مدل عددی نشان می‌دهد پایه سکویی ۶ سانتی‌متری با کاهش $r_{de}=46\%$ بیشترین تأثیر را در کاهش فرسایش بستر داشته است. این سکوی در بالادست پایه،

مدل‌های گروه A

آشفتگی در آرایش خطوط جریان در پایه‌های با دماغه تیز و آیرودینامیک کمتر از حالت دماغه پهن بوده و شکل پایه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در حذف گردابه‌های نعل‌اسبی و برخاستگی پیرامون پایه دارد. در این راستا سه شکل پایه مستطیلی گرد گوشه، بیضی و عدسی که به ترتیب میزان انطباق آن‌ها با الگوی جریان بیشتر شده بررسی شده‌اند. در جدول (۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک‌ساعته برای مدل‌های گروه A ارائه شده است.

جدول (۵): حداکثر عمق آب‌شستگی مدل پایه‌های گروه A

مدل پایه	D (mm)	D_{Bed} (mm)	d_s (mm)	d_s/D_{Bed}	r_{de} (%)
C	۴۰	۴۰	۲۹	۰/۷۲۵	---
R	۴۰	۴۰	۲۱	۰/۳۷۵	۲۷
E	۴۰	۴۰	۱۶	۰/۲۲۵	۴۴
L	۴۰	۴۰	۱۲	۰/۱۲۵	۵۸

در شکل (۱۳) و (۱۴) نمایی دوبعدی و سه‌بعدی از فرسایش بستر پایه‌های با مقطع مستطیلی گرد گوشه و عدسی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها معلوم است فرسایش بستر اطراف مدل L بسیار کمتر از مدل R است.

با استفاده از مقطع هندسی عدسی، آب‌شستگی تا ۵۸٪، در مقطع بیضی تا ۴۴٪ و با مقطع مستطیل گرد گوشه، آب‌شستگی تا ۲۷٪ کاهش یافته است. این کاهش نشان می‌دهد مقطع عدسی بهتر از سایر مقاطع عمل کرده و تأثیر بیشتری در کنترل فرسایش بستر داشته است. تأثیر مقطع بیضی نیز در کاهش آب‌شستگی قابل ملاحظه است. در مقطع عدسی به دلیل انطباق زیاد مقطع با الگوی جریان، الگوی جریان کمتر دستخوش تغییر شده و جدایش جریان تنها محدود به یک نقطه می‌گردد؛ بنابراین جدایش جریان از پایه حذف گردیده و احتمال تشکیل گردابه‌های نعل‌اسبی نیز در بالادست پایه ضعیف می‌گردد. در نتیجه با تضعیف پارامترهای عامل

CB4 تمایل به برقراری تعادل در شرایط فرسایش دیده نمی‌شود؛ اما در دو مدل سکویی ۵ و ۶ سانتی‌متری مجانب افقی در زمان ۳۶۰۰ ثانیه قابل مشاهده است. فرسایش بستر پیرامون مدل CB2 در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

مدل‌های گروه C

شکل (۱۸) تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی برای مدل‌های گروه C را نمایش می‌دهد. بر حسب نتایج، ارتفاع مؤثر سکو ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. ترکیب مقطع هندسی با سکو به‌منظور بررسی میزان تأثیر هرکدام از پارامترهای آب‌شستگی، جدایش جریان و جریان رو به پایین؛ بوده است. جدول (۷) مقایسه کمی بیشینه عمق آب‌شستگی را نشان می‌دهد.

جدول (۷): درصد کاهش عمق آب‌شستگی در مدل پایه‌های گروه C

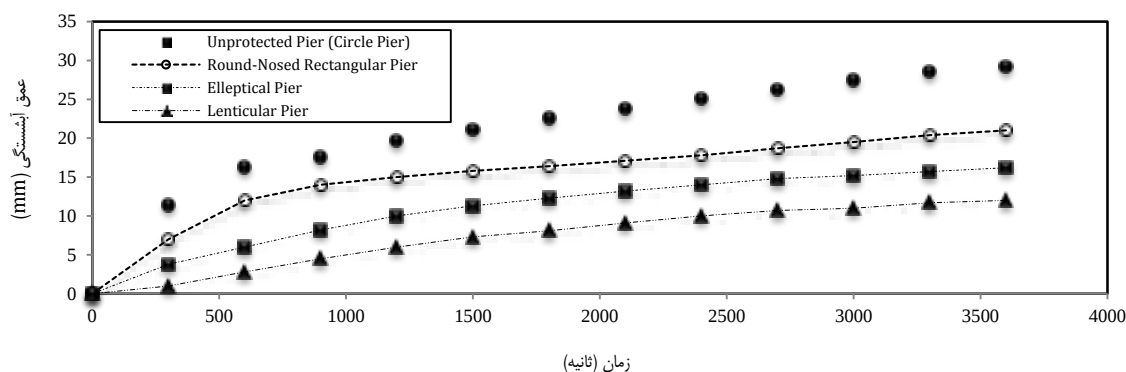
مدل پایه	D (mm)	D _{Bed} (mm)	d _s (mm)	d _s /D _{Bed}	r _{de} (%)
C	۴۰	۴۰	۲۹	۰/۷۲۵	---
CB	۴۰	۶۰	۱۵/۵	۰/۲۵۸	۴۶
RB	۴۰	۶۰	۲۶	۰/۴۳۳	۱۰
EB	۴۰	۶۰	۱۸/۳	۰/۳۰۵	۳۷
LB	۴۰	۶۰	۱۱	۰/۱۸۳	۶۲

مانع از برخورد جت جریان به بستر بالادست پایه می‌گردد. مشهود است که با افزایش ارتفاع سکو از نقش محافظتی آن کاسته می‌گردد طوری که کاهش ۱۲ درصدی عمق آب‌شستگی مربوط به مدل سکویی ۸ سانتی‌متری است.

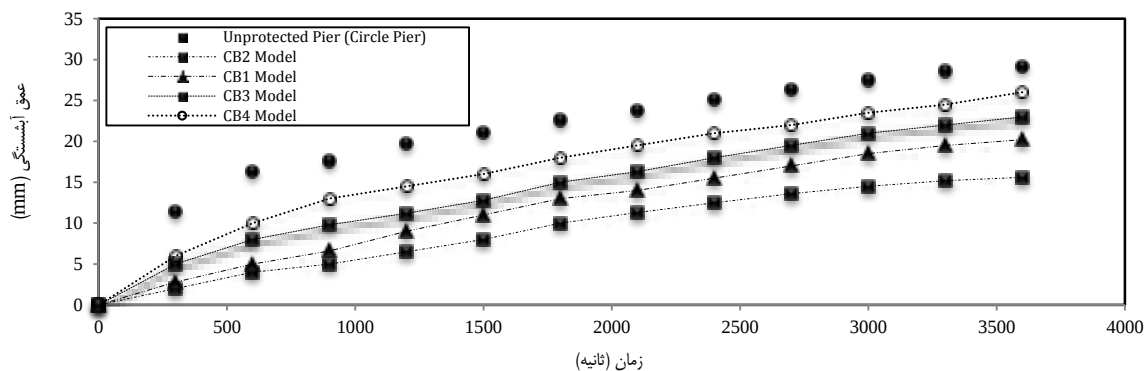
جدول (۶): درصد کاهش عمق آب‌شستگی در مدل پایه‌های گروه B

مدل پایه	D (mm)	D _{Bed} (mm)	d _s (mm)	d _s /D _{Bed}	r _{de} (%)
C	۴۰	۴۰	۲۹	۰/۷۲۵	---
CB1	۴۰	۶۰	۲۰/۲	۰/۵۰۵	۳۰
CB2	۴۰	۶۰	۱۵/۶	۰/۳۹	۴۶
CB3	۴۰	۶۰	۲۳	۰/۵۷۵	۲۱
CB4	۴۰	۶۰	۲۵/۷	۰/۶۴۲	۱۲

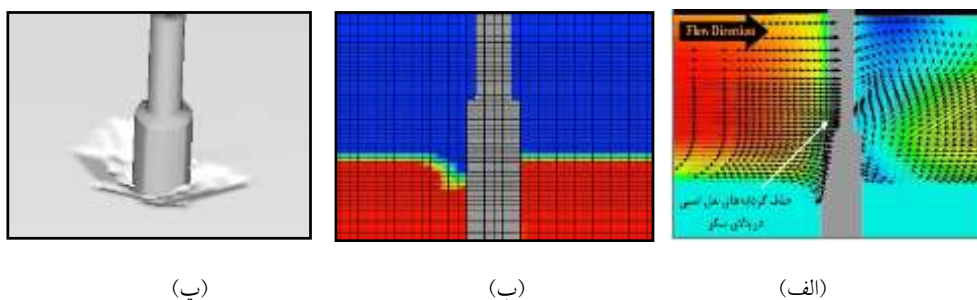
در استفاده از ابزار سکو، تنها قسمتی از جریان رو به پایین در بالای سکو حذف گردیده و جریان رو به پایین در مقطع سکو دوباره به بستر بالادست برخورد کرده و باعث تشدید آب‌شستگی می‌گردد. با افزایش ارتفاع سکو بر شدت جت جریان رو به پایین در بالادست آن افزوده می‌شود. همچنین با بالا رفتن ارتفاع سکو، درصد مساحت انسداد افزایش یافته و بدین ترتیب از عملکرد اصلی سکو کاسته می‌شود. در مدل‌های CB3 و



شکل (۱۵): تغییرات زمانی بیشینه عمق آب‌شستگی در مدل‌های گروه A



شکل (۱۶): تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی برای مدل پایه‌های گروه B



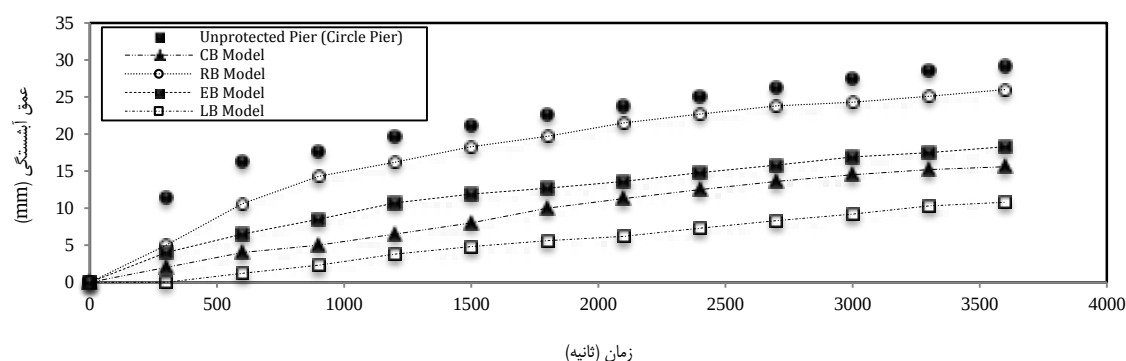
شکل (۱۷): فرسایش بستر پیرامون مدل پایه CB2 (الف) بردارهای سرعت جریان در پیرامون پایه سکویی (ب) فرسایش یک‌ساعته بستر پیرامون پایه سکویی (پ) نمایی سه‌بعدی از آبشستگی اطراف مدل

است. عرض، ارتفاع و محل قرارگیری شکاف و طولی از شکاف که درون بستر رودخانه قرار می‌گیرد عوامل مهم در شکاف پایه پلها هستند. در این تحقیق عرض شکاف مطابق با پیشنهادهای پژوهشگران مختلف، برابر با ۲۵ درصد قطر پایه و ارتفاع آن یک برابر قطر پایه انتخاب شده است که عرض شکاف برابر ۲ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۵ سانتی‌متر بالای بستر است. شکاف‌ها در زیر تراز بستر نیز امتداد یافته‌اند. با توجه به این‌که ارتفاع مؤثر سکو در مدل‌های گروه B، ۶ سانتی‌متر تعیین شده است، ارتفاع شکاف ۱ سانتی‌متر کوچک‌تر از ارتفاع سکو در نظر گرفته می‌شود. مقایسه شماتیک تغییرات بیشینه عمق آبشستگی برای مدل‌های گروه D در شکل (۱۹) ارائه شده است.

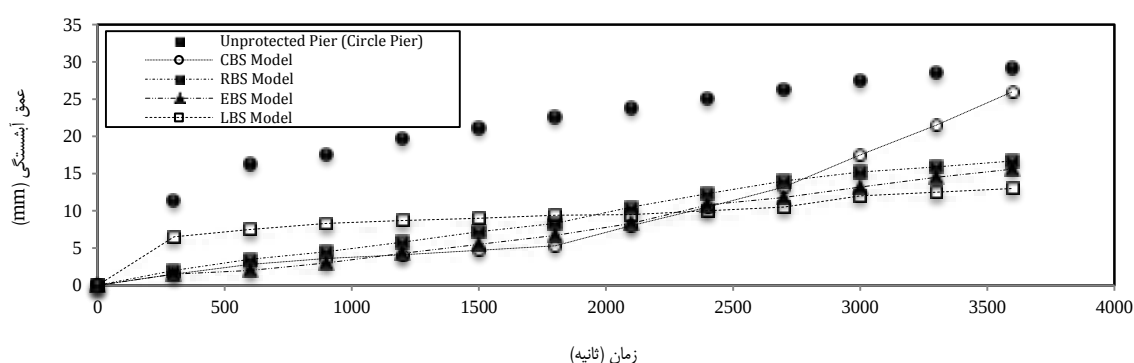
با افزایش قطر پایه در مقطعی از آن، عرض پایه در محل بستر افزایش می‌یابد که در نهایت موجب ازدیاد عرض انسداد می‌شود. ایجاد سکو و ازدیاد عرض انسداد در مدل‌های R و E، موجب افزایش عمق آبشستگی در مدل‌های RB و EB شده است. در مدل L نیز تأثیر سکو تنها کاهش ۱ میلی‌متری عمق فرسایش بوده است. اگرچه افزایش قطر پایه در نزدیکی بستر مانع برخورد جت جریان به بستر می‌گردد؛ لیکن افزایش قطر باعث تشدید جدایش جریان در کناره‌های پایه شده و بر شدت آبشستگی می‌افزاید.

مدل‌های گروه D

هدف استفاده از شکاف میانی، منحرف نمودن جریان رو به پایین در مقطع بالادست پایه و کاهش عرض انسداد



شکل (۱۸): تغییرات زمانی بیشینه عمق آب‌شستگی برای مدل پایه‌های گروه C

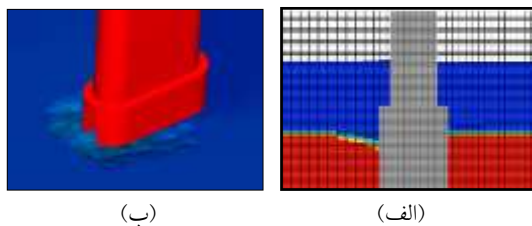


شکل (۱۹): تغییرات بیشینه عمق آب‌شستگی برای مدل‌های گروه D

به سمت پایین دست کشیده شده و در پشت پایه تجمع می‌یابند. تجمع رسوبات موجب گرفتگی شکاف شده و باعث می‌شود مدل CB در بلندمدت رفتاری همانند مدل C داشته باشد. بیشینه عمق آب‌شستگی برای مدل CB حدود ۲۷ میلی‌متر است که اندکی کمتر از بیشینه عمق آب‌شستگی مدل C است. انسداد شکاف در مدل‌های RB، EB و LB مشاهده نمی‌شود. در این مدل‌ها، بزرگ بودن نسبت طول به عرض پایه موجب می‌شود تا با کاهش سرعت جریان در کناره‌های پایه، رسوبات برخاسته در کناره‌های مدل‌ها ته‌نشین شده و به سمت پایین دست جابه‌جا نشوند؛ بنابراین شکاف ابزار مناسبی برای کاهش فرسایش بستر در پایه‌هایی است که نسبت طول به عرض آن‌ها بزرگ‌تر از ۱ باشد. عمق فرسایش در مدل RBS، ۱۴/۵ میلی‌متر به دست آمده است که برابر ۵۰ درصد کاهش نسبت به مدل مبنا و ۳۱ درصد کاهش

در لحظات آغازین شبیه‌سازی، عمق آب‌شستگی مدل‌های RB، EB و LB دارای تغییرات قابل توجهی است لیکن پس از گذشت زمان ۲۵۰۰ ثانیه این تغییرات کاهش می‌یابد تا اینکه در نهایت به حالت تعادل برسد. در مدل پایه‌های شکاف‌دار تغییرات اولیه در عمق آب‌شستگی بسیار بیشتر از تغییرات عمق آب‌شستگی در مدل پایه‌های گروه A، B و C است که نشان می‌دهد مدت زمان لازم برای رسیدن به شرایط تعادل در مدل‌های شکاف‌دار بیش از سایر مدل‌ها بوده و زمان بیشتری برای شبیه‌سازی نیاز است.

اعمال بازشدگی در مدل C تغییر قابل توجهی در عمق آب‌شستگی ایجاد نکرده است. تأثیر مثبت شکاف در کاهش فرسایش بستر، تنها در لحظات اولیه شبیه‌سازی دیده می‌شود لیکن با گذشت زمان (۲۷۵۰ ثانیه)، رسوبات فرسایش یافته از کناره‌های پایه (ناشی از جدایش جریان)



شکل (۲۱): فرسایش بستر پیرامون مدل RBS

در جدول (۸) درصد کاهش بیشینه عمق آبشستگی برای مدل پایه‌های گروه D نسبت به مدل مبنا نشان داده شده است.

جدول ۸ بیشینه عمق آبشستگی مدل پایه‌های گروه D

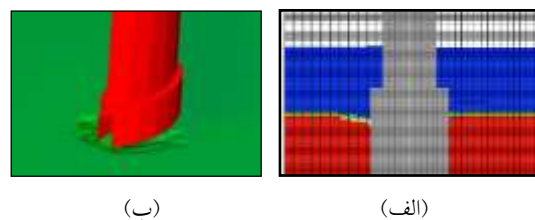
مدل پایه	D (mm)	D _{Bed} (mm)	d _s (mm)	d _s /D _{Bed}	r _{de} (%)
C	۴۰	۴۰	۲۹	۰/۷۲۵	---
CBS	۴۰	۶۰	۲۷	۰/۴۵	۶/۹
RBS	۴۰	۶۰	۱۴/۵	۰/۲۴۱	۵۰
EBS	۴۰	۶۰	۱۵	۰/۲۵	۴۸
LBS	۴۰	۶۰	۱۱	۰/۱۸۳	۶۲

عملکرد مدل پایه‌های گروه A در کنترل فرسایش بستر مطلوب‌تر از مدل‌های گروه B بوده است، یعنی استفاده از شکل هندسی آیرودینامیک در پایه‌های پل، نقش حفاظتی مؤثری در کاهش فرسایش بستر داشته است. در مدل‌های سکودار اگرچه ایجاد سکو در پایه موجب کنترل جریان‌های رو به پایین و گردابه‌های نعل‌اسبی می‌گردد لیکن افزایش قطر پایه در تراز بستر، موجب افزایش عرض انسداد و تشدید فرسایش بستر می‌شود. لذا کنترل جدایش جریان بسیار مؤثرتر از کنترل جریان رو به پایین در کاهش آبشستگی است. ترکیب سکو، شکل پایه و شکاف میانی نیز کاهش قابل توجه در عمق آبشستگی را موجب شده است لیکن در این پایه‌ها احتمال گرفتگی و انسداد شکاف در اثر جابه‌جایی رسوبات وجود دارد. در این پایه‌ها با ایجاد شکاف، سطح مقطع پایه کاهش می‌یابد که ضعف سازه‌ای را به دنبال

نسبت به مدل R است.

به عبارتی ترکیب مقطع مستطیلی گرد گوشه با سکو و شکاف باعث کاهش عمق آبشستگی به میزان ۱۳/۵ میلی‌متر شده است. در مدل EBS، کاهش بیشینه عمق آبشستگی نسبت به مدل مبنا و مدل E، به ترتیب برابر ۴۸ درصد و ۶ درصد است. اعمال سکو و شکاف در مدل L تنها موجب کاهش ۱ میلی‌متر در بیشینه مقدار فرسایش بستر شده است. در مدل LBS، نیز بیشینه عمق آبشستگی به اندازه ۶۲ درصد نسبت به مدل مبنا و ۴ درصد نسبت به مدل L کاهش داشته است. این مقدار کاهش در مقایسه با تأثیر سکو و شکاف در مقطع مستطیلی گرد گوشه بسیار اندک است.

در مدل با مقطع هندسی بیضی و عدسی، با ایجاد شکاف، شکل مقطع هندسی تغییر کرده و پایه دیگر آیرودینامیک نبوده و از انطباق آن با الگوی جریان کاسته می‌شود؛ بنابراین مقطع هندسی پایه تأثیر اندکی بر کاهش آبشستگی خواهد داشت. در مدل پایه L عمق فرسایش بستر در لحظات آغازین شبیه‌سازی بسیار کم است لیکن در مدل LB، از لحظات آغازین اجرای برنامه، تشدید فرسایش در اطراف لبه‌های شکاف دیده می‌شود. به عنوان مثال عمق فرسایش در دقیقه ۲۰ شبیه‌سازی برای مدل L برابر ۰/۵ میلی‌متر است در حالی که این مقدار در مدل LB مساوی ۱/۵ میلی‌متر است؛ بنابراین تأثیر مثبت ایجاد شکاف در مقطع هندسی عدسی به مراتب کمتر از تأثیر آن در مدل با مقطع مستطیلی گرد گوشه است. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نمای دوبعدی و سه‌بعدی از آبشستگی اطراف پایه‌های مرکب RBS و LBS را نمایش می‌دهند.



شکل (۲۰): فرسایش بستر پیرامون مدل LBS

دارد؛ بنابراین استفاده از پایه‌هایی با مقاطع آیرودینامیک می‌تواند به‌عنوان پیشنهاد کارهای آتی مطرح گردد. رودخانه‌هایی توصیه می‌شود که در آنها حجم جابه‌جایی رسوبات پایین باشد.

نتیجه‌گیری		فهرست علائم	
در پژوهش حاضر شبیه‌سازی عددی پایه‌های پل ساده و مرکب با استفاده از نرم‌افزار Flow3D انجام گرفته است.	سرعت متوسط	u	
به همین منظور در ابتدا گزارشی از نحوه مدل‌سازی پایه-های پل در شرایط جریان زلال رودخانه‌ای ارائه شد که شامل مشخصات مدل فیزیکی و مدل عددی است. در ادامه، صحت‌سنجی پارامترهای مورد استفاده مانند اندازه سلول‌های شبکه، مدل‌های آشفتگی و عمق فرسایش مورد بررسی قرار گرفت.	فشار	P	
مدل پایه‌های مرکب با هدف بررسی دو پارامتر مهم در وقوع آب‌شستگی (جت جریان رو به پایین و جدایش جریان) مورد مطالعه قرار گرفته و درصد کاهش عمق آب‌شستگی آن‌ها نسبت به مدل پایه استوانه‌ای به دست آمد. نتایج نشان داد در اغلب موارد استفاده از یک ابزار کنترل آب‌شستگی بهتر از ترکیب ابزارهای مختلف عمل می‌نماید. به‌کارگیری شکل عدسی به‌عنوان مقطع هندسی پایه، توانست عمق آب‌شستگی را تا ۵۸ درصد کاهش دهد. مدل ترکیبی مقطع مستطیلی گردگوشه، سکو و شکاف نیز توانست فرسایش بستر را تا ۵۰ درصد کاهش دهد لیکن استفاده از مدل پایه‌های شکاف‌دار برای	مساحت	A	
	شتاب ناشی از نیروهای وزنی	G	
	شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز	f	
	تنش برشی دیواره	τ_b	
	دانسیته سیال	ρ	
	ثابت ون کارمن	κ	
	ضریب زبری	k_s	
	کسر مربوط به قسمت سیال	f	
	سرعت شناوری ذرات رسوب	u_{drift}	
	ضریب درگ ذره رسوب	k_t	
	ضریب شناوری	D_f	
	قطر متوسط ذرات رسوب	d_s	
	تنش برشی بحرانی	τ_{cr}	
	پارامتر شیلدز بحرانی	θ_{cr}	
	سرعت بلند شدن رسوبات	u_{Lift}	
	بردار نرمال	n_s	
	زاویه اصطکاک داخلی رسوبات	ξ	

مراجع

1. Breusers, H. N. C., and Raudkivi, A. J., "Scouring, In: Hydraulic Structures Design Manual", International Association of Hydraulic Research, Balkema, Vol. 2, pp. 143, (1991).
2. Raudkivi, A. J., and Ettema, R., "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 338-50, (1983).
3. Sumer, B. M., and Fredsoe, J., "The mechanics of the scour in the marine environment", *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 17, (2002).
4. Laursen, E. M., and Toch, A., "Scour around bridge piers and abutments", Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, Bureau of Public Roads, Iowa, (1956).
5. Shen, H. W., Schneider, V. R., and Karaki, S. S., "Local scour around bridge piers", *Journal of the*

- Hydraulics Division*, Vol. 95 (HY6), pp. 1919–1940, (1969).
6. Melville, B. W., "Local scour at bridge sites", Rep. No. 117, Dept. of Civil Engineering, School of Engineering, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand, (1975).
 7. Dargahi, B., "Controlling mechanism of local scouring", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 10, pp.1197-1214, (1990).
 8. Graf, W. H., and Istiarto, I., "Flow pattern in the scour hole around a cylinder", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 1, pp. 13-20, (2002).
 9. Drysdale, D. M., "The effectiveness of an aerofoil shaped pier in reducing downstream vortices and turbulence", University of Southern Queensland, (2008).
 10. Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., and Cardoso, A. H., "Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 1, pp. 13-21, (2009a).
 11. Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., and Cardoso, A. H., "Countermeasures against Local Scouring at Bridge Piers: Slot and Combined System of Slot and Bed Sill", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 5, pp. 425-31, (2009b).
 12. Gaudio, R., Tafarojnoruz, A., and Calomino, F., "Combined flow-altering countermeasures against bridge pier scour", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 35-43, (2012).
 13. Richardson, J., and Panchang, V., "Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 5, pp. 530-540, (1998).
 14. Yen, C., Sunglai, J., and Chang, W., "Modeling of 3D flow and scouring around circular piers", *proceeding of National Science Council*, Republic of China, Vol. 25, No. 1, pp.17-26, (2000).
 15. Vasquez, J. A., and Walsh, B. W., "CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow", 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment. ISBN: 978-94-90365-01-1 (2009).
 16. Abdelaziz, S., Bui, M. D., and Rutschmann, P., "Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet", Institute of Hydraulic and Water Resources Engineering, Technische Universität München, Munich, Germany, (2011).
۱۷. مهرزاد، ر.، "بررسی تجربی و عددی پدیده آب شستگی موضعی در اطراف پایه‌های مخروطی شکاف‌دار تحت جریان دائمی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۹۰).
 ۱۸. اسدی پرتو، ا.، اقبال زاده، ا.، و احمدی، آ.، "بررسی اثر قطر پایه بر الگوی جریان در کانال مستقیم با استفاده از Flow3D"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، (۱۳۹۱).
 ۱۹. حمیدی‌فر، ح.، امید، م. ح.، "شبیه‌سازی سه بعدی جریان در آبراهه‌های با مقطع مرکب با مدل Flow3D"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، (۱۳۹۱).
 ۲۰. توحیدی، ح. ر.، "بررسی تجربی و عددی فرایند آب‌شستگی در اطراف پایه‌هایی با مرزهای جانبی متناسب با پروفیل سرعت تحت جریان دائمی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۹۲).

۲۱. حسن زاده، ی.، کاردان، ن.، و حکیم زاده، ح.، "مطالعه عددی سه‌بعدی مدل‌های ترکیبی شکل پایه و شکاف در کاهش تنش‌های برشی آغازکننده آبستنگی پیرامون پایه‌های پل، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست"، ۴۴(۴) صفحات ۳۹ الی ۵۰، (۱۳۹۳).
22. Flow Science, Inc., "FLOW-3D User's Manual", Flow Science, Inc, (2008).
23. Smith, H., and Foster, D., "Modeling of flow around a cylinder over a scoured Bed", *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 121-137, (2005).
24. Brethour, J. M., "Transient 3-d model for lifting, transporting and depositing solid material", International Symposium on Environmental University Hydraulics, Tempe, Arizona, (2001).
25. Soulsby, R. L., and Whitehouse, R. J. S. W., "Threshold of sediment motion in Coastal Environments, Proc", *Combined Australian Coastal Engineering and Port Conference, EA*, pp. 149-154, (1997).
26. Meyer-Peter, E., and Müller, R., "Formulas for bed-load transport", Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, pp. 39-64, (1948).
27. Van Rijn, L. C., "Sediment transport, Part I: bed load transport", *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), pp. 1431-1456, (1984).
۲۸. عبداللہی، م.، و عاطفی، غ.ع.، "شبیه‌سازی پدیده رهایی متناوب گردابه‌ها در یک جریان دو بعدی حول مانع مربعی در یک کانال، با استفاده از روش شبکه بولتزمن"، فصلنامه مکانیک هوافضا (مکانیک سیالات و آیرودینامیک)، ۷(۴) صفحات ۵۱ الی ۶۳، (۱۳۹۰).
29. Melville, B. W., and Chiew, Y. M., "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65, (1999).

راهکار نوین برای ارزیابی شرایط کارگاه‌های ساختمان‌های بلندمرتبه مشهد با رویکرد HSE (مطالعه موردی پروژه‌های ساخت‌وساز)*

پوریا ایلدرآبادی^(۱) امیررضا مهردوست^(۲) جواد علامتیان^(۳)

چکیده ارزیابی خطرهای وابسته به سلامت، ایمنی و محیط‌زیست در پروژه‌های عمرانی با فرآیند HSE انجام می‌پذیرد. این یک شیوه نظام‌مند است که هدف آن حفاظت از سرمایه، نیروی انسانی و محیط‌زیست در برابر خطرهای و حوادث غیرقابل پیش‌بینی در پروژه‌های ساختمانی است. در این مقاله، اهداف، مبانی HSE در پروژه‌های ساختمانی شهر مشهد ارزیابی می‌شوند. برای انجام این کار، نخست عوامل به وجود آورنده خطرهای سلامت، ایمنی و محیط‌زیست در کارگاه‌های ساختمانی شناسایی می‌شوند. سپس، یک تابع عملکرد بر مبنای ریسک‌های سلامت، ایمنی و محیط‌زیست پیشنهاد می‌شود. وزن‌دهی عوامل شناسایی شده و ارزیابی عملکرد تابع پیشنهادی، به ترتیب با استفاده از ماتریس SWOT و شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام می‌گردد. برای انجام این کار، با تهیه و توزیع چک‌لیست‌های سلامت، ایمنی و محیط‌زیست بین کارشناسان HSE، مدیران پروژه و سرپرستان کارگاه‌ها، نظرهای آنها دریافت می‌شود. در ادامه با به‌کارگیری روش ماتریس SWOT و شبیه‌سازی مونت‌کارلو، به ترتیب، وزن‌دهی عوامل شناسایی شده و ارزیابی عملکرد تابع پیشنهادی، انجام می‌پذیرد. نتیجه چنین فرآیندی، طبقه‌بندی خطرهای سلامت، ایمنی و محیط‌زیست در پروژه‌های ساختمانی مشهد، با استفاده از تابع پیشنهادی، است. بر این اساس، فرآیندهای وابسته به ایمنی جوشکاری و خطرهای ناشی از برنامه‌ریزی HSE، به ترتیب، بیشترین و کمترین خطر را در پروژه‌های ساختمانی مشهد ایجاد می‌کنند.

واژه‌های کلیدی صنعت ساختمان، HSE، سلامت، ایمنی، محیط‌زیست، شبیه‌سازی، مونت‌کارلو، ماتریس SWOT.

A New Approach for Evaluation of Workshops of Tall Buildings in Mashhad by HSE Approach (case study: construction projects)

P. Ildarabadi A. Mehrdoust J. Alamatian

Abstract The HSE technique is used for evaluating the health, safety and environmental risks. This is a systematic method which is utilized for protection of capital, manpower and environmental towards the risks of unpredictable events in construction projects. In this paper, HSE method is utilized for evaluating construction projects in Mashhad. For this purpose, health, safety and environmental risks are identified. Then a performance function is proposed based on assumed risks. Weight of identified factors and evaluation the efficiency of proposed function are performed by SWOT matrix and Monte Carlo simulation technique, respectively. To do this, by preparing, distribution and purchasing health, safety and environment checklists between HSE experts, project managers and supervisors of workshops, their comments are received. By running SWOT matrix method and Monte Carlo simulation, health, safety and environmental risks of Mashhad construction projects are classified based on proposed function. Results show that the highest and the lowest risks in construction projects in Mashhad are caused by welding safety related processes and the risks of HSE planning, respectively.

Key Word HSE, Construction project, SWOT method, Monte Carlo simulation technique.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۳/۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۶/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت.

(۲) کارشناس ارشد مهندسی عمران- مدیریت ساخت، موسسه آموزش عالی خاوران.

(۳) نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد.

مقدمه

پیشرفت فناوری و رشد صنعت ساخت‌وساز سبب استفاده از الگوها، ماشین‌آلات و ابزارهای نوین در پروژه‌های عمرانی شده است. هم‌زمان با ورود این روش‌ها و الگوهای نوین، احتمال بروز حوادث و خطاها در فرآیند ساخت افزایش می‌یابد [1]. در این راستا، توجه به نیروی انسانی به‌عنوان اصلی‌ترین سرمایه صنعت ساخت‌وساز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [2]. همچنین، توجه به محیط‌زیست برای تحقق اهداف توسعه پایدار، یکی از معیارهای رقابت‌پذیری این صنعت است [1-2]. بر این اساس، پرداختن به موضوع‌های ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست از اولویت‌های صنعت ساخت‌وساز محسوب می‌شود [2]. بهره‌گیری از یک شیوه جامع و نظام‌مند در این زمینه، بسیار راهگشا خواهد بود. سامانه مدیریت بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست و همان HSE (Health, Safety, Environment) پاسخی به این نیاز مهم است [2]. این سامانه را می‌توان مدیریت سلامت، ایمنی و بهداشت محیط کار دانست [2]. در این فرآیند، بهداشت و سلامتی با نماد H نشان داده می‌شود. موضوع بهداشت شامل بهداشت عمومی و فردی، بهداشت محیط و بهداشت حرفه‌ای است. بهداشت فردی، به سلامت مجموعه افراد وابسته است [3]. بهداشت محیط نیز پیرامون پروژه را دربر می‌گیرد و بهداشت حرفه‌ای شامل تحلیل‌های شغلی است [2-3]. ایمنی با نشانه S مشخص می‌شود. هر پروژه در معرض خطرهایی قرار دارد که در صورت اهمیت ندادن به آنها احتمال ایجاد حوادث ناخوشایند افزایش می‌یابد. شاخص‌های ایمنی پروژه‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد [2-3]. دسته اول ایمنی در عملیات است که حفاری، کار در ارتفاع، جوشکاری و برشکاری، ایمنی ماشین‌آلات و مانند این‌ها را شامل می‌شود. دسته دوم به عامل‌های ایمنی در پروژه‌ها وابسته است که شامل ایمنی انبار، مدیریت حریق، محصورسازی، علائم هشداردهنده و مانند این موارد است. در دسته سوم، ایمنی اشخاص در پروژه‌ها بررسی می‌گردد که مواردی مانند استفاده از تجهیزات حفاظت فردی را دربر می‌گیرد [2-3].

از سوی دیگر، نشانه E برای محیط‌زیست استفاده می‌شود. شاخص‌های محیط‌زیست در پروژه‌های عمرانی شامل هوا، خاک و آب است که به نوع آلاینده منبع آن وابسته است [2-3]. انتشار مواد نفتی مانند نشت گازوئیل که برای سوخت ماشین‌آلات به کار می‌رود، نمونه‌ای از آلودگی خاک است. آلودگی هوا از طریق انتشار گازهای هیدروکربن نسوخته که از آگروز ماشین‌آلات خارج می‌شود، ایجاد می‌شود و با تعمیر و نگهداری آنها کاهش می‌یابد [2-3].

باید دانست، برنامه‌ریزی و اجرای درست شاخص‌های سلامت، ایمنی و محیط‌زیست در صنعت ساخت‌وساز سبب کاهش ریسک‌های سرمایه‌گذاری و نیروی انسانی پروژه‌ها می‌گردد [4]. برای دستیابی به این هدف، باید عامل‌هایی که در ارزیابی عملکرد سلامت، ایمنی و محیط‌زیست اثرگذارند را بررسی کرد [4]. همه شاخص‌هایی که در موضوع HSE استفاده می‌شوند، مانند ضریب‌های تکرار و شدت آسیب‌های اتلاف وقت، میزان فوت‌ها، نرخ بیماری‌های شغلی و میزان انتشار آلاینده‌ها، از نوع شاخص‌های تابع یا پیامد هستند که به گذشته نظر دارند. به سخن دیگر، هیچ‌یک از این عامل‌ها تضمین نمی‌کنند نتایج به‌دست‌آمده بر اساس آنها در آینده نیز تداوم داشته باشند [4].

بنابراین، ضروری است شاخص‌هایی انتخاب شوند تا علاوه بر نشان دادن وضعیت پیشین، فعالیت‌های آینده را نیز دربر گیرند. از آنجایی که هدف اساسی در چشم‌انداز HSE، کنترل و کاهش حوادث و خطرهای زیست‌محیطی است، باید شاخص‌هایی که نشان‌دهنده این اقدامات (کنترل و کاهش) هستند، تعیین و رتبه‌بندی شوند [5].

مدیریت ریسک در سیستم مدیریت بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست شامل تجزیه و تحلیل، ارزیابی و کنترل جنبه‌های زیست‌محیطی، خطرهای بالقوه و عوامل زیان‌آور بهداشتی است [3]. روش‌های ارزیابی مبحث HSE در صنعت ساخت‌وساز رو به گسترش است، این روش‌ها معمولاً برای شناسایی، کنترل و کاهش پیامدهای خطرات به کار می‌رود [3]. اکثر روش‌های ارزیابی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود، دسته اول شامل مطالعه موردی

با استفاده از ماتریس SWOT و شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌پذیرد. در پایان، با استفاده از تابع پیشنهادی، ریسک‌های سلامت، ایمنی و محیط‌زیست در پروژه‌ها طبقه‌بندی می‌شوند.

شناسایی ریسک‌های سلامت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE)

افزایش بهره‌وری و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و حوادث در کارگاهی از هدف‌های صنعت ساخت‌وساز هستند. از این رو، سامانه مدیریت HSE تلاش می‌کند ریسک‌های پروژه شناسایی گردند و همه شرایط بهداشتی، ایمنی و محیط‌زیست کنترل شوند تا خطرهایی که از جانب آن‌ها سلامتی افراد، ایمنی و محیط‌زیست را تهدید می‌کنند، کاهش یابند. برای دستیابی به این هدف، به‌کارگیری روش‌های شناسایی خطر، تعیین و دسته‌بندی ریسک‌های موجود در محیط کار الزامی است. می‌توان با ارائه چک‌لیست‌های پیشنهادی، شرایط کارگاه‌ها را ارزیابی کرد. از این رو، لازم است با توجه به دانش، مهارت‌های علمی و تخصصی، فرهنگ محیط کارگاه و نیروی کار و تجربه عملی افراد کارشناس و مسئولین پروژه‌های عمرانی چک‌لیست‌ها تهیه و تدوین گردند [2,9,10].

چک‌لیست‌های راهنما، روش سودمندی برای حصول اطمینان از شناسایی و ارزیابی همه خطرهای سلامت، ایمنی و محیط‌زیست می‌باشند. استفاده از این چک‌لیست‌ها نباید سبب محدود شدن دامنه هرگونه بازنگری گردد [9]. چک‌لیست‌ها معمولاً از استانداردها و تجارب عملیاتی استخراج می‌شوند. در نتیجه، فعالیت‌ها بر حوزه‌هایی که در آنها پتانسیل اشتباه زیاد است و یا دارای سوابق نامناسب می‌باشند، متمرکز می‌شوند. چک‌لیست‌ها باید شامل نتایج بررسی حوادث یا رویدادها باشند و بسته به کاربرد مورد نظر، ممکن است کلی (جنبه‌ها و پیامدهای زیست‌محیطی، کاهش منابع غیرقابل بازگشت سوخت فسیلی و یا آلودگی حرارتی و گرم شدن جهانی) و یا جزئی (اثراتی بر خاک، آب‌وهوا، تغییر در اکوسیستم منطقه) باشند [10,11].

شهری بر اساس شرایط موجود در کارگاه‌ها و دسته دوم بر مبنای گزارش‌ها، نظرات و تجربیات اشخاص است. با وجود این، آنچه در بیشتر این پژوهش‌ها مشترک است، انجام ارزیابی‌ها بر مبنای پرسشنامه (چک‌لیست) است [5-8].

در موضوع HSE، پژوهش‌هایی مدیریت ایمنی کارگاه را از روش‌های سلسه‌مراتبی فازی بررسی کرده‌اند و با استفاده از روش داده‌کاوی به تحلیل حوادث شغلی در صنعت ساختمان پرداخته‌اند [5]. همچنین، برای رتبه‌بندی عوامل اصلی خطر سقوط در صنعت بلندمرتبه‌سازی، از تحلیل درخت خطا استفاده شده است [2]. ارزیابی ریسک ایمنی در پروژه‌های انبوه‌سازی ساختمان‌ها، با استفاده از روش فازی انجام پذیرفت. در این فرآیند، با انجام مصاحبه با کارشناس‌ها و طراحی پرسش‌نامه به بررسی شرایط ایمنی کارگاه‌ها پرداخته شده است [1]. همچنین، پژوهشی در زمینه الگوی رتبه‌بندی HSE پیمانکاران پیش از قرارداد انجام پذیرفته است. این پژوهش با ارائه روشی جدید، پیمان‌ها را به سه دسته پیشرفته، متوسط و مقدماتی تقسیم نموده است [6]. سپس، با تدوین پرسشنامه HSE وضعیت پیمانکاران پیش از ورود به مناقصه مورد بررسی گرفته و با ارزیابی پرسشنامه و وزن‌دهی عوامل آن، پیمانکاران در گروه‌های مختلف قرار گرفته‌اند [6]. همچنین، مطالعه‌ای به مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد سیستم HSE پرداخته است. این مدل وضعیت عملکرد سامانه را در دو بخش نتایج و توانمندسازی مشخص می‌کند و این امکان را به سازمان‌ها می‌دهد تا با درک وضعیت موجود، شرایط رسیدن به وضعیت بهتر و بهبود مستمر آن برنامه‌ریزی گردد [8].

در این مقاله، نخست، عامل‌های پدیدآورنده ریسک‌های سلامت، ایمنی و محیط‌زیست برای پروژه‌های ساختمانی شهر مشهد شناسایی می‌شوند. سپس، با تهیه پرسشنامه و ارائه آن‌ها به کارشناسان، اهمیت هر یک از این عوامل مشخص می‌گردد. در ادامه، یک تابع عملکرد بر مبنای ریسک‌های سلامت، ایمنی و محیط‌زیست پیشنهاد می‌شود. وزن‌دهی عوامل شناسایی شده و ارزیابی عملکرد تابع پیشنهادی، به ترتیب

چک‌لیست‌های پیشنهادی سعی شده است، تقریباً همه ابعاد مدیریت اجرای بهداشت حرفه‌ای، ایمنی و سلامت کارگران در نظر گرفته شود. در ادامه، این چک‌لیست‌ها برای ارزیابی کارگاه‌های ساختمانی استفاده می‌شوند. چک‌لیست‌ها توسط کارشناسان HSE و مهندسين شاغل در پروژه‌های عمرانی تکمیل می‌گردند.

در چک‌لیست‌های تهیه‌شده سعی شده است رخدادهای و حوادث کارگاهی در نظر گرفته شوند. باید دانست، برای ارزیابی چک‌لیست‌های تدوین‌شده، عوامل تشکیل‌دهنده آنها با آمارهای شرکت‌های بیمه مقایسه شده‌اند تا حوادث پرتکرار کارگاهی در آنها وارد شده باشند.

به عنوان نمونه، برای ایمنی سازه نهبان در پروژه‌های مورد بررسی، از پرسشنامه جدول (۱) استفاده شده است.

فرآیند مدیریت و ارزیابی HSE شامل، جمع‌آوری داده‌ها، شناسایی خطرات، ارزیابی، ارائه اقدامات کنترلی و بازنگری است. از این رو چک‌لیست‌های پیشنهادی HSE باید همه فرآیندهای طراحی، ساخت، راه‌اندازی، بهره‌برداری و برچیدن کارگاه را شامل شود.

در این پژوهش، روش آماده‌سازی چک‌لیست‌ها با مصاحبه و نظرسنجی از اساتید HSE فنی حرفه‌ای، اساتید دانشگاهی، کتاب‌ها و آیین‌نامه‌های موجود در صنعت ساختمان انجام می‌پذیرد. چک‌لیست‌های ارائه‌شده در این بخش با هدف شناسایی و ارزیابی کارگاه‌های ساختمانی تدوین شده‌اند. این چک‌لیست‌ها در هشت جدول کلی شامل چک‌لیست برنامه‌ریزی بهداشت، ایمنی و محیط-زیست، ایمنی سازه نهبان، ایمنی کار هنگام جوشکاری، آتش‌نشانی، بهداشت کارگاه، ایمن‌سازی محیط کارگاه، ایمنی کار با جرثقیل و ایمنی برق کارگاه درج شده‌اند. در

جدول (۱): چک‌لیست ایمنی سازه نهبان

ردیف	عناوین سؤالات	بلی	خیر	امتیاز
۱	آیا قبل از شروع خاک‌برداری محل عبور تأسیسات زیرزمینی مشخص شده است؟			
۲	آیا اقدامات لازم جهت جلوگیری از خسارت و آسیب‌دیدگی به تأسیسات زیرزمینی انجام شده است؟ (هماهنگی با ارگان‌ها و سازمان‌های مرتبط)			
۳	آیا اگر شواهدی از احتمال ریزش خاک، خرابی سیستم محافظ یا حوادثی از این قبیل دیده شد، کار تعطیل و کارگران از محل خطر دور می‌شوند؟			
۴	آیا سیستم مناسب جهت محافظت از دیوارهای گود که محل کار کارگران بوده و احتمال ریزش وجود دارد تعبیه شده است؟			
۵	آیا تجهیزات لازم برای مواقع اضطراری در محل‌هایی که استفاده از سیستم‌های زهکش و کنترل آب به‌طور مدام لازم است در نظر گرفته شده است؟			
۶	آیا تجهیزات و مصالح مورد استفاده برای سیستم‌های محافظ سالم و بی‌عیب هستند؟			
۷	آیا تدابیر لازم برای خاک‌های ریزشی در نظر گرفته شده است؟			
۸	چنانچه ساختمان مجاور به ساختمان موجود تکیه داده است سازه نهبان مناسب در نظر گرفته شده است؟			
۹	آیا از محل پروژه بازدید شده و معارضین محل بازدید شده است؟			
۱۰	آیا نقشه سازه نهبان برای کلیه ابعاد موجود است؟			

حالت برابر یک می‌باشند. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که نکات ایمنی مطابق استانداردهای موجود برای همه عوامل شنا سایی شده در کارگاه‌های ساختمانی رعایت شوند. در غیر این صورت، با توجه به اهمیت داده شده به عوامل شناسایی شده در کارگاه ساختمانی، فرآیند امتیازدهی توسط کارشناسان انجام می‌پذیرد.

از سوی دیگر، عامل‌های به کار رفته در این تابع، شامل هشت فعالیت کلی می‌باشند. این عوامل به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که عناصر سه گانه مببحث HSE را شامل می‌شوند. همچنین، هریک از این فعالیت‌ها به اجزای تشکیل دهنده آنها گسسته شده‌اند. این کار با تهیه تعدادی پرسشنامه و درج اجزای هر فعالیت در آنها انجام می‌پذیرد.

شایان توجه است، هنگام پیشنهاد هر مدل، سه ویژگی نوع عامل‌ها، وزن هر یک و چگونگی اثر آنها در کمیت پاسخ (خطی یا غیرخطی) لحاظ می‌شود. برای ارزیابی خطرهای رایج کارگاهی چنین روشی به کار می‌رود. شناسایی و پیشنهاد نوع عامل‌های اثرگذار در خطرهای کارگاهی با بررسی مراجع و نظر متخصصان انجام می‌پذیرد. در اینجا، دو هدف رتبه‌بندی عامل‌ها در بروز خطرهای کارگاهی و تحلیل حساسیت خطر نسبت به هریک از آنها در نظر گرفته می‌شود. برای دستیابی به این دو هدف، لازم است اثر هر عامل در تعریف مدل یکسان در نظر گرفته شود. در نتیجه، از الگوی خطی برای نوشتن مدل استفاده شد. با انجام رتبه‌بندی، وزن هر عامل مشخص می‌شود. همچنین، می‌توان تحلیل حساسیت را بر روی عامل‌های مختلف انجام داد. باید دانست پس از رتبه‌بندی و تحلیل حساسیت، می‌توان پژوهش پیش‌رو را با در نظر گرفتن توابع غیرخطی (چندجمله‌ای درجه بالا) گسترش داد.

شایان یادآوری است، در این پژوهش از روش عددی ماتریس SWOT برای ارزیابی و امتیازدهی فعالیت‌ها استفاده می‌شود. روش SWOT یکی از توانمندترین شیوه‌های امتیازدهی و وزن‌دهی است. باید دانست

داده‌های آماری مورد نیاز برای ارزیابی شرایط کارگاه‌ها با توزیع چک‌لیست‌ها بین کارشناسان سلامت، ایمنی و محیط‌زیست، مدیران پروژه و سرپرستان کارگاه‌های ساختمانی، به دست می‌آید.

مدل پیشنهادی

این پژوهش به بررسی کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه در صنعت ساخت و ساز می‌پردازد. برای تحلیل شرایط کارگاه‌های ساختمانی از دیدگاه HSE، فعالیت‌های کلیدی و تأثیرگذار بر وضعیت آنها شناسایی می‌شوند. این فعالیت‌ها دارای عدم قطعیت می‌باشند و بر ریسک کارگاه ساختمانی اثر دارند. باید دانست، فرآیند شناسایی و تجزیه فعالیت‌ها توسط کارشناسان و مراجع موجود در زمینه HSE انجام شده است. در این راستا، یک تابع نوین برای ارزیابی شرایط کارگاه‌های ساختمانی پیشنهاد می‌شود:

$$SF = h \times H + s \times S + ss \times SS + f \times F + p \times P + e \times E + w \times W + c \times C \quad (1)$$

در رابطه (۱)، عامل‌های H، S، SS، F، P، E، W و C به ترتیب، بهداشت، ایمنی محیط کارگاه، سازه نگهبان، آتش‌نشانی، برنامه‌ریزی HSE، ایمنی برق، جوشکاری و جرثقیل می‌باشند. همچنین، کمیت‌های h، s، ss، f، p، e، w و c به ترتیب وزن عامل‌های بهداشت، ایمنی محیط کارگاه، سازه نگهبان، آتش‌نشانی، برنامه‌ریزی HSE، ایمنی برق، جوشکاری و جرثقیل را در تابع پیشنهادی برای عامل ایمنی (SF) مشخص می‌کنند. باید دانست، این ضرایب وزنی برای افزایش دقت نتایج تابع پیشنهادی در نظر گرفته شده است. ضریب‌های وزنی کمک می‌کنند تا میزان اثرگذاری و اهمیت پارامترها در شرایط کارگاه به درستی منظور شوند. این ضرایب وزنی به صورت درصدی ارائه می‌شوند و بر اساس نظرات کارشناسان و مسئولین HSE کارگاه‌های ساختمانی محاسبه می‌شوند. لازم به توضیح است که ضریب‌های پیش‌بینی شده، در بهترین

صورت وجود داده‌های آماری محدود، آنها دربرگیرنده همه حالت‌های رخدادها در کارگاه‌ها نیستند؛ بنابراین، برای انجام ارزیابی جامع از شرایط کارگاهی و درنظرگرفتن همه جوانب، لازم است داده‌های آماری مورد نیاز تولید شوند. این کار، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام می‌پذیرد. باید دانست، با افزایش تعداد نمونه‌های تولیدشده می‌توان خطای شبیه‌سازی را کاهش داد و حالت‌های ممکن را در نظر گرفت. این شیوه کمک می‌کند تا شرایط مختلف کارگاه‌های ساختمانی بررسی گردند و دقت پاسخ تابع پیشنهادی بیشتر شود.

روش‌های تحلیل و ارزیابی

در این پژوهش برای ارزیابی و شبیه‌پرسش‌نامه‌ها از روش تحلیل ماتریس SWOT و برای ارزیابی مدل پیشنهادی از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است.

تحلیل ماتریس SWOT

در این روش عوامل خارجی و داخلی اثرگذار بر یک سازمان و یا یک فرآیند بررسی می‌شوند. این روش به رتبه‌بندی عوامل اثرگذار بر روی فرصت‌ها، تهدیدها، نقاط قوت و نقاط ضعف یک سازمان می‌پردازد. روش ماتریس SWOT یکی از ابزارهای مهمی است که مدیران به‌وسیله آن می‌توانند اطلاعات مربوط به عوامل داخل و خارج سازمان را مقایسه کنند [10]. اصول ایجاد این ماتریس تکیه بر مشاهدات و بررسی‌های میدانی پژوهشگر است و برای تکمیل آن نیاز به انجام گام‌های زیر است:

- گام اول: شناسایی عوامل‌های اثرگذار بر مبحث HSE؛
- گام دوم: تهیه چک‌لیست کمیته‌های تشکیل‌دهنده هر عامل؛
- گام سوم: توزیع چک‌لیست‌های تدوین‌شده بین

در این روش، با افزودن هر عامل وزن آن در تابع پیشنهادی لحاظ می‌گردد. از سوی دیگر، وزن هر عامل بر پایه داده‌های چک‌لیست به دست می‌آید. درنهایت، امتیاز هر چک‌لیست با توجه به نظر کارشناسان حساب می‌شود. همچنین، از روش SWOT برای تحلیل حساسیت استفاده می‌گردد. برای انجام این کار، با تغییر هر عامل، نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

باید افزود، روش‌هایی مانند فازی، الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی و شیوه‌های مشابه، برای ارزیابی خطر و تحلیل حساسیت وجود دارند. باوجوداین، الگوریتم روش ماتریس SWOT نسبت به دیگر فرایندها ساده‌تر است. با وجود سادگی، دقت روش SWOT در تحلیل حساسیت مناسب است.

بر این اساس، تابع پیشنهادی بر مبنای امتیازدهی ماتریس SWOT مدل شده است. چنانچه، حاصل ضرب عدد اختصاص‌یافته به ضریب‌های وزنی عامل‌ها (حرف-های کوچک در رابطه ۱)، در مقدار عددی به‌دست‌آمده از فرآیند ماتریس SWOT برای هر عامل (حرف‌های بزرگ در رابطه ۱)، از عدد ۲/۵ بیشتر شود، بر اساس رتبه‌بندی ماتریس SWOT آن کمیته در وضعیت مطلوبی قرار دارد. درنتیجه، هرگاه همه عامل‌های شناسایی‌شده، کمترین امتیاز مطلوب را کسب نمایند، مقدار عددی تابع پیشنهادی عدد ۲۰ خواهد شد.

$$SF_{all} = h \times H + s \times S + ss \times SS + f \times F + p \times P + e \times E + w \times W + c \times C = 20 \quad (2)$$

درنتیجه، با مقایسه عدد عامل ایمنی هر کارگاه (SF) با کمترین مقدار قابل پذیرش عامل ایمنی (SF_{all})، می‌توان وضعیت کارگاه ساختمانی را از دیدگاه HSE بررسی کرد. برای افزایش داده‌های آماری و به دست آوردن تخمین ریسک موضوع HSE در کارگاه‌های ساختمانی، از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود. دلیل استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، کمبود و یا فقدان داده‌های آماری واقعی است. همچنین، در

کارگاه‌های ساختمانی؛

گام چهارم: وزن دهی به هر کمیت با اعداد بین صفر تا یک (عدد صفر برای کمیت‌های بی‌اهمیت و عدد یک برای کمیت‌های بسیار مهم). باید دانست، بر اساس ماتریس SWOT، جمع ضریب‌های اختصاص داده شده به کمیت‌های تشکیل دهنده هر عامل باید مساوی با یک باشد. برای انجام این کار، در این پژوهش به هر کمیت عددی بین صفر تا صد اختصاص داده می‌شود. سپس، با نرمالیزه کردن آنها، وزنهایی بین صفر تا یک برای هر کمیت به دست می‌آید. مجموع وزنها نیز برابر با یک است (این فرآیند در قسمت محاسبات تشریح می‌شود)؛

گام پنجم: برای هر عامل یک امتیاز بین یک تا چهار بر حسب میزان تأثیر بر اهداف HSE داده می‌شود. این امتیاز بیانگر میزان اثربخشی عامل بر واکنش مبحث مورد بررسی است. عدد چهار به این معنی است که واکنش عالی است (بسیار مهم). اگر واکنش بسیار ضعیف باشد، عدد یک به آن اختصاص می‌یابد (بی‌اهمیت)؛

گام ششم: محاسبه امتیازهای وزن‌دار هر عامل. برای دستیابی به این هدف، ضریب اهمیت هر عامل را در امتیاز اختصاص یافته شده توسط خبرگان و کارشناسان ضرب می‌گردد این فرآیند برای هر یک از عوامل چک‌لیست تدوین شده انجام می‌پذیرد؛

گام هفتم: محاسبه جمع امتیازهای وزن‌دار برای هر جدول (چک‌لیست). باید دانست، مجموع امتیاز به‌دست‌آمده بین ۱ و ۴ خواهد بود. بر اساس استاندارد SWOT امتیاز متوسط و قابل قبول برای هر چک‌لیست در روش SWOT برابر ۲/۵ است.

در اینجا برای روشن شدن گام‌های بیان‌شده، فرآیند وزن‌دهی و امتیازدهی برای چک‌لیست ایمنی سازه نگهبان، در جدول (۲) بیان شده است.

بر اساس داده‌های جدول (۲)، برای نرمالیزه کردن، مجموع امتیازهای اختصاص یافته توسط کارشناسان محاسبه می‌گردد (در اینجا امتیاز ۹۳۰ است). سپس، امتیاز هر عامل بر این عدد تقسیم می‌شود. با انجام این فرآیند، وزن هر عامل به دست می‌آید (ستون وزن در جدول ۳). اکنون، جمع وزن‌های چک‌لیست برابر یک می‌گردد که با روش ماتریس SWOT سازگار است. در حقیقت، با نرمالیزه کردن امتیازهای کارشناسان، وزن عامل‌های جدول به دست می‌آید. برای محاسبه امتیاز وزن‌دار هر کمیت، کافی است امتیاز وضع موجود آن کمیت در وزن آن ضرب گردد. در پایان، امتیاز کسب‌شده برای چک‌لیست ایمنی سازه نگهبان، بر اساس روش SWOT، ۳/۸۲۷۹ است. این عدد از مجموع امتیازهای وزن‌دار کمیت‌های موجود در چک‌لیست به دست می‌آید. با توجه به دسته‌بندی امتیازها در روش ماتریس SWOT، به مبحث سازه نگهبان در کارگاه مورد بررسی اهمیت جدی و ویژه‌ای داده می‌شود. همچنین، با توجه به امتیاز به‌دست‌آمده برای این چک‌لیست (جدول ۲)، این عامل به‌عنوان یک فرصت در جهت کاهش خطرهای احتمالی منظور می‌گردد.

این فرآیند برای همه عامل‌های شناسایی شده در تابع پیشنهادی تکرار می‌شود. با این روش، کارگاه‌های ساختمانی شهر مشهد از دیدگاه موضوع HSE بررسی می‌گردند. همچنین، هشت عامل شناسایی شده رتبه‌بندی می‌شوند. با این کار، می‌توان این عامل‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود و میزان اثرگذاری هر یک از آنها را در کارگاه ساختمانی تعیین کرد.

جدول (۲): امتیازدهی چک‌لیست ایمنی سازه نگهبان بر اساس SWOT

ردیف	عناوین سؤالات	امتیاز کارشناس	امتیاز وضع موجود	وزن	امتیاز وزن‌دار
۱	آیا قبل از شروع خاک‌برداری محل عبور تأسیسات زیرزمینی مشخص شده است؟	۱۰۰	۴	۰,۱۰۷	۰,۴۳۰
۲	آیا اقدامات لازم جهت جلوگیری از خسارت و آسیب‌دیدگی به تأسیسات زیرزمینی انجام شده است؟ (هماهنگی با ارگان‌ها و سازمان‌های مرتبط)	۸۰	۳	۰,۰۸۶	۰,۲۵۸
۳	آیا اگر شواهدی از احتمال ریزش خاک، خرابی سیستم محافظ یا حوادثی از این قبیل دیده شد، کار تعطیل و کارگران از محل خطر دور می‌شوند؟	۱۰۰	۴	۰,۱۰۷	۰,۴۳۰
۴	آیا سیستم مناسب جهت محافظت از دیوارهای گود که محل کار کارگران بوده و احتمال ریزش وجود دارد تعبیه شده است؟	۹۰	۴	۰,۰۹۶	۰,۳۸۰
۵	آیا تجهیزات لازم برای مواقع اضطراری در محل‌هایی که استفاده از سیستم‌های زهکش و کنترل آب به‌طور مدام لازم است، در نظر گرفته شده است؟	۹۰	۴	۰,۰۹۶	۰,۳۸۷
۶	آیا تجهیزات و مصالح مورد استفاده برای سیستم‌های محافظ، سالم و بی‌عیب هستند؟	۸۰	۳	۰,۰۸۶	۰,۲۵۸
۷	آیا تدابیر لازم برای خاک‌های ریزشی در نظر گرفته شده است؟	۹۰	۴	۰,۰۹۶	۰,۳۸۷
۸	چنانچه ساختمان مجاور به ساختمان موجود تکیه داده است سازه نگهبان مناسب در نظر گرفته شده است؟	۱۰۰	۴	۰,۱۰۷	۰,۴۳۰
۹	آیا از محل پروژه بازدید شده و معارضین محل بازدید شده است؟	۱۰۰	۴	۰,۱۰۷	۰,۴۳۰
۱۰	آیا نقشه سازه نگهبان برای کلیه ابعاد موجود است؟	۱۰۰	۴	۰,۱۰۷	۰,۴۳۰
جمع		۹۳۰		۱	۳,۸۲۷

ایمنی
سازه
نگهبان

شبیه‌سازی مونت کارلو

[12,13].

در روش مونت‌کارلو، نخست باید عامل‌های اثرگذار بر مدل شناسایی شوند. سپس، برای هر عامل توزیع مناسب انتخاب گردد. این کار با توجه به شناخت تحلیلگر از سامانه انجام می‌پذیرد. در ادامه، با توجه به نوع توزیع متغیرها، رفتار سامانه شبیه‌سازی می‌گردد [12,13].

شبیه‌سازی مونت‌کارلو از جمله روش‌های پیش‌بینی شرایط است. این روش می‌تواند عوامل اثرگذار در خروجی مدل پیشنهادی را با استفاده از تولید نمونه‌های تصادفی شبیه‌سازی کند و پیامدهای احتمالی را در محدوده مورد انتظار پیش‌بینی کند. درواقع شبیه‌سازی مونت‌کارلو با مدل‌سازی وقایعی که احتمال رخداد آن‌ها وجود دارد، رفتار مدل پیشنهادی را ارزیابی می‌کند

نمی‌توان همه رخدادهای ممکن در پروژه‌ها را بررسی کرد. ازاین‌رو، برای افزایش جامعه آماری در محدوده تغییرات پروژه‌ها، روش شبیه‌سازی مونت کارلو به کار گرفته می‌شود.

جدول (۳): پروژه‌های بررسی شده و کارشناسان

نام پروژه	سمت / سابقه کارشناس (سال)
المان (هاشمیه)	مدیر پروژه / ۱۷
یاس مسکونی (ارشاد)	کارشناس HSE / ۱۰ کارشناس بهداشت حرفه‌ای / ۱۲
آرمیتاژ (گلشن)	ناظر عالی معماری / ۱۲ مسئول HSE / ۱۰
یاس تجاری-اداری (جانباز)	مسئول اجرایی کارگاه / ۱۵ سرپرست کارگاه / ۱۲ افسر HSE / ۱۰ افسر HSE / ۱۰

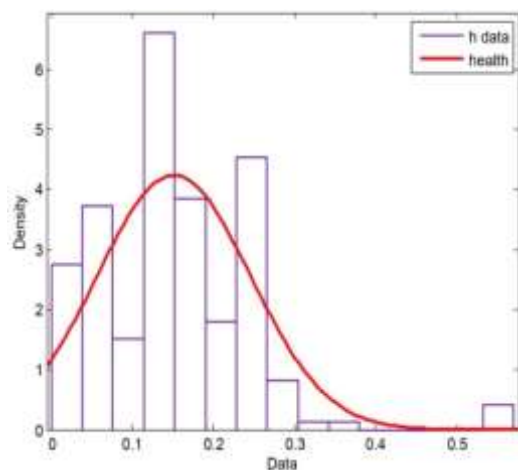
شبیه‌سازی تابع پیشنهادی بر مبنای جامعه آماری و داده‌های واقعی انجام می‌پذیرد. همچنین، در این پژوهش با توجه به محدود بودن تعداد پروژه‌های بررسی شده (تعداد محدود پروژه‌های بلندمرتبه)، برای افزایش جامعه آماری از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. فرآیند کار در شبیه‌سازی مونت کارلو بر مبنای آگاهی داشتن از توابع توزیع احتمال است. سپس، با تولید اعداد تصادفی، رخدادهایی که احتمال وقوع آن‌ها وجود دارد، بررسی می‌شوند. به سخن دیگر، شبیه‌سازی مونت کارلو با توجه به توابع توزیع احتمال متغیرهای ورودی (جامعه آماری به دست آمده از چک‌لیست‌ها)، رخدادهای تصادفی تولید می‌کند و پیش‌بینی آینده را میسر می‌سازد. در این راستا، برای تولید داده‌های تصادفی و افزایش جامعه آماری در محدوده مورد انتظار، شناخت رفتار پارامترها ضروری است. بر این اساس، تعیین توابع توزیع احتمال عامل‌ها با استفاده از داده‌های آماری جمع‌آوری شده (نظریات کارشناسان) مشخص شده‌اند و در شکل‌های (۱) تا (۷) نمایش داده شده‌اند.

داده‌های پژوهش

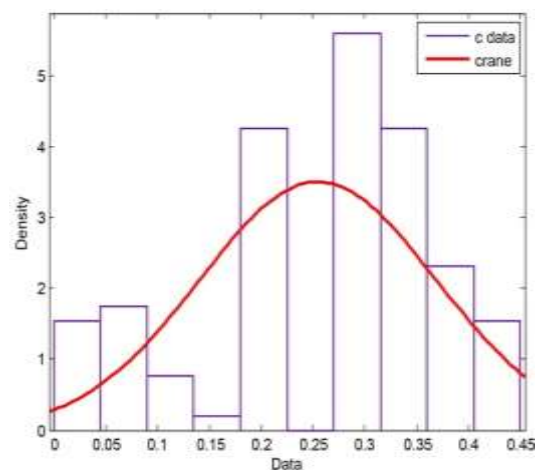
در این پژوهش، برای ارزیابی شرایط موضوع HSE در کارگاه‌های ساختمانی، پروژه‌های بلندمرتبه شهر مشهد بررسی می‌شوند. برای انجام این فرآیند، چک‌لیست‌های تدوین شده، در کارگاه‌های بلندمرتبه شهر مشهد توزیع شدند. پروژه‌های بررسی شده شامل کارگاه‌های ساختمانی؛ پروژه گروه المان واقع در بلوار هاشمیه، یاس (مسکونی) در بلوار ارشاد، آرمیتاژ گلشن و یاس (تجاری - اداری) در میدان جانباز می‌باشند. این چک‌لیست‌ها توسط مدیران پروژه، افسرهای HSE، مهندس‌های بهداشت حرفه‌ای، ناظران عالی معماری، مسئول‌های اجرایی کارگاه، سرپرستان کارگاه، مسئول‌های HSE، و کارشناسان HSE تکمیل شدند. باید افزود، سابقه کار اجرایی همه این افراد بالای ۱۰ سال است. نحوه امتیازدهی کارشناسان به چک‌لیست‌ها از صفر (۰) تا صد (۱۰۰) است. در اینجا، عدد (۰) بیانگر بدبینانه‌ترین حالت است (عامل مورد نظر در کارگاه اجرا نمی‌گردد و یا به آن بی‌توجهی می‌شود). امتیاز (۱۰۰) نشانگر بهترین حالت است به گونه‌ای که آن عامل در کارگاه ساختمانی با الگوی صحیح اجرا می‌گردد.

باید افزود، فقدان پروژه‌های ساختمانی بلندمرتبه که در آنها ضوابط و اصول مدیریت پروژه لحاظ شده‌اند، سبب گردید داده‌های پژوهش تنها از این چهار پروژه به دست آیند. برای برطرف کردن مشکل کمبود داده‌های ورودی و نیز در نظر گرفتن همه حالت‌های ممکن، از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید داده‌های مناسب استفاده شد. با استفاده از شبیه‌سازی، می‌توان مدل پیشنهادی را به صورت جامع و کامل بررسی کرد؛ زیرا داده‌های در دسترس (گردآوری شده از چک‌لیست‌ها)، برای پروژه‌های واقعی محدود می‌باشند و همه حالت‌های ممکن را نیز دربر نمی‌گیرند. شبیه‌سازی مونت کارلو این کاستی‌ها را برطرف می‌کند. در جدول (۳)، نام پروژه‌ها به همراه ویژگی‌های کارشناسان تکمیل‌کننده پرسشنامه‌ها درج شده‌اند.

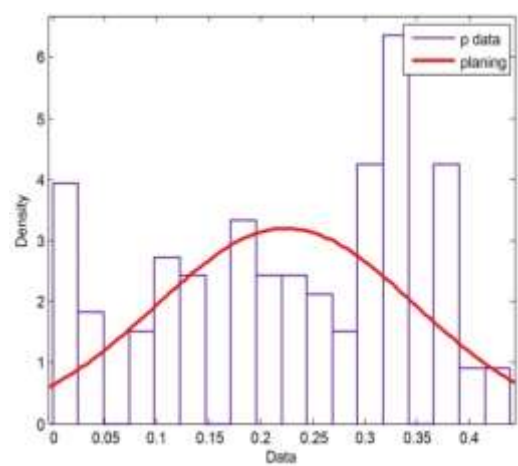
باید دانست، با توجه به تعداد محدود چک‌لیست‌ها،



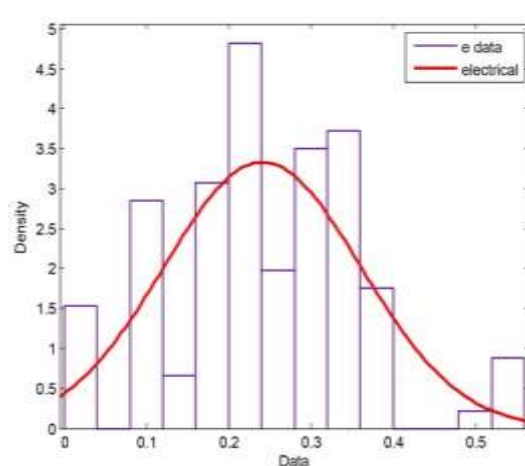
شکل (۴): هیستوگرام بهداشت کارگاه



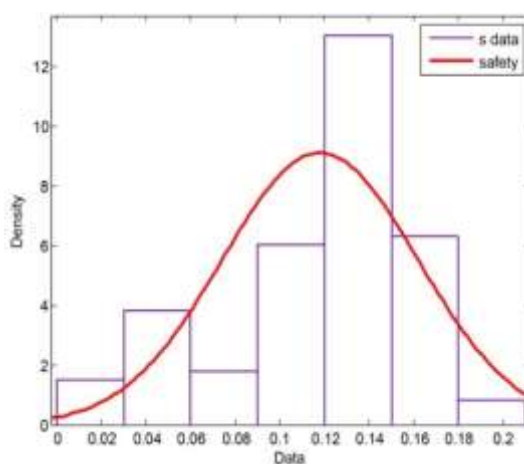
شکل (۱): هیستوگرام جثه قلی



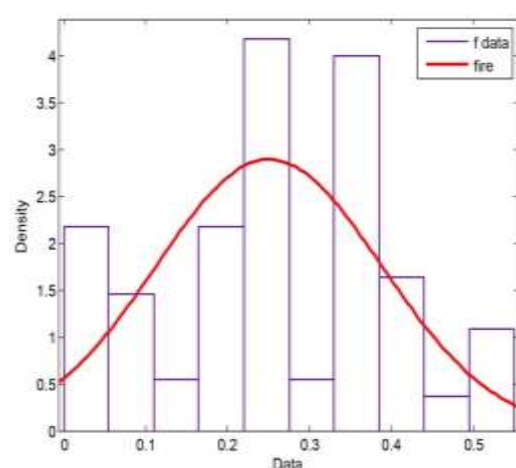
شکل (۵): هیستوگرام برنامه‌ریزی HSE



شکل (۲): هیستوگرام ایمنی برق



شکل (۶): هیستوگرام ایمنی محیط

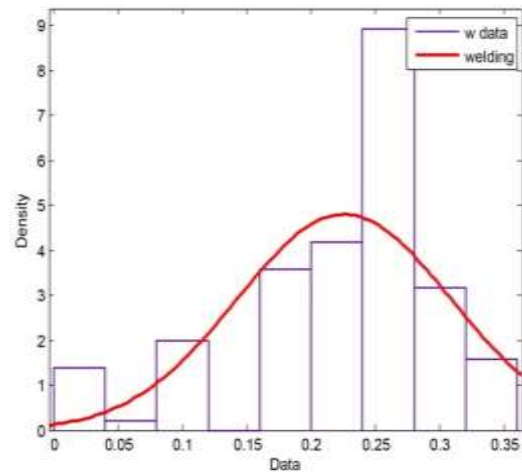


شکل (۳): هیستوگرام ایمنی آتش‌نشانی

پیشنهادی استفاده کرد. از این رو، شبیه‌سازی عامل‌ها برای افزایش جامعه آماری بر مبنای تابع توزیع احتمال نرمال انجام می‌پذیرد. به سخن دیگر، تولید داده در روش مونت‌کارلو، با استفاده از میانگین و انحراف معیار داده‌های واقعی و فرض تابع توزیع انجام می‌پذیرد. در اینجا، مهم‌ترین عامل، نوع تابع توزیع احتمال است. برای انجام این کار، نمودارهای تابع چگالی احتمال (PDF)، با توجه به تعریف آماری آن در شکل‌های (۱) تا (۷) رسم شده‌اند. بر این اساس، برای تولید داده‌ها در شبیه‌سازی مونت‌کارلو از توزیع نرمال استفاده شد (توابع لگ نرمال و یکنواخت مناسب نیستند). روشن است، هرچه تعداد داده‌های واقعی بیشتر باشند، دقت این تابع‌های توزیع هم بیشتر می‌گردد. باید دانست، تابع توزیع رسم شده برای داده‌ها، مطابق روش‌های ریاضی و آماری استاندارد است که بهترین تابع توزیع منطبق بر داده‌ها را مشخص می‌کنند.

همچنین، در بیشتر کارگاه‌های بررسی‌شده سازه نگهبان اجرا نشده بود. در نتیجه، داده‌های آماری کافی برای تعیین توزیع توابع احتمال در دسترس نیست. از این رو، رفتار عامل سازه نگهبان نیز مشابه دیگر عوامل نرمال فرض می‌گردد و شبیه‌سازی آن با استفاده از تابع توزیع احتمال نرمال انجام می‌پذیرد. ویژگی‌های آماری عامل‌ها برای انجام شبیه‌سازی در جدول (۴) درج شده‌اند.

مقدارهای درج شده در جدول (۴) حاصل از وزن دهی عامل‌های شناسایی‌شده بر اساس ماتریس SWOT است. شایان توجه است که همه این مقادارها بر اساس نظرهای کارشناسان صنعت بلندمرتبه‌سازی به‌دست‌آمده‌اند. در این راستا، فرآیند شبیه‌سازی بر مبنای جامعه آماری واقعی انجام می‌پذیرد تا شرایط کارگاه‌های بلندمرتبه شهر مشهد از دیدگاه مبحث HSE به‌درستی ارزیابی شود.



شکل (۷): هیستوگرام ایمنی جوشکاری

هیستوگرام‌های رسم شده در شکل‌های (۱) تا (۷) وجود اختلاف معنی‌دار بین توابع توزیع و داده‌های واقعی را نشان می‌دهد. علت اصلی این اختلاف، کم بودن تعداد پرسشنامه‌های تکمیل‌شده (داده‌های استخراج‌شده از پروژه‌های واقعی) است. دو دلیل را می‌توان برای این موضوع برشمرد. نخست آنکه برخی از آیت‌های موجود در چک‌لیست‌ها به دلیل پایان یافتن آن قسمت از پروژه، در دسترس نبودند و نتیجه‌گیری بر پایه داده‌های ثبت‌شده در بایگانی انجام شد. دوم اینکه کارشناسان در زمینه‌هایی تخصصی، چک‌لیست‌های مربوط را تکمیل کردند که این موضوع سبب کاهش تعداد داده‌های واقعی گردید. به این دلیل‌ها، تعداد داده‌های مورد اطمینان کم است و این نکته سبب افزایش خطا در تابع‌های توزیع احتمال گردید. برای برطرف کردن این کاستی و افزایش تعداد داده‌ها، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تولید داده‌های تصادفی استفاده شد.

با توجه به هیستوگرام‌های شکل‌های (۱) تا (۷)، می‌توان دریافت همه چک‌لیست‌ها از الگوی تابع توزیع نرمال پیروی می‌کنند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه شرایط اجرای مبحث HSE در کارگاه‌های بررسی‌شده یکسان نیستند و نیز تغییرات آنها یکنواخت نمی‌باشند، نمی‌توان از توزیع یکنواخت برای شبیه‌سازی مدل

جدول (۴): ویژگی‌های عامل‌های شبیه‌سازی شده (شرایط واقعی)

آتش‌نشانی	بهداشت کارگاه	کار با جرتقیل	ایمنی برق	سازه نگهبان	جوشکاری	ایمنی محیط	برنامه‌ریزی HSE	SWOT (حروف بزرگ در مدل پیشنهادی)
۳/۲۲	۳/۲	۳/۶۵	۳/۳۳	۳/۲۷	۳/۵۴	۳/۵۷	۳/۳۶	میانگین
۰/۵۹۷	۰/۴۱۷	۰/۳۴۵	۰/۲۹۶	۰/۴۰۲	۰/۴۳۵	۰/۳۶۱	۰/۴۳۴	انحراف معیار
نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	نوع تابع توزیع
آتش‌نشانی	بهداشت کارگاه	کار با جرتقیل	ایمنی برق	سازه نگهبان	جوشکاری	ایمنی محیط	برنامه‌ریزی HSE	(حروف کوچک در ضریب تأثیر)
۰/۶۴۵	۰/۶۰۸	۰/۷۸۰	۰/۷۷۹	۰/۷۶۳	۰/۸۵۷	۰/۸۱۵	۰/۷۲۴	میانگین
۰/۲۳۱	۰/۱۴۰	۰/۲۶۸	۰/۲۷۳	۰/۴۰۸	۰/۳۰۵	۰/۱۲۶	۰/۱۰۲	انحراف معیار

۲. محاسبه مقدارهای میانگین و انحراف معیار عامل‌ها (جدول ۴)؛

۳. تعیین نوع توابع توزیع احتمال عامل‌ها (جدول ۴)؛

۴. تولید اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه بین ۰ و ۱؛

۵. استفاده از رابطه‌های آماری برای انتقال نمونه‌های شبیه‌سازی شده از توزیع یکنواخت به توزیع نرمال؛

۶. مقداردهی به تابع عملکرد پیشنهادی با استفاده از نمونه‌های تولید شده و ذخیره نتایج؛

۷. ارزیابی و تحلیل نتایج.

برای مقایسه و رتبه‌بندی عامل‌ها و ارزیابی کارگاه‌های بررسی شده، احتمال شکست، P_f ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [13].

$$P_f = \frac{n}{N} \quad (۳)$$

در اینجا، N تعداد کل شبیه‌سازی‌ها است. همچنین، n تعداد شبیه‌سازی‌هایی است که مقدار آنها در تابع پیشنهادی کمتر از ۲۰ گردد. فرآیند شبیه‌سازی تابع پیشنهادی با تولید ۱۰۰۰۰۰ نمونه و مقداردهی به تابع عملکرد پیشنهادی انجام می‌پذیرد. در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو حالت ارائه می‌گردد.

حالت اول: بررسی عملکرد تابع پیشنهادی با

شبیه‌سازی یک عامل در هر مرحله

برای شبیه‌سازی در این حالت، امتیازهای وزندار برای هر چک‌لیست که عددی بین ۱ تا ۴ می‌باشند و بر اساس

همچنین، برای ارزیابی شرایط واقعی کارگاه‌های بلندمرتبه شهر مشهد و مقایسه موردی عامل‌ها (چک‌لیست‌ها)، فرآیند شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در دو حالت متفاوت انجام می‌پذیرد.

در حالت اول، فرآیند شبیه‌سازی مدل پیشنهادی به تعداد عامل‌های معرفی شده انجام می‌شود. در هر دور از این فرآیند، یک عامل به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شود و عامل‌های دیگر ثابت فرض می‌گردند. با این کار، اثر و عملکرد هر عامل از مبحث HSE در کارگاه ساختمانی جداگانه بررسی و مشخص می‌شود. در حالت دوم، شبیه‌سازی همه عامل‌ها هم‌زمان انجام می‌پذیرد و اثر آنها در موضوع HSE کارگاه‌های ساختمانی ارزیابی می‌شوند. این حالت نشانگر این موضوع است که شرایط واقعی کارگاه‌های بلندمرتبه ساختمانی چگونه است و احتمال شکست مبحث HSE با استفاده از مدل پیشنهادی ارزیابی می‌شود.

فرآیند شبیه‌سازی

در این بخش با توجه اطلاعات گردآوری شده برای ساختمان‌های بلندمرتبه شهر مشهد، فرآیند شبیه‌سازی و ارزیابی تابع عملکرد پیشنهادی انجام می‌پذیرد. همچنین، جامعه آماری با روش شبیه‌سازی مونت کارلو گسترش می‌یابد. فرآیند شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر شرح داد:

۱. تعیین متغیرهای تابع پیشنهادی به عنوان عامل‌های ورودی؛

به طور کلی بر مبحث HSE در کارگاه ساختمانی را بررسی کرد. برای اولویت بندی پارامترها، شبیه سازی باید به تعداد عامل ها انجام پذیرد و در هر شبیه سازی، یک پارامتر به صورت متغیر در نظر گرفته شود و دیگر عامل ها ثابت باشند (ردیف های ۱ تا ۸ در جدول ۵). شبیه سازی در این حالت با استفاده از نتایج جدول (۵) انجام می پذیرد. اعداد شبیه سازی شده با استفاده از ویژگی های پارامترها است که در جدول (۴) محاسبه شده اند. همچنین، برای تعیین درصد شکست، رابطه (۳) بکار می رود. در پایان، درصد شکست و یا خطرپذیری به دست آمده از تابع عملکرد پیشنهادی برای هر یک از عامل ها، در جدول (۶) درج شده اند.

ماتریس SWOT محاسبه شده اند، در ضرایب تأثیر آن ها که بر مبنای امتیازهای کارشناسان به دست آمده اند ضرب می شوند (اعداد محاسبه شده در جدول ۴). این فرآیند در جدول (۵) ثبت شده است. در هر بار شبیه سازی این حالت، تنها یک عامل متغیر در نظر گرفته می شود و عامل های دیگر بر اساس شرایط واقعی (نظر کارشناسان)، به صورت ثابت جایگذاری می گردند. به سخن دیگر، برای شبیه سازی در این حالت، با توجه به تابع عملکرد پیشنهادی پارامترها مقداردهی می شوند و پارامتری که هر ردیف متغیر لحاظ شده است، شبیه سازی می گردد و دیگر پارامترها ثابت در نظر گرفته می شوند. با انجام چنین فرآیندی، می توان اثر پارامتر متغیر بر تابع عملکرد و

جدول (۵): امتیازهای محاسبه شده برای هر عامل بر اساس روش SWOT

ردیف	H×h	P×p	S×s	C×c	E×e	W×w	SS×ss	F×f	جمع
۱	متغیر	۳/۳×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۶×۰/۷	۳/۴×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۲×۰/۷	۳/۲×۰/۶	۱۸/۴۹۱
۲	۳/۲×۰/۶	متغیر	۳/۵×۰/۸	۳/۶×۰/۷	۳/۴×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۲×۰/۷	۳/۲×۰/۶	۱۸/۰۰۵
۳	۳/۲×۰/۶	۳/۳×۰/۷	متغیر	۳/۶×۰/۷	۳/۴×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۲×۰/۷	۳/۲×۰/۶	۱۷/۵۲۴
۴	۳/۲×۰/۶	۳/۳×۰/۷	۳/۵×۰/۸	متغیر	۳/۴×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۲×۰/۷	۳/۲×۰/۶	۱۷/۵۸۶
۵	۳/۲×۰/۶	۳/۳×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۶×۰/۷	متغیر	۳/۵×۰/۸	۳/۲×۰/۷	۳/۲×۰/۶	۱۷/۷۶۲
۶	۳/۲×۰/۶	۳/۳×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۶×۰/۷	۳/۴×۰/۷	متغیر	۳/۲×۰/۷	۳/۲×۰/۶	۱۷/۳۹۷
۷	۳/۲×۰/۶	۳/۳×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۶×۰/۷	۳/۴×۰/۷	۳/۵×۰/۸	متغیر	۳/۲×۰/۶	۱۷/۹۴۲
۸	۳/۲×۰/۶	۳/۳×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۶×۰/۷	۳/۴×۰/۷	۳/۵×۰/۸	۳/۲×۰/۷	متغیر	۱۸/۳۵۳

جدول (۶): نتایج شبیه سازی اثر هر عامل متغیر در تابع هدف

کمیت متغیر	درصد شکست (%)	تعداد شکست (کمتر از ۲۰)	تعداد کل
ایمنی برق	۳۷/۵۴	۳۷۵۴۰	۱۰۰۰۰۰
آتش نشانی	۳۴/۵۵۴	۳۴۵۵۴	۱۰۰۰۰۰
بهداشت	۲۵/۶۴	۲۵۶۴۰	۱۰۰۰۰۰
برنامه ریزی HSE	۲۴/۳۷۹	۲۴۳۷۹	۱۰۰۰۰۰
ایمنی محیط	۲۷/۳۵۷	۲۷۳۵۷	۱۰۰۰۰۰
سازه نگهبان	۳۳/۹۳	۳۳۳۹۰	۱۰۰۰۰۰
جوشکاری	۳۸/۱	۳۸۱۰۰	۱۰۰۰۰۰
جرتقبل	۳۶/۱۴۶	۳۶۱۴۶	۱۰۰۰۰۰

مقداردهی به تابع عملکرد پیشنهادی انجام پذیرفت. در اینجا، شبیه‌سازی‌هایی که در آنها مقدار تابع عملکرد کمتر از ۲۰ شد، شکست منظور گردید. در پایان، با استفاده از رابطه (۳)، ریسک هر یک از عامل‌های معرفی شده و موضوع HSE محاسبه شدند. با توجه به جدول‌های (۶) و (۷)، نتایج حاصل از فرآیندهای شبیه‌سازی در شکل (۸) ارائه شده است.

در شکل (۸) نتایج به‌دست‌آمده از فرآیند شبیه‌سازی در دو حالت مختلف ارائه شده است. در این راستا، با متغیر در نظر گرفتن همه عامل‌های معرفی شده (چک‌لیست‌ها)، ریسک حاصل از شبیه‌سازی، برابر با ۴۸٪ به دست می‌آید.

از سوی دیگر، با استفاده از شکل (۸)، می‌توان بر اساس وزن‌های اختصاص داده شده و فرآیند شبیه‌سازی در حالت اول، عامل‌های معرفی شده را رتبه‌بندی کرد (نتایج به‌دست‌آمده از حالت اول شبیه‌سازی). در اینجا، از شکل (۸) استفاده می‌شود و اثر هر عامل بر اجرای مبحث HSE در کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه مشخص می‌گردد. بر این اساس، هرچه ریسک به‌دست‌آمده برای یک عامل بیشتر باشد، امتیاز اختصاص‌یافته به آن کمتر می‌شود. در نتیجه، وزن آن عامل در تابع عملکرد کمتر می‌گردد. از این‌رو، رتبه‌بندی عامل‌های معرفی شده در کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه، به ترتیب میزان اهمیت آنها، در جدول (۸) درج شده‌اند.

بر اساس نتایج جدول (۸)، عامل برنامه‌ریزی بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست HSE برای کارگاه کم حادثه‌ترین و پارامتر ایمنی کار هنگام جوشکاری خطرناک‌ترین عامل در پروژه‌های ساختمانی بررسی شده می‌باشند. به سخن دیگر، به موضوع برنامه‌ریزی بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست HSE برای کارگاه، اهمیت زیادی داده می‌شود و کمترین خطر را در کارگاه ساختمانی ایجاد می‌کند. همچنین، عامل‌های بهداشت کارگاه، ایمن‌سازی محیط کارگاه، ایمنی سازه نگهبان، ایمنی آتش‌نشانی، ایمنی کار با جرثقیل، ایمنی برق کارگاه و ایمنی هنگام

جدول (۶) میزان اثرگذاری عامل‌های مختلف را به صورت جداگانه، بر موضوع HSE نشان می‌دهد. در اینجا، درصد شکست هر کمیت نشان‌دهنده مقدار خطرپذیری آن عامل در کارگاه ساختمانی است. بر این اساس، فرآیندهای وابسته به ایمنی جوشکاری، دارای بیشترین خطر می‌باشند. در مقابل، خطرهای ناشی از برنامه‌ریزی HSE کمترین خطر را ایجاد کرده است. با انجام چنین فرآیندی می‌توان بحرانی‌ترین و یا حادثه‌سازترین پارامتر را و کم حادثه‌سازترین پارامتر را شناسایی کرد و با در نظرگیری تمهیدات لازم از بروز حوادث مشابه جلوگیری کرد.

حالت دوم: بررسی عملکرد تابع پیشنهادی با شبیه‌سازی همه عامل‌ها (شرایط واقعی)

شبیه‌سازی انجام‌شده در این حالت بر اساس جامعه آماری گردآوری شده و بر مبنای داده‌های واقعی صنعت ساخت‌وساز انجام می‌پذیرد. در این حالت با در نظر گرفتن همه عامل‌ها به‌عنوان متغیر، مدل پیشنهادی ارزیابی می‌شود. برای تعیین میزان ریسک و خطرپذیری از رابطه (۳) استفاده می‌گردد. نتایج این فرایند در جدول (۷) درج شده‌اند.

ارزیابی تابع پیشنهادی با تولید ۱۰۰۰۰۰ داده شبیه‌سازی شده برای هر عامل انجام پذیرفت. ریسک حاصل از فرآیند برای شرایط واقعی مبحث HSE (تمامی عامل‌ها به‌عنوان متغیر) در ساختمان‌های بلندمرتبه شهر مشهد ۴۸/۳۰۲٪ به دست آمد. به سخن دیگر، ریسک به‌دست‌آمده از تابع پیشنهادی برای شرایط واقعی صنعت بلندمرتبه‌سازی شهر مشهد تقریباً ۵۰ درصد است. این یافته نشان می‌دهد در کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه شهر مشهد اهمیت چندانی به مبحث HSE داده نمی‌شود.

بررسی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی

برای مقایسه و رتبه‌بندی عوامل اثرگذار در موضوع HSE، فرآیند شبیه‌سازی با تولید ۱۰۰۰۰۰ داده تصادفی و

جوشکاری به ترتیب، در رتبه‌های دوم تا هشتم به لحاظ اهمیت دادن به آنها در کارگاه ساختمانی قرار دارند.

جدول (۷): نتیجه شبیه‌سازی برای حالت دوم (شرایط واقعی)

تعداد مقادیر قابل قبول (بیشتر از ۲۰)	تعداد شکست (کمتر از ۲۰)	تعداد کل
۵۱۶۹۸	۴۸۳۰۲	۱۰۰۰۰۰



شکل (۸): نتایج حاصل شبیه‌سازی

جدول (۸): رتبه‌بندی اهمیت عامل‌های شناسایی شده

عامل اثرگذار	میزان خطرپذیری به‌دست آمده (%)	رتبه اهمیت به پارامتر در کارگاه ساختمانی از زیاد به کم
برنامه‌ریزی بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست HSE برای کارگاه	۲۴/۴	۱
بهداشت کارگاه	۲۵/۶	۲
ایمن‌سازی محیط کارگاه	۲۷/۴	۳
ایمنی سازه نگهدار	۳۳/۹	۴
ایمنی آتش‌نشانی	۳۴/۶	۵
ایمنی کار با جرثقیل	۳۶/۱	۶
ایمنی برق کارگاه	۳۵/۷	۷
ایمنی هنگام جوشکاری	۳۸/۱	۸

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل برای ارزیابی ریسک موضوع HSE در کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه ارائه گردید. با استفاده از این الگو، شرایط ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست در پروژه‌های بلندمرتبه‌سازی شهر مشهد ارزیابی شد. برای انجام این کار، نخست، عوامل اثرگذار بر موضوع HSE در کارگاه‌های ساختمانی شناسایی شدند. در ادامه، برای هر عامل چک‌لیست ارزیابی طراحی گردید. برای وزن دهی عامل‌های شناسایی‌شده، چک‌لیست‌ها بین افراد متخصص در کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه توزیع شدند. وزن‌دهی این عامل‌ها بر اساس نظرهای کارشناسان، با استفاده از ارزیابی ماتریس SWOT انجام پذیرفت. همچنین، برای افزایش جامعه آماری از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. ارزیابی تابع پیشنهادی با تولید ۱۰۰۰۰۰ داده تصادفی برای هر عامل انجام شده است.

در این پژوهش تعداد ۹ عامل، جداگانه شبیه‌سازی شدند. برای ارزیابی مقایسه‌ای و رتبه‌بندی عامل‌های شناسایی‌شده، در هر بار فرآیند شبیه‌سازی، تنها یک عامل متغیر و دیگر عامل‌ها ثابت می‌باشند. همچنین برای ارزیابی شرایط واقعی صنعت بلندمرتبه‌سازی، همه عامل‌ها متغیر در نظر گرفته شدند. بر این اساس، نتایج

حاصل از فرایند شبیه‌سازی با مدل پیشنهادی، به این قرار است:

۱- خطر موضوع HSE در کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه‌سازی تقریباً ۵۰٪ است. باید دانست، این کمیت حاصل از شبیه‌سازی تابع پیشنهادی بر اساس نظرهای کارشناسان و متغیر در نظر گرفتن همه عامل‌ها به دست آمد؛

۲- بر پایه شیوه پیشنهادی، می‌توان پرخطرترین و ایمن‌ترین عامل‌ها را در کارگاه‌های ساختمانی بلندمرتبه مشخص کرد. همچنین، عامل‌های شناسایی‌شده در کارگاه‌های ساختمانی رتبه‌بندی شدند. در این پژوهش، برنامه‌ریزی بهداشت و ایمنی در هنگام جوشکاری، به‌ترتیب، ایمن‌ترین و پرخطرترین عامل‌های شناسایی‌شده در موضوع HSE به دست آمدند؛

۳. با استفاده از نتایج مدل پیشنهادی می‌توان، نقاط ضعف کارگاه ساختمانی را شناسایی کرد و برای بهبود آنها برنامه‌ریزی نمود.

باید دانست، می‌توان مدل پیشنهادی را برای کارگاه‌های مختلف ارزیابی کرد. در این راه، نخستین کار، شناسایی عامل‌های اثرگذار بر موضوع HSE است. سپس، می‌توان فرایندی مشابه این پژوهش را انجام داد.

مراجع

1. Ardeshtir, A., Maknoon, R., Rekab Islami Zadeh, M., Jahantab, Z., "HSE risks assessment in urban high-rise construction using Fuzzy Approach", *Journal of Health and Safety at Work*, Vol. 5 (2), pp. 1-12, (2015). [Persian]
2. Fazlollah, A., Mohammadfam, I., HadgiParvaneh, M. J., Omidvari, M., "Introducing a method for Health, Safety and Environmental (HSE) risk assessment, using multi-criteria decision making (MCDM) techniques: a case study in power plant construction", *Journal of Health and Safety at Work*, Vol. 4 (1), pp. 55-64, (2016). [Persian]
3. Wybo, J., Wassenhove, W. V., "Preparing graduate students to be HSE professionals", *Safety Science*, Vol. 81, pp. 1-10, (2016).
4. Mohammadfam, I., Shekari, A., Khosroujerdi, A., "Presentation of an HSE-MS performance measuring

- model based on EFQM", *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 10(4), pp.1-10, (2009). [Persian]
5. Zhou, Z., Goh, Y. M., Li. Q., "Overview and analysis of safety management studies in the construction industry", *Safety Science*, Vol. 72, pp. 337–350, (2015).
 6. Jafari, M. J., Mapar, M., Mansouri, N., "A New Method for Contractors HSE Ranking at the Pre-Contract Stage Based on Contract Level", *Iran occupational health journal*, Vol. 10 (2), pp. 65-78, (2013). [Persian]
 7. Perlman, A., Sacks, R., Barak, R., "Hazard recognition and risk perception in construction", *Safety Science*, Vol. 64, pp. 22–31, (2014).
 8. Amiri, M., Ardeshtir, A., Soltanaghaei, E., "Analysis of High Risk Occupational Accidents in Construction Industry Using Data-mining Methods", *Iran occupational health journal*, Vol. 11 (4), pp. 31-43, (2014). [Persian]
 9. Hassanzadeh-Rangi, N., Khosravi, Y., Farshad, A. A., Abedinloo, R., Jalilian, H., "Inter and intra-rater reliability of a new assessment tool for Health, Safety, and Environment (HSE) in urban districts: A case study in Tehran city", *Journal of Health and Safety at Work*, Vol. 6(3), pp. 73-90, (2016). [Persian]
 10. Amini, fard, F., meshkani, m., "Investigation of occupational health and safety application using the internal and external factor assessment matrix: SWOT", *Journal of Health and Safety at Work*, Vol. 2 (2), pp. 53-60, (2012). [Persian]
 11. Oswald, D., Sherratt, F., Smith, S., "Problems with safety observation reporting: A construction industry case study", *Safety Science*, Vol. 107, pp. 35–45, (2018).
 12. Khosravi, Y., Asilian Mahabadi, H., Jafari, M., Hassanzadeh-Rangi, N., Hajizadeh, E., "Why construction workers involve in unsafe behavior: Part B: Scale validity and reliability", *Iran occupational health journal*, Vol.11 (6), pp. 10-20, (2014). [Persian]
 13. Nowak AS, Collins KR. Reliability of Structures, McGraw Hill, New York, (2000).

تحلیل پایداری یک تونل در شرایط هیدروستاتیک با استفاده از روش‌های مختلف قابلیت اعتماد در

نرم‌افزارهای RT و @Risk*

مقاله علمی - پژوهشی

هادی فتاحی^(۱)فاطمه جیریایی شراهی^(۲)

چکیده یکی از راه‌های تحلیل پایداری تونل، بررسی همگرایی و شعاع منطقه پلاستیک در اطراف آن است. از طرفی وجود عدم قطعیت در پارامترهای طراحی، ارزیابی ایمنی سازه‌ها را به استفاده از روش‌های احتمالاتی و قابلیت اعتماد سوق می‌دهد. در این تحقیق سعی شده با بهره‌گیری از روابط هوک و براون و موهر کولمب، یک متدولوژی برای تحلیل پایداری دو تونل (در شرایط متفاوت) با استفاده از روش‌های قدرتمند قابلیت اعتماد شامل روش مرتبه اول (FORM)، روش مرتبه دوم (SORM) و شبیه‌سازی مونت‌کارلو در نرم‌افزارهای جدید RT و @Risk ارائه شود. پس از مدل سازی احتمالاتی در این دو نرم‌افزار، نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم نسبت به روش مرتبه اول در توابع پیچیده‌تر حالت حلی، از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین در مقادیر بالای احتمال شکست، روش‌های مرتبه اول و شبیه‌سازی مونت‌کارلو خروجی‌های واقعی‌تری را ارائه می‌دهند و در مقادیر پایین احتمال شکست، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو توصیه نمی‌شود. به علاوه تونل مدنظر در شرایط بدون نگهداری دارای احتمال شکست بالایی (۲۴٪) است و تدارک یک سیستم نگهداری با فشار نگهداری ۰/۱۲ مگاپاسکال کارآمد است.

واژه‌های کلیدی قابلیت اعتماد، نرم‌افزار RT، نرم‌افزار @Risk، تحلیل پایداری تونل.

Stability Analysis of a Tunnel in Hydrostatic Conditions Using Different Reliability Methods in @Risk and RT Software

H. Fattahi

F. Jiryaei

Abstract One way to stability analysis of tunnel is to examine the convergence and radius of the plastic zone around it. On the other hand, uncertainties in the design parameters lead to the evaluation of the safety of structures using probabilistic and reliability methods. In this research was presented a methodology for stability analysis of two tunnels (under different conditions), by Hock-Brown and Mohr-Coulomb theory using robust reliability methods including: first order method (FORM), second order method (SORM) and Monte Carlo simulation in new RT and @Risk software. After probabilistic modeling in these two software, the results of the analysis show that the second order reliability method is more accurate than the first order method in more complex limit state functions. Also, at high values of failure probability, first order and Monte Carlo simulation methods provide more realistic outputs and at low values of failure probability, Monte Carlo simulation method is not recommended. In addition, the tunnel without pressure has a high probability of failure (24%), so that providing a support with 0.12 MPa pressure is efficient.

Key Word Reliability, RT software, @Risk software, Tunnel stability analysis.

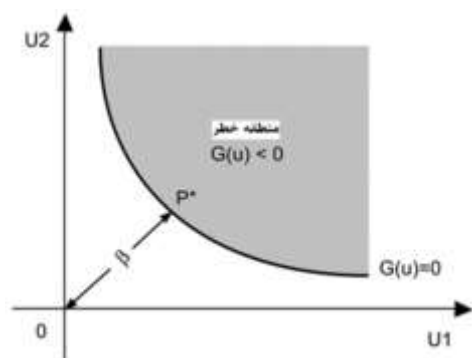
* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۱۲/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۵/۱۳ می‌باشد.

Email: fattahi.h62@gmail.com

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

(۲) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک.

بردار متغیرهای تصادفی و $f(X)$ تابع چگالی احتمال مشترک (Joint probability Density Function) همه متغیرهای تصادفی است. به عبارتی این انتگرال وظیفه دارد مساحت مشخص شده در شکل (۱) را به دست آورد [6].



شکل (۱): شاخص قابلیت اعتماد β و احتمال شکست [7]

حل این انتگرال در حالت عمومی بسیار پیچیده و غیر ممکن است؛ به این دلیل که ممکن است تابع حالت حدی، یک ترکیب غیر خطی باشد و یا متغیرها توزیع نرمال نداشته باشند؛ بنابراین برای رسیدن به جواب، باید به راه‌های تقریبی روی آورد. از این رو با پذیرش چند فرض ساده‌کننده به جای محاسبه دقیق احتمال خرابی، از پارامتر دیگری به نام شاخص قابلیت اعتماد (β Reliability Index) استفاده می‌شود تا حجم محاسبات و زمان مورد نیاز کاهش یابد. روش‌های عددی که با این شاخص کار می‌کنند عبارت‌اند از روش مرتبه اول (First Order Reliability Method: FORM) و مرتبه دوم قابلیت اعتماد (Second Order Reliability Method: SORM). همچنین شبیه‌سازی مونت‌کارلو (Monte Carlo Simulation: MCS) روشی است که با داده‌سازی زیاد، احتمال شکست را به دست می‌آورد.

محققین بسیاری از دیرباز متوجه برخی عدم قطعیت‌ها در طراحی و ساخت سازه‌های ژئومکانیکی شده بودند. رویکرد برخی از آنها نسبت به عدم قطعیت، توسط روش‌های قابلیت اعتماد بدین شرح است:

مقدمه

تونل با توجه به وسعت کاربردش در کارهای عمرانی و معدنی از دیرباز نقش مهمی در تسهیل فعالیت‌های بشر داشته است. لذا در سال‌های اخیر احداث تونل‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است [1-3]. حفر فضاهای زیرزمینی باعث برهم خوردن تعادل تنش‌ها در محیط حفر شده می‌شود و منطقه پلاستیکی با پتانسیل تخریب در اطراف این فضا ایجاد می‌کند [4, 5]. شرط ادامه کار یا استفاده از این فضا، وابسته به پایداری و ثبات آن در مدت زمان مشخص است. بر این اساس، تحلیل تنش‌ها و بررسی شعاع منطقه پلاستیک و پیش‌بینی عامل نگهدارنده برای آن امری لازم است. از طرفی همگن یا همسان‌گرد بودن خاک و سنگ، یک خاصیت ایده‌آل برای آن است که هیچ‌گاه تحقق نمی‌یابد و ویژگی‌های آن بسته به ضریب تغییراتش از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. تغییرات در این ویژگی‌ها در مکان‌ها و زمان‌های مختلف، موجب پی بردن به رابطه یا همبستگی بین این ویژگی‌ها نیز می‌شود. در اصطلاح به این تغییرات در ویژگی‌ها، عدم قطعیت گفته می‌شود. مهندسی، تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت است و انکار این نکته امکان‌ناپذیر است. قطعیت در متغیرهای مدل به معنی در نظر نگرفتن تغییرات در متغیرها است. بر این اساس بایستی در طراحی‌ها و مدل‌ها راهی برای ورود عدم قطعیت باز شود [4, 5]. به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در تحلیل‌های مهندسی روش‌های احتمالاتی و قابلیت اعتماد (Reliability) ارائه می‌شوند. در این روش‌ها، پارامتری که در نهایت با استفاده از روش‌های مختلف عددی و شبیه‌سازی به دست می‌آید، همان احتمال شکست (Failure Probability) یا احتمال خرابی است. احتمال شکست را می‌توان به شکل زیر تعریف کرد [6]:

$$P_f = P(G(X) \leq 0) = \int_{G(X) \leq 0} f(X) dX \quad (1)$$

در این رابطه P_f احتمال شکست، $g(X)$ تابع حالت حدی (Limit state Function) سیستم، $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$

قابلیت اعتماد اندرکنش بین سنگ و سیستم نگهداری در تونل‌های دایره‌ای با استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول و سطح پاسخ پرداختند. لو و کو [19] به کمک معیارهای هوک-براون و موهر-کولمب و با استفاده از روش سطح پاسخ و روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول و دوم به بررسی شعاع منطقه پلاستیک و جابه‌جایی تونل پرداختند و در نهایت نتایج را با روش شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه کردند. گه و ژانگ [20] به کمک روش‌های قابلیت اعتماد ابتدا یک مدل رگرسیون لگاریتمی را برای پیش‌بینی ضریب ایمنی غارهای سنگی ارائه کردند. سپس یک آنالیز قابلیت اعتماد بر اساس معیار هوک-براون برای پایداری جبهه کار تونل ارائه دادند. در این تحقیق سعی شده با بهره‌گیری از روابط هوک و براون و موهر کولمب، یک متدولوژی برای تحلیل پایداری دو تونل (در شرایط متفاوت) با استفاده از روش‌های قدرتمند قابلیت اعتماد شامل روش قابلیت اعتماد مرتبه اول، روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم و شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم‌افزارهای جدید RT و @Risk ارائه شود.

روش‌های ارزیابی قابلیت اعتماد

با توجه به پیچیدگی محاسبه انتگرال در رابطه احتمال خرابی، محققان در پی یافتن روش‌هایی جهت تقریب زدن قابلیت اعتماد بوده‌اند. وظیفه روش‌های قابلیت اعتماد محاسبه احتمال هر رویداد مورد نظر است. هر کدام از روش‌ها به شیوه‌ای احتمال شکست را محاسبه می‌کنند. از جمله روش‌های قابلیت اعتمادی که در این تحقیق استفاده می‌شوند می‌توان به روش مرتبه اول قابلیت اعتماد، مرتبه دوم قابلیت اعتماد و روش شبیه‌سازی مونت کارلو اشاره کرد. در ادامه به شرح این روش‌ها پرداخته می‌شود.

سانگ ان چو در سال ۲۰۰۹ با ترکیب روش مرتبه دوم قابلیت اعتماد و شبکه عصبی مصنوعی به تحلیل احتمالاتی شیروانی خاکی پرداختند [7]. سانجی و کیچی در سال ۲۰۰۹ بر روی روانگرایی خاک بر اساس داده‌های آزمایش نفوذ استاندارد، آنالیز قابلیت اعتماد مربوطه را انجام دادند [8]. چین لونگ و بک در سال ۲۰۱۲ شمع‌ها یا المان‌های انتقال بارهای سطحی به عمق زمین را با استفاده از احتمالات و قابلیت اعتماد تحلیل کردند [9]. پنگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به تحلیل برخی مسائل ژئوتکنیکی نظیر، نشست فونداسیون سطحی، ظرفیت باربری یک شالوده سطحی و پایداری شیروانی خاکی با استفاده از روش‌های قابلیت اعتماد پرداختند [10]. لوانیس و فیلیپ در سال ۲۰۱۷ پایداری داخلی دیوار خاکی تقویت‌شده را با روش مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند [11]. رخشانی مهر و همکاران در سال ۱۳۹۶ ایمنی شمع‌های بتنی و فولادی تحت بار ثقلی برای دو نوع خاک چسبنده و غیر چسبنده را با روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو، شبیه‌سازی وزنی و مرتبه اول قابلیت اعتماد بررسی کردند [12]. هوک در سال ۱۹۹۸ آنالیز قابلیت اعتماد یک تونل دایره‌ای را به روش شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از نرم‌افزار ریسک را انجام داد [13]. لی و لو در سال ۲۰۱۰ برای محاسبه شاخص قابلیت اعتماد یک تونل دایره‌ای تحت تنش هیدروستاتیک، از روش مرتبه اول قابلیت اعتماد استفاده کردند [14]. یانگ و همکاران آنالیز قابلیت اعتماد را برای بررسی پایداری سقف تونل‌های عمیق در دو لایه توده سنگ به کار بردند [15]. لو و اینستین در سال ۲۰۱۳ در مورد گوه‌های سقف و به‌کاربردن نیروی راک بولت در تونل، آنالیز قابلیت اعتماد را برای این تونل انجام دادند [16]. لی و کو [17] به کمک روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول و روش شبیه‌سازی مونت کارلو به تحلیل پایداری یک تونل با مقطع دایره‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک پرداختند. لو و همکاران [18] به آنالیز

در روش مرتبه اول، بسته به میزان غیر خطی بودن تابع، محاسبات احتمال شکست دچار خطا می‌شود. چراکه تابع، با یک صفحه یا ابر صفحه تخمین زده می‌شود. زمانی که تابع حالت حدی انحنای زیادی داشته باشد، تقریب خطی، دقت محاسبات را پایین می‌آورد. در توابع غیر خطی روش مرتبه دوم با کمک گرفتن از تقریب درجه دوم، به یک جواب صحیح نزدیک می‌شود. این روش در واقع تکامل یافته روش مرتبه اول است و به جای استفاده از تقریب خطی، تابع حالت حدی را با یک سهمی یا ابر سهمی تخمین می‌زند. بریتنگ در سال ۱۹۸۴ رابطه زیر را برای محاسبه احتمال شکست با تقریب مرتبه دوم ارائه داد [6]:

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 + \beta k_i\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن k_i نشان‌دهنده انحنای اصلی تابع حالت حدی در نقطه طراحی است، به صورتی که اگر تابع n متغیر داشته باشد، $(n-1)$ انحنای دارد [6].

شبیه‌سازی مونت کارلو

همان‌طور که از نام آن برمی‌آید کلیت‌های شبیه‌سازی مونت کارلو عبارت است از نمونه‌گیری به صورت تصادفی به منظور شبیه‌سازی تصنعی تعدادی زیادی آزمون و مشاهده نتایج آنها در حالت آنالیز قابلیت اعتماد سازه‌ها در ساده‌ترین شکل. احتمال خرابی در این روش به شکل زیر محاسبه می‌شود [6]:

$$P_f \approx \frac{n(G \leq 0)}{N} \quad (6)$$

که در آن $n(G \leq 0)$ تعداد آزمون‌هایی است که در آنها $G \leq 0$ است. تعداد آزمون‌ها N به دقت مطلوب P_f ارتباط می‌یابد. روشن است که در روش مونت کارلو یک بازی شانس با توجه به خواص احتمالاتی معلوم به منظور حل مسئله به تعداد زیاد انجام می‌گیرد و سپس از این فرآیند نتیجه دلخواه یعنی احتمال خرابی استخراج می‌شود. از مزایای مهم این روش عدم وجود هیچ محدودیتی در نوع و شکل $f_X(X)$ و نیز تابع حالت حدی

شاخص هاسفر-لیند (Hasofer-Lind) و روش مرتبه اول قابلیت اعتماد

شاخص هاسفر-لیند و یا شاخص قابلیت اعتماد، کمیتی است که اجازه می‌دهد متغیرهای تصادفی نمود پیدا کنند و قضاوت در مورد پایداری بر اساس آنها انجام پذیرد. این اندیس یک مبنای مقایسه‌ای برای قابلیت اعتماد به شمار می‌رود و با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [14]:

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{(X - \mu)^T C^{-1} (X - \mu)} \quad (2)$$

که در آن X بردار متغیرهای تصادفی (x_i) ، μ بردار میانگین متغیرها، C ماتریس کوواریانس و F دامنه شکست است. در اینجا β از طریق یک مسئله بهینه‌سازی به دست خواهد آمد. لو و تنگ یک رابطه جایگزین برای رابطه هاسفر-لیند ارائه دادند که در آن به جای فضای استاندارد نرمال از فضای اصلی متغیرها استفاده می‌شود [14]:

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{\left[\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right]^T [R]^{-1} \left[\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right]} \quad (3)$$

که در آن R ، ماتریس همبستگی و σ_i انحراف معیار متغیرهای تصادفی است. شاخص قابلیت اعتماد را می‌توان به صورت هندسی نیز تعریف کرد. در فضای ترسیم یافته متغیرها به صورت استاندارد نرمال، شاخص قابلیت اعتماد را می‌توان فاصله بین مبدأ و نقطه‌ای دانست که به آن نقطه طراحی (Design Point) می‌گویند. این نقطه بر روی رویه حالت حدی قرار دارد و کمترین فاصله را تا مبدأ دارد. پس از به دست آمدن شاخص قابلیت اعتماد، احتمال شکست به طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [14]:

$$P(f) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

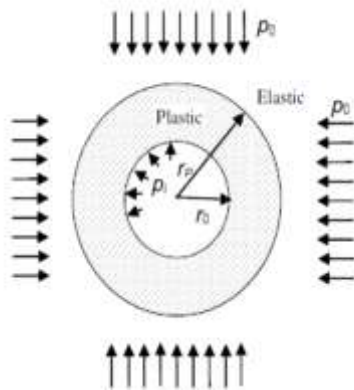
در این رابطه Φ بیانگر تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال است [14].

روش مرتبه دوم قابلیت اعتماد

تابع حالت حدی ممکن است خطی یا غیر خطی باشد.

است [6].

برجا قرار دارد، تونل یا هر حفره زیرزمینی دیگری احداث شود، وضعیت تنش مؤثر بر سنگ‌ها در مجاورت این تونل، به هم می‌خورد و توزیع جدیدی می‌یابد. برای تحلیل رفتار تونل، فرض می‌کنیم که تونل دایره‌ای شکلی به شعاع r تحت تنش هیدروستاتیک P_0 و نیز تحت فشار یکنواخت داخلی P_i که سیستم نگهداری تونل را اعمال می‌کند قرار دارد (شکل ۲) [6].



شکل (۲): تنش مؤثر بر یک تونل دایره‌ای [15]

اگر فشار داخلی مؤثر بر تونل که ناشی از سیستم نگهداری نصب‌شده در آن است، از فشار بحرانی نگهداری P_{cr} کمتر شود، در سنگ‌های اطراف تونل شکستگی رخ می‌دهد. فشار بحرانی P_{cr} از رابطه زیر به دست می‌آید [6]:

$$P_{cr} = \frac{\gamma P_0 - \sigma_{cm}}{1+k} \quad (9)$$

σ_{cm} مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ است که با رابطه زیر تعریف می‌شود [6]:

$$\sigma_m = \frac{\gamma C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (10)$$

k نیز شیب منحنی تغییرات σ_1 نسبت به σ_3 است و به صورت زیر بیان می‌شود (شکل ۳) [6].

بردارهای اهمیت

بردارهای اهمیت و حساسیت زیادی، ارائه شده که اهمیت و تأثیرگذاری همه متغیرها را در قالب یک بردار بیان می‌کند و هر یک برای بیان این اهمیت روش خاص خود را دارند که در اینجا به بردارهای اهمیت α و γ پرداخته می‌شود.

بردار اهمیت آلفا

بردار اهمیت آلفا، اهمیت هر یک از متغیرها را بر اساس سهمی که در محاسبه واریانس تابع حالت حدی دارد بیان می‌کند. واریانس تابع حالت حدی از این جهت که در محاسبه احتمال شکست دخیل است بیان‌کننده این

اهمیت است [6]:

$$V[\hat{G}] = \|\nabla G\|^2 \left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2 \right) \quad (7)$$

سهم هر متغیر تصادفی در واریانس تابع حالت حدی به اندازه α_i ، یعنی بردار یکه آن است. هرچه $|\alpha_i|$ بیشتر باشد بیانگر آن است که اهمیت x_i بالاتر است. علامت α_i نیز در احتمال شکست تأثیرگذار است. مقدار مثبت α نشان می‌دهد با افزایش آن، متغیر P_f افزایش پیدا می‌کند و مقدار منفی بیانگر آن است که با افزایش آن، متغیر P_f کاهش می‌یابد [6].

بردار اهمیت گاما

این بردار همبستگی بین متغیرها را نیز در نظر می‌گیرد، به طوری که اگر همبستگی بین متغیرها صفر باشد بردار اهمیت α و γ یکی هستند [6].

$$\gamma = \frac{\alpha^T J_{y,x} \bar{D}}{\|\alpha^T J_{y,x} \bar{D}\|} \quad (8)$$

که در آن $\bar{D}$ ماتریس انحراف معیار متغیرهای معادل نرمال و $J_{y,x}$ ماتریس ژاکوبین است.

پایداری یک تونل در شرایط هیدروستاتیک

وقتی که در داخل توده سنگی که تحت تأثیر تنش‌های

در این صورت جابه‌جایی شعاعی کلی روبه درون دیواره تونل، خواهد شد [21]:

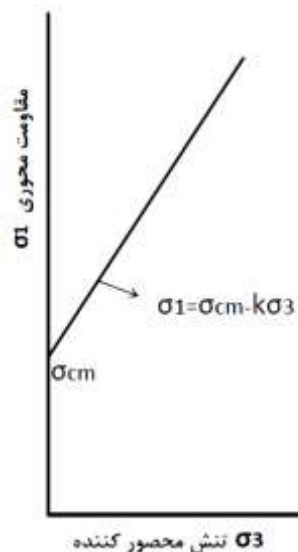
$$U_{ip} = \frac{r_i (1 + \nu)}{E} [\gamma (1 - \nu) (P_i - P_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_i} \right)^2 - (1 - 2\nu) (P_i - P_i)] \quad (14)$$

معرفی نرم‌افزارهای به‌کارگرفته شده

در این تحقیق از نرم‌افزارهای قابلیت اعتماد RT و Risk@ برای انجام تحلیل‌ها کمک گرفته شده است و در ادامه نتایج تحلیل‌ها توسط این دو نرم‌افزار در کنار هم آورده شده است. در این بخش به معرفی آنها پرداخته می‌شود.

نرم‌افزار RT

RT نرم‌افزاری است که به‌وسیله آن می‌توان کارهای احتمالاتی و یا قابلیت اعتماد انجام داد. در این برنامه می‌توانیم پارامترهای مورد نظر را به‌صورت متغیر تصادفی به برنامه RT داد. در این برنامه این امکان وجود دارد که برای تعداد زیادی متغیر ورودی این کار را انجام دهد و در نهایت میزان حساسیت هر یک از پارامترها را تعیین نماید. در این نرم‌افزار توزیع‌های مختلفی مانند نرمال، گامبل، بتا، نمایی، لاگ نرمال و رابلی وجود دارد که می‌توان برای برازش به یک سری داده از آنها استفاده نمود. انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو، روش مرتبه اول قابلیت اعتماد و روش مرتبه دوم قابلیت اعتماد از دیگر قابلیت‌های برنامه است. با انجام این آنالیزها می‌توان مشخص کرد برای یک تابع حالت حدی از یک سری متغیر تصادفی به ازای چه مقداری از آنها کمترین احتمال شکست وجود دارد. ضمناً این برنامه با برنامه‌هایی مانند MATLAB و OpenSees, Abaqus, ANSYS, SAP می‌تواند لینک شود. این نرم‌افزار را می‌توان به‌صورت رایگان از طریق لینک (inrisk.ubc.ca/software/rt) دریافت کرد.



شکل (۳): بیان ترسیمی معیار موهر کولمب [19]

$$k = \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \quad (11)$$

در این روابط σ_1 ، تنش محوری که به ازای آن شکستگی رخ داده است، σ_3 تنش محصورکننده، C چسبندگی توده سنگ و ϕ زاویه اصطکاک داخلی سنگ است [6].

اگر فشار داخلی P_i بزرگ‌تر از فشار بحرانی P_{cr} باشد، شکستگی ایجاد نمی‌شود و رفتار سنگ‌های اطراف تونل، الاستیک خواهد بود. در این صورت جابه‌جایی الاستیک شعاعی روبه درون دیواره تونل از رابطه زیر حاصل می‌شود [21]:

$$U_{ie} = \frac{r_i (1 + \nu)}{E} (P_i - P_i) \quad (12)$$

که در آن ν ضریب پواسون و E مدول الاستیسیته است. در حالتی که فشار داخلی سیستم نگهداری P_i کمتر از فشار بحرانی P_{cr} باشد، شعاع منطقه پلاستیک در اطراف تونل از رابطه زیر به دست می‌آید [21]:

$$r_p = r_i \cdot \left\{ \frac{\gamma [P_i (k-1) + \sigma_{cm}]}{(1+k)(k-1)P_i + \sigma_{cm}} \right\}^{\frac{1}{(k-1)}} \quad (13)$$

مدول الاستیسیته هستند که توزیع، میانگین و انحراف معیار آنها در جدول (۱) آورده شده است. هر سه پارامتر توزیع نرمال دارند، علاوه بر این متغیرهای C و ϕ همبسته هستند و ضریب همبستگی آنها ۰/۵- است.

جدول (۱): مشخصات پارامترهای تصادفی تونل اول در توزیع نرمال

متغیر تصادفی	میانگین	انحراف معیار
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۲/۸۵	۱/۳۱
چسبندگی (مگاپاسکال)	۰/۲۳	۰/۰۶۸
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	۳۷۳	۴۸

با توجه به رابطه (۱۳) و (۱۴)، شعاع منطقه پلاستیک و جابه‌جایی شعاعی کلی به دست می‌آید. نخستین مرحله برای انجام تحلیل‌های قابلیت اعتماد، تصمیم‌گیری در رابطه با معیارهای عملکرد به صورت ارائه یک تابع حالت حدی و پارامترهای مرتبط با آن است؛ بنابراین با استفاده از روابطی که گفته شد، توابع حالت حدی را به صورت زیر می‌سازیم. به طوری که اگر مقدار شعاع منطقه پلاستیک و مقدار جابه‌جایی شعاعی تونل از حد مجاز آنها تجاوز کند و بیشتر شود مقدار عددی به دست آمده برای تابع حالت حدی یک مقدار منفی است و شرایط نایمن را تعریف می‌کند، در غیر این صورت مقدار عددی مثبت بوده و شرایط ایمن است.

$$G_1(x) = L - \frac{r_p}{r_t} \quad (15)$$

$$G_2(x) = \varepsilon_L - \frac{U_{ip}}{r_t} \quad (16)$$

در این روابط L حد نهایی شعاع منطقه پلاستیک و ε_L حد نهایی جابه‌جایی شعاعی تونل است. در اینجا مقدار $L = 3$ و مقدار $\varepsilon_L = 0.01$ است. به عبارتی تجاوز از این حد باعث خرابی تونل می‌شود و شکست در نقاطی اتفاق می‌افتد که مقدار تابع حالت حدی به ازای آنها، یک مقدار منفی شود؛ بنابراین هدف، محاسبه احتمال شکست با استفاده از این توابع است.

با استفاده از نرم‌افزار RT اولین تحلیل را بر روی

نرم‌افزار @Risk

@Risk به عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند در تحلیل ریسک پروژه‌ها به کار می‌رود که بر روی نرم‌افزار Microsoft Excel نصب می‌شود و به صورت یک نرم‌افزار افزودنی کار می‌کند. @Risk با تلفیق قابلیت‌های Excel، قادر به طراحی مدلی برای برآوردن نیازهای تحلیل ریسک با بهترین کاربری است. این نرم‌افزار برای تحلیل پروژه‌هایی با پارامترهای احتمالی بکار می‌رود. توزیع احتمال هر یک از پارامترهای مذکور بایستی قبلاً مشخص شود. این پارامترها به همراه توزیعشان به عنوان ورودی وارد نرم‌افزار می‌شوند. سپس @Risk با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و یا Latin Hypercube و تولید اعداد تصادفی، مدل را بارها اجرا کرده و پارامترهای پروژه را تحلیل می‌کند و در نهایت مقادیر خروجی‌های مشخص شده و توزیع احتمال آنها را ارائه می‌کند. با بررسی مقادیر خروجی، می‌توان میزان ریسک عددی پروژه را با توجه به انتظارات مورد نظر به دست آورد. این نرم‌افزار قادر است تا نتایج به دست آمده را به صورت گرافیکی نیز ارائه دهد که این قابلیت باعث فهم بهتر و سریع‌تر جواب‌ها می‌شود. تقریباً در تمام مدل‌هایی که با عدم قطعیت مواجه هستیم، می‌توان از این نرم‌افزار استفاده کرد.

تحلیل و نتایج

در این بخش، نتایج به دست آمده از آنالیز قابلیت اعتماد مربوط به پایداری دو تونل ارائه شده است. تونل اول یک تونل دایره‌ای است که در یک فضای همگن، همسان‌گرد و الاستیک حفر شده است و تحت فشار هیدروستاتیک P_1 و فشار نگه‌دارنده داخلی یکنواخت P_1 قرار دارد [6].

تحلیل پایداری این تونل در سه نوع شرایط P_1 بررسی می‌شود که شامل مقادیر صفر، ۰/۳ و ۰/۸ مگاپاسکال است و در هر بار بررسی، مقدار آن به صورت قطعی در رابطه‌ها وارد می‌شود. علاوه بر P_1 ، متغیرهای قطعی دیگر این مسئله، $P_2 = 2.0$ ، $\nu = 0.3$ ، ضریب پواسون و r_t شعاع تونل هستند. همچنین متغیرهای تصادفی، C ، چسبندگی، ϕ ، زاویه اصطکاک داخلی و E .

می‌دهد، متغیر چسبندگی نسبت به زاویه اصطکاک داخلی بر روی احتمال شکست تأثیرگذارتر است و در تصمیمات مهندسی اولویت بالاتری دارد. پس از بردار اهمیت، آخرین نتایج، مربوط به شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست است. در این تحلیل مقدار $\beta = 0.7$ و $P_f = 24\%$ است. شکلی که نرم‌افزار RT به عنوان خروجی می‌دهد به صورت زیر است.

نموداری که در شکل (۵) مشخص شده، نزدیک شدن گام‌های جستجو و کم شدن فاصله آن به نقطه طراحی را نشان می‌دهد؛ بنابراین در گام آخر این فاصله نشان‌دهنده شاخص قابلیت اعتماد است. در ادامه این تحلیل‌ها در مورد هر تونل، در هر دو نوع تابع حالت حدی، روش‌های قابلیت اعتماد به کار گرفته شده که نشان می‌دهد در مقدارهای مختلف از P_i ، مقادیر متفاوتی از احتمال شکست به دست می‌آید. در این تحلیل‌ها از دو نرم‌افزار RT و @Risk کمک گرفته شده و خروجی‌ها در قالب جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. در جدول‌های زیر تحلیل‌هایی با تابع حالت حدی اول و دوم آورده شده است.

تابع حالت حدی اول $(G_1(x))$ و $P_i = 0$ ، انجام می‌دهیم؛ یعنی حالتی که تونل، نگهداری نشده باشد. پس از اتمام کار نرم‌افزار با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول، خروجی آن به شکل (۴) در صفحه ظاهر می‌شود.

نرم‌افزار RT برای رسیدن به مقدار شاخص قابلیت اعتماد از یک الگوریتم گام‌به‌گام استفاده می‌کند تا در فضای تبدیل یافته متغیرها به نقطه طراحی برسد. با توجه به خروجی که از نرم‌افزار RT گرفته شده، نقطه‌ای که در گام سوم به دست می‌آید نقطه طراحی است. این نقطه در فضای اصلی متغیرها دارای مختصات و در فضای استاندارد نرمال دارای مختصات است. مؤلفه اول در این مختصات مربوط به متغیر C و مؤلفه دوم مربوط به متغیر φ است. پس از مختصات نقطه طراحی، بردار اهمیت گاما مشخص شده است. این بردار دارای دو مؤلفه است که مؤلفه اول به اهمیت متغیر C و مؤلفه دوم به اهمیت متغیر φ می‌پردازد. در اینجا مقدار هر دو مؤلفه منفی به دست آمده که این نشان‌دهنده آن است که با افزایش متغیرهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی احتمال شکست کاهش می‌یابد. همچنین در این بردار، مقدار قدر مطلق مؤلفه اول بیشتر از مؤلفه دوم است که این نشان

```

Output

#### STARTING FORM ANALYSIS WITH FUNCTION "G1(x)" ...

Step 3 :

Check1 = 2.38485e-05 , Check2 = 0.000382833 , Distance = 0.700191

Search for the design point has been completed successfully.
Design point in original space, x:
| 0.185089 |
| 0.401964 |

Design point in standard-normal space, u:
| -0.660462 |
| -0.232502 |

Gamma importance measure:
| -0.947257 |
| -0.320474 |

Computing the random variable sensitivities...
Random variable sensitivities are computed successfully.

The reliability index:
Beta = 0.700191

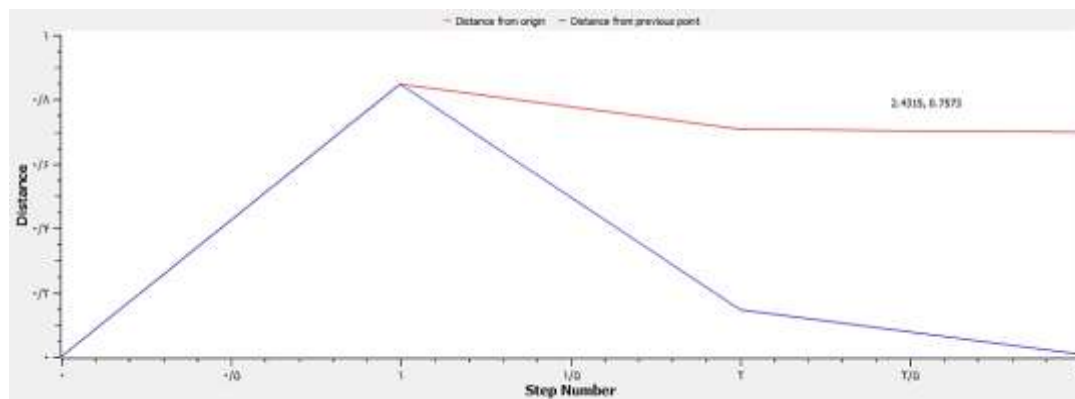
The probability of failure:
pf = 0.241904

#### FORM ANALYSIS DONE IN 0.391 SECONDS.

```

$\begin{bmatrix} 0.185089 \\ 0.401964 \end{bmatrix}$

شکل (۴): خروجی نرم‌افزار RT برای تابع $G1(x)$ با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول



شکل (۵): خروجی نرم افزار RT برای تابع $G_1(x)$ با روش قابلیت اعتماد مرتبه اول

جدول (۲): تخمین احتمال شکست در تابع حالت حدی اول

نرم افزار @Risk	نرم افزار RT					فشار نگهداری (مگاپاسکال)
	مونته کارلو	روش مرتبه دوم	روش مرتبه اول			
$P_f(\%)$	$P_f(\%)$	$P_f(\%)$	β	$P_f(\%)$	β	
۲۴	۲۳/۷۹	۲۵/۷۷	۰/۶۵	۲۴/۱۹	۰/۷	۰
۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۴	۰/۰۶	۳/۲	۰/۳
۰	۰	$۴/۷ \times ۱۰^{-۱۴}$	۷/۴۵	$۴/۷ \times ۱۰^{-۱۴}$	۷/۴۵	۰/۸

جدول (۳): تخمین احتمال شکست در تابع حالت حدی دوم

نرم افزار @Risk	نرم افزار RT					فشار نگهداری (مگاپاسکال)
	مونته کارلو	روش مرتبه دوم	روش مرتبه اول			
$P_f(\%)$	$P_f(\%)$	$P_f(\%)$	β	$P_f(\%)$	B	
۰/۸	۰/۰۶۲	۰/۰۶۵	۲/۴۷	۰/۰۵۹	۲/۴۷	۰/۸

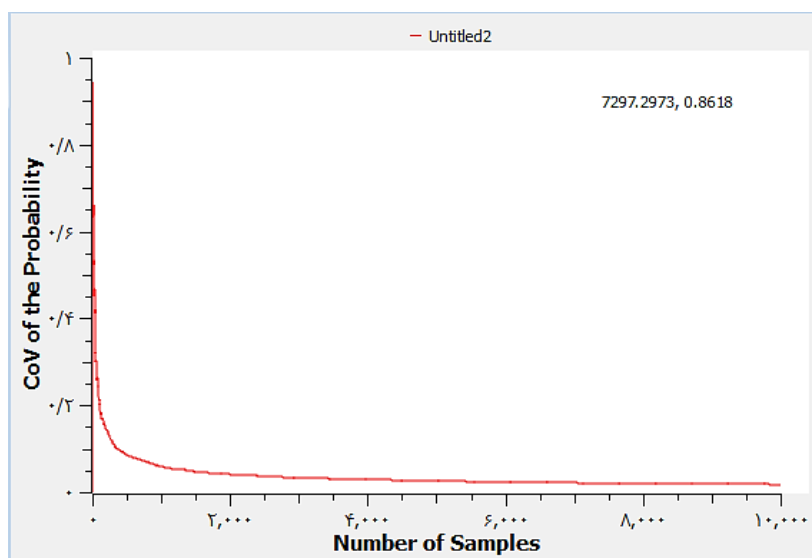
احتمال شکست دارد.

نرم افزار @Risk برای محاسبه احتمال خرابی از روش مونته کارلو استفاده می کند. در شکل زیر خروجی این نرم افزار برای تابع حالت حدی اول آورده شده است که در آن بر اساس مساحت محصور شده در زیر تابع چگالی احتمال $G(X)$ مقدار احتمال خرابی به دست می آید. احتمالی که در شکل (۷) به دست آمده ۲۴٪ است که تقریباً به جوابی که با نرم افزار RT به دست آمد نزدیک است.

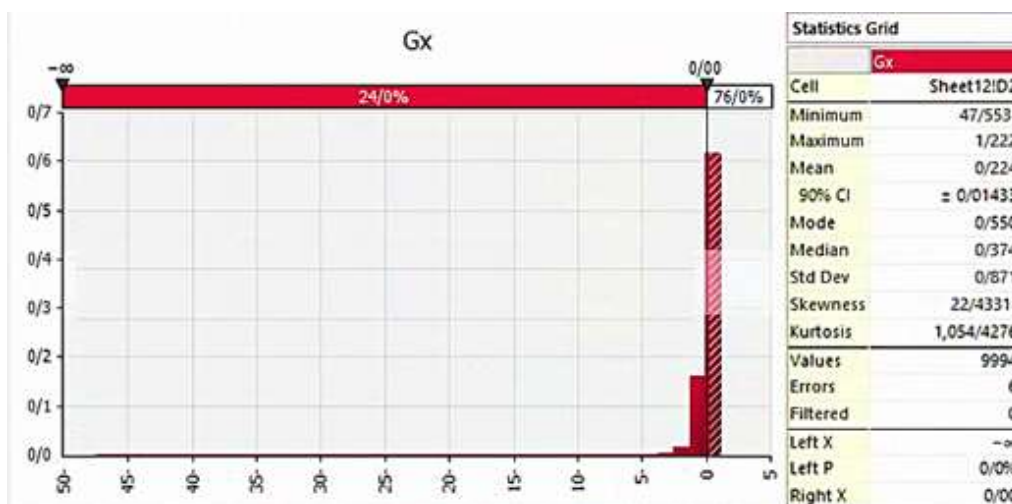
در اینجا تعداد اعداد تصادفی که در شبیه سازی مونته کارلو تولید می شود $N = ۱۰۰۰$ است. شکل (۶) روند همگرایی روش شبیه سازی مونته کارلو به جواب را نشان می دهد. با توجه به این شکل، تغییرات احتمال شکست، حتی تا آخرین داده شبیه سازی شده در حال کاهش است و منجر به یک عدد ثابت نشده است. می توان گفت این تغییرات در محاسبه احتمال شکست، ممکن است با ادامه شبیه سازی کاهش پیدا کند. البته تصمیم به ادامه شبیه سازی بستگی به دقت قابل قبول

سیستم نگهداری با فشار مناسب دارد. از طرفی احتمال شکست، زمانی که یک سیستم نگهداری با فشار محافظت‌کننده ۰/۳ اعمال شود، بسیار کوچک (۰/۰۶٪) برآورد شده است؛ بنابراین می‌تواند برای ایمن‌سازی تونل مورد نظر مناسب باشد. اگرچه فشار نگهداری ۰/۸ نیز شرایط ایمنی را فراهم می‌کند اما با توجه به هزینه بالایی که به همراه دارد مناسب نخواهد بود.

با توجه به اعداد نمایش داده شده در جداول (۲) و (۳) احتمال شکست‌ها در هر روش و برای هر تابع حالت حدی متفاوت است که از این اختلاف در احتمالات برداشت‌هایی می‌توان کرد. زمانی که مقدار فشار نگهداری صفر باشد و به عبارتی شرایط بدون نگهداری فرض شود، احتمال شکست محاسبه شده (۲۴٪) بسیار بالا خواهد بود؛ بنابراین تونل مورد نظر با وضعیتی که در مورد سایر پارامترها اعلام شده ایمن نیست و نیاز به یک



شکل (۶): روند همگرایی شبیه‌سازی مونت کارلو به احتمال شکست نهایی



شکل (۷): خروجی نرم‌افزار @Risk برای تابع $G1(x)$

معیار آنها در جدول (۴) آورده شده است. هر سه پارامتر توزیع نرمال دارند، علاوه بر این متغیرهای C و φ همبسته هستند و ضریب همبستگی آنها -0.5 است.

جدول (۴): مشخصات پارامترهای تصادفی تونل دوم

متغیر تصادفی	تابع توزیع	میانگین	انحراف معیار
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	نرمال	۲۱/۰۹۳	۲/۰۴۵
چسبندگی (مگاپاسکال)	نرمال	۰/۲۸۷	۰/۰۳۸
فشار نگهداری (مگاپاسکال)	نرمال	۰/۴	۰/۰۶
مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	نرمال	۳۷۳	۴۸

همچنین در این مسأله مقدار $L=2$ و $\varepsilon_L = 0.02$ است. تحلیل‌هایی که انجام شده به‌طور خلاصه در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵): تخمین احتمال شکست در تونل دوم

RISK		روش مرتبه دوم (RT)		
$G_2(X)$	$G_1(X)$	$G_2(X)$	$G_1(X)$	
۴/۱	۴/۹	۳/۵	۴/۵	احتمال شکست (%)

در مورد این مسأله فشار نگهداری به‌عنوان یک متغیر تصادفی با یک میانگین و انحراف معیار ارائه شده است. این متغیر با در نظر گرفتن بازه اطمینان $(\bar{X} \pm 3S)$ می‌تواند بین مقادیر $(0.22-0.58)$ تغییر کند. با مقایسه این مقادیر نسبت به مقادیر در نظر گرفته شده برای فشار نگهداری در تونل اول، می‌توان دریافت تونل اول به سبب تفاوت در مقادیر پارامترهای تصادفی آن، نسبت به تونل دوم ایمن‌تر بوده و فشار نگهداری مورد نیاز برای رسیدن به احتمال شکست قابل قبول برای آن کمتر بود است. شکل‌های (۸) و (۹) نمودارهایی را نمایش می‌دهد که

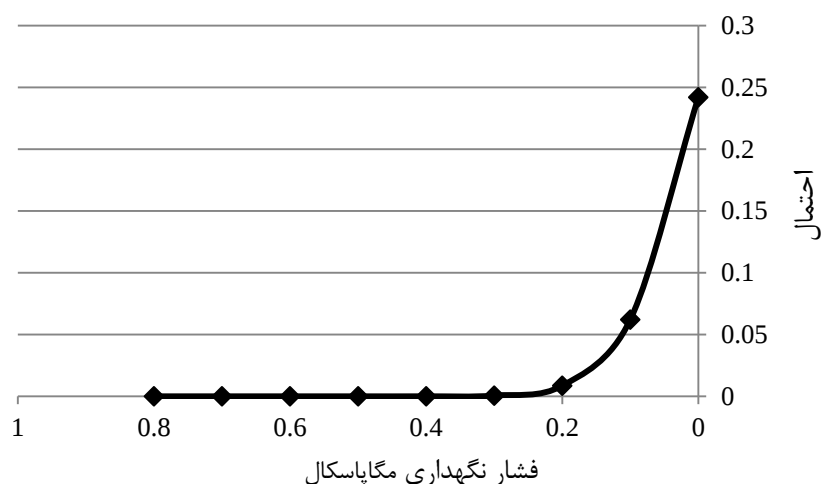
در مقادیر بالای احتمال شکست، یعنی در تونل اول با فشار نگهداری صفر، روش قابلیت اعتماد مرتبه اول و روش شبیه‌سازی مونت کارلو، خروجی‌های نزدیک به هم دارند، اما این خروجی‌ها نسبت به احتمال شکست روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم کمی اختلاف دارد. این اختلاف در مقادیر احتمالات ممکن است به دلیل نزدیکی رویه حالت حدی اول $G_1(X) = 0$ ، به یک خط باشد که روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم را دچار خطا می‌کند. چراکه در روش مرتبه دوم از یک سهمی برای تقریب‌زدن رویه حالت حدی استفاده می‌شود. از طرفی در احتمال شکست‌های خیلی کوچک، سه روش یادشده خروجی شبیه به هم دارند و از آنجا که شبیه‌سازی مونت کارلو برای رسیدن به دقتی بالا در احتمالات بسیار کوچک، نیاز به تعداد زیادی شبیه‌سازی و صرف زمان زیادی دارد، استفاده از آن در این شرایط توصیه نمی‌شود؛ بنابراین با توجه به پیچیدگی تابع حالت حدی دوم و دقت بالای روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش شبیه‌سازی مونت کارلو باشد.

در هر دو تونل برای تخمین احتمال شکست‌ها از دو تابع حالت حدی $G_1(X)$ و $G_2(X)$ استفاده شد که بر اساس نتایجی که به دست آمد در هر حالت خروجی این دو تابع با هم متفاوت بوده و در همه حالت‌ها، احتمال شکست به‌دست‌آمده از $G_2(X)$ نسبت به $G_1(X)$ بیشتر بوده است. این ممکن است به دلیل در نظر گرفتن متغیر E در $G_2(X)$ باشد که از این نظر می‌تواند تخمین واقعی‌تر و دقیق‌تری از احتمالات داشته باشد.

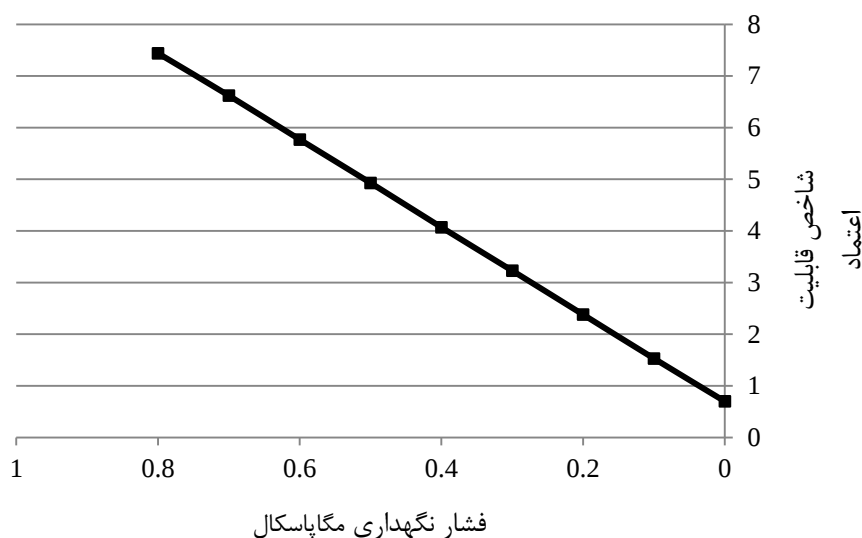
تونل دوم نیز همانند تونل اول یک تونل دایره‌ای است که در یک فضای همگن، همسانگرد و الاستیک حفر شده است و تحت فشار هیدروستاتیک P_0 و فشار نگه‌دارنده داخلی یکنواخت P_i قرار دارد [19]. متغیرهای قطعی این مسأله، $P_0 = 2.5$ ، $\nu = 0.3$ ، r_0 شعاع تونل هستند. همچنین متغیرهای تصادفی، C ، چسبندگی، φ ، زاویه اصطکاک داخلی، E ، مدول الاستیسیته و P_i فشار نگه‌دارنده داخلی هستند که توزیع، میانگین و انحراف

باشد با تدارک یک سیستم نگهداری با فشار نگهداری تقریباً ۰/۱۲ مگاپاسکال، احتمال شکست به مقدار مورد نظر کاهش می‌یابد. همچنین نمودار شاخص قابلیت اعتماد با افزایش P_i با یک شیب ثابت افزایش می‌یابد، به طوری که افزایش شاخص قابلیت اعتماد کاهش احتمال شکست را نشان می‌دهد.

چگونگی تغییرات شاخص قابلیت اعتماد و احتمال شکست را در مقابل تغییرات فشار نگهداری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش فشار نگهداری، نمودار تغییرات احتمال شکست با شیب تندی کاهش می‌یابد و تقریباً در مقدار $P_i = 0.2$ مگاپاسکال این نمودار ثابت می‌شود. معمولاً احتمال شکست قابل قبول برای پروژه‌های مهندسی ۰.۵٪ است که اگر چنین



شکل (۸): تأثیر فشار نگهداری بر احتمال شکست

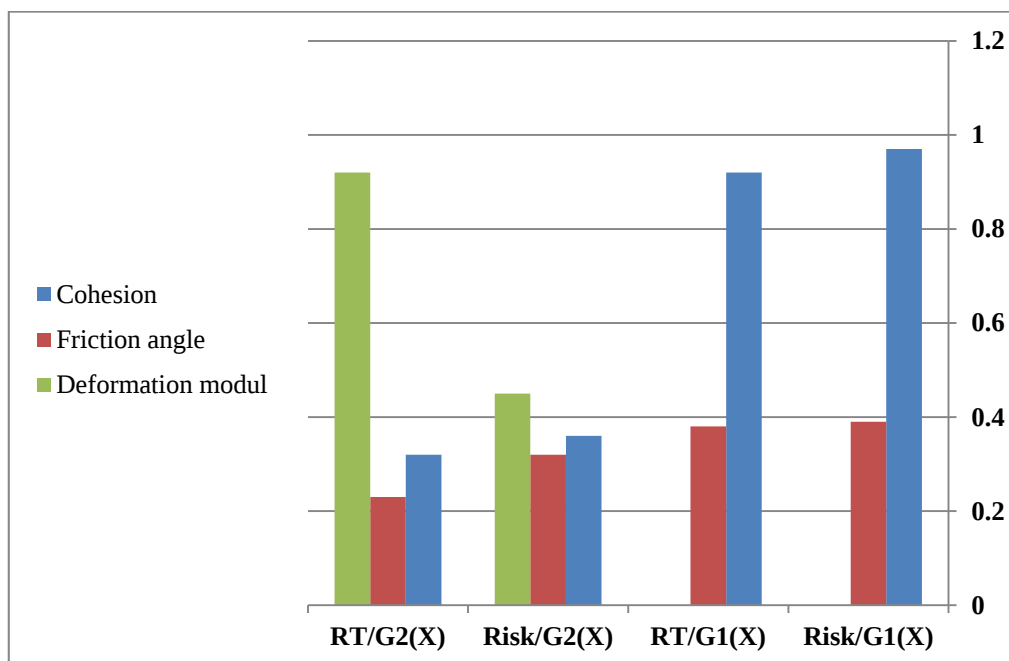


شکل (۹): تأثیر فشار نگهداری بر شاخص قابلیت اعتماد

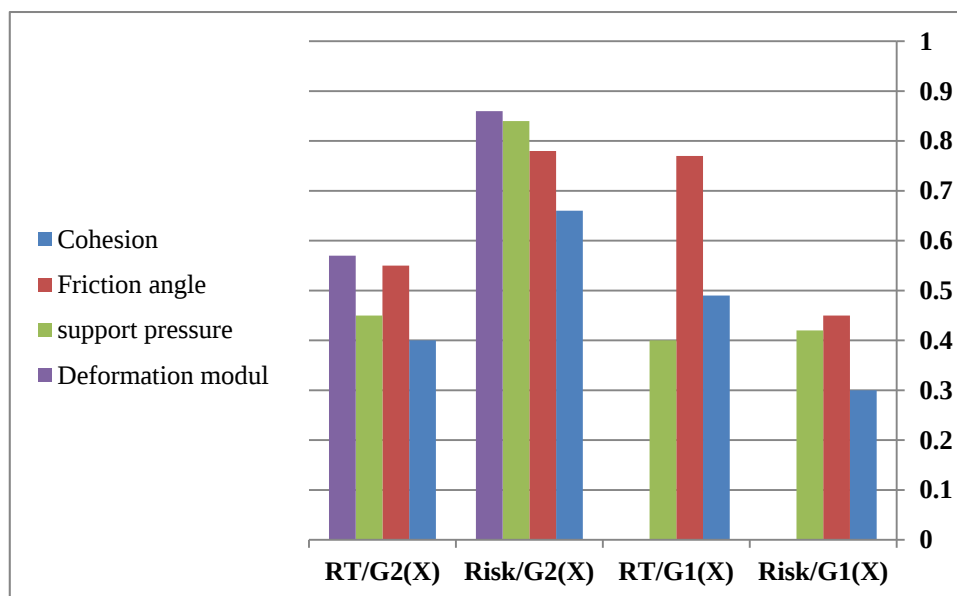
ارائه می‌دهد. بر اساس این نتایج در تونل اوّل وقتی از $G_1(X)$ استفاده می‌شود متغیر چسبندگی دارای اهمیت بالاتری است و زمانی که از $G_2(X)$ استفاده می‌شود با اضافه شدن متغیر E از دو متغیر قبلی پیشی می‌گیرد و دارای اهمیت بیشتری می‌شود. همچنین در مورد تونل دوم مدول الاستیسیته دارای اهمیت بالایی است؛ بنابراین می‌توان گفت مدول الاستیسیته نسبت به سایر متغیرها در طراحی بهینه سیستم، نقش مهمی دارد. در مورد سایر متغیرها اهمیت آنها در هر یک از حالت‌ها متفاوت است. برای مثال در مورد تونل اول بعد از E ، C یعنی چسبندگی اهمیت بیشتری دارد؛ اما در مورد تونل دوم زاویه اصطکاک داخلی جایگاه دوم در مهم‌ترین متغیرها را دارد؛ بنابراین ممکن است برای هر مطالعه موردی یک تحلیل حساسیت ویژه مطرح شود.

با استفاده از تحلیل حساسیتی که بر مبنای آنالیز قابلیت اعتماد انجام شده است، نتایجی به این شرح به دست آمده است. آنالیز تحلیل حساسیت که به منظور تعیین اهمیت هر یک از پارامترها و همچنین نقش آنها در سیستم و احتمال شکست آن می‌پردازد، در نرم‌افزارهای مختلف ممکن است توسط روش‌های متفاوتی انجام شود. در نرم‌افزار RT ، به دلیل وجود همبستگی بین متغیرها از بردار اهمیت گاما استفاده شده است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمودارهایی جهت نمایش اهمیت متغیرها در هر دو تونل اوّل و دوم و اعداد آن به‌طور واضح‌تر در جداول (۶) و (۷) نشان داده شده است، به‌طوری‌که اهمیت متغیرها با توجه به نوع برنامه استفاده شده و تابع حالت حدی مربوطه مشخص شده است.

با توجه به این‌که تابع حالت حدی دوم دارای متغیر E نیز است، نمایش بهتری را از همه متغیرهای تصادفی



شکل (۱۰): تحلیل حساسیت بر مبنای آنالیز قابلیت اعتماد در تونل اوّل



شکل (۱۱): تحلیل حساسیت بر مبنای آنالیز قابلیت اعتماد در تونل دوم

جدول (۶): تحلیل حساسیت بر مبنای آنالیز قابلیت اعتماد در تونل اول

میزان اهمیت			نرم افزار/تابع حالت حدی
مدول الاستیسیته	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	
-	۰/۳۹	۰/۹۷	@Risk/G1(X)
-	۰/۳۸	۰/۹۲	RT/G1(X)
۰/۴۵	۰/۳۲	۰/۳۶	@Risk/G2(X)
۰/۹۲	۰/۲۳	۰/۳۲	RT/G2(X)

جدول (۷): تحلیل حساسیت بر مبنای آنالیز قابلیت اعتماد در تونل دوم

میزان اهمیت				نرم افزار/تابع حالت حدی
مدول الاستیسیته	فشار نگهداری (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی	
-	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۳۰	@Risk/G1(X)
-	۰/۴۰	۰/۷۷	۰/۴۹	RT/G1(X)
۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۶۶	@Risk/G2(X)
۰/۵۷	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۴۰	RT/G2(X)

نتیجه گیری

نشان داد در مورد تابع حالت حدی اول در احتمال شکست‌های بزرگ، (در تونل اول با فشار نگهداری صفر)، روش قابلیت اعتماد مرتبه اول و شبیه‌سازی مونت کارلو، تقریباً شبیه به هم عمل می‌کنند، از طرفی در

در تحقیق حاضر روش‌های قابلیت اعتماد مرتبه اول، مرتبه دوم و شبیه‌سازی مونت کارلو برای تحلیل پایداری دو تونل در شرایط مختلف به کار گرفته شد. بررسی‌ها

همچنین نتایج تحلیل حساسیت بر روی متغیرها نشان داد که مدول الاستیسیته دارای اهمیت و تأثیرگذاری بسیار بالایی است و در تحلیل‌ها به لحاظ اهمیت و تأثیرگذاری اولویت اول را دارد. به علاوه نتایج نشان داد که شاخص قابلیت اعتماد وابستگی زیادی به فشار نگه‌دارنده دارد. تونل‌های مورد بررسی، در حالت بدون نگهداری احتمال شکست بالایی دارند؛ بنابراین بایستی برای آنها سیستم نگهداری تعریف شود که اگر در تونل، فشار سیستم نگهداری $P_i = 0.3$ مگاپاسکال ایجاد شود، احتمال شکست قابل قبولی خواهد داشت.

احتمال شکست‌های خیلی کوچک، هر سه روش خروجی نزدیک به هم دارند. البته شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مقادیر احتمال بسیار کوچک و دقت بسیار بالا، نیازمند تولید تعداد زیادی داده رندم و شبیه‌سازی هریک از آنها است و هزینه محاسباتی بالایی دارد. از این نظر، استفاده از آن در این شرایط توصیه نمی‌شود؛ بنابراین روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم با توجه به دقت بالای آن در تقریب زدن توابع، با وجود پیچیدگی تابع حالت حدی دوم، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو باشد.

مراجع

1. Fattahi, H. and Babanouri, N., "Applying optimized support vector regression models for prediction of tunnel boring machine performance", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 35, No. 5, pp. 2205-2217, (2017).
2. Fattahi, H. and Moradi, A., "Risk Assessment and Estimation of TBM Penetration Rate Using RES-Based Model", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 365-376, (2017).
3. Fattahi, H., "Adaptive neuro fuzzy inference system based on fuzzy C-means clustering algorithm, a technique for estimation of TBM penetration rate", *Int. J. Optim. Civil Eng*, Vol. 6, No. 2, pp. 159-171, (2016).
4. Fattahi, H., Varmazyari, Z., and Babanouri, N., "Feasibility of Monte Carlo simulation for predicting deformation modulus of rock mass", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 89, pp. 151-156, (2019).
5. Fattahi, H., et al., "Hybrid Monte Carlo simulation and ANFIS-subtractive clustering method for reliability analysis of the excavation damaged zone in underground spaces", *Computers and Geotechnics*, Vol. 54, pp. 210-221, (2013).
6. Low, B. K. and Phoon, K.-K., "Reliability-based design and its complementary role to Eurocode 7 design approach", *Computers and Geotechnics*, Vol. 65, pp. 30-44, (2015).
7. Fenton, G. A., Naghibi, F., and Griffiths, D., "On a unified theory for reliability-based geotechnical design", *Computers and Geotechnics*, Vol. 78, pp. 110-122, (2016).
8. Cai, J.-S., et al., "Effect of spatial variability of shear strength on reliability of infinite slopes using analytical approach", *Computers and Geotechnics*, Vol. 81, pp. 77-86, (2017).
9. Li, Y., et al., "Penalty function-based method for obtaining a reliability indicator of gravity dam stability", *Computers and Geotechnics*, Vol. 81, pp. 19-25, (2017).

10. Metya, S., et al., "System reliability analysis of soil slopes with general slip surfaces using multivariate adaptive regression splines", *Computers and Geotechnics*, Vol. 87, pp. 212-228, (2017).
11. Zhang, J., et al., "Efficient response surface method for practical geotechnical reliability analysis", *Computers and Geotechnics*, Vol. 69, pp. 496-505, (2015).
12. Liu, L.-L., Cheng, Y.-M., and Zhang, S.-H., "Conditional random field reliability analysis of a cohesion-frictional slope", *Computers and Geotechnics*, Vol. 82, pp. 173-186, (2017).
13. Huang, J., et al., "Updating reliability of single piles and pile groups by load tests", *Computers and Geotechnics*, Vol. 73, pp. 221-230, (2016).
14. Sun, Y. and Li, X., "A probabilistic approach for assessing failure risk of cutting tools in underground excavation", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 70, pp. 299-308, (2017).
15. Tee, K. F., et al., "Reliability based life cycle cost optimization for underground pipeline networks", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 43, No. pp. 32-40, (2014).
16. Wang, Q., Fang, H., and Shen, L., "Reliability analysis of tunnels using a metamodeling technique based on augmented radial basis functions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 56, pp. 45-53, (2016).
17. Li, H.-Z. and Low, B. K., "Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field", *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, No. 1-2, pp. 50-58, (2010).
18. Mohammadi, S., Naseri, F., and Alipoor, S., "Development of artificial neural networks and multiple regression models for the NATM tunnelling-induced settlement in Niayesh subway tunnel, Tehran", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 74, No. 3, pp. 827-843, (2015).
19. Lü, Q. and Low, B. K., "Probabilistic analysis of underground rock excavations using response surface method and SORM", *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, No. 8, pp. 1008-1021, (2011).
20. Goh, A. T. C. and Zhang, W., "Reliability assessment of stability of underground rock caverns", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 55, pp. 157-163, (2012).
21. Song, L., et al., "Reliability analysis of underground excavation in elastic-strain-softening rock mass", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 60, pp. 66-79, (2016).

بررسی اثر آهک و نانواهک بر ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی ماسه ساحلی چالوس*

مقاله علمی - پژوهشی

رضا رضوانی توچاهی^(۱) میلاد عزیزی^(۲) پژمان نوپارس^(۳) علی نبی زاده^(۴)

چکیده خاک به عنوان لایه سطحی زمین و بستر سازه‌های عمرانی، از اهمیت ویژه‌ای در توسعه مناطق شهری برخوردار است. برخی از خاک‌ها، همچون ماسه ساحلی چالوس، به دلیل وجود رفتار نامناسب از قبیل ظرفیت باربری کم و تراکم‌پذیری زیاد، در زمره خاک‌های مساله‌دار قرار می‌گیرند. از جمله روش‌های مرسوم در بهسازی سطحی خاک، تثبیت با استفاده از مواد افزودنی مناسب است. در این پژوهش به بررسی اثر افزودن کربنات کلسیم (آهک) در ابعاد معمولی و نانو، بر ویژگی‌های مکانیکی ماسه مورد استفاده پرداخته می‌شود. بدین منظور پس از نمونه‌برداری این خاک از سواحل شهر چالوس، آهک و نانواهک در درصدهای وزنی مختلف به آن افزوده شده و تحت آزمایش‌های تراکمی و مقاومتی قرار گرفتند. بر اساس نتایج این پژوهش، افزودن آهک در ابعاد معمولی و نانو، باعث بهبود ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی شده، لیکن تأثیر نانواهک به مراتب بیشتر است که این موضوع می‌تواند به علت تشدید و تسریع واکنش‌های شیمیایی رخ داده بین عنا صر موجود در خاک و کربنات کلسیم در ابعاد نانو باشد. همچنین با افزایش درصد آهک و نانواهک در مخلوط، هم زاویه اصطکاک و هم چسبندگی افزایش یافته، لیکن تأثیر مواد افزودنی بر چسبندگی مخلوط، چشمگیرتر است.

واژه‌های کلیدی بهسازی خاک، آهک، نانواهک، رفتار تراکمی، پارامترهای مقاومتی.

Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand

R. Rezvani

M. Azizi

P. Nopars

A. Nabizadeh

Abstract Soil as a substrate of land and the foundation of civil structures is of particular importance in the development of urban areas. Some soils are classified as problematic soils due to their low mechanical resistance or high sensitivity to moisture changes, such as the Chalus coastal sand. Soil stabilization with suitable materials is one of the methods of soil improvement for problematic soils. The effect of calcium carbonate (i.e., lime) and nano-calcium carbonate (i.e., nano-lime) on the mechanical properties of the Chalus coastal sand is evaluated in this study. For this purpose, after sampling the soil from the coasts of Chalus city and conducting basic geotechnical experiments, the mixtures were prepared with different percentages of lime and nano-lime and compaction and strength tests were performed on the mixtures. The results showed that lime and nano-lime improved the mechanical properties of the soil material. However, the effect of nano-lime on the mechanical properties of Chalus sand is more significant compared to lime-sand mixtures. In addition, the increase in the lime and nano-lime content in soil mixtures resulted in an increase in the internal friction angle and cohesion.

Key Words Soil Improvement, Lime, Nano-Lime, Compaction Properties, Strength Parameters, Bearing Capacity

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۱۲/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۳/۳۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان. Email: rezvani@guilan.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنکابن.

(۳) کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنکابن.

(۴) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدمه

کشور ایران در زمره کشورهای قرار گرفته که دارای خاک های مسأله دار (خاک های نرم و شل، خاک های انبساطی، خاک های رمنده یا فروریزی و خاک دستی) است و در صورت عدم شناسایی این نوع خاک ها، اگر سازه ای روی آنها احداث شود، سازه احداث شده بنا به دلایل مختلف دچار مشکلات و ضرر و زیان خواهد شد. روش های مختلفی برای بهبود خواص و ویژگی های خاک وجود دارد که از آن جمله می توان به فرآیندهای مکانیکی نظیر تراکم، زهکشی به وسیله چاه های ماسه ای و تحکیم و فرآیندهای شیمیایی نظیر اصلاح و تثبیت یا استفاده از عناصر مسلح کننده همچون تسمه های فولادی، اشاره نمود. اضافه نمودن پاره ای از افزودنی ها به خاک، به عنوان یکی از روش های مؤثر در بهبود برخی از مشخصه های رفتاری خاک همواره مدنظر بوده است. افزودنی های مختلفی همچون سیمان، آهک، کلرید کلسیم، خاکستر بادی، قیر، انکلوژیون های پلیمری و... در مطالعات پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است [1-4].

تثبیت خاک به روش شیمیایی، در مورد اغلب خاک ها، همچون خاک های ماسه ای ساحلی، مورد استفاده قرار می گیرد. این گونه خاک ها به دلیل شرایط محیطی، اغلب دارای سطحی صاف و دانه های گرد و ریز بوده و به همین دلیل دارای مقاومت کم و تراکم پذیری بالا می باشند، بنابراین بهسازی این نوع خاک ها برای مقابله با بارهای استاتیکی و دینامیکی اجتناب ناپذیر است [5]. خاک مورد استفاده در این پژوهش نیز منشأیی دریایی دارد و بر اثر بارگذاری می تواند نشست های قابل توجهی از خود نشان دهد. بخش قابل توجهی از سواحل شمالی ایران، از این نوع خاک پوشیده شده و تعداد زیادی از مراکز جمعیتی و روستایی بر روی این نوع خاک بنا شده است. از همین رو بهسازی این نوع خاک اهمیت ویژه ای دارد.

در کنار انواع افزودنی های متداول، نانوذرات که دارای ویژگی های منحصر به فردی هستند، در مهندسی ژئوتکنیک کمتر مورد توجه قرار گرفته اند. نانو فناوری شاخه ای از علم مهندسی است که درباره ذراتی بحث

می کند که اندازه آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. ذرات با اندازه نانومتر در مقایسه با ذرات با اندازه بزرگ تر، رفتارهای بسیار متفاوت، با ویژگی های ارتقاء یافته، از خود نشان می دهند [6-10]. نانوذرات به دلیل داشتن ویژگی هایی همچون سطح ویژه بالا، بارهای سطحی و منافذ در ابعاد نانو، در صورتی که به مقدار بسیار کمی هم در خاک وجود داشته باشند، می توانند ویژگی های مهندسی و رفتار فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار دهند.

پژوهش های بسیاری در زمینه استفاده از انواع مواد افزودنی (در ابعاد طبیعی و نانو)، برای بهبود رفتار مصالح خاکی انجام شده است. حائری و همکاران [11] با افزودن سه ماده چسباننده مختلف شامل گچ، آهک و سیمان پرتلند به ماسه شن دار، به بررسی رفتار مقاومتی مخلوط با استفاده از نتایج آزمایش های سه محوری پرداختند. نتایج نشان داد که نمونه های ساخته شده با مخلوط خاک و گچ دارای بیشترین رفتار شکنندگی نسبت به نمونه های ساخته شده با دیگر مواد افزودنی بوده است. همچنین افزودن ۴/۵٪ آهک باعث شد که چسبندگی خاک حدود ۱۰ و زاویه اصطکاک حدود ۱/۱ برابر افزایش یابد. در پژوهشی دیگر، اصغری و همکاران [12] با انجام آزمایش های سه محوری بر روی خاک های غیرسیمانه و سیمان شده با آهک نشان دادند که با افزایش میزان سیمان شدگی، چسبندگی نمونه ها بیشتر شده و همچنین پوش گسیختگی در خاک های سیمان شده به صورت منحنی است. در سال ۱۹۹۳، یونکورا و میوا [13] برای افزایش مقاومت فشاری ماسه از نانوذرات سیلیس استفاده کردند. آنها گزارش کردند که با افزودن ۳۳ درصد وزنی نانوسیلیس به خاک، مقاومت خاک بعد از حدود ۱۰۰۰ روز، ۳/۵ برابر شد. کاهش نفوذپذیری و جذب سطحی فلزات به وسیله تثبیت خاک با نانوسیلیس توسط نول و همکاران [14] نیز بیان گردیده است. باترون و همکاران [15] بیان کردند که نفوذپذیری مصالح مخلوط شده با نانوسیلیس می تواند مشابه رُس با نفوذپذیری کم باشد. نتیجه پژوهش ها بر روی چگونگی تأثیر نانوسیلیس بر ویژگی های مخلوط خاک-سیمان نشان می دهد که افزودن

پتانسیل وقوع روانگرایی در مصالح خاکی می‌گردد. احمدی [27] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانومواد بر ویژگی‌های ماسه تثبیت‌شده با سیمان پرداخت. در این پژوهش سه نوع نانومواد شامل نانوسیلیس، نانوالومینیوم و نانومیزیم مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حضور نانومواد باعث قفل‌وبست بیشتر مصالح خاکی و پر شدن منافذ بین دانه‌ای شده و افزایش سختی تا بیش از ۲۰٪ با افزودن ۱/۲٪ مواد نانو را به همراه خواهد داشت.

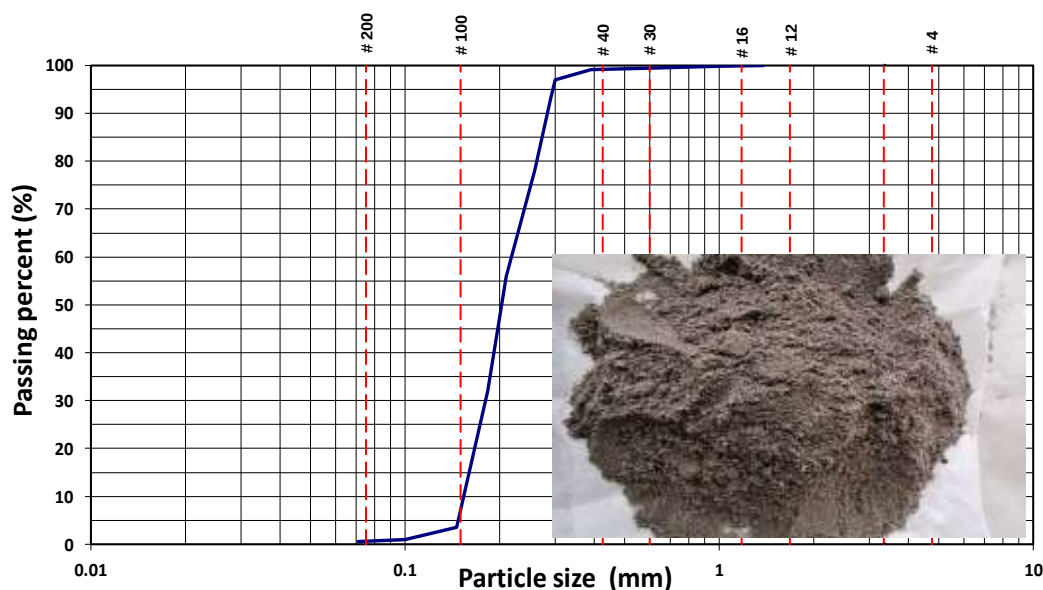
در این پژوهش سعی شده است با افزودن درصد-های مختلف از آهک و نانواهک، به بررسی اثر آنها بر بهسازی ویژگی‌های خاک ماسه‌ای سواحل شهر چالوس پرداخته شود. همچنین با در نظر گرفتن درصد-های افزودنی تقریباً یکسان در حالت‌های آهک و نانواهک، سعی شده است نحوه عملکرد این دو ماده در بهسازی خاک ماسه‌ای ساحلی مقایسه شده و تأثیر ابعاد ذرات افزودنی بر شدت و چگونگی واکنش‌های شیمیایی بررسی شود. در انتها مقایسه‌ای بین نتایج حاصل‌شده در این مطالعه و پژوهش‌های پیشین انجام گرفته است.

مصالح مورد استفاده

در این پژوهش از خاک سواحل دریای خزر به‌عنوان مصالح خاکی استفاده شده است. بدین منظور خاک مورد نظر از سواحل شهرستان چالوس برداشت شده است. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی این ماسه، آزمایش‌های شاخص بر روی آن انجام گرفت. نمودار دانه‌بندی خاک در شکل (۱) نشان داده شده است. با استفاده از روش متحد (یونیفاید)، این خاک به‌صورت ماسه بدانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی می‌گردد. در جداول (۱) و (۲) برخی از مهم‌ترین مشخصات فیزیکی و مهندسی ماسه چالوس و نانواهک مورد استفاده در این پژوهش، ارائه شده است.

نانوسیلیس تا ۳۰٪ وزن سیمان، باعث افزایش ۱۰۰ درصدی مقاومت فشاری، نسبت به نمونه‌های فاقد نانوسیلیس می‌شود [۱۶]. بهمنی و همکاران [17] نیز بیان کردند که با افزودن نانوسیلیس تا ۰/۴٪ وزن خاک، مقاومت فشاری حدود ۸۰٪ افزایش می‌یابد.

نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات از یک حدی بیشتر، کاهش مقاومت برشی خاک را به همراه خواهد داشت. برخی از محققین مقدار ۸٪ وزن خاک را به‌عنوان درصد بهینه نانوسیلیس گزارش کرده‌اند [18,19]. بررسی تأثیر مواد نانو بر ماسه رس‌دار توسط محمدزاده و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۰ انجام گرفت. در این پژوهش خاک ماسه‌ای رس‌دار (با نسبت ۸۰٪ ماسه ساحلی انزلی و ۲۰٪ رس کائولینیت) با درصد-های وزنی مختلفی از نانورس (۰/۵، ۱ و ۲ درصد) مخلوط شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که حضور ۱٪ نانو، باعث افزایش حد خمیری به مقدار ۳۸٪ و کاهش دامنه خمیری به مقدار ۴۰٪ می‌گردد. نتایج مشابهی توسط عبدی‌نژاد و همکاران [۲۱] با افزودن نانواهک به خاک رس مسأله‌دار گزارش شده است. آنها اعلام کردند که به ازای هر ۱٪ نانو آهک، حد خمیری خاک رس در حدود ۲٪ افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان افزایش این پارامتر برای افزودن هر ۱٪ آهک، حدود ۰/۹٪ است. ژانگ و همکاران [22] با افزودن مواد نانو به مصالح رسی بیان نمودند که حدود اثربرگ در این مصالح افزایش می‌یابد. بهبود خواص خاک رس با افزودن مواد نانو، توسط محققین مختلفی بیان شده است [23-25]. تایپودیا و همکاران [26] به بررسی تأثیر نانوذرات دی کلریدکلسیم، اکسیدکلسیم، نیترات پتاسیم و بنتونیت بر ویژگی‌های خاک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از مواد افزودنی در ابعاد نانو، تأثیر بیشتری بر رفتار خاک دارد. مقاومت فشاری مخلوط رس و نانواکسید کلسیم، ۵۵٪ و مدول برشی مخلوط ماسه و نانواکسید کلسیم، بیش از ۱۰۰٪ افزایش داشته است. درنتیجه استفاده از نانوذرات، باعث کاهش



شکل (۱): نمودار دانه‌بندی و تصویری از ماسه برداشت‌شده از ساحل چالوس

آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ارزیابی تأثیر افزودن آهک و نانواهک بر روی ویژگی‌های تراکمی و مقاومتی، نمونه‌های خاک با درصد‌های مختلف مواد افزودنی (شامل ۱، ۲، ۳، ۶ و ۹ درصد) ساخته‌شده و تحت آزمایش‌های پروکتور استاندارد و برش مستقیم قرار گرفتند. در این پژوهش از روش رسوب‌گذاری خشک برای آماده‌سازی نمونه‌های مخلوط خاک، آهک و نانواهک استفاده گردید. بدین منظور، با توجه به درصد وزنی افزودنی‌ها، مقادیر مناسب ماسه خشک‌شده در گرم‌خانه، آهک و نانواهک توزین و در یک بطری ریخته شده و با چرخاندن و تکان دادن بطری به مدت پنج دقیقه، سعی گردید تا ماسه و افزودنی‌ها به صورت نسبی با یکدیگر مخلوط شوند. سپس مخلوط به دست‌آمده به همراه ۲ الی ۳٪ وزنی آب، در ظرفی لوله‌ای شکل از جنس پلکسی‌گلاس ریخته شد. با چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ظرف، به صورت رفت و برگشتی و به مدت ۲۰ دقیقه، ماسه و افزودنی کاملاً با هم مخلوط گردیدند.

برای انجام آزمایش تراکم، ۵ نمونه آماده‌شده به طریق فوق، به صورت جداگانه با وزن حدود ۴ کیلوگرم

جدول (۱): ویژگی‌های فیزیکی ماسه چالوس

مقادیر	مشخصات خاک
SP	طبقه‌بندی متحد (یونیفاید)
۱/۴۴	ضریب یکنواختی $(C_u)^*$
۰/۸۶	ضریب انحناء $(C_c)^{**}$
۰/۱۵۳	اندازه مؤثر ذرات (D_{10}) (mm)
۰/۲۰۵	اندازه متوسط ذرات (D_{50}) (mm)
۲/۷۰	چگالی ویژه (G_s)
۰/۵۳	نسبت منافذ حداقل (e_{min})
۰/۸۰	نسبت منافذ حداکثر (e_{max})
$^* C_u = D_{60}/D_{10}$ $^{**} C_c = D_{30}^2 / (D_{60} * D_{10})$	

جدول (۲): مشخصات نانواهک مورد استفاده در پژوهش

مقادیر	مشخصات نانواهک
۶۰	اندازه متوسط (nm)
۸۰-۶۰	سطح ویژه (cm^2/gr)
۸۲۵	درجه ذوب $(^\circ C)$
۹۹	درجه خلوص (%)
۸-۱۰/۵	pH

مخصوص، با افزایش درصد رطوبت، میزان تراکم کاهش می‌یابد. این روند هم در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و هم در نمونه‌های تثبیت‌شده با نانواهک دیده می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) ماسه ساحلی چالوس از مقدار $15/1 \text{ kN/m}^3$ در حالت طبیعی، به $16/4 \text{ kN/m}^3$ با افزودن ۹٪ آهک و $15/7 \text{ kN/m}^3$ با افزودن ۳٪ نانواهک افزایش یافته است. با توجه به ریزی ذرات آهک و نانو آهک، این مواد در بین منافذ خاک قرار گرفته و باعث توپرتر شدن مخلوط می‌گردند و همین امر منجر به افزایش وزن مخصوص می‌شود. همچنین با افزایش درصد مواد افزودنی، مقدار درصد رطوبت بهینه (w_{opt}) نیز افزایش می‌یابد. درواقع با افزایش مقدار آهک و نانواهک در مخلوط خاک-افزودنی، سطح ویژه مخلوط افزایش یافته و همین موضوع سبب می‌شود تا دانه‌های مخلوط به آب بیشتری برای جابه‌جایی نیاز داشته باشند. شایان یادآوری است که رطوبت بهینه در حالت ماسه طبیعی، ۱۰/۴٪ بوده و این پارامتر با افزودن ۹٪ آهک، ۱۴/۹٪ و با افزودن ۳٪ نانواهک، ۱۳/۲٪ می‌شود.

شکل (۳) منحنی‌های تراکم برای خاک ماسه‌ای در شرایط طبیعی (بدون افزودنی) و خاک تثبیت‌شده با ۳ درصد وزنی آهک و نانواهک ($x=3\%$) را برای مقایسه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر ماسه ساحلی با افزودن ۳٪ نانواهک ($15/7$ کیلو نیوتن بر مترمکعب) بیشتر از مقدار این پارامتر با افزودن ۳٪ آهک ($15/3$ کیلو نیوتن بر مترمکعب) به‌دست آمده است. به‌عبارتی دیگر، تثبیت خاک با نانواهک نتیجه تراکمی بهتری را به دست می‌دهد. همچنین درصد رطوبت بهینه خاک تثبیت‌شده با ۳٪ نانواهک، ۱۳/۲٪ و مخلوط ماسه و ۳٪ آهک، ۱۴/۹٪ به‌دست آمده است. با توجه به ریزی ذرات نانواهک، سطح ویژه این مصالح در درصدهای وزنی یکسان با آهک، بسیار بیشتر بوده و در نتیجه برای انجام فرآیندهای شیمیایی به مقدار آب بیشتری نیازمند است.

آماده شده و به هرکدام رطوبت‌های مختلف (از ۵ الی ۲۰٪) اضافه گردید. تمامی نمونه‌های ساخته‌شده به مدت ۲۴ ساعت داخل محفظه‌های پلاستیکی برای انجام واکنش‌های شیمیایی قرار داده شدند. پس‌از آن بر روی هر نمونه، آزمایش پروکتور مطابق با استاندارد [28] انجام گرفت.

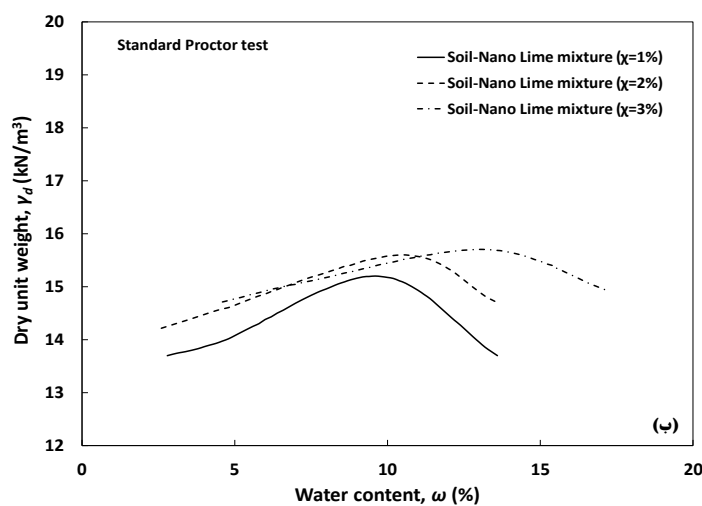
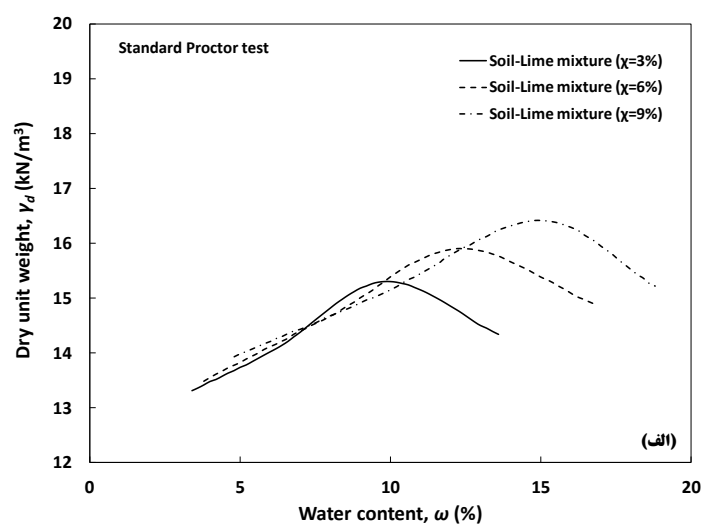
برای انجام آزمایش برش مستقیم [29] از دستگاه برش با ابعاد جعبه $30 \times 60 \times 60$ میلی‌متر استفاده گردید. شایان یادآوری است که برای مقایسه بهتر نتایج، شرایط اولیه آزمایش برای تمامی نمونه‌های خاک طبیعی و تثبیت‌شده، ثابت در نظر گرفته شد. بدین منظور تمامی آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های با درصد رطوبت ۱۳٪ و وزن مخصوص ۱۶ کیلو نیوتن بر مترمکعب انجام گرفت. برای هر آزمایش برش، ۳ نمونه جدا با رطوبت ثابت ساخته‌شده و پس از ۲۴ ساعت نگهداری در محفظه پلاستیکی، تحت آزمایش برش با اعمال بار قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند. این توضیح لازم است که کلیه آزمایش‌ها در شرایط کرنش کنترل شده و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت.

نتایج آزمایش‌ها

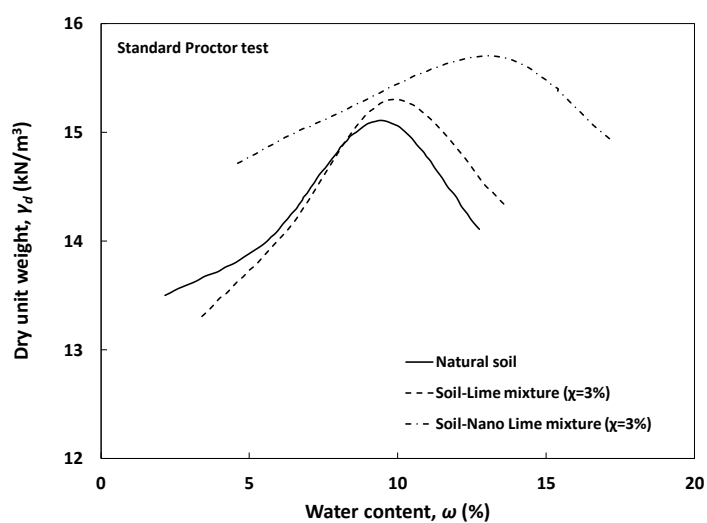
آزمایش پروکتور استاندارد

برای بررسی رفتار تراکمی ماسه تثبیت‌شده با آهک و نانواهک، از جمله وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه، آزمایش پروکتور استاندارد بر روی نمونه‌های خاک بدون افزودنی و با افزودنی انجام گردید. بدین منظور مخلوط‌هایی با درصد افزودنی‌های مختلف (x) شامل ۳٪، ۶٪ و ۹٪ آهک و ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانواهک تحت آزمایش تراکم قرار گرفتند.

شکل (۲) منحنی‌های تراکم به‌دست‌آمده از این آزمایش را برای ماسه تثبیت‌شده با آهک و نانواهک نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است در ابتدا با افزایش رطوبت، مقدار وزن مخصوص خشک نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و پس از رسیدن به نقطه حداکثر وزن



شکل (۲): منحنی های تراکم ماسه تثبیت شده با (الف) آهک و (ب) نانواهک

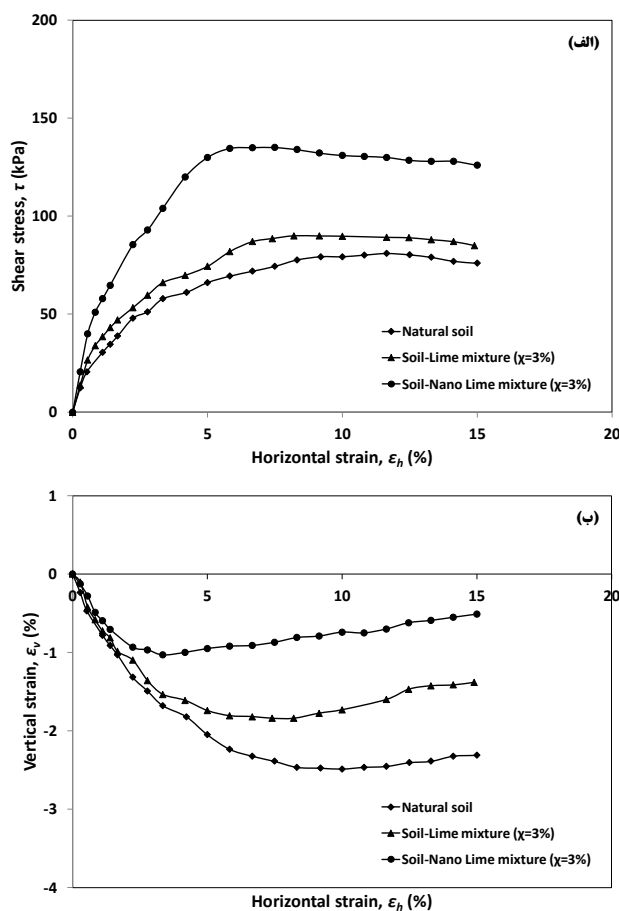


شکل (۳): منحنی های تراکم ماسه طبیعی و تثبیت شده با ۳٪ آهک و نانواهک

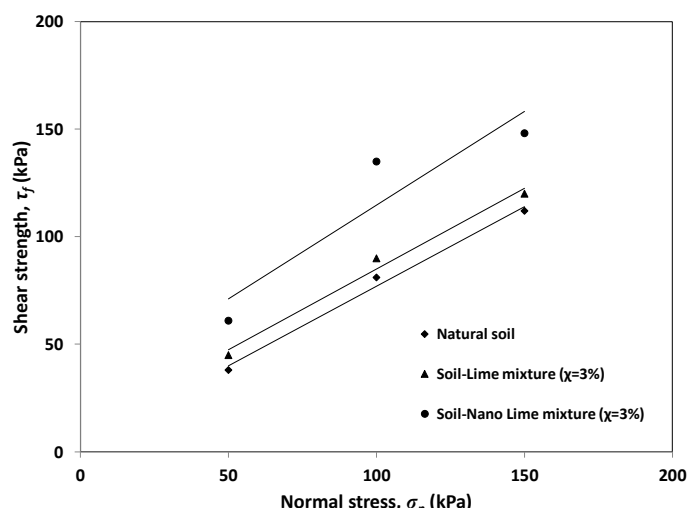
آزمایش برش مستقیم

مخلوط و انتقال بهتر تنش بین دانه‌ها می‌شود. همچنین سیمان‌تاسیون ایجاد شده در اثر واکنش‌های شیمیایی، افزایش سختی و کسب مقاومت سریع‌تر مخلوط را به دنبال خواهد داشت. با توجه به تأثیر بیشتر ذرات آهک در مقیاس نانو بر شدت واکنش‌های شیمیایی، افزایش مقاومت در مخلوط خاک-نانوآهک نسبت به مخلوط خاک-آهک بیشتر بوده است. شکل (۴-ب) نشان می‌دهد که تمایل به اتساع در نمونه‌های مخلوط خاک تثبیت شده با آهک و نانوآهک بیشتر بوده که این موضوع به دلیل کلوخه شدن دانه‌های خاک و تشکیل دانه‌های زبرتر و گوشه‌دارتر نسبت به ماسه طبیعی است.

در این پژوهش، بررسی پارامترهای مقاومتی خاک ماسه-ای تثبیت شده با آهک و نانوآهک، به وسیله آزمایش برش مستقیم انجام شد. بدین منظور نمونه‌های مختلف خاک ماسه‌ای مخلوط شده با درصد‌های وزنی متفاوت آهک ($x=1, 2, 3, 6\%$) آزمایش شدند. شکل (۴) نتایج آزمایش‌های برش مستقیم برای ماسه طبیعی و تثبیت شده با ۳٪ مواد افزودنی را تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، افزودن آهک و نانوآهک منجر به افزایش مقاومت برشی ماسه ساحلی شده است. وجود ذرات ریز آهک و نانوآهک در بین منافذ ماسه، باعث توپرتر شدن



شکل (۴): نتایج آزمایش برش مستقیم برای ماسه طبیعی و تثبیت شده با ۳٪ آهک و نانوآهک، (الف) تنش برشی-کرنش افقی، (ب) کرنش قائم-کرنش افقی



شکل (۵): پوش گسیختگی برای ماسه طبیعی و تثبیت شده با ۳٪ آهک و نانواهک

شکل (۶-الف) نشان می‌دهد که با افزودن ۳٪ نانواهک به خاک ماسه‌ای، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر نسبت به حالت بدون مواد افزودنی، حدود ۴٪ افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقدار افزایش این پارامتر در مخلوط خاک تثبیت شده با ۳٪ آهک، حدود ۱/۳٪ است. این موضوع نشان می‌دهد که اضافه کردن کربنات کلسیم در ابعاد نانو، باعث تسریع و تشدید فرآیندهای هیدراتاسیون شده و در نتیجه بازدهی عملیات تراکم در خاک افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شکل (۶-ب) می‌توان متوجه شد که افزودن آهک و نانواهک به شدت بر روی رطوبت بهینه مخلوط تأثیرگذار است. درصد افزایش رطوبت بهینه در حالات استفاده از ۳٪ آهک و نانواهک به ترتیب ۴/۸٪ و ۲۶/۹٪ بوده و شیب تغییرات درصد رطوبت بهینه در مخلوط ماسه و نانواهک حدود ۱/۹ برابر شیب تغییرات در مخلوط ماسه و آهک است. ذرات آهک و نانواهک باعث تغییر ساختاری در مخلوط خاک-افزودنی می‌شوند، بدین معنی که در منافذ موجود در خاک قرار گرفته و آب بین‌دانه‌ای را جذب می‌کنند. همچنین ذرات نانواهک به علت بار یونی بالا (با توجه به سطح ویژه بسیار زیاد)، یون‌های هیدراته آب را بیشتر جذب می‌کنند. علاوه بر این، با اضافه نمودن آهک و نانواهک به خاک ماسه‌ای، به دلیل افزایش واکنش‌های

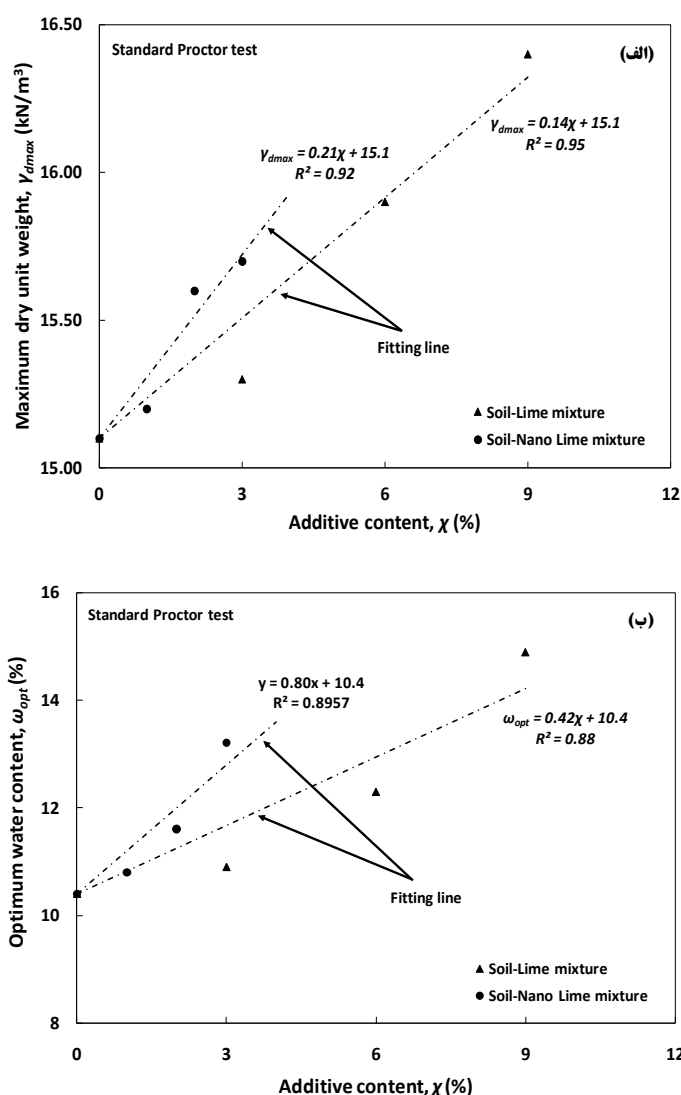
با در نظر گرفتن نقطه حداکثر نمودار تنش-کرنش به عنوان نقطه گسیختگی، می‌توان پوش گسیختگی برای خاک را رسم نمود (شکل ۵). بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت شده، هم به صورت افزایش زاویه اصطکاک بین دانه‌ها و هم افزایش چسبندگی بین ذرات است. با افزودن ۳٪ آهک و نانواهک، مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک از ۳۶/۵ درجه در حالت طبیعی، به ۳۶/۹ و ۴۱ درجه رسیده است. این در حالی است که تأثیر مواد افزودنی بر چسبندگی شدیدتر بوده و مقدار چسبندگی ماسه ساحلی چالوس از ۲ کیلوپاسکال، به ۱۰ و ۲۷ کیلوپاسکال در حالت استفاده از ۳٪ آهک و نانواهک افزایش یافته است.

بحث و مقایسه

نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه در نمونه‌های با درصد‌های مختلف آهک و نانواهک در شکل (۶) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، افزایش درصد مواد افزودنی (آهک و نانواهک) باعث افزایش خطی وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه می‌گردد. لیکن تأثیر کربنات کلسیم در مقیاس نانو، بیشتر از ابعاد معمولی است و شیب خط مربوط به خاک تثبیت شده با نانواهک بیشتر است.

مخلوط ماسه با آهک و نانواهک نیاز به آب دارد، لذا مقداری از آب اضافه شده به مخلوط سبب انجام واکنش - های شیمیایی مذکور می گردد. با توجه به دلایل یاد شده، میزان رطوبت لازم برای ایجاد حداکثر تراکم مخلوط های تثبیت شده افزایش می یابد. افزایش درصد رطوبت بهینه در مخلوط های خاک با مواد افزودنی همچون آهک و پوزولان در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است [۳۲-۳۰].

آنی (تبادل کاتیونی) میان ذرات افزودنی و خاک، لخته شدن ذرات نیز افزایش می یابد. بروز این ذرات لخته شده (کلوخه شده)، باعث سخت تر شدن عمل تراکم شده و همین امر باعث شده است که افزودن آهک و نانواهک تأثیر قابل توجهی بر میزان وزن مخصوص خاک نداشته باشد. وجود کلوخه ها موجب می شود که ذرات خاک برای جابه جایی خود بر روی یکدیگر با مقاومت بیشتری مواجه شده و در نتیجه به آب بیشتری احتیاج داشته باشند. همچنین انجام هیدراتاسیون و واکنش های پوزولانی در



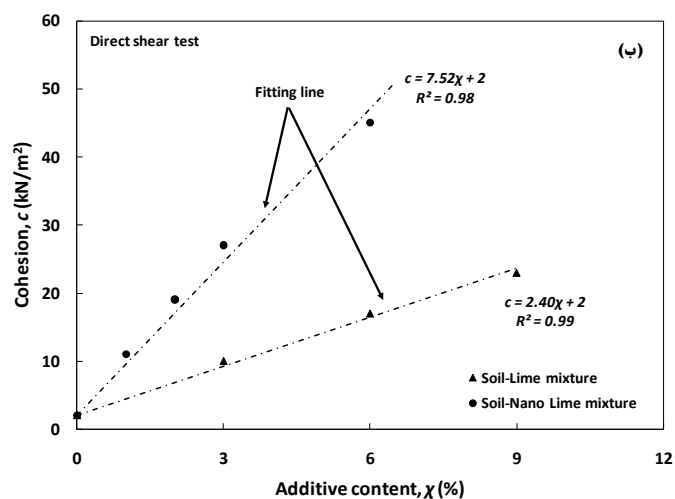
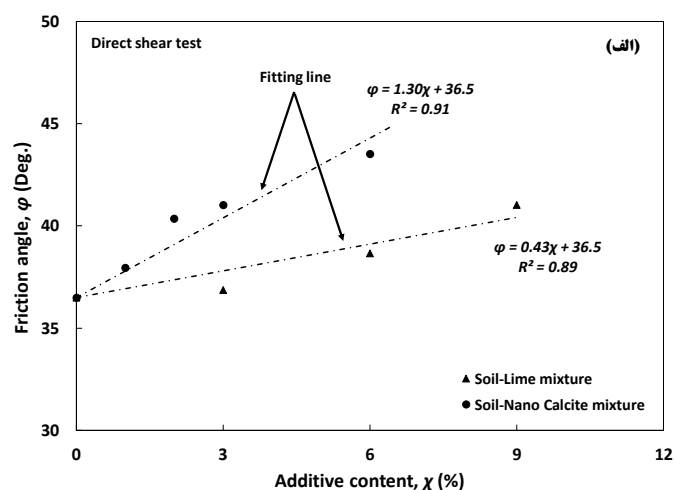
شکل (۶): (الف) تأثیر درصد افزودنی بر وزن مخصوص خشک حداکثر و (ب) تأثیر درصد افزودنی بر درصد رطوبت بهینه

نانو بر شدت واکنش های پوزولانی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است [33-35].

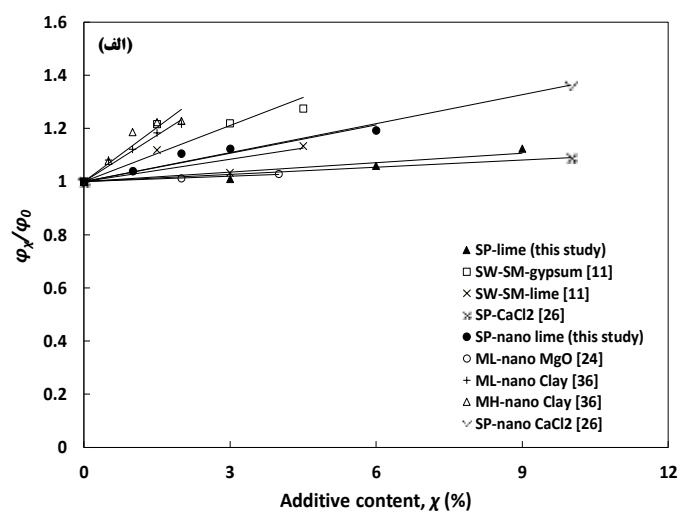
مقایسه اشکال (۷-الف و ب) نشان می دهد که تغییرات چسبندگی خاک در اثر تثبیت با آهک و نانواهک بیشتر از تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک است. افزودن ۶٪ آهک به خاک چالوس باعث می شود زاویه اصطکاک ۱/۰۶ و چسبندگی ۸/۵ برابر گردد. همچنین در حالت استفاده از ۶٪ نانواهک، زاویه اصطکاک و چسبندگی به ترتیب ۱/۱۹ و ۲۲/۵ برابر افزایش یافته است. از این رو می توان عامل اصلی افزایش مقاومت برشی را چسبندگی مخلوط دانست که پیش تر توسط محققین مختلف نیز گزارش شده است [12,24]. در این میان تأثیر نانواهک در افزایش چسبندگی مخلوط به مراتب بیشتر از آهک است.

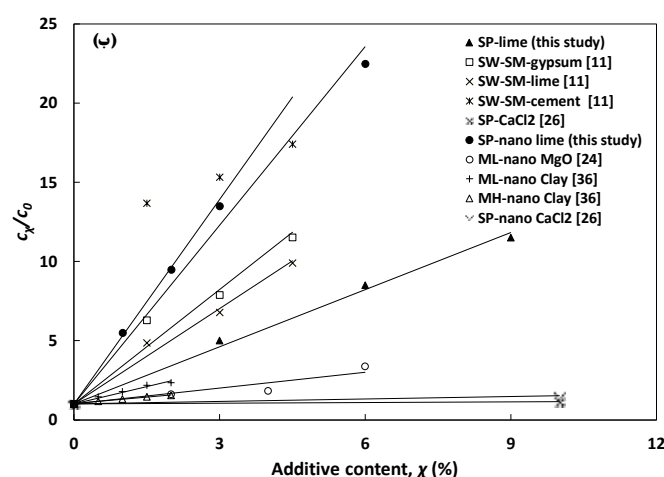
مقایسه ای بین نتایج به دست آمده از این مطالعه و پژوهش های مشابه قبلی انجام گرفته است. شایان یادآوری است که داده های گردآوری شده مربوط به خاک های غیر چسبنده (ماسه و لای) بوده و در آنها از انواع مختلف مواد افزودنی شامل آهک (در ابعاد طبیعی و نانو)، گچ، سیمان، کلرید کلسیم (در ابعاد طبیعی و نانو)، نانواکسید منیزیم و نانورس استفاده شده است. محور قائم در شکل (۸) نسبت مقدار ϕ یا c در مخلوط با $\%$ درصد افزودنی به مقدار پارامتر در خاک بدون افزودنی است. همان گونه که مشخص است، تأثیر مواد افزودنی (در ابعاد طبیعی و نانو) بر روی چسبندگی خاک های غیر چسبنده بیشتر از زاویه اصطکاک است. در حالی که حداکثر نسبت افزایش زاویه اصطکاک ۱/۴ است، مقدار چسبندگی در برخی موارد بیش از ۱۰ برابر افزایش یافته است. البته لازم به یادآوری است که مقدار افزایش مقاومت برشی خاک های تثبیت شده، به شدت به نوع خاک و نوع افزودنی وابسته بوده و پراکندگی زیادی در داده ها دیده می شود.

در شکل (۷) تغییرات مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک نسبت به درصد وزنی مواد افزوده شده به خاک، نمایش داده شده است. همان گونه که پیش تر بیان گردید، افزودن آهک و نانواهک به ماسه ساحلی چالوس باعث افزایش مقاومت برشی شده است. در واقع وقوع واکنش های شیمیایی از جمله سیمان تاسیون و واکنش های پوزولانی، در اثر وجود کربنات کلسیم، باعث چسبیدن برخی از دانه ها به یکدیگر (کلوخه شدن) و در نتیجه تشکیل دانه های بزرگ تر با سطوح خشن تر و گوشه دارتر نسبت به خاک اولیه می شود. همچنین بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)، در پژوهش های پیشین نشان داده است که تجمع مواد تثبیت کننده به دور ذرات خاک، باعث افزایش ناصافی دانه ها شده و در نتیجه زاویه اصطکاک افزایش می یابد. وجود ذرات در ابعاد نانو در فضای بین دانه های خاک، باعث افزایش تراکم و انتقال بهتر تنش های وارده شده که این امر منجر به افزایش سختی مخلوط های تثبیت شده با نانومواد می گردد [23,27]. با اضافه شدن کربنات کلسیم چه در ابعاد معمولی و چه در ابعاد نانو به خاک، یون های Ca^{++} و $2(OH)^{-}$ تجزیه شده، ژل های سیمانی سیلیکات هیدراته شده را به وجود می آورند. این ژل های سیمان گونه در بین خلل و فرج خاک نفوذ کرده و چسبندگی بین ذرات خاک را افزایش می دهند. از طرف دیگر به دلیل وجود ذرات بسیار ریز در نانواهک، pH خاک افزایش یافته و سرعت واکنش پوزولانی زیادتر می شود و همین امر سبب می گردد که تأثیر افزودن نانواهک بر افزایش مقاومت برشی خاک، بیشتر از افزودن آهک باشد. شیب تغییرات زاویه اصطکاک در مخلوط های ماسه و نانواهک، حدود ۳ برابر شیب تغییرات زاویه اصطکاک در مخلوط های ماسه و آهک است، همچنین شیب تغییرات چسبندگی در حالت استفاده از نانواهک، حدود ۳/۱۳ برابر این پارامتر در حالت استفاده از آهک است. تأثیر مواد افزودنی در ابعاد



شکل (۷): (الف) تأثیر درصد افزودنی بر زاویه اصطکاک داخلی و (ب) تأثیر درصد افزودنی بر چسبندگی





شکل (۸): مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعات پیشین (الف) تأثیر درصد افزودنی بر درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک، (ب) تأثیر درصد افزودنی بر درصد تغییرات چسبندگی

نتیجه گیری

نشان دهنده تأثیر بیشتر نانواهک در تسریع و تشدید فرایندهای هیدراتاسیون و در نتیجه افزایش بازدهی عملیات تراکم در خاک است. بروز واکنش های شیمیایی و کلوخه شدن دانه های خاک، باعث سخت تر شدن عملیات تراکم شده، به همین دلیل افزایش وزن مخصوص چندان زیاد نبوده است. لازم به یادآوری است که برای حصول وزن مخصوص حداکثر، مقدار آب بیشتری در خاک های تثبیت شده مورد نیاز است و این موضوع باید در پروژه های اجرایی مدنظر قرار گیرد. به عنوان مثال رطوبت بهینه در حالت افزودن ۳٪ نانواهک، به میزان ۲۷٪ افزایش می یابد؛

۳. وقوع واکنش های شیمیایی از قبیل هیدراتاسیون، سیمان تاسیون و واکنش های پوزولانی، باعث فرآیند آگلومراسیون و در نتیجه تشکیل دانه های بزرگ تر با سطوح خشن تر و گوشه دارتر نسبت به خاک اولیه می شود. به همین دلیل زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می یابد؛

۴. عامل اصلی افزایش مقاومت خاک در اثر تثبیت با آهک و نانواهک، افزایش چسبندگی ذرات

در مقاله حاضر اثر تثبیت کننده کربنات کلسیم (آهک) در ابعاد معمولی و نانو بر خواص تراکمی و مقاومتی خاک ماسه ای شهرستان چالوس مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش برش مستقیم و پروکتور استاندارد بر روی نمونه های مختلف به منظور بررسی نقش بهسازی بر رفتار خاک ساحلی انجام گردید. با توجه به درصد های افزودنی و ویژگی های شیمیایی تقریباً یکسان آهک و نانواهک، مقایسه کمی تأثیر ابعاد ذرات افزودنی بر بهسازی ماسه ساحلی چالوس انجام گرفت. برخی از مهم ترین یافته های این پژوهش در زیر آورده شده است:

۱. به طور کلی بهسازی ماسه ساحلی چالوس به روش تثبیت با آهک و نانواهک، باعث بهبود ویژگی های تراکمی (افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر) و پارامترهای مقاومتی (افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) خاک می گردد؛
۲. با افزودن ۳٪ آهک و نانواهک به خاک ماسه ای، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر نسبت به حالت بدون مواد افزودنی به ترتیب حدود ۱/۳٪ و ۴٪ افزایش می یابد. این موضوع

نانوآهک در واکنش های شیمیایی و ریزی دانه-ها سبب می شود که این مواد به خوبی دور دانه-های خاک را احاطه کرده و به شدت چسبندگی مخلوط را افزایش دهند.

خاک است. ژل های سیمانی سیلیکات هیدراته شده در خلل و فرج خاک نفوذ کرده و باعث افزایش چسبندگی بین ذرات خاک می گردد. این موضوع در مخلوط خاک و نانوآهک به مراتب چشمگیرتر است. فعال تر بودن

مراجع

1. Dermatas, D. and Meng, X.G., "Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metalcontaminated soils", *Engineering Geology*, Vol.70, pp. 377-394, (2003).
2. Kalkan, E. and Akbulut, S., "The positive effects of silica fume on the permeability, swelling, pressure and compressive strength of natural clay liners", *Engineering geology*, Vol.73, No.1: pp. 145-156, (2004).
3. Obrer, C., "Permeability of stabilized clay", M.Sc. Thesis, Helsinki university of technology, (2006).
4. Gallagher, P.M. and Lin, Y., "Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms", *Geo-Frontiers Congress*, Austin, Texas, United States, (2005).
5. Ahmadi, H., Eslami, A., and Arabani, M., "Characterization of sedimentary Anzali Sand for static and seismic studies purposes", *International Journal of Geography and Geology*, Vol.4, No.10., pp.155-169, (2015).
6. Zeng, Q.J., Mo, H.H., Liao, J.C., and Pan, H., "Study on corrosion resistance of soil-cementmixed with nanometer silica powder", *Science Technology and Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp.1671-815, (2007).
7. Wang, L.F., "Experimental researches on microstructure of nanometer silicon and cement-stabilized soils", *Applied Mechanics and Materials*, 94-96:358-64, (2011).
8. Zhang, M.H., and Islam, J., "Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag", *Construction and Building Materials*, Vol. 29:, pp.573-80, (2012).
9. Oltulu, M., and Şahin. R., "Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica", *Construction and Building Materials*, Vol.53: pp.658-664, (2014).
10. Sadrjamali, M., Athar, S.M., and Negahdar, A., "Modifying soil shear strength parameters using additives in laboratory condition", *Current World Environment*, Vol.10, No.1, pp.120-130, (2015).
11. Haeri, S.M., Hamidi, A., Hosseini, S.M., Asghari, E., and Toll, D.G., "Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravely sand", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 24, No.2, pp.335-360, (2006).
12. Asghari, E., Toll, D.G., and Haeri, S.M., "Triaxial behaviour of a cemented gravely sand, Tehran alluvium", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 21, No.1, pp.1-28, (2003).

13. Yonekura, R., and Miwa, M., "Fundamental properties of sodium silicate based grout", *Proceedings of the Southeast Asian Geotechnical Conference (SEAGC)*, P.44-439, (1993).
14. Noll, M.R., Bartlett, C., and Dochat, T.M., "Insitu permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica", *National Outdoor Action Conference*, Las Vegas, NV, P.57-443, (1992).
15. Butron, C., Axelsson, M., and Gustafson, G., "Silica soil for rock grouting laboratory testing of strength, fracture behavior and hydraulic conductivity", *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 6, pp.603-607, (2006).
۱۶. شوش پا شا، عیسی، عباسی، مجتبی و نجف نیا، هادی، "بررسی اثر ترکیب سیمان و نانو سیلیس بر روی مقاومت برشی خاک ماسه ای بابلسر"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۱، صفحه ۱۷۹-۱۸۸، (۱۳۹۷).
17. Bahmani, S.H., Huat, B.B.K., and Asadi, A., and Farzadnia, N., "Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement", *Construction and Building Materials*, Vol.64, pp.350-359, (2014).
18. Kutanaei, S.S., and Choobbasti, A.J., "Prediction of combined effects of fibers and cement on the mechanical properties of sand using particle swarm optimization algorithm", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 29, No.6, 487-501, (2015).
19. Kutanaei, S.S., and Choobbasti, A.J., "Experimental study of combined effects of fibers and nanosilica on mechanical properties of cemented sand", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.28, No. 6, p. 06016001, (2016).
۲۰. محمدزاده ثانی، ابوالفضل، عربانی، مهیار، خداپرست حقی، اکبر و جمشیدی چناری، رضا، "تأثیر نانو رس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه های رس دار"، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، (۱۳۸۹).
۲۱. عبدی نژاد نوح دانی، امیرحسین، عسکری جیرهنده، صادق، ترابی خداشهری، حامد و احتشامی، امیرمحمد، "ارزیابی آزمایشگاهی بهسازی خاک رس با نانواهک و آهک به منظور بهبود خواص خمیری رس"، کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران، شرکت مدیران ایده (۱۳۹۴).
22. Zhang, G., Germaine, J.T., Whittle, A.J., and Ladd, C., "Index properties of a highly weathered old alluvium", *Geotechnique*, Vol.54, NO. 7, pp. 441-451, (2004).
23. Gao, L., Ren, K., Ren, Z., and Yu, X., "Experimental study of nanometer magnesium oxide-modified clay", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.52, NO. 4, pp.218-224, (2015).
24. Gao, L., Ren, K., Ren, Z., and Yu, X., "Study on the shear property of nano-mgo-modified soil", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol. 36, pp. 465-470, (2018).
25. García, S., Trejo, P., Ramírez, O., López-Molina, J., and Hernández, N., "Influence of nanosilica on compressive strength of lacustrine soft clays", *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea, pp. 369-372, (2017).
26. Taipodia, J., Dutta, J., and Dey, A.K., "Effect of nanoparticles on properties of soil", *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Kochi, (2011).

27. Ahmadi, H., "Experimental study of the effect of nano-additives on the stiffness of cemented fine sand", *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp.1-14, (2019).
28. ASTM D698, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
29. ASTM D3080, "Standard test method for direct shear test of soils underconsolidated drained conditions", ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
30. Bahadori, H., Hasheminezhad, A., and Taghizadeh, F., "Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 04018363, (2019).
31. Bahadori, H., Hasheminezhad, A., and Alizadeh, S., "The influence of natural pozzolans structure on marl soil stabilization", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, Vol. 7: pp. 46-54, (2020).
۳۲. نوروززاده، پیام و فرخی، فرهنگ، "تأثیر نانورس بر روی خصوصیات تراکمی و مقاومت فشاری خاک ماسه رس-دار تثبیت شده با آهک"، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز، دانشگاه تبریز-دانشگاه شهید مدنی آذربایجان-دانشگاه علمی کاربردی شهرداری تبریز، (۱۳۹۷).
33. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., and Rongshen, C., "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction and Building Materials*, Vol. 21: pp. 539-545, (2007).
34. Papatzani, S., Paine, K., and Calabria-Holley, J., "A comprehensive review of the models on the nanostructure of calcium silicate hydrates", *Construction and Building Materials*, Vol. 74: pp. 219-234, (2015).
35. Oltulu, M., and Şahin, R., "Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume", *Materials Science and Engineering*, A 528: pp. 7012-7019, (2011).
36. Bahari, M., Nikookar, M., Arabani, M., Haghi, A. K., and Khodabandeh, H., "Stabilization of silt by nano-clay", *7th National Congress on Civil Engineering*, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. (2017).

مطالعه آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ در قوس رودخانه*

مقاله علمی - پژوهشی

مرضیه محمدی^(۱) مهدی قمشی^(۲)

چکیده هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی رفتار جریان غلیظ در خم با بستر فرسایشی است. برای انجام آزمایش‌های جریان نمکی، فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰، عرض ۲۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱ به همراه سه قوس متوالی به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر، ساخته شد. نتایج نشان داد در پروفیل‌های سرعت بدنه جریان نرخ افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت، به تغییرات فرم بستر وابسته است. در نتیجه باعث کاهش سرعت بدنه جریان تا حدود ۱۹ درصد خواهند شد. سرعت پیشانی افزایش یافته است و تا جایی این افزایش سرعت ادامه یافته است که تنش برشی ذرات بستر قادر به تشکیل فرم بستر باشد. بدین ترتیب، با کاهش تنش برشی بستر و حذف فرم‌های بستر، نرخ افزایش سرعت پیشانی، کاهش در حدود ۶ درصد داشته است.

واژه‌های کلیدی بستر فرسایشی، جریان چگال، جریان ثانویه، خم، پروفیل غلظت، پروفیل سرعت.

Investigation of Velocity and Concentration Profiles of Turbidity Flow in River Bends

M. Mohammadi

M. Ghomeshi

Abstract The purpose of this study was to investigate the behavior of high flow in bending with Erodible Bed, This paper presents a series of experiments in which saline gravity currents flowed through a sinuous channel model. This flume contains three successive bends with three different relative curvature radiuses: 40, 80 and cm, 8.5 m length, 20cm width and 70cm height. The results show, in condition of a constant discharge, increasing the concentration of the inlet current, the flow velocity of the body flow increases on a mobile bed. The rate of increase in velocity depends on changes in the form of the bed the flow rate of the body will be reduced to about 19%. The velocity of the forehead has increased in the conditions of the mobile bed by forming the form of the bed. So decrease shear stress and omit the bed form cause increasing the velocity of the forehead decrease about 6%.

Key Words Erodible Bed, Density Flow, Secondary Flow, Bend, Concentration Profile, Velocity Profile.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۸/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱۱/۱۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

Email: mohamadi_200035@yahoo.com

(۲) استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

مقدمه

یکی از مسائل بسیار مهم در زمان بهره‌برداری از سدها، وجود معضل رسوب‌گذاری در مخزن آنها است. رسوب‌گذاری در مخازن سدها باعث کاهش عمر مفید سدها می‌گردد. رسوب‌گذاری مخازن یکی از مشکلات مهم در مدیریت منابع آب در دهه‌های آینده خواهد بود. استفاده پایدار از مخازن در امر مدیریت منابع آب مستلزم کنترل رسوب‌گذاری مخزن و حتی تخلیه رسوب مخزن است [1]. در حال حاضر متوسط سالانه کاهش مخازن مفید در جهان به دلیل رسوب‌گذاری، بیشتر از حجم ایجادشده توسط سدهای جدید است [2].

جریان غلیظ و یا جریان چگال عبارت است از جریان یک سیال در سیال دیگر با چگالی متفاوت. عامل ایجاد جریان گردان افقی فشار است که خود ناشی از اختلاف جرم مخصوص بین دو سیال است. این اختلاف چگالی می‌تواند ناشی از تفاوت دما، تفاوت در غلظت مواد محلول و تفاوت در غلظت ذرات معلق باشد. در این حالت سیال وارد شونده به درون سیال دیگر را سیال غلیظ و سیال پذیرنده را سیال پیرامون می‌نامند. اگر اختلاف چگالی ایجادشده به دلیل رسوبات معلق باشد جریان ایجادشده را جریان کدر می‌نامند. جریان‌های غلیظ (کدر) در نتیجه مومتم و نیروی شناوری به دلیل اختلاف چگالی بین جریان‌های فرعی ورودی و مخزن دریافت‌کننده جریان به وجود می‌آیند.

جریان غلیظ می‌تواند به سه صورت مشاهده شود:

۱. زیرگذر که به صورت یک جریان با چگالی بیشتر از سیال پیرامون در زیر سیال پیرامون حرکت می‌کند؛

۲. میان‌گذر که به صورت یک جریان در مرز بین دو لایه سیال، در سیال پیرامون لایه‌بندی شده که دارای چگالی معادل با متوسط چگالی دو لایه سیال است؛

۳. روگذر که به صورت جریان با چگالی کمتر از سیال پیرامون روی سیال پیرامون حرکت می‌کند [2].

تفاوت اساسی این دو جریان تأثیر کاهندگی سیال محیطی روی نیروی ثقل در جریان غلیظ است. شتاب ثقل کاهش یافته که عامل حرکت در جریان‌های غلیظ است با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$g' = g \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \quad (1)$$

در این رابطه g' شتاب ثقل مؤثر بر جریان غلیظ، ρ_d چگالی جریان غلیظ و ρ_a چگالی سیال پیرامون است.

عدد ریچاردسون (Bulk Richardson Number) به عنوان نسبت شناوری به انرژی جنبشی جریان تعریف می‌شود. یک عدد ریچاردسون بزرگ به معنی حکم‌فرما بودن نیروی شناوری است؛ در نتیجه اختلاط کمتری در سطح بین جریان غلیظ و سیال پیرامون اتفاق می‌افتد. عدد ریچاردسون می‌تواند با استفاده از مقیاس طول و سرعت به شکل رابطه (۲) بیان شود:

$$Ri_0 = \frac{g' L}{U^2} \quad (2)$$

که U سرعت جریان و L کلاً مقیاس طول عمودی است. عموماً عمق آب h را نشان می‌دهد. عدد فرود دنسیمیتریک: شبیه عدد فرود است. عدد فرود دنسیمیتریک عکس مجذور عدد ریچاردسون کلی است.

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{2g'h \cos \theta}} \quad (3)$$

در این رابطه Fr_d عدد فرود دنسیمیتریک است. این رابطه اغلب نیروی گرانشی مقاوم در برابر اختلاط را نسبت به نیروی اینرسی جریان بیان می‌کند. حرکت جریان غلیظ باعث کشش و ورود سیال پیرامون به درون جریان می‌گردد که شدت ورود سیال با پارامتر شدت

جریان غلیظ دارای شکلی مشابه جت دیواره است. در جت دیواره دو رژیم دیواره و جت قابل تشخیص است (شکل ۱). در این شکل $h_{\max}$ در حقیقت ارتفاعی است که در آن سرعت ماکزیمم است یعنی $u = U_{\max}$. دو رژیم یادشده بالا عبارتند از:

۱. در رژیم دیواره $z < h_{\max}$ توسط رابطه لگاریتمی توزیع سرعت به صورت زیر است [4].

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln z + \text{cte} \quad (9)$$

یا توسط رابطه نمایی:

$$\frac{u(z)}{u_{\max}} = \left(\frac{z}{h_{\max}} \right)^n \quad (10)$$

۲. در رژیم جت $z > h_{\max}$ توسط رابطه near-Gaussian:

$$\frac{u(z)}{u_{\max}} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{z - h_{\max}}{h - h_{\max}} \right)^\beta \right] \quad (11)$$

در این رابطه $\alpha = 1/4$ و $\beta = 2.5$ پیشنهاد می شود [4]

اختلاط بیان می شود. شدت ورود سیال تابعی از عدد ریچاردسون است که می توان آن را با رابطه (۴) محاسبه نمود:

$$E_W = f(R_i) \quad (4)$$

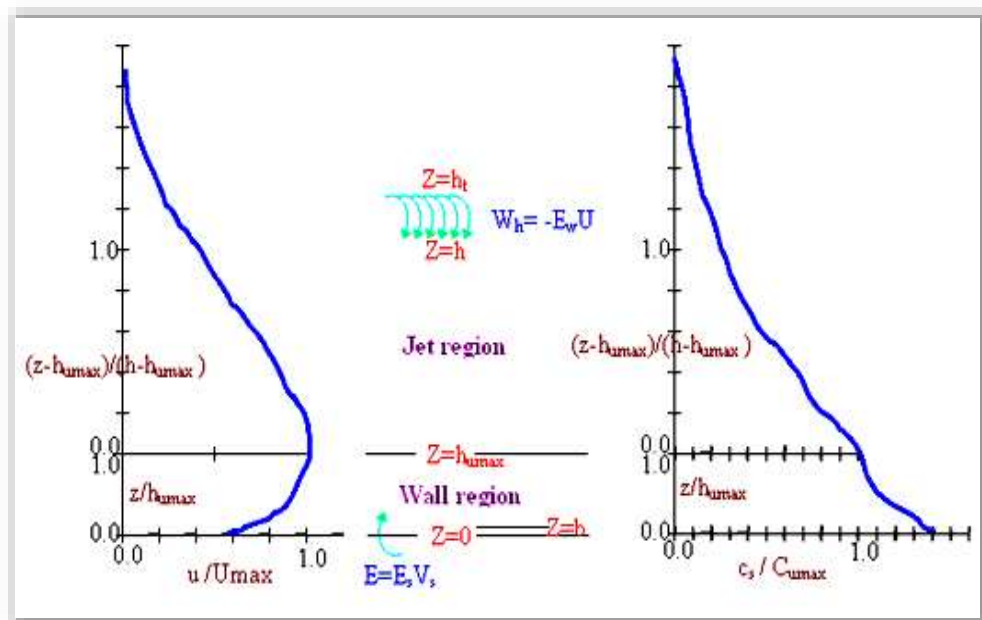
در این رابطه E_W شدت اختلاط و R_i عدد ریچاردسون است. در جریان غلیظ برای به دست آوردن عمق و سرعت جریان نیاز به انتگرال گیری در عمق جریان (z) دارد. همچنین غلظت در امتداد قائم دارای تغییرات تدریجی است. روابط (۵، ۶ و ۷) برای به دست آوردن متوسط غلظت در عمق C_s ، سرعت متوسط U و عمق h ارائه شده است [3].

$$\bar{C}_s = \frac{\int_0^\infty C_s u dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_t} C_s u dz}{\int_0^{h_t} u dz} \quad (5)$$

$$\bar{U} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \quad (6)$$

$$\bar{h} = \frac{\left(\int_0^\infty u dz \right)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} = \frac{\left(\int_0^{h_t} u dz \right)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \quad (7)$$

u سرعت جریان و h در این روابط ارتفاعی که در آن سرعت برابر صفر می شود.



شکل (۱): شماتیک پروفیل های بی بعد سرعت و غلظت در جریان غلیظ [4]

در تحقیقات انجام شده با استفاده از جریان غلیظ نمکی در یک معبر زیر آبی برای برداشت پروفیل سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک استفاده شد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد بر خلاف جهت جریان ثانویه در رودخانه ها که به سمت ساحل داخلی است، جهت جریان ثانویه در معبر زیر آبی معکوس بوده و از ساحل داخلی به سمت ساحل خارجی است. تغییرات جریان اصلی و تنش برشی کل بر شکل گیری و گسترش انباشتگی در ساحل داخلی در معبرهای زیر آبی مؤثر خواهد بود و در نهایت ممکن است بر تغییر شکل این کانال ها نیز اثر گذارد [5]. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش ها با افزایش ارتفاع دریچه ورودی، عدد فرود چگالی جریان ورودی کاهش پیدا می کند؛ بنابراین پرش هیدرولیکی کوچک تری لازم است تا این جریان فوق بحرانی را به حالت زیر بحرانی برساند. از این رو جریان گل آلود در طول کانال با عدد فرود بالاتری به جریان خود ادامه می دهد. در این حالت ضخامت جریان گل آلود در طول کانال کاهش یافته و سرعت جریان افزایش می یابد. فیروزآبادی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به وسیله دستگاه ADV پروفیل سه بعدی سرعت جریان را برداشت و آن را با مدل ریاضی $k-\epsilon$ مقایسه نمودند. نتایج حاصل از تحقیق تطابق خوبی بین مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نشان می دهد [6].

کشتکار و همکاران پروفیل های سرعت و غلظت جریان گل آلود در حالت دوبعدی و در یک مدل فیزیکی در محدوده حالت های زیر بحرانی تا فوق بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می دهد که افزایش ارتفاع بازشدگی دریچه زیرگذر ورودی، منجر به افزایش سرعت جریان و کاهش ضخامت جریان گل آلود می گردد که این پدیده به نوبه خود افزایش میزان اختلاط ذرات سیال محیطی و کاهش مقادیر غلظت جریان را در پی خواهد داشت. همچنین نتایج نشان می دهد که ارتفاع معادل سرعت متوسط جریان در ارتفاعی برابر با $0/8$ ضخامت متوسط جریان و ارتفاع نظیر غلظت متوسط

جریان در ارتفاعی معادل با $0/35$ تا $0/5$ برابر ضخامت متوسط جریان اتفاق می افتد [7]. سکویروس و همکاران با یک سری آزمایش های جریان غلیظ نمکی و رسوبی بر روی بستر متحرک شکل گیری فرم بستر را مورد مطالعه قرار داده و اثر زبری و فرم بستر ایجاد شده بر روی پروفیل های سرعت و مقدار افزایش غلظت از طریق بستر متحرک را مورد بررسی کیفی قرار دادند. آنها نشان دادند که شکل گیری فرم بستر در رژیم های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و اثر متفاوتی نیز بر روی پروفیل سرعت در نزدیک بستر (بخش دیواره از پروفیل سرعت جریان غلیظ) و فاصله عمودی محل قرارگیری سرعت بیشینه دارد [8]. شریفی نژاد با انجام آزمایش های جریان غلیظ نمکی بر روی بستر متحرک شکل گیری فرم بستر را مورد مطالعه قرار داده و اثر زبری و فرم بستر ایجاد شده بر روی پروفیل های سرعت و غلظت از طریق بستر متحرک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تشکیل فرم های بستر بر توزیع غلظت جریان غلیظ در عمق نیز تأثیرگذار است. به طوری که با تشکیل فرم بستر، باعث کاهش غلظت بدنه جریان غلیظ و یکنواخت شدن توزیع آن در عمق خواهد شد [9]. کاهه و ورجاوند جریان غلیظ بر روی بستر زبر را بررسی کردند نتایج این تحقیقات نشان داده است که تغییرات زبری بستر بر روی خصوصیات جریان غلیظ مانند پروفیل سرعت و غلظت، سرعت پیشانی، ضریب ورود و میزان ته نشینی اثرگذار خواهد بود [10,11].

الگوی جریان در قوس

قبل از ورود به خم، جریان موجود در رودخانه، جریانی طولی بوده و فاقد جریان عرضی است. در این حالت پروفیل سرعت در راستای عرض رودخانه به گونه ای است که ماکزیمم مقدار سرعت در محور مرکزی رودخانه است. در راستای قائم نیز سرعت آب در نزدیکی کف بستر به دلیل مقاومت در مقابل جریان کمتر از سرعت در سطح آب است. با ورود جریان به قوس

دامنه عدد فرود دنسیمتریک دست یافتند که سه رژیم جریان را از هم متمایز می‌سازد:

۱. رژیم بالایی با عدد فرود دنسیمتریک بالا که تقریباً همه‌ی اعداد در محدوده‌ی جریان فوق بحرانی و جهت جریان ثانویه معکوس است (به سمت ساحل بیرونی)؛

۲. رژیم متوسط با مقادیر متوسط عدد فرود دنسیمتریک جهت جریان ثانویه نرمال (به سمت ساحل داخلی) بوده و جریان می‌تواند زیر بحرانی و یا فوق بحرانی باشد؛

۳. رژیم پایینی با عدد فرود دنسیمتریک پایین که جریان زیر بحرانی بوده و جهت جریان ثانویه معکوس است [14].

تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی زیادی روی جنبه‌های مختلف جریان‌های غلیظ در مسیر مستقیم صورت گرفته است در کانال‌های قوسی ورود جریان غلیظ به قوس‌ها موجب تغییر قابل توجهی در شکل جریان غلیظ و در نتیجه الگوی جریان غلیظ در قوس می‌شود. تنها تعداد کمی از این مطالعات بر روی بستر غیر ثابت (متحرک) انجام شده است. به‌طوری‌که وقتی شکل بستر توسعه پیدا کرده، اثر آن بر مشخصات جریان ورودی ارزیابی نشده است. درواقع، فرم بستر مکانیسم بازخوردی دارد و بر جریانی که آن را ایجاد کرده است، اثر خواهد گذاشت [15]. همچنین، طبق نظر ژو، یکی از مهم‌ترین دلایل تفاوت نتایج داده‌های صحرایی با نتایج آزمایشگاهی، ایجاد فرم‌های بستر در شرایط طبیعی و بستر رسوبی است [16]. همچنین، نتایج تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت و غلظت جریان، علاوه بر آب‌شستگی به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی جریان، به دانه‌بندی بستر و تنش‌های برشی ناشی از آن نیز وابسته است [17]. آزمایش‌های جریان غلیظ زیررونده را با محلول نمکی و دو نوع دانه‌بندی بستر (با میانگین هندسی ۱۰۰ و ۱۸۰ میکرومتر) نشان داد به‌طورقطع یک جریان با دبی معین می‌تواند به مقدار قابل توجهی رسوبات کف را معلق کند. به‌طوری‌که دبی

رودخانه، ذراتی که در حال حرکت در خم هستند، علاوه بر نیروی ثقل تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار گرفته که می‌خواهند آنها را از مسیر مستقیم منحرف نماید. از آنجایی‌که توزیع سرعت در مقطع نامتقارن است، نیروی گریز از مرکز (F) در عمق ثابت نبوده و در هر نقطه تابع سرعت جریان است. در لایه‌های نزدیک به سطح آب به دلیل سرعت بیشتر، ذرات با نیروی بیشتری به طرف دیواره قوس بیرونی کشیده می‌شوند. نیروی فشاری خالص وارد بر همان جرم واحد سیال در امتداد r به‌صورت معادله (۹) است:

$$P = -\gamma \frac{\partial h}{\partial r} \quad (9)$$

در این رابطه h درواقع همان ارتفاع سطح آزاد جریان است. مقدار متوسط F و P به‌تقریب با هم برابرند. مقدار نیروی گریز از مرکز با زیاد شدن ارتفاع و افزایش سرعت ناشی از آن افزایش می‌کند؛ این در حالی است که مقدار P به‌طورکلی با Z تغییر نمی‌کند؛ بنابراین در بخش بالایی مقطع $P < F$ و در بخش پایین آن $P > F$ است. این حالت موجب حرکت چرخشی جریان در عرض مقطع، جریان ثانویه (Secondary flow) خواهد بود [12]. اندرکنش جریان ثانویه و مؤلفه طولی سرعت موجب تشکیل جریان حلزونی (Helical flow) در طول قوس می‌گردد.

آبد و همکاران جریان ثانویه ناشی از عبور جریان غلیظ نمکی از کانالی با پیچ‌وخم زیاد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد پروفیل قائم سرعت در امتداد جریان و اختلاف چگالی نسبی جریان غلیظ زیرگذر مرتباً با عدد فرود دنسیمتریک (Fd) تغییر می‌کند. هنگامی‌که عدد Fd کاهش می‌یابد، ماکزیمم سرعت در رأس خم به سمت محل تلاقی جریان غلیظ با محیط پیرامون میل می‌کند و پروفیل اختلاف چگالی نسبی اضافی به‌جز در محل تلاقی یکنواخت‌تر می‌شود. هنگامی‌که Fd افزایش پیدا می‌کند، سرعت ماکزیمم مماس به سمت بستر متمایل می‌شود [13]. آبد و همکاران در آزمایش‌های خود به سه

کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی متر، عرض ۲۰ سانتی متر و شیب کف ۰/۰۰۱، دارای سه خم متوالی ۹۰ درجه به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ انجام شد (شکل ۳). برای انجام این آزمایش ها از نمک طعام و ماده رنگی حلال در آب برای ایجاد سیال غلیظ استفاده گردید. علت استفاده از ماده رنگی به همراه محلول آب و نمک برای تشخیص سیال غلیظ (محلول آب و نمک) از سیال پیرامون (آب شهری) و قابل رؤیت بودن آن است. آزمایش ها به صورت جریان نمکی و در چهار دبی ۰/۷، ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر در ثانیه و در غلظت های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر صورت پذیرفت. به دلیل کم بودن حجم مخزن های اختلاط به تنهایی (۲۰۰۰ لیتر) سیال غلیظ (محلول آب، نمک و ماده رنگی) تهیه شده در دو مخزن اختلاط آماده و به طور جداگانه توسط پمپ از هر مخزن سیال غلیظ به یک هد تانک با ارتفاع ثابت به صورت پیوسته تا پایان آزمایش ها منتقل می گردد. برای تهیه بستر متحرک در کف فلوم رسوباتی از جنس پلی استایلین با چگالی ۱/۰۱۳ با ارتفاعی در حدود ۸ سانتی متر در فاصله یک متری از دریچه پس از یک سطح شیب دار ملایم که به عنوان آرام کننده جریان عمل می کند قرار گرفته است (شکل ۲).



شکل (۲): آرام کننده ابتدای فلوم

پیش از ورود جریان غلیظ، فلوم به طور کامل آبگیری شده و شیرفلکه ورود سیال غلیظ به محوطه پشت دریچه فلوم باز می شود. (در انتهای ۵۰ سانتی متری ابتدایی کانال یک دریچه برای عبور جریان غلیظ تعبیه

شناوری را به بیش از ۱۰ درصد افزایش دهد و نیز تجزیه و تحلیل تنش برشی بستر، اهمیت اصطکاک و نیروی دراگ را نشان داد [18]. مطالعه جریان غلیظ رسوبی و نمکی در هر دو رژیم زیر بحرانی و فوق بحرانی نشان داد فرم بسترهای تشکیل شونده اثر بازخوردی دارند و درواقع بر روی جریان تولیدی خود اثر می گذارند [19]. برای اولین بار بررسی کامل مقاومت و انتقال بار بستر در جریان غلیظ زیر رونده با سه حالت جریان نمکی، رسوبی و ترکیبی، با تشکیل چهار فرم بستر در رژیم های جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی انجام شدند. طبق نتایج به دست آمده روابط انتقال رسوب حاصل از داده های آزمایشگاهی تطابق خوبی با روابط موجود در کانال های باز دارند. همچنین، مقایسه داده های صحرایی به کمک پارامترهای شیلدز و عدد فرود دنسیمتریک دلیل محکمی بر کاربرد روابط آزمایشگاهی است [15].

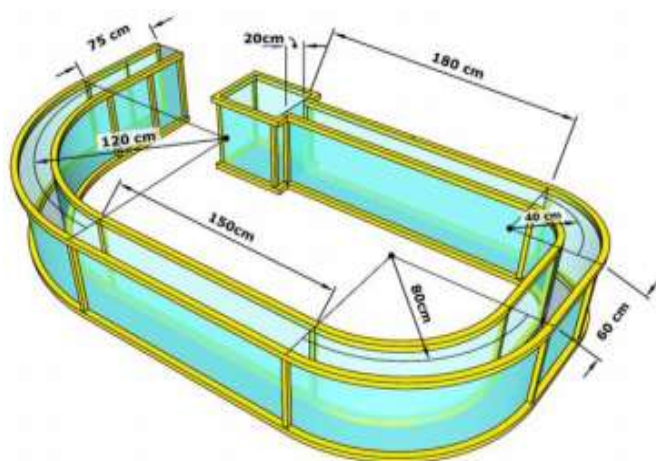
بنابراین، نادیده گرفتن رسوبات بستر موجب می شود که اثر متحرک بودن رسوبات کف و یا تشکیل فرم های بستر نادیده گرفته شود و نتایج آزمایشگاهی با خطا همراه شود. بنابراین، با توجه به اهمیت نقش بستر رسوبی در تحلیل مشخصات جریان غلیظ و نزدیک شدن به نتایج واقعی تر در طبیعت، رفتار جریان غلیظ در قوس با بستر فرسایشی، بررسی چگونگی رسوب گذاری در قوس ها و مقایسه خصوصیات جریان در شعاع انحنای ملایم، متوسط و تند از اهمیت بالایی برخوردار است. این جریان ها مکانیزم اصلی انتقال جریان های رودخانه ای، ساحلی و ذرات کف اقیانوس به آب های عمیق تر است. از این رو، این جریان ها مسئول شستشوی تنگه های زیر دریایی و همین طور تشکیل مخروط افکنه های بسیار وسیع در دهانه بیشتر تنگه ها هستند.

مواد و روش ها

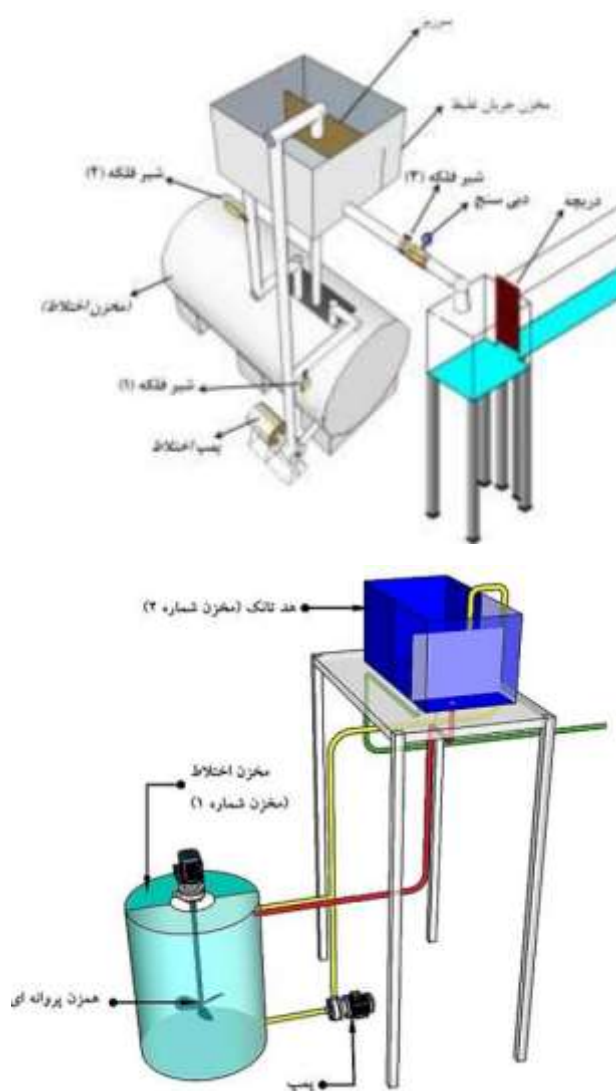
آزمایش های این تحقیق در آزمایشگاه مدل های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. این آزمایش ها در فلومی با طول

آن تخلیه می‌گردید. در این حالت بخشی از سیال ساکن نیز از فلوم خارج می‌شود برای ثابت نگه‌داشتن سطح آب ساکن، شیرفلکه ورودی آب تمیز به فلوم باز و مقدار آب لازم به فلوم اضافه می‌شد تا مانع از افت تراز آب گردد (شکل ۴). برای جلوگیری از به وجود آمدن تلاطم در این ناحیه تیغه آرام‌کننده جریان در انتهای فلوم نصب گردید. بعد از تخلیه کامل رأس جریان و حصول اطمینان از یکنواخت بودن بدنه جریان در طول فلوم، ارتفاع جریان غلیظ در هر قوس در فاصله ۱۰ سانتی متری در طول فلوم در دو دیواره داخلی و خارجی قرائت و ثبت گردید.

شده است. با گشودن این دریچه جریان غلیظ در کف فلوم و در زیر آب ساکن به حرکت درمی‌آید. اندازه‌گیری دبی ورودی از طریق دبی‌سنج و تنظیم آن از طریق شیرفلکه یادشده صورت می‌گرفت. پس از تنظیم دبی به محض آنکه سطح سیال غلیظ پشت دریچه فلوم برابر با سطح سیال پیرامون می‌گشت دریچه فلوم به ارتفاع ۱۰ سانتی متر گشوده می‌شد. بدین شکل جریان غلیظ با دبی تنظیم‌شده وارد فلوم می‌گشت. حرکت جریان غلیظ زیر سیال محیطی آغاز و پس از رسیدن رأس جریان غلیظ به انتهای فلوم شیرفلکه انتهای فلوم (شیرفلکه تخلیه) باز شده و رأس جریان و تلاطم‌های



شکل (۳): شماتیک فلوم مورد استفاده و نما از بالا فلوم



شکل (۴): مخزن های اختلاط

متوسط ۳۰۰۰ داده توسط نرم افزار ثبت شده است. در این تحقیق با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) مؤلفه های سرعت (u , v , w) در ۴۸ نقطه (۴ نقطه در عرض و ۱۲ نقطه در عمق) در هر مقطع عرضی اندازه گیری و ذخیره شد. مدت زمان ذخیره مؤلفه های سرعت لحظه ای در هر نقطه ۲۰ تا ۳۰ ثانیه به طول انجامید؛ داده برداری دستگاه ADV در راستای ارتفاع از بالا به پایین صورت گرفت. سپس سنسور دستگاه به سمت نقطه بعدی جابه جا شد و این عمل تا کامل شدن پروفیل سرعت ادامه می یافت. سرعت ها نیز در محور کانال و در محل برداشت غلظت اندازه گیری شده اند. به منظور

به منظور برداشت ارتفاع بدنه ارتفاع جریان غلیظ از اشل با دقت یک میلی متر استفاده گردید. در دیواره داخلی و خارجی هر سه قوس، خط کش های تلقی به فاصله ۱۰ سانتی متر نصب شده اند. برای اندازه گیری سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک (ADV) مدل Vectrino+ استفاده شده است شکل (۵). این دستگاه می تواند نوسانات سرعت را در یک بازه زمانی مشخص در سه راستای عمود بر هم ثبت و به محیط نرم افزار Excel انتقال و برنامه ای تنظیم شد تا بتواند با میانگین گیری از بین اعدادی با $correlation > 70$ و $SNR > 15$ متوسط هر یک از مؤلفه های سرعت را برآورد نماید. برای هر نقطه به طور

به منظور مطالعه رفتار جریان غلیظ در خم متغیرهای حاکم بر جریان را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

۱. خصوصیات مربوط به هندسه‌ی سیستم: شیب کانال اصلی (S_0)، عرض کانال (b)، شعاع قوس (r_m)، زاویه مرکزی قوس (θ).

۲. خصوصیات مربوط به سیستم جریان غلیظ: پارامترهای مستقل جریان در سیستم جریان غلیظ: شتاب ثقل (g)، جرم مخصوص جریان غلیظ (ρ_d)، دبی جریان غلیظ در واحد عرض (q)، لزجت سینماتیکی جریان (ν)، پارامترهای وابسته جریان: سرعت پیشانی جریان (U_f)، سرعت بدنه (U)، ضخامت پیشانی (H_f)، ضخامت بدنه (h)، عمق نقطه غوطه‌وری (h_p).

۳. خصوصیات مربوط به سیال محیطی: ارتفاع آب ساکن در فلوم (H)، جرم مخصوص سیال محیطی (ρ_a) و سرعت ورود سیال پیرامون به بدنه جریان غلیظ (W_e).

۴. خصوصیات مربوط به مصالح بستر: قطر متوسط ذرات رسوبی (D_s)، چگالی رسوبات (ρ'_s)، انحراف معیار رسوبات (σ)، ارتفاع فرم بستر (Δ) و طول موج فرم بستر (λ).

در راستای هدف این تحقیق، اثر پارامترهای هیدرولیکی مؤثر (دبی جریان غلیظ و غلظت جریان ورودی)، بر مشخصات جریان غلیظ (سرعت پیشانی، سرعت متوسط بدنه) به کمک آنالیز ابعادی قابل ارزیابی خواهد بود.

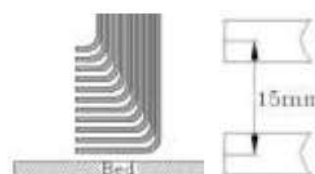
نتایج و بحث

در این آزمایش‌ها با توجه به ضخامت کم جریان غلیظ برداشت غلظت توسط ۱۰ سیفون از کف و در ارتفاعات ۱ تا ۱۲ سانتی‌متری انجام گردید. ضخامت جریان غلیظ به وسیله ارتفاع سیال ساکن ($H = 55\text{cm}$) بی‌بعد شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار غلظت در فاصله حدود ۲ سانتی‌متری از کف اتفاق می‌افتد. پروفیل غلظت جریان تابعی از فاصله نقاط از کف

برداشت پروفیل قائم غلظت از بدنه جریان غلیظ، شش سری سیفون نمونه‌گیری در ابتدا و انتهای هر قوس نصب گردید. هر سیفون نمونه‌گیری شامل ۱۴ لوله خمیده مسی به قطر ۴ میلی‌متر بوده و فاصله مرکز آنها در جهت قائم ۱۵ میلی‌متر است. در انتهای هر لوله مسی یک شیلنگ پیژومتری متصل شده و سر دیگر آن به یک سرنگ ۶۰ سی‌سی ختم می‌گردد (شکل ۶). پس از نمونه‌برداری سرنگ‌ها داخل ظروف پلاستیکی تخلیه و جهت قرائت EC به آزمایشگاه کیفیت آب منتقل می‌شد. در این تحقیق در هر خم ۱۶ آزمایش و در مجموع ۴۸ آزمایش انجام شده است.



شکل (۵): دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV)

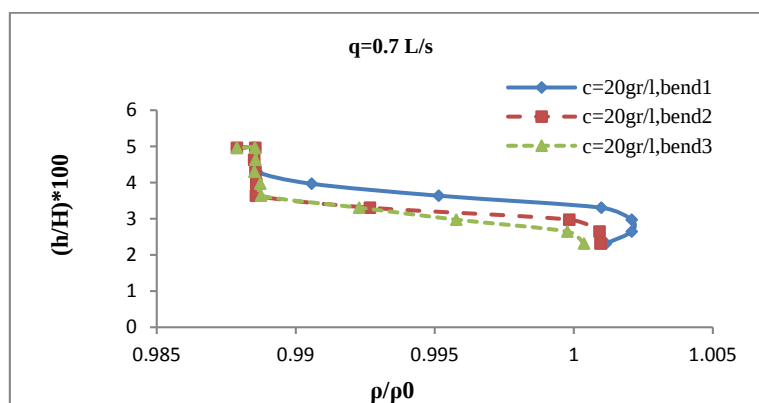


شکل (۶): بستر متحرک در کف فلوم رسوباتی (جنس پلی استایلن) و طرز قرار گرفتن سیفون‌ها

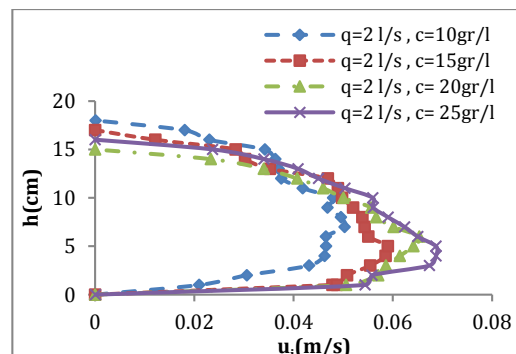
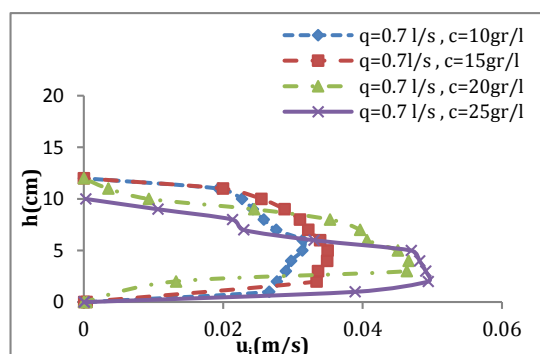
آنالیز ابعادی

غلظت های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر در جدول (۱) محاسبه گردیده است. در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحنا، سرعت در میانه خم و محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می یابد (شکل ۹). همچنین در خم سوم با نسبت شعاع انحنا ۶ به دلیل فاصله کم این خم تا محل تخلیه، جریان تحت تأثیر خروجی قرار می گیرد؛ در نتیجه افت تدریجی تراز آب و افزایش سرعت ناشی از آن را خواهیم داشت که این امر افزایش سرعت ناشی از کاهش نیروی گریز از مرکز را تشدید می کند. بر اساس نتایج به دست آمده سرعت در انتهای خم دوم نسبت به میانه خم اول به طور متوسط ۲۸ درصد و در میانه خم سوم نسبت به انتهای خم اول به طور متوسط ۴۴ درصد افزایش نشان می دهد.

کانال بوده و با افزایش ضخامت جریان غلیظ کاهش می یابد. غلظت نقاط اندازه گیری شده تا ارتفاع ۴ سانتی متری از کف تقریباً ثابت است و پس از آن کاهش می یابد (شکل ۷). در یک دبی ثابت با افزایش غلظت، سرعت متوسط جریان در مسیر مستقیم و نیز سرعت در میانه ی خم ها افزایش می یابد. علت این امر را می توان به افزایش مؤلفه وزن سیال در اثر افزایش غلظت نسبت داد. همچنین در یک دبی ثابت با افزایش غلظت سرعت در میانه خم ها نیز افزایش می یابد (شکل ۸) در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحنا، سرعت در رأس خم و محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می یابد. مقادیر سرعت متوسط جریان و عدد فرود دنسیمتریک جریان به ازای دبی های مختلف و



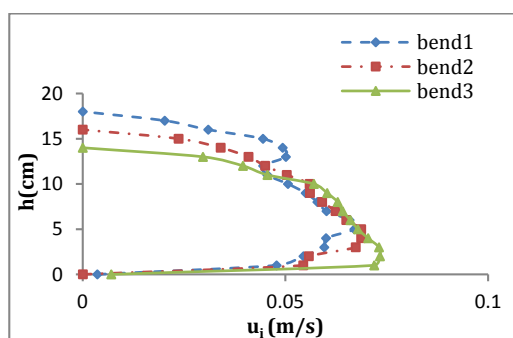
شکل (۷): موقعیت حداکثر غلظت جریان غلیظ به ازای یک دبی و غلظت ورودی ثابت در سه قوس



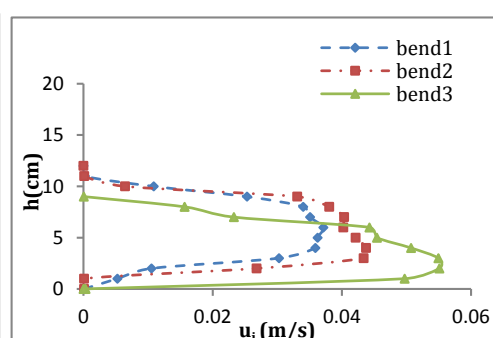
شکل (۸): پروفیل سرعت به ازای افزایش غلظت در دبی ۰/۷ و ۲ لیتر در ثانیه در میانه خم با نسبت شعاع انحنا ۴

جدول (۱): سرعت و عدد فرود دنسیمتریک جریان به ازای دبی ۰/۷ در غلظت‌های مورد نظر

شماره آزمایش در هر خم															
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
دبی جریان غلیظ (L/s)															
۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۱	۱	۱	۱	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۲	۲	۲	۲
غلظت جریان غلیظ (g/L)															
۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
عدد فرود دنسیمتریک قوس اول ($F_{d \text{ Bend1}}$)															
۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۴
عدد فرود دنسیمتریک قوس دوم ($F_{d \text{ Bend2}}$)															
۰/۳	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۴	۰/۴	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۳۶
عدد فرود دنسیمتریک قوس سوم ($F_{d \text{ Bend3}}$)															
۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۴۲



(ب)



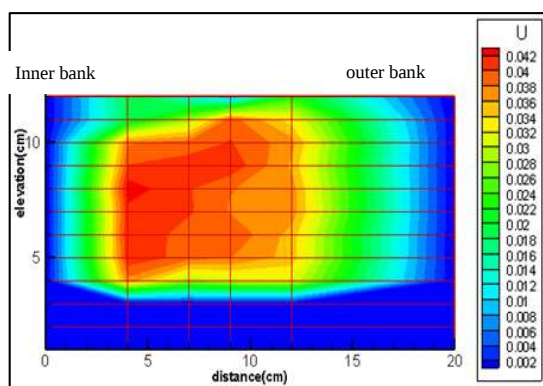
(الف)

شکل (۹): پروفیل طولی سرعت با $R/B=2$, $R/B=4$ و $R/B=6$ به ازای (الف) دبی ۰/۷ لیتر بر ثانیه و غلظت ۲۵ گرم بزیلی تر (ب) دبی ۲ لیتر بر ثانیه و غلظت ۲۵ گرم بزیلی تر

در قوس دوم با شعاع انحنا ۴ و حدود ۷۲ درصد در قوس سوم با شعاع انحنا ۶ افزایش یافته است. نرخ افزایش سرعت در غلظت ۲۵ گرم بر لیتر نسبت به غلظت ۲۰ گرم بزیلی تر با افزایش تنش برشی کاهش یافته است (از حدود ۳۴ درصد به ۱۵ درصد رسید است).

بنابراین، بیشترین نرخ افزایش سرعت با حذف فرم‌های بستر و کاهش زبری و تنش برشی بستر رخ خواهد داد. بدین ترتیب افزایش غلظت سبب افزایش قدرت جریان می‌گردد، به طوری که در ابتدا، زبری و تنش برشی بستر افزایش یافته و در ادامه مجدداً با حذف فرم‌های

بر روی بستر متحرک، افزایش دبی ورودی جریان غلیظ نیز باعث افزایش سرعت بدنه جریان می‌شود. با توجه به نتایج تغییرات ناشی از زبری فرم بستر با افزایش دبی جریان غلیظ ورودی بر نرخ افزایش سرعت مؤثر است. به عنوان مثال در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ، ابتدا فرم بستر شکل گرفته و سپس فرم بسترها شروع به شسته شدن می‌کنند و زبری فرم بستر و تنش برشی آن کاهش می‌یابد. در این صورت نرخ افزایش سرعت از حدود ۲۲ درصد، در دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه در قوس اول با شعاع انحنا ۲، به حدود ۳۴ درصد،



شکل (۱۱): پروفیل عرضی سرعت در ابتدای قوس اول

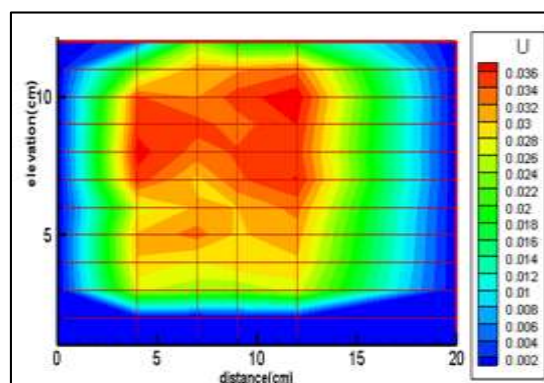
بر اساس نتایج به دست آمده در خم اول و مقطع عرضی دوم (میان خم) حداکثر سرعت به سمت دیواره داخلی است. با ورود جریان به خم به علت تغییر ناگهانی انحنا و اثر نیروی گریز از مرکز در امتداد جداره داخلی کاهش فشار و در امتداد جداره بیرونی افزایش فشار روی می دهد. آزمایش ها نشان داد که با حرکت جریان در طول خم، عمق جریان در امتداد دیواره داخلی کاهش و در امتداد دیواره بیرونی افزایش می یابد. در نزدیکی دیواره داخلی گرادیان فشار طولی منفی رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات می گردد. در مقابل در نزدیکی دیواره بیرونی گرادیان فشار طولی مثبت بوده و فشار در امتداد جریان افزایش می یابد (شکل ۱۲).

بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق و نیز سایر تحقیقات صورت گرفته مانند [4,5,9] در جریان غلیظ بر خلاف جریان در مجاری روباز جریان ثانویه در کف به سمت دیواره بیرونی و در سطح مشترک به سمت دیواره داخلی است. جریان ثانویه ایجاد شده منجر به نزدیک شدن سرعت بیشینه به دیواره بیرونی شده و حداکثر سرعت به سمت دیواره بیرونی منتقل می شود. این امر در پروفیل های عرضی سرعت در خم دوم و سوم مشاهده می گردد.

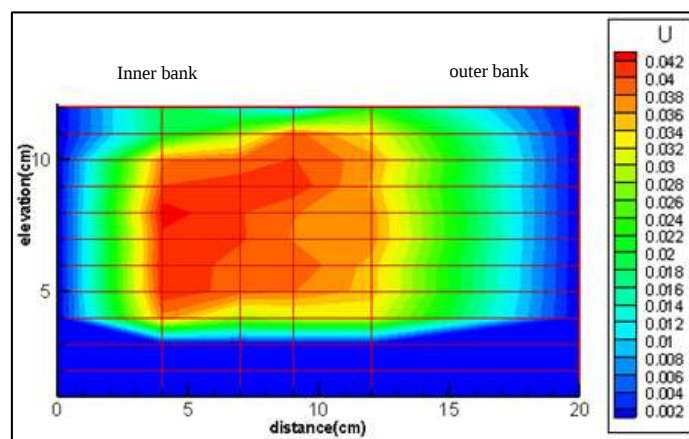
بستر کاهش می یابد.

با توجه به نتایج نشان داده شده در تمامی مسیرها با افزایش دبی، سرعت جریان غلیظ افزایش می یابد اما موقعیت سرعت ماکزیمم در جریان غلیظ با بستر فرسایشی به دلیل تنش برشی ایجاد شده بین بستر و بدنه جریان غلیظ، به سمت بالا حرکت کرده به عبارت دیگر سرعت ماکزیمم جریان غلیظ در فاصله بیشتری از بستر رخ می دهد.

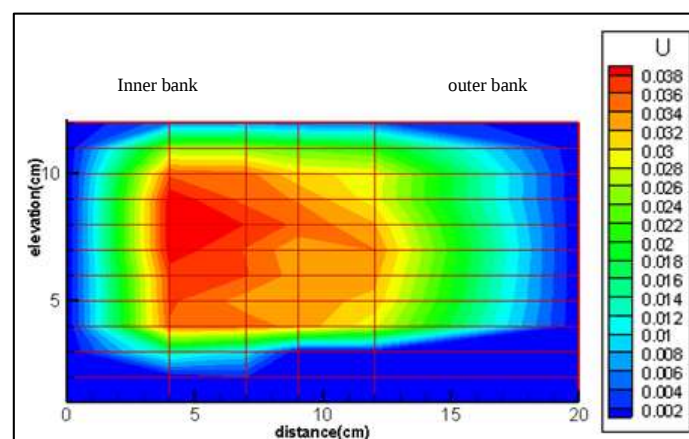
شکل (۱۰) پروفیل عرضی سرعت در مسیر مستقیم ۱۸۰ سانتی متری قبل از ورود جریان به خم را به ازای دبی 0.7 (l/s) و غلظت 15 (gr/l) نشان می دهد. در ابتدای قوس اول جریان پروفیل عرضی خود در مسیر مستقیم را حفظ نکرده و تغییر نشان می دهد. برداشت داده های سرعت در خم با شعاع انحنای 40 سانتی متر با توجه به کوتاه بودن طول خم در فاصله 5 سانتی متری از ابتدای خم و در خم های با شعاع انحنای 80 و 120 سانتی متر در فاصله 10 سانتی متری از ابتدای خم انجام گرفته است. با نزدیک شدن جریان به ابتدای خم، حداکثر سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می شود (شکل ۱۱). در تمامی شکل ها سرعت برحسب (m/s) است و محور افقی فاصله نقاط از دیواره داخلی فلوم (Distance(cm)) و محور قائم ارتفاع (Elevation(cm)) را نشان می دهد.



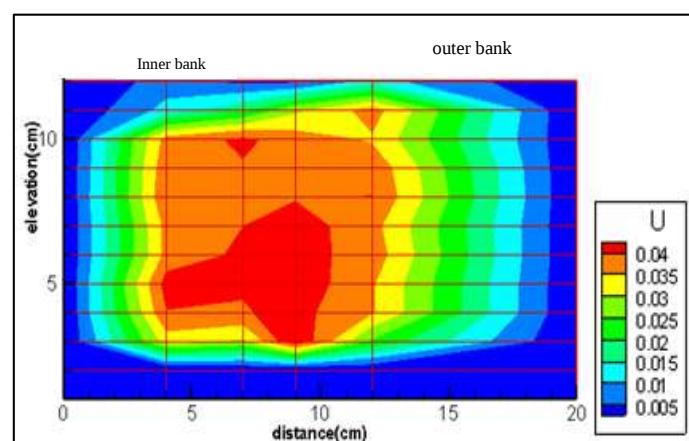
شکل (۱۰): پروفیل عرضی سرعت در مسیر مستقیم ۱۸۰ سانتی متری



(الف)



(ب)

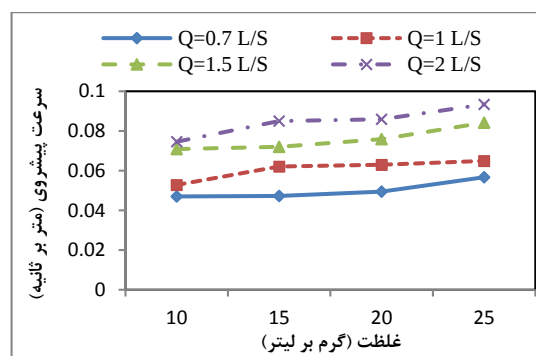


(ج)

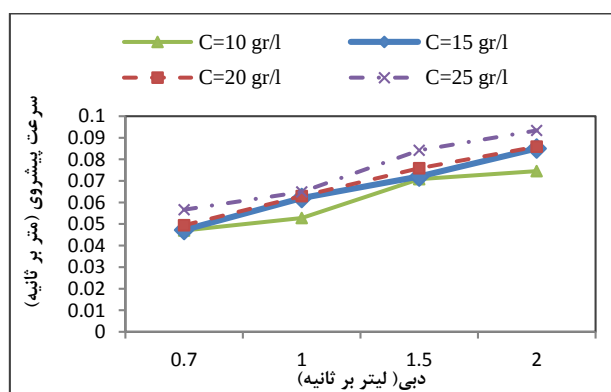
شکل (۱۲): پروفیل عرضی سرعت: الف) در ابتدا، ب) در میانه و ج) در انتها قوس اول با دبی 0.7 لیتر بر ثانیه و غلظت 15 گرم بر لیتر

با توجه به شکل (۱۴) در یک غلظت مشخص مومتم جریان افزایش یافته و جریان برگشتی مقاوم کاهش می یابد و بدین ترتیب سرعت پیشانی افزایش یافته است. البته تا جایی این افزایش سرعت ادامه یافته است که تنش برشی ذرات بستر به حدی باشد که قادر به تشکیل فرم بستر با شد. بدین ترتیب، با کاهش تنش برشی بستر و حذف فرم های بستر، ورود ذرات به داخل پیشانی جریان کاهش یافته و در نتیجه نرخ افزایش سرعت پیشانی، کاهشی در حدود ۶ درصد داشته است. بر اساس نتایج به دست آمده در (شکل ۱۵) از آنجایی که نیروی گریز از مرکز در عمق ثابت نیست و در هر نقطه تابع سرعت جریان است در نزدیکی سطح آب جهت چرخش بردارهای سرعت به سمت دیواره خارجی و در کف به دلیل غالب بودن نیروی گرادیان فشاری به دلیل اختلاف تراز سطح آب جهت چرخش بردارهای سرعت به سمت دیواره داخلی خواهد بود و باعث شکل گیری جریان ثانویه معکوس است. این در حالی است که موقعیت سرعت بیشینه در راستای قائم پروفیل سرعت در جریان غلیظ با بستر فرسایشی بسته به عدد فروود و تنش برشی ایجاد شده بین بستر و بدنه جریان غلیظ، به سمت بالا حرکت کرده به عبارت دیگر سرعت ماکزیمم جریان غلیظ در فاصله بیشتری از بستر رخ می دهد.

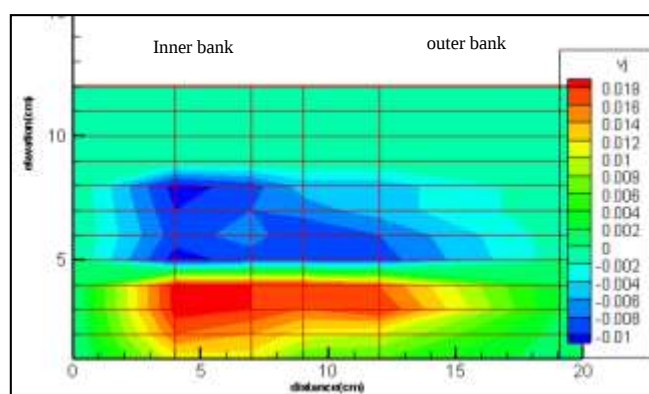
محاسبه سرعت پیشانی در شرایط بستر متحرک نشان می دهد که در تمامی آزمایش ها سرعت پیشانی در شرایط بستر متحرک (با تشکیل فرم بستر) افزایش یافته است (شکل ۱۳). انتظار می رود ذرات بستر به عنوان یک عامل مقاوم در مقابل جریان باشند اما در این آزمایش ها، ورود رسوبات کف از ناحیه زیر دماغه جریان غلیظ به داخل جریان، باعث افزایش مومتم جریان غلیظ و کاهش جریان های برگشتی در مقابل جریان و در نتیجه افزایش سرعت پیشانی شده اند. البته این مسأله، اهمیت تشکیل فرم بستر در ایجاد عامل مقاومت در مقابل جریان را به خوبی نشان می دهد. چون در ابتدای حرکت جریان غلیظ، فرم بستر هنوز تشکیل نشده است و عامل مقاومت و زبری بستر ناچیز است و در نتیجه اثر مقاومتی و کاهشی در برابر سرعت پیشانی جریان وجود نخواهد داشت.



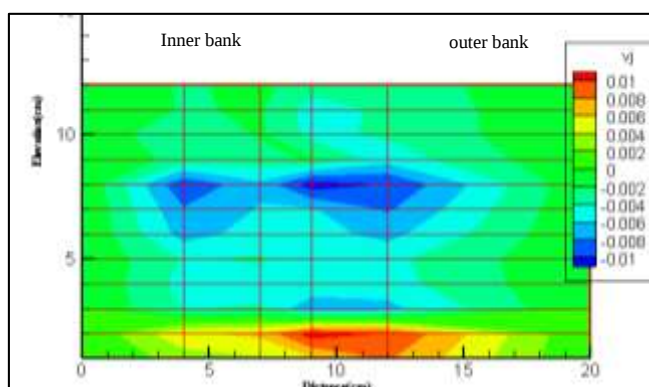
شکل (۱۳): تغییرات سرعت پیشانی جریان در دبی ثابت و غلظت های مختلف



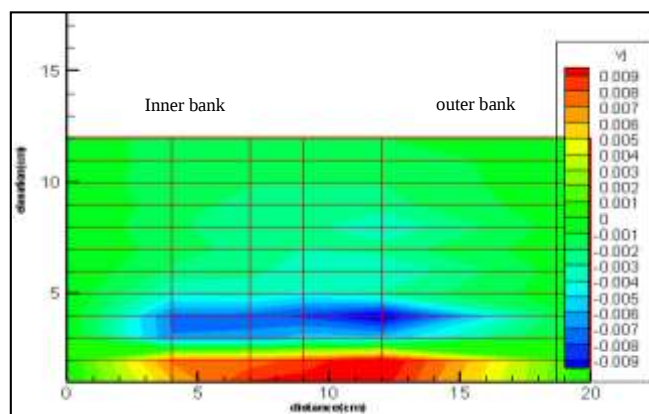
شکل (۱۴): تغییرات سرعت پیشانی جریان در غلظت ثابت و دبی های مختلف



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۵): جهت جریان ثانویه در میانه الف) قوس اول، ب) قوس دوم و ج) قوس سوم دبی ۲/۵۲ لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۵ گرم بزلی تر

نیروی گریز از مرکز با شعاع انحنا رابطه معکوس داشته و در نتیجه با افزایش شعاع انحنا نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد. کاهش نیروی گریز از مرکز موجب کاهش جریان‌های ثانویه ناشی از آن می‌شود. این امر منجر به افزایش سرعت جریان در مسیر جریان شده و با توجه به دائمی بودن جریان، عمق جریان غلیظ نیز کاهش می‌یابد؛ به طوری که در مقاطع عرضی خم سوم بیشترین سرعت طولی و کمترین عمق جریان غلیظ را می‌توان مشاهده نمود. در تمامی آزمایش‌های این تحقیق عدد فرود دنسیمتریک کمتر از ۱ بوده و رژیم جریان زیر

توجه به دائمی بودن جریان، عمق جریان غلیظ نیز کاهش می‌یابد؛ به طوری که در مقاطع عرضی خم سوم بیشترین سرعت طولی و کمترین عمق جریان غلیظ را می‌توان مشاهده نمود. در تمامی آزمایش‌های این تحقیق عدد فرود دنسیمتریک کمتر از ۱ بوده و رژیم جریان زیر

بحرانی است و جریان ثانویه نیز معکوس است؛ از این رو نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج حاصل از آبد و همکاران مطابقت دارد (۳).

نتیجه گیری

نکته حائز اهمیت در پروفیل های سرعت بدنه جریان این است که نرخ افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت، به تغییرات فرم بستر وابسته است. با افزایش غلظت جریان غلیظ، تنش برشی بستر نیز افزایش یافته است. در شرایط بستر متحرک ذرات بستر فعال هستند و با افزایش سرعت و تشکیل فرم های بستر سبب افزایش زبری و مقاومت بستر جریان می شوند، به طوری که ذرات بستر به صورت

نیروی مقاوم در مقابل جریان ورودی عمل می کنند. در نتیجه طبق نتایج حاصل شده، باعث کاهش سرعت بدنه جریان تا حدود ۱۹ درصد هم خواهند شد. با توجه به نتایج در شرایط بستر متحرک عموماً با افزایش غلظت و در نتیجه افزایش سرعت جریان، قدرت جریان غلیظ نیز افزایش یافته است و سبب تغییر زبری بستر و افزایش تنش برشی بستر شده است. تا جایی که با شسته شدن فرم بستر، زبری و تنش برشی نیز شروع به کاهش می کند. در یک غلظت مشخص مومتم جریان افزایش یافته و جریان برگشتی مقاوم کاهش می یابد و بدین ترتیب سرعت پیشانی افزایش یافته است.

مراجع

1. Kassem, A., and Imran, J. "Three-dimensional modeling of density current. II: Flow in sinuous confined and unconfined channels", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 6, pp. 591– 602, (2004).
2. Parker, G., Gary, M., and Toniolo, H. "Note on the Analysis of Plunging of Density Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 690, (2007).
3. Abad, J. D., Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Pirmez, C., García, M. H, and Parker, G., "Secondary current of saline underflow in a highly meandering channel: Experiments and theory", *Journal of Sedimentology Research*, Vol. 81, pp. 787–813, (2011).
4. Islam, M. A. and Imran, J. "Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel", *Journal of Geophysics Research*, Vol. 113, pp.C07041, (2008).
5. Keevil, G. M., Peakall, J., Best, J. L. and Amos, K. J. "Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel", *Journal of Marine Geology*, Vol. 229, No. (3–4), pp. 241–257, (2006).
6. Firoozabadi, B., Afshin, H. and Aram, E. "Three-Dimensional Modeling of Density Current in a Straight Channel", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 5, (2009).
7. کشتکار، شیوا، ایوب زاده، علی، فیروزآبادی، (۱۳۸۹). "بررسی پروفیل سرعت و غلظت جریان گل آلود با استفاده از مدل فیزیکی. پژوهش های آبخیزداری"، (۸۷): ۳۶–۴۳.
8. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R.T., Sun, T., García, M. H. and Parker, G. "Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing over a Mobile Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 7, pp. 412-433, (2010a).

۹. شریفی نژاد، اعظم، "بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک"، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۹۶)
۱۰. کاهه، مهدی، "بررسی آزمایشگاهی دینامیک جریان غلیظ بر روی سطح زبر"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، (۱۳۹۴).
۱۱. ورجاوند، پیمان، "بررسی آزمایشگاهی جریان غلیظ بر روی بسترهای زبر"، رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، (۱۳۹۲).
۱۲. امید، محمدحسین و حبیب زاده، علیرضا، "فرایندهای رودخانه‌ای"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۲۷۲ صفحه، (۱۳۸۸).
13. Oehy, C. "Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents", PhD thesis, Fac. ENAC, Ecole Polytech. Fed. de Lausanne, Lausanne, France, (2003).
14. Corney, R.K.T., Peakall, J., Parsons, D.R., Elliott, L., Amos, K.J., Best, J.L., Keevil, G.M. and Ingham, D.B. "The orientation of helical flow in curved channels", *Journal of Sedimentology*, No. 53, pp. 249–257, (2006).
15. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R.T., Sun, T., García, M.H. and Parker, G. "Bed load transport and bed resistance associated with density and turbidity currents", *Journal of Sedimentology*, No. 57, pp.1463–1490, (2010b).
16. Xu, J.P. "Normalized velocity profiles of field-measured turbidity currents", *Journal of Geology*, Vol. 38, No. 6, pp. 563–566, (2010).
17. Turner, J. S. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press, Cambridge, England, (1973).
18. Parker G, Garcia M, Fukushima Y and Yu W, "Experiments on turbidity currents over an erodible bed", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 123-147, (1987).
19. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R., Sun, T., García, M., and Parker, G., "Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing over a Mobile Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No.7, pp. 412-433, (2010).

بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فلزی مجهز به مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه*

محمدحسین برادران خلخال^(۱) عباس کرم‌الدین^(۲)

چکیده مهاربندهای مرکزگرا از جمله سیستم‌های ساختمانی هستند که سبب کاهش جابه‌جایی نسبی ساختمان پس از زمین‌لرزه می‌گردند. در این پژوهش پس از بررسی و مطالعه تمامی سیستم‌های مرکزگرا، به‌صورت تخصصی رفتار کلیه مهاربندهای مرکزگرای پیشنهادی توسط محققین پیشین مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که مهاربندهای پیشنهادی قبلی همگی نقطه‌ضعف‌هایی دارند. برخی از این نکات عبارت‌اند از: دشواری ساخت، هزینه بالا، جذب انرژی پایین و ظرفیت محدود نیروی محوری. در این پژوهش مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه (DT-SCED) (Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace) پیشنهاد گردید. این مهاربند نسبت به نمونه‌های پیشین دارای قابلیت‌های بهتری است. برخی از نکات مثبت این مهاربند عبارت است از: سادگی ساخت متناسب با امکانات ساخت در ایران، هزینه پایین ساخت، ظرفیت بالای نیروی محوری، جذب انرژی بالا و قابلیت توسعه. در این پژوهش پس از محاسبه جزئیات طراحی مهاربند پیشنهادی، مدل دینامیکی آن در نرم‌افزار OPENSEES مدل‌سازی گردید. برای مدل‌سازی مهاربند از ده‌المان یک‌بعدی استفاده گردید. پس از راستی‌آزمایی مدل‌سازی، مهاربند تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت و نمودار چرخه‌ای (هیسترسیس) آن محاسبه گردید. همچنین یک نمونه ساختمان شش طبقه با سیستم مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه طراحی و تحلیل گردید. عملکرد لرزه‌ای ساختمان نمونه با دو نمونه از مهاربندهای پیشنهادی قبلی مقایسه گردید. پارامترهای مورد مقایسه عبارت بودند از: زمان تناوب سازه، مقدار نیروی فعال شدن مهاربند، شکل‌پذیری سازه، ضریب اضافه مقاومت سازه، بیشینه شتاب، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینه جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات و بیشینه برش پایه. نتایج تحلیل مهاربند پیشنهادی بیان‌کننده رفتار مرکزگرا و نمودار چرخه‌ای پرچمی شکل با ظرفیت نیروی محوری بالا برای مهاربند پیشنهادی بود. همچنین عملکرد لرزه‌ای مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه در سازه بسیار مطلوب ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی مهاربند مرکزگرا، تحلیل سختی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، شکل‌پذیری، قاب فولادی، طراحی لرزه‌ای.

Seismic Response of Multistory Buildings with Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED)

M. H. Baradaran Khalkhali

A. Karamodin

Abstract Telescopic Self-Centering braces are one of the very successful examples of Self-Centering braces which perform well in seismic loading. In this study, a new example of Telescopic Self-Centering brace is introduced, which has superior features over other telescopic braces. These include: high axial load capacity, use of shorter cables in brace construction, simplicity of construction, use of separate cables for compressive and traction modes, less fatigue in cyclic loads and, allowing for more dynamic loading cycles. In this paper, a sample was designed with an axial force capacity of 300kN. Modeling of behavior (DT-SCED) was accurately expressed using numerical relationships. nonlinear incremental stiffness analysis method was also used to calculate the hysteresis brace behavior. The cyclic load test was applied to this brace and the result showed complete Self-Centering behavior. Then, a sample building with the double telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED) was subjected Single direction pushover analyses and the results are compared with the sample buildings with the Self-Centering Energy-Dissipative Bracing (SCED) and the Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Bracing (T-SCED). The results of the analysis and comparing with other samples confirm the seismic superiority of performance of the DT-SCED brace over other samples.

Keyword Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace, pushover Analysis, Cyclic Load Test, Nonlinear Incremental Stiffness Analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۲/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۴/۲۱ می‌باشد.

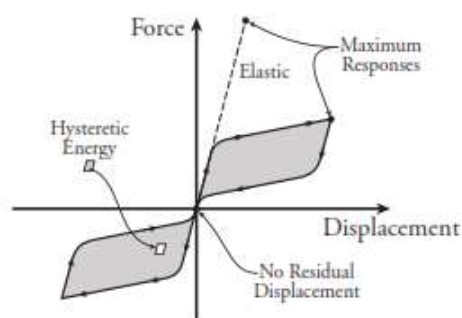
(۱) دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

مقدمه

در دو دهه اخیر یکی از موضوعات مورد بررسی محققان در زمینه کنترل رفتار سازه در برابر زلزله بوده است. در طراحی سازه‌ها، نحوه عملکرد درحین زلزله و وضعیت بهره‌برداری آن پس از زلزله دارای اهمیت است. همان‌طور که می‌دانید طراحی سازه‌های بااهمیت بالا مانند بیمارستان‌ها و مدارس باید به شکلی باشد که پس از زلزله قادر به بهره‌برداری باشند و همین موضوع باعث می‌شود که طراحی بر اساس عملکرد، اهمیت بیشتری پیدا کند. یکی از موضوعاتی که اخیراً مورد بررسی محققان قرار گرفته شده است سازه‌های مرکزگرا است. سیستم‌های مرکزگرای مقاوم در برابر زلزله علاوه بر توانایی اتلاف انرژی باعث بازگشت ساختمان به جایگاه اصلی خود پس از زلزله می‌شود، شکل (۱) نشان‌دهنده رفتار چرخه‌ای یک سیستم مرکزگرا است. این روش نسبتاً جدید مفهوم امیدوارکننده‌ای از طراحی لرزه‌ای را بازگو می‌نماید. سیستم‌های مرکزگرا به‌طورکلی به سه دسته عمده تقسیم می‌شوند: الف) سیستم‌های همراه با عناصر فولادی پس تنیده افقی که در محل اتصال خمشی به کار می‌روند و باعث افزایش شکل‌پذیری سازه در زمان زلزله می‌گردد. ب) سیستم گهواره‌ای با یا بدون اعضای پس تنیده عمودی که به سازه اجازه می‌دهد از محل فونداسیون در حین زلزله به سمت بالا و پایین حرکت کند. ج) سیستم مهاربندی همراه با مهاربندهای مرکزگرا که سبب کاهش جابه‌جایی نسبی ساختمان پس از زلزله می‌گردد [1]. در سال ۱۹۹۳ نیمس و همکاران در دانشگاه برلکی کالیفرنیا اولین نمونه مهاربند مرکزگرا را معرفی نمودند. در مهاربند معرفی شده توسط آنها یک سری فنرهای اصطکاکی وظیفه اتلاف انرژی و بازگرداندن مهاربند پس از باربرداری را داشتند [1]. از مهم‌ترین معایب مهاربند معرفی شده توسط آنها سختی ساخت و وجود ظرفیت نیروی محوری پایین در حدود ۱٫۵ کیلونیوتن بود. در

سال ۱۹۹۴ تیسوپلاس و همکاران مهاربند مرکزگرا همراه با مایع مستهلک‌کننده انرژی را پیشنهاد نمودند [2]. ایده اولیه این نوع مهاربند مربوط به ارتش آمریکا در سال ۱۹۷۰ بود که توسط آنها گسترش یافت؛ بزرگ‌ترین نقطه ضعف این طرح پیشنهادی نیز کمکان ظرفیت نیروی محوری پایین در حدود ۱۵ کیلونیوتن بود. در سال ۲۰۰۰ فیلپاتورتال و همکاران مهاربند مرکزگرا با فنرهای اصطکاکی را پیشنهاد نمودند، در این طرح وظیفه فنرها تأمین نیروی لازم برای بازگشت مهاربند پس از بارگذاری به نقطه اولیه و استهلاک انرژی بود که البته این مدل پیشنهادی نیز قابلیت آزمایش در ابعاد واقعی را نداشت [3]. در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ کریستوپلوس و همکاران بر روی سازه‌های مرکزگرا تحقیقات فراوانی را انجام دادند و در سال ۲۰۰۸ یک نمونه مهاربند مرکزگرا را معرفی نمودند [4,5,6]. مهاربند معرفی شده (SCED) (Self-Centering Energy-Dissipative Brace) ظرفیت نیرویی مناسبی داشت، اما کمکان یکی از مشکلات مهاربند پیشنهادی دشواری ساخت بود. همچنین در سال ۲۰۰۵ افراد دیگری همچون روژاست و همکاران نیز بر روی سازه‌های مرکزگرا پژوهش نمودند و نتایج به‌دست‌آمده از کار آنها نیز شامل محدود نمودن جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده سازه‌ها بود [7].



شکل (۱): شماتیک رفتار چرخه‌ای یک سیستم مرکزگرا [17]

در سال ۲۰۰۸ ژو و ژانگ یک نمونه مهاربند

در شکلی در محیط نرم افزار آباکوس یک سیستم جدید مهاربندی را پیشنهاد نمودند. آنها پس از بررسی اطلاعات به دست آمده به این نتیجه رسیدند که استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی باعث افزایش خاصیت مرکزگرایی می گردد، شکل پذیری سازه افزایش می یابد و میزان میرایی مهاربند نیز به علت رفتار پیستونی آن افزایش می یابد. نقطه اشتراک تحقیقات افراد بالا حذف و کاهش جابه جایی نسبی باقی مانده در سازه ها بوده است. باید خاطرنشان نمود که این جابه جایی های نسبی در سازه به علت بروز زلزله در سازه ها ایجاد گردیده شده است. مقالات یاد شده نشان می دهند که مهم ترین عامل قابل اندازه گیری بعد از زلزله جابه جایی نسبی باقی مانده در سازه است. تحقیقات اخیر نیز نشان می دهد چنانچه میزان جابه جایی نسبی باقی مانده در سازه پس از زلزله کمتر از ۰/۵ درصد باشد، هزینه بازسازی و آماده سازی سازه برای بهره برداری بسیار زیاد کاهش پیدا می نماید [13,14,15]. هدف از این پژوهش معرفی، طراحی و تحلیل یک نمونه مهاربند مرکزگرا است که ویژگی های مثبتی نسبت به نمونه های پیشین داشته باشد. این ویژگی ها عبارت اند از: ظرفیت نیروی محوری بالا، استفاده از کابل کمتر در مهاربند، سادگی ساخت متناسب با امکانات موجود در ایران و استفاده از کابل های مجزا برای حالت های فشاری و کششی مهاربند.

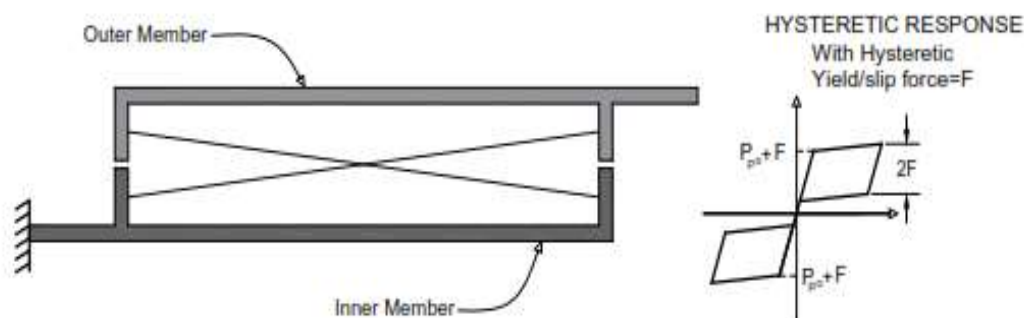
معرفی مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه

پس از بررسی کلیه مهاربندهای مرکزگرا پیشین، با توجه به متریال موجود و امکانات ساخت در ایران، مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دو طرفه (DT-SCED) (Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace) پیشنهاد گردید. همان طور که پیش تر اشاره شد مهاربندهای پیشنهادی قبلی همگی دارای چندین نکته منفی از جمله: دشواری ساخت، هزینه بالا، جذب انرژی پایین و ظرفیت محدود نیروی محوری بودند. در مهاربند

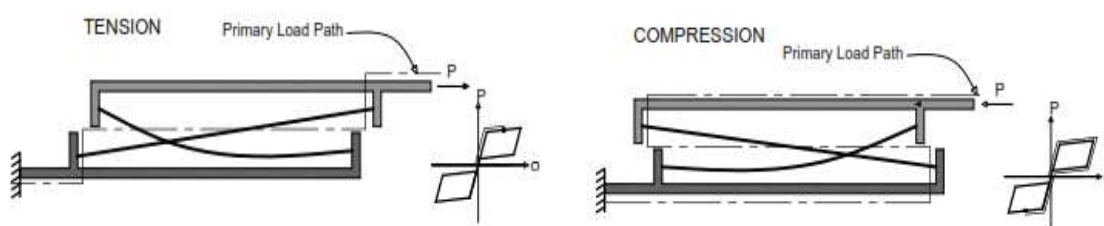
مرکزگرا را معرفی نمودند که در آن از کابل های با جنس SMA استفاده شده بود، از نکات حائز اهمیت این طرح پژوهشی رفتار بسیار خوب پرچمی شکل نمودار چرخه-ای مهاربند بود. البته این نمونه پیشنهادی نیز قابلیت آزمایش واقعی را نداشت و ظرفیت نیروی محوری آن در حدود ۹ کیلونیوتن بود [8]. اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی رفتار لرزه ای قاب های فولادی به همراه مهاربندهای مرکزگرا پرداختند [9]. آنها در این پژوهش از دو نرم افزار عددی OPENSEES و نرم افزار تجاری SAP2000 برای مدل سازی استفاده نمودند. در هر دو نرم افزار پاسخ مناسبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استخراج نمودند. پس از بررسی اطلاعات، آنها نتیجه گرفتند که میزان جابه جایی نسبی طبقات در سازه مرکزگرا برای ۱۲ زلزله اعمالی بین ۲ تا ۴ درصد است، همچنین رفتار لرزه ای سازه از جمله جابه جایی نسبی، شتاب، نیروی ایجاد شده در تیر و ستون به خوبی در نرم افزارهای اجزای محدود پیش بینی گردیده است. در سال ۲۰۱۴ اروکو و همکاران کار خود را بر روی یک نمونه مهاربند مرکزگرای تلسکوپی آغاز نمودند (T-SCED) (Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace)، آنها در این پژوهش تلاش نمودند یک نمونه مهاربند مرکزگرا را طراحی نمایند تا علاوه بر ایجاد خاصیت مرکزگرایی در سازه امکان شکل پذیری بیشتری در سازه ایجاد نمایند و جابه جایی نسبی باقی مانده سازه را نیز به نحو قابل توجهی کاهش دهد [9]. در سال ۲۰۱۶ آلم (Alam) و همکاران یک نمونه مهاربند جدید را طراحی نمودند. آنها در این پژوهش قصد داشتند با توجه به هزینه های زیادی که پس از تخریب سازه در زمان وقوع زلزله در ساختمان های عظیم ایجاد می شود، ابزاری را در سازه استفاده نمایند که علاوه بر هزینه کم اجرایی، جابه جایی و جابه جایی نسبی باقی مانده را نیز کاهش دهد [10]. آنها با توجه به الگوی کمک فنرهای استفاده شده در سیستم تعلیق خودرو و آلیاژهای حافظه

به‌عنوان عضو بیرونی استفاده شده است. هر دسته از کابل‌ها توسط دو نبشی به عضو داخلی و خارجی متصل می‌گردند و در بارگذاری کششی و فشاری پس از غلبه نیروی محوری به نیروی اصطکاکی میان عضوهای داخلی و خارجی، کابل‌ها فعال می‌شوند. مزیت این نوع مهاربند نسبت به نمونه‌های پیشین استفاده از کابل‌های کمتر و نصف نمودن میزان خستگی در کابل‌ها به علت کابل‌های کششی و فشاری مجزا است. ساخت و نصب آسان این مهاربند از دیگر مزایای این طرح نسبت به طرح‌های پیشین است که امکان ساخت آن را در ایران به‌سادگی میسر می‌سازد.

پیشنهادی از عملکرد تلسکوپی اרוکو و همکاران استفاده شده است با این تفاوت که از اتصالات بسیار ساده‌تری برای ساخت در آن استفاده می‌گردد [9]. در این مهاربند برای ایجاد عملکرد کششی در کابل‌ها در حین بارگذاری کششی و فشاری از ایده مطرح‌شده در مهاربند پژوهشی ژو و ژانگ در سال ۲۰۰۸ استفاده شده است [8]. برای این منظور از ۴ دسته کابل کمک گرفته شده است که دو دسته از این کابل‌ها در کشش و دو دسته دیگر نیز در فشار فعال می‌شوند. شکل (۲) به‌صورت شماتیک رفتار مهاربند را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد در مهاربند (DT-SCED) از یک عضو I شکل به‌عنوان عضو درونی و یک عضو قوطی شکل



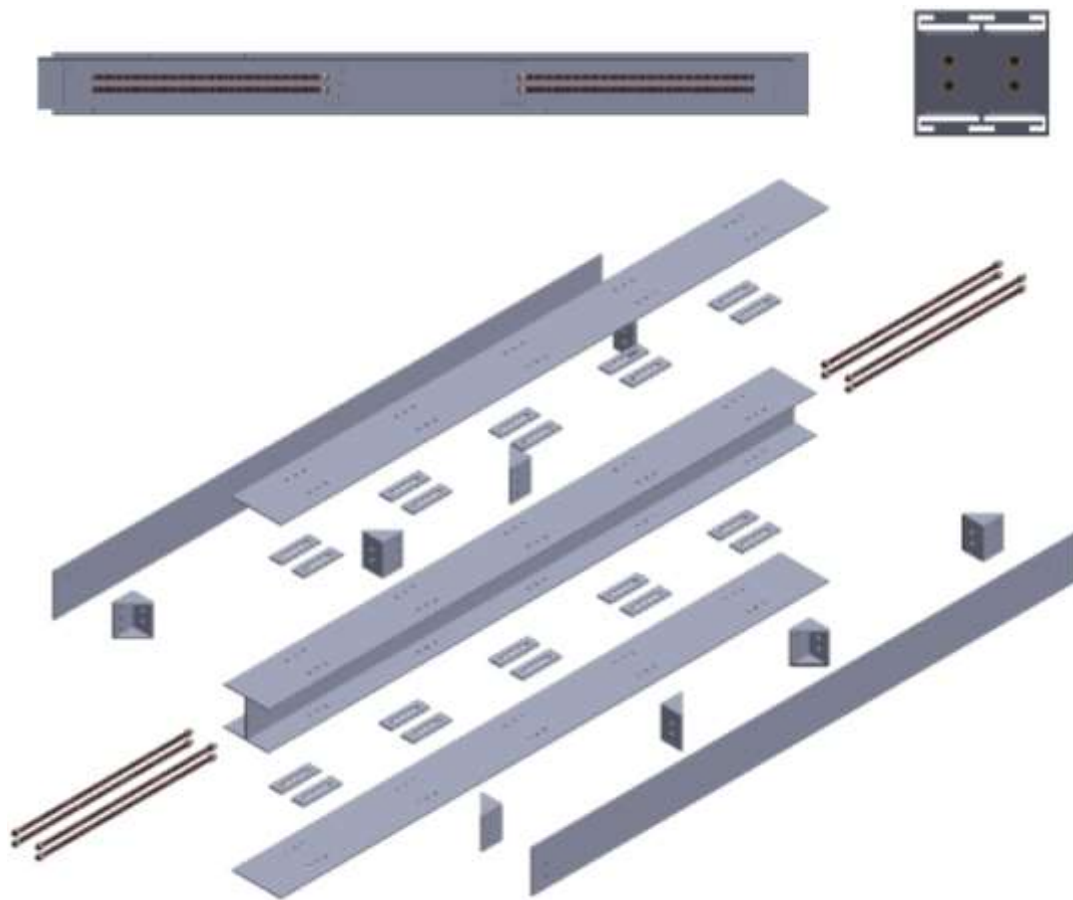
(الف)



(ب)

(ج)

شکل (۲): شکل شماتیک مهاربند مرکزگرای (الف) حالت بدون بارگذاری، (ب) بارگذاری کششی، (ج) بارگذاری فشاری



شکل (۳): شکل جزئیات مهاربند مرکزگرای پیشنهادی (DT-SCED): الف) مقطع مهاربند، ب) وجه جانبی مهاربند، ج) اجزای مورد نیاز در ساخت مهاربند

صحت‌سنجی نحوه مدل‌سازی مهاربند (DT-SCED)

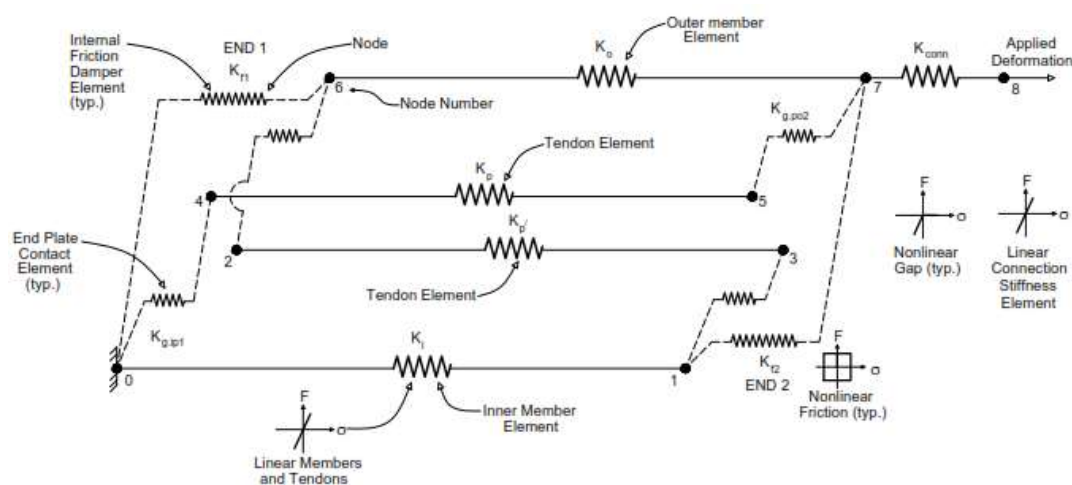
یک‌خطی در نظر گرفته شده است. فاصله میان اعضاها و کابل‌ها نیز با المان دوخطی (K_g) در نظر گرفته شده است. همچنین سختی ناشی از اصطکاک میان عضو داخلی و خارجی نیز با المان دوخطی K_f مشخص شده است. نخستین گام تحلیل مهاربند تعیین میزان نیروی لازم برای غلبه بر پیش‌تنیدگی است. در این مرحله فرض می‌شود که قبل از غلبه بر نیروی پیش‌تنیدگی، مهاربند فعال نمی‌گردد و هیچ‌گونه اصطکاک میان عضو داخلی و خارجی ایجاد نمی‌شود. بارگذاری نیز به صورت گام‌های کوچک به سازه وارد می‌گردد و در نهایت یک ماتریس سختی و یک ماتریس بارگذاری برای مهاربند برپا می‌شود. باید خاطرنشان نمود نمودار نیرو جابه‌جایی هر یک از المان‌ها قابل ترسیم است. برای محاسبه رفتار چرخه‌ای مهاربند

در این پژوهش برای صحت‌سنجی نحوه مدل‌سازی مهاربند مرکزگرای (DT-SCED) در نرم‌افزار اجزای محدود از دو نمونه پژوهش آزمایشگاهی مشابه استفاده شد، لذا برای تعیین نمودار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED) از تحلیل سختی غیر خطی در نرم‌افزار OPENSEES استفاده شده است. ماتریس سختی مهاربند پیشنهادی نیز بر اساس المان‌های شکل ۴ برپا گردیده است. کلیه المان‌ها به صورت یک‌بعدی است اما در تصویر به صورت دوبعدی نمایش داده شده است. سختی عضو داخلی، خارجی و کابل‌ها که به ترتیب با K_o ، K_i و K_p در شکل (۴) مشخص شده‌اند و به صورت المان

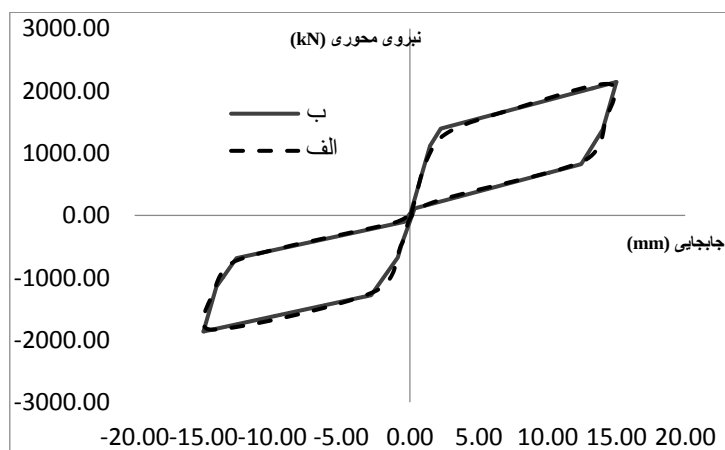
همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است نتایج از دقت بالایی برخوردار بودند. برای کنترل بیشتر یک نمونه مهاربند مرکزگرا را که در سال ۲۰۱۴ توسط اروکو و همکاران درون یک قاب سه‌طبقه تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار گرفت و مدل‌سازی شد که نمودار چرخه‌ای مهاربند طبقه میانی در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل‌سازی و تحلیل با دقت بسیار زیاد و قابل قبول است.

نقطه ۵ تکیه‌گاه و نقطه ۷ در شکل (۴) نقطه هدف است و جابه‌جایی نسبی این دو نقطه کنترل می‌شود. برای هر گام چرخه چرخه‌ای مهاربند یک ماتریس نیرو و یک ماتریس سختی تشکیل می‌گردد و به وسیله آن موقعیت دوسر مهاربند از یکدیگر مشخص می‌شود.

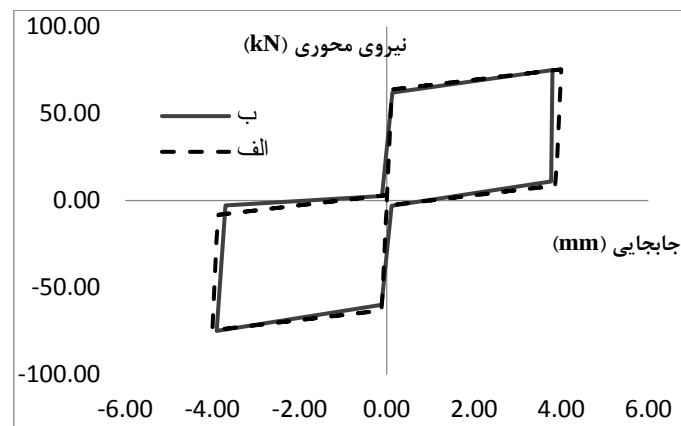
برای صحت‌سنجی نحوه مدل‌سازی و دقت نرم‌افزار یک نمونه مهاربند مرکزگرایی تلسکوپی که در سال ۲۰۱۴ توسط اروکو و همکاران تحت آزمایش جک دینامیکی قرار گرفته بود، مدل‌سازی و تحلیل شد [11].



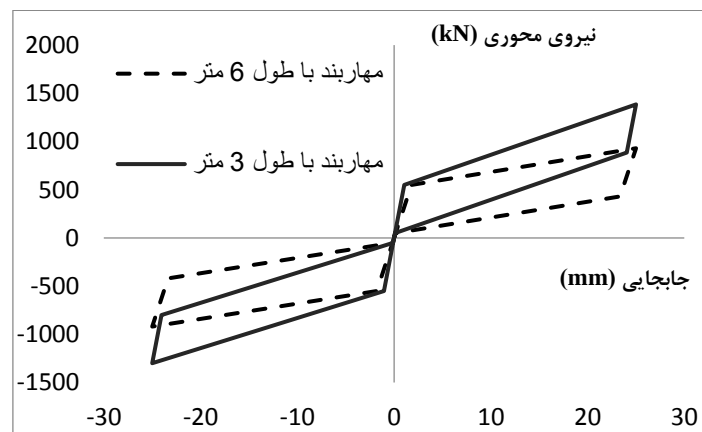
شکل (۴): مدل سازه‌ای مهاربند پیشنهادی (DT-SCED) برای محاسبه نمودار چرخه‌ای در نرم‌افزار OPENSEES



شکل (۵): نمودار چرخه‌ای نیرو جابه‌جایی جهت صحت‌سنجی نرم‌افزار، الف) نمونه واقعی آزمایش شده توسط اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۴، ب) نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار OPENSEES



شکل (۶): نمودار چرخه‌ای نیرو جابه‌جایی جهت صحت‌سنجی نرم‌افزار، الف) نمونه واقعی آزمایش شده توسط اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۴، ب) نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار OPENSEES



شکل (۷): رفتار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED) در طول‌های مختلف

نمودار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED)

پس از صحت‌سنجی نرم‌افزار و نحوه مدل‌سازی مهاربندهای تلسکوپی، دو نمونه مهاربند (DT-SCED) را برای محاسبه رفتار چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادیم. یکی از مهاربندها دارای طول ۳۰۰۰ میلی‌متر و طول مهاربند مرکز‌گرای دیگر ۶۰۰۰ میلی‌متر است. در هردو این مهاربندها از فولاد نرمه با مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال برای کلیه عضوهای داخلی، خارجی و اتصالات استفاده شده است.

مدول الاستیسیته کابل‌ها ۱۰۲۰۰۰ مگاپاسکال است و مساحت کل کابل‌ها به همراه نیروی پیش‌تندگی به ترتیب ۹۰۷ میلی‌متر مربع و ۳۰۰ کیلو نیوتن است. شکل

(۸) نمودار چرخه‌ای تئوری مهاربندهای پیشنهادی با طول‌های مختلف را نمایش می‌دهد. شایان یادآوری است که این نمودارها با توجه به روابط عددی و از مدل‌سازی به صورت فنرهای سری و موازی حاصل شده است. برای محاسبه رفتار چرخه‌ای مهاربندهای فوق پس از راستی-آزمایی برنامه OPENSEES و محدود نمودن جابه‌جایی مهاربند پیشنهادی، یک بار رفت و برگشتی از نوع جابه‌جایی به مهاربندها اعمال گردید. شکل (۷) نمودار چرخه‌ای مهاربندهای نمونه را با دو طول متفاوت نمایش می‌دهد. جزییات مهاربندها در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول (۱): جزئیات و پارامترهای مهاربند (DT-SCED)

مهاربند پیشنهادی		پارامترها
مهاربند با طول ۶ متر	مهاربند با طول ۳ متر	
200000 MPa	200000 MPa	مدول یانگ فولاد (E_s)
102000 MPa	102000 MPa	مدول یانگ کابل (E_p)
3000 mm	6000 mm	طول عضو داخلی (L_i)
20412 mm ²	30345 mm ²	سطح مقطع عضو داخلی (A_i)
3000 mm	6000 mm	طول عضو خارجی (L_o)
21419 mm ²	33930 mm ²	سطح مقطع عضو خارجی (A_o)
570 kN	710 kN	اصطکاک ابتدای مهاربند (F_{I1})
118 kN	146 kN	اصطکاک انتهای مهاربند (F_{I2})
1836 mm ²	1836 mm ²	سطح مقطع کابل‌ها (A_{pt})
530 kN	870 kN	نیروی پیش‌تندگی (P_{po})
0.1 kN	0.1 kN	نیروی پیش‌تندگی در هر گام
0.005 mm	0.005 mm	میزان تغییر شکل در هر گام

مدل‌سازی ساختمان نمونه

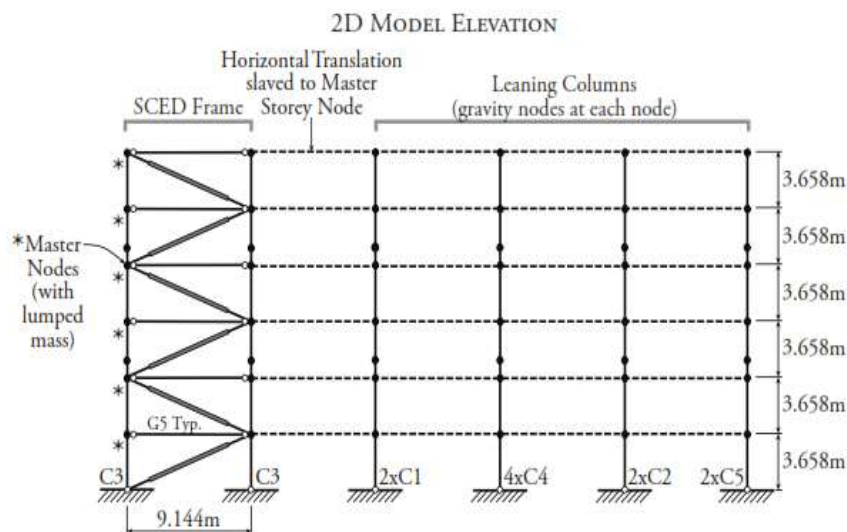
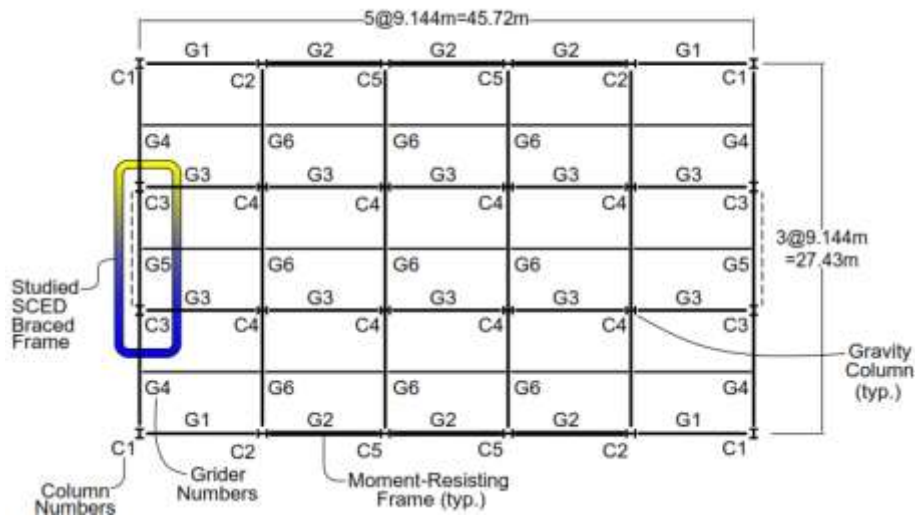
کمانش تاب در نظر گرفته شده است. تیرها و ستون‌ها در قاب مذکور فولادی بوده و سقف‌ها بتنی و صلب در نظر گرفته شده است. همچنین وزن مؤثر نصف سازه ۳۲۱۰۰ کیلو نیوتن است. پلان و برش سازه در شکل (۸) ارائه شده است. سیستم باربر جانبی برای سازه در جهت شمال به جنوب مهاربند مرکزگرا و در جهت شرق به غرب قاب خمشی است. پس از آنکه طراحی سازه بر اساس آیین‌نامه ASCE صورت گرفت، قاب دهانه مهاربندی به صورت دوبعدی در نرم‌افزار اجزای محدود OPENSEES مدل‌سازی گردید. این قاب دوبعدی بر اساس مدل سه‌بعدی سازه در نظر گرفته شده است. مدل دوبعدی مورد نظر شامل عضوهای تیر، ستون و مهاربند است و بارهای مرده و زنده نیز به تمامی ستون‌ها به صورت عمودی اختصاص یافته است. همچنین بایستی خاطرنشان نمود در این مدل‌سازی اثر $P-\Delta$ نیز در نظر گرفته شده است و با توجه به سقف دال بتنی سازه، کلیه کف‌ها در نرم‌افزار به صورت یک دیافراگم صلب در نظر گرفته شده است. همچنین میرایی رایلی قاب برای دو مورد اول سازه ۳ در نظر گرفته شده است و علت آن مقدار میرایی در نظر گرفته شده در مطالعات قبلی برای مقایسه بهتر بوده است.

در این پژوهش برای بررسی رفتار لرزه‌ای مهاربند (DT-SCED) در سازه واقعی از یک قاب نمونه شش طبقه همراه با مهاربند مرکزگرا که اولین بار توسط کریستوپلوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ مورد بررسی قرار گرفت، استفاده گردید [16]. نتایج به دست آمده با دو نمونه پژوهشی دیگر که توسط کریستوپلوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ و اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر روی همان ساختمان پژوهشی صورت پذیرفته بود، مقایسه گردید [17]. در این پژوهش منظور از مهاربند (Self-Centering Energy-Dissipative) SCED، مهاربند معرفی شده توسط کریستوپلوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ است. همچنین منظور از مهاربند T-SCED (Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative)، مهاربند معرفی شده توسط اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۴ است. بایستی خاطرنشان نمود برای طراحی این سازه از آیین‌نامه ASCE 7-05 استفاده شده است [12]. ساختمان یادشده با خاک نوع ۴ و در شهر لوس‌آنجلس ایالت کولورادو آمریکا در نظر گرفته شده است. ضریب رفتار قاب مذکور ($R=7$)، ضریب اضافه مقاومت ($\Omega_0=2$) و ضریب شکل‌پذیری آن ($C_d=5.5$) مشابه با مهاربند

مدل سازی مهاربند مرکزگرا (DT-SCED)

پس از محاسبه نمودار چرخه‌ای جزئیات نمودار پرچمی شکل مطابق المان مرکزگرای ایجاد شده در نرم افزار OPENSEES محاسبه گردید و از این المان در طراحی مهاربند مرکزگرا استفاده شد. پارامترهای نمودار چرخه‌ای برای مهاربندهای مختلف در جدول (۳) گزارش گردیده است.

برای مدل سازی مهاربند مرکزگرا در گام اول نمودار چرخه‌ای هریک از مهاربندهای طبقات محاسبه گردید. برای این منظور از مقدار نیروی جانبی در هریک از طبقات استفاده شد و با توجه به بیشینه نیروی محوری جزئیات مهاربندها مطابق جدول (۲) محاسبه گردید.



بارهای ثقیلی: بام: بار مرده= 4.07 kpa، بار زنده= 0.96 kpa، طبقات: بار مرده= 4.31 kpa، بار زنده= 2.4 kpa،

مختصات بار جانبی: Los Angeles, CA, $S_S = 2.1$ g; $S_I = 0.8$ g, Occupancy Category II, Seismic Use Group I

Importance Factor = 1.0, Site Class D, $F_a = 1.0$; $F_v = 1.5$, $S_{DS} = 1.4$ g; $S_{DI} = 0.08$ g, Seismic Design Category E

Steel: $F_y = 345$ Mpa

شکل (۸): پلان و جزئیات ساختمان نمونه شش طبقه مورد بررسی کریستوپلوس و همکاران [17]

جدول (۲): جزئیات و پارامترهای مهاربندهای استفاده‌شده در قاب نمونه

پارامترها	مهاربند SCED	مهاربند T-SCED	مهاربند (DT-SCED)
مدول یانگ فولاد (E_s)	200000 MPa	200000 MPa	200000 MPa
مدول یانگ کابل (E_p)	102000 MPa	102000 MPa	102000 MPa
طول عضو داخلی (L_i)	6500 mm	7000 mm	6500 mm
سطح مقطع عضو داخلی (A_i)	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
طول عضو میانی (L_m)	-	7000 mm	-
سطح مقطع عضو میانی (A_m)	-	جدول ۳	-
طول عضو خارجی (L_o)	6500 mm	7000 mm	6500 mm
سطح مقطع عضو خارجی (A_o)	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
اصطکاک ابتدای مهاربند (F_{I1})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
اصطکاک انتهای مهاربند (F_{I2})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
سطح مقطع کابل‌ها (A_{pt})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
نیروی پیش‌تنیدگی (P_{po})	جدول ۳	جدول ۳	جدول ۳
نیروی پیش‌تنیدگی در هر گام	0.1 kN	0.1 kN	0.1 kN
میزان تغییر شکل در هر گام	0.005 mm	0.005 mm	0.005 mm

جدول (۳): جزئیات و پارامترهای مهاربندهای استفاده‌شده در قاب نمونه

مهاربند	مساحت اعضای داخلی، میانی و خارجی (mm ²)			اصطکاک دوسر مهاربند (kN)		سطح مقطع کابل‌ها (mm ²)	نیروی پیش‌تنیدگی (kN)
	A _i	A _m	A _o	F _{I1}	F _{I2}	A _{pt}	P _{po}
مهاربند SCED							
طبقه ۱ و ۲	۲۰۱۰۰	—	۲۰۷۰۰	۴۵۰	۴۵۰	۱۸۳۰	۱۰۵۳
طبقه ۳	۲۰۱۰۰	—	۲۰۷۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۱۸۳۰	۸۹۴
طبقه ۴	۲۰۱۰۰	—	۲۶۷۷۰	۳۵۰	۳۵۰	۱۲۲۰	۷۸۷
طبقه ۵	۲۰۱۰۰	—	۲۶۷۷۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۲۲۰	۶۱۷
طبقه ۶	۱۳۶۰۰	—	۲۶۷۷۰	۲۰۰	۱۵۰	۹۱۲	۳۹۸
T-SCED مهاربند							
طبقه ۱ و ۲	۱۳۶۰۰	۲۶۷۷۰	۲۶۴۳۱	۴۵۰	۲۵۰	۹۱۲	۵۵۷
طبقه ۳	۱۳۶۰۰	۲۶۷۷۰	۲۶۴۳۱	۴۰۰	۱۵۰	۹۱۲	۳۹۸
طبقه ۴	۲۰۱۰۰	۲۶۷۷۰	۲۹۰۵۰	۳۵۰	۳۰۰	۱۲۲۰	۸۵۱
طبقه ۵	۲۰۱۰۰	۲۶۷۷۰	۲۹۰۵۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۲۲۰	۶۱۷
طبقه ۶	۱۳۶۰۰	۲۶۷۷۰	۲۶۴۳۱	۲۰۰	۱۵۰	۹۱۲	۲۹۸
(DT-SCED) مهاربند							
طبقه ۱ و ۲	۱۸۷۷۳	—	۲۲۴۳۲	۴۵۰	۵۰۰	۱۵۰۰	۱۰۵۰
طبقه ۳	۱۸۷۷۳	—	۲۲۴۳۲	۴۰۰	۴۰۰	۱۵۰۰	۷۸۰
طبقه ۴	۱۸۷۷۳	—	۲۵۰۰۰	۳۵۰	۲۰۰	۱۱۰۰	۶۳۵
طبقه ۵	۱۸۷۷۳	—	۲۵۰۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۱۰۰	۶۳۵
طبقه ۶	۱۵۹۰۰	—	۲۱۴۶۲	۲۰۰	۱۵۰	۸۰۰	۵۰۰

مقایسه نتایج تحلیل قاب‌های نمونه زمان تناوب

زمان تناوب ۳ مورد اول ساختمان‌های طراحی شده با سیستم‌های مختلف مهاربندی مرکزگرا در جدول (۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان تناوب ساختمان نمونه پژوهشی همراه با مهاربند (DT-SCED) به نمونه‌های مورد مقایسه نزدیک است.

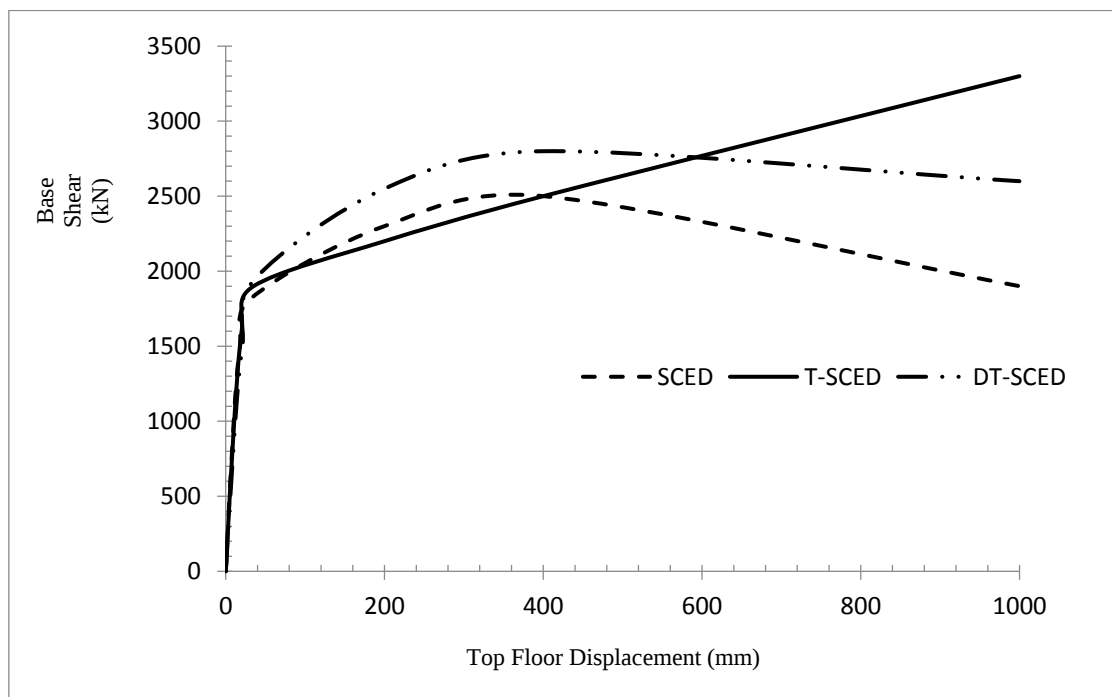
جدول (۴): زمان تناوب قاب نمونه پیشنهادی و قاب‌های مورد

مقایسه

نمونه پژوهشی	مود ۱ (s)	مود ۲ (s)	مود ۳ (s)
کریستوپلوس و همکاران	0.9	0.3	0.17
مهاربند تلسکوپی (تحلیلی)	0.76	0.22	0.12
مهاربند (DT-SCED) (تحلیلی)	0.81	0.24	0.14

تحلیل استاتیکی غیر خطی

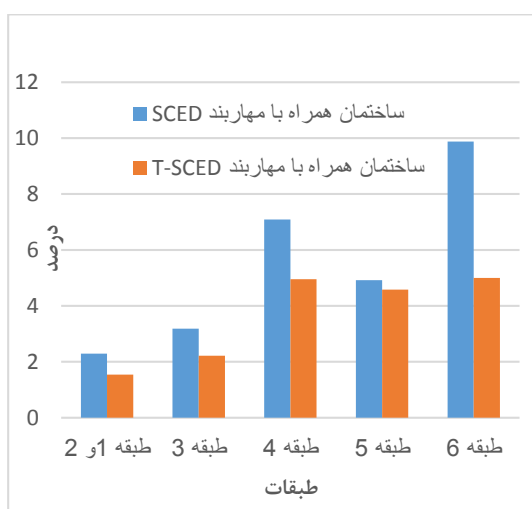
نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب نمونه در شکل (۹)



شکل (۹): نمودار پوش‌آور مهاربند (DT-SCED)، مهاربند کریستوپلوس و همکاران و اروکو و همکاران

جدول (۵): نتایج تحلیل قاب نمونه پیشنهادی و قاب‌های پیشین

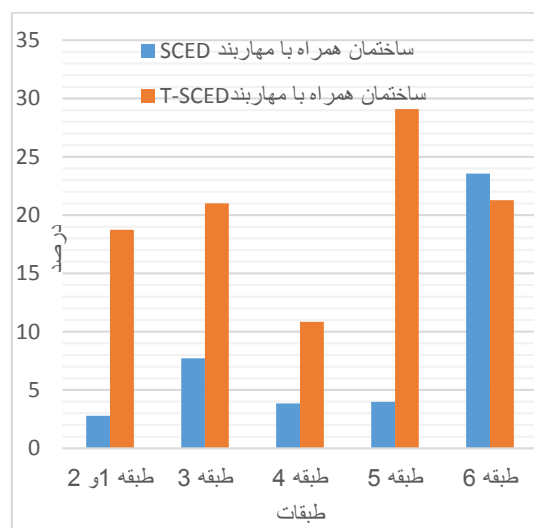
مهاربند	نیروی فعال شدن مهاربند (kN)	سختی داخلی (kN/mm)	نیروی پیش‌تنیدگی (kN/mm)	پیشینه نیروی محوری (kN)
مهاربند SCED				
طبقه ۱ و ۲	۱۹۶۴	۴۹۴	۱۷	۳۱۳۲
طبقه ۳	۱۷۰۳	۴۶۸	۱۵	۲۷۱۵
طبقه ۴	۱۴۸۱	۴۱۱	۱۴	۲۴۰۴
طبقه ۵	۱۱۴۱	۳۶۱	۱۰	۱۷۸۶
طبقه ۶	۷۲۱	۲۲۱	۵	۱۰۷۴
مهاربند T-SCED				
طبقه ۱ و ۲	۱۹۷۹	۸۸۵	۲۷	۳۸۲۶
طبقه ۳	۱۷۲۰	۸۸۵	۲۷	۳۵۶۰
طبقه ۴	۱۵۱۵	۹۱۴	۱۸	۲۷۷۱
طبقه ۵	۱۱۴۵	۹۱۴	۱۸	۲۴۰۱
طبقه ۶	۷۶۰	۷۶۶	۱۴	۱۷۰۴
مهاربند (DT-SCED)				
طبقه ۱ و ۲	۲۰۱۰	۵۵۰	۱۶	۳۲۲۲
طبقه ۳	۱۷۵۹	۵۸۰	۱۶	۲۹۴۲
طبقه ۴	۱۵۹۴	۴۹۰	۱۴	۲۵۰۰
طبقه ۵	۱۲۰۰	۴۱۰	۱۲	۱۸۶۰
طبقه ۶	۸۰۰	۳۲۰	۶	۱۴۰۵



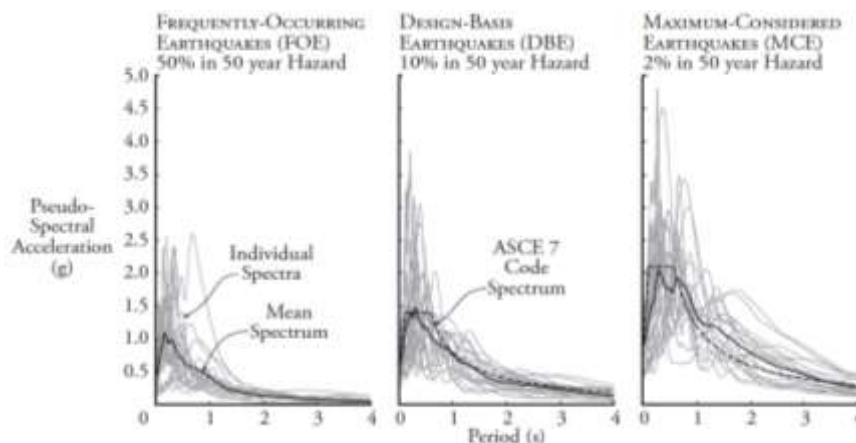
شکل (۱۰): میزان درصد اختلاف نیروی فعال شدن مهاربند DT-SCED با مهاربندهای SCED و T-SCED

نیروی فعال شدن مهاربند و میزان سختی داخلی.

همان‌طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود، میزان اختلاف نیروی فعال شدن مهاربند (DT-SCED) در مقایسه با دو نمونه دیگر بین ۱/۵ تا ۹/۸ درصد است. این مقایسه نشان می‌دهد شروع عملکرد مهاربند (DT-SCED) با نمونه‌های پیشین برابر است و در نتیجه همان‌طور که در شکل (۹) قابل ملاحظه است شیب اولیه و حد پلاستیک نمودار پوش‌آور هر سه نمونه تقریباً برابر است. همچنین بایستی خاطرنشان نمود سختی داخلی مهاربندها متناسب با نحوه ساخت و میزان پیش‌تنیدگی کابل‌های استفاده‌شده متفاوتند اما نسبت آنها نیز تقریباً برابر است.



شکل (۱۱): میزان درصد اختلاف بیشینه نیروی محوری مهاربند DT-SCED با مهاربندهای SCED و T-SCED



شکل (۱۲): طیف شبه شتاب زمین لرزه‌ها را بر اساس آیین‌نامه ASCE برای سطوح خطرپذیری مختلف [12]

استفاده شد. زمین‌لرزه‌های SAC برای منطقه لوس آنجلس در سه سطح خطرپذیری کالیبره شده است. بیست زمین‌لرزه (LA41 to LA60) برای سطح خطرپذیری با احتمال تکرار (FOE) با احتمال وقوع ۵۰٪ در ۵۰ سال کالیبره گردیدند. بیست زمین‌لرزه (LA01 to LA20) برای سطح خطرپذیری طراحی (DBE) با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال کالیبره گردیدند. بیست زمین‌لرزه نیز (LA21 to LA40) برای بیشترین سطح خطرپذیری (MCE) با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲) نیز طیف شبه شتاب زمین‌لرزه‌ها را بر اساس آیین‌نامه ASCE برای هر سه سطح خطرپذیری

نیروی پیش‌تندگی و بیشینه نیروی محوری. همان‌طور که در مقدمه بیان شد، ظرفیت نیروی محوری مهاربندهای مرکزگرا همواره یکی از مهم‌ترین نکات طراحی این مهاربندها است. شکل (۱۱) میزان درصد اختلاف بیشینه نیروی محوری (DT-SCED) را نمایش می‌دهد و مشاهده می‌شود میزان اختلاف بین ۳ تا ۲۸ درصد است؛ بنابراین مهاربند (DT-SCED) با مکانیزم ساخت بسیار ساده‌تر از ظرفیت نیروی محوری مناسب برخوردار است.

تحلیل دینامیکی غیر خطی

در این پژوهش از ۶۰ زمین‌لرزه استفاده شده توسط Somerville و همکاران در سال ۱۹۹۷ برای پروژه SAC،

نمایش می‌دهد [12].

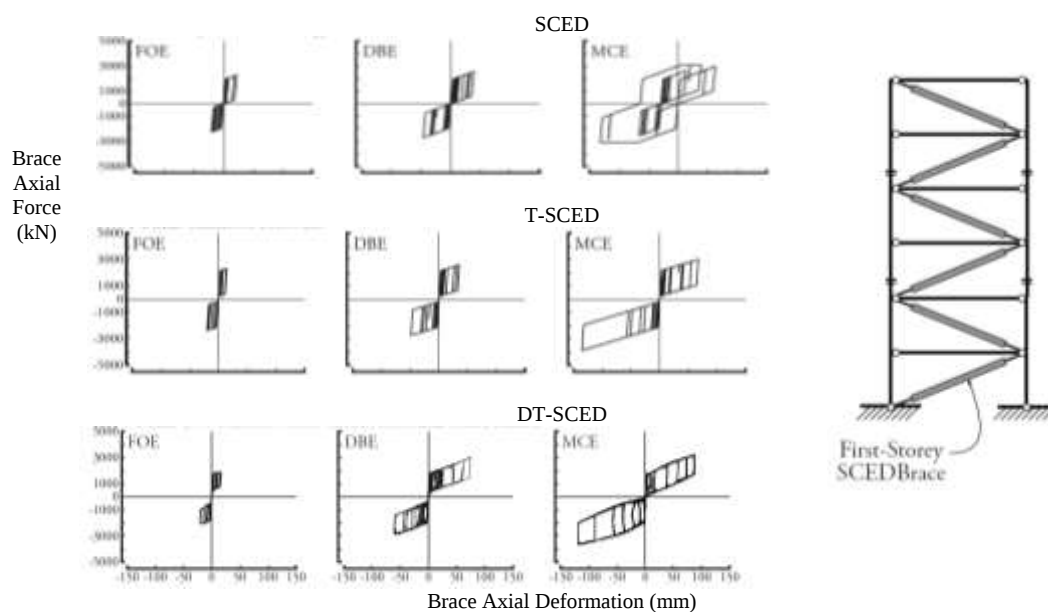
و مجزا در فشار و کشش باشد. به صورت کلی عملکرد مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دو طرفه در این سطح از زمین‌لرزه بسیار مطلوب ارزیابی گردید.

۲. در سطح خطرپذیری DBE نیز هر سه مهاربند مرکزگرای رفتار پرچمی شکل دارند. سختی اولیه مهاربند مرکزگرای DT-SCED از دو نمونه دیگر بیشتر است. همچنین در مهاربند مرکزگرای DT-SCED سطح زیر نمودار نیز از دو نمونه دیگر بیشتر است. همانند حالت (الف) میزان جابه‌جایی باقی‌مانده در مهاربند DT-SCED از دو نمونه دیگر کمتر است.

۳. در سطح خطرپذیری MCE بر خلاف دو حالت قبل، مهاربند مرکزگرای SCED رفتار پرچمی شکل کامل ندارد و رفتار چرخه‌ای این مهاربند از حالت مرکزگرای خارج می‌گردد. از نکات حائز اهمیت مهاربند مرکزگرای تلسکوپی و تلسکوپی دوطرفه که در این پژوهش ارائه گردیده است، پایداری رفتار چرخه‌ای آنها در زلزله‌های با سطح خطرپذیری بالا است. از دیگر نکات مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه DT-SCED می‌توان به تعداد سیکل‌های بیشتر نمودار چرخه‌ای نسبت به مهاربند مرکزگرای تلسکوپی T-SCED اشاره نمود.

مقایسه رفتار چرخه‌ای مهاربندها. در این پژوهش پس از تحلیل قاب‌های نمونه در هر سه سطح خطرپذیری زمین‌لرزه‌ها، رفتار چرخه‌ای مهاربندهای طبقه اول با یکدیگر مقایسه گردیدند. شکل (۱۳) نمودار چرخه‌ای مهاربندهای قاب‌های مختلف را نمایش می‌دهد. زمین‌لرزه‌های استفاده‌شده در هریک از سطوح خطرپذیری در جدول (۶) ارائه گردیده است. از مقایسه نمودارهای شکل (۱۳) با یکدیگر موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

۱. در سطح خطرپذیری FOE هر سه مهاربند مرکزگرای رفتار پرچمی شکل دارند. سختی اولیه هر سه مهاربند تقریباً با یکدیگر برابر است، سطح زیر نمودار مهاربند SCED از دو نمونه دیگر بیشتر است که با توجه به جزییات ساخت قابل پیش‌بینی است. سختی ثانویه مهاربند DT-SCED در حالت کششی از دیگر نمونه‌ها کمتر است اما در حالت فشاری با دو نمونه دیگر تقریباً برابر است. میزان جابه‌جایی باقی‌مانده در مهاربند DT-SCED از دو نمونه دیگر کمتر است و دلیل آن می‌تواند استفاده از کابل‌های با طول کوتاه‌تر



شکل (۱۳): رفتار چرخه‌ای مهاربند طبقه اول در ساختمان‌های نمونه تحت زمین‌لرزه‌های با سطوح خطرپذیری متفاوت

جدول (۶): زمین لرزه‌های منتخب برای تحلیل تاریخیچه زمانی در سطوح مختلف خطرپذیری

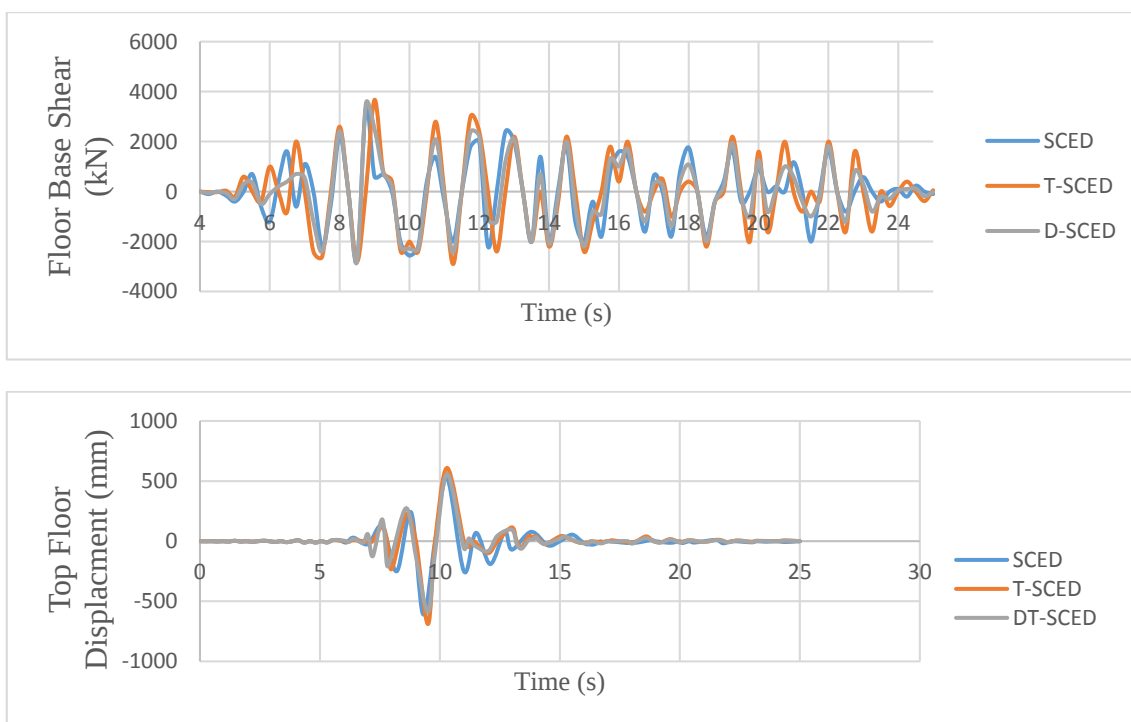
سطح خطرپذیری	نام زمین لرزه	تاریخ	بزرگی	فاصله (km)	PGA(g)
FOE	LA51/52	Parkfield, 1966	6.1	3.7	0.78/0.63
DBE	LA01/02	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	0.46/0.68
MCE	LA21/22	Kobe, 1995	6.9	3.4	1.28/0.92

دیگر نمونه‌ها کمتر است. با مقایسه نمودار جابه‌جایی طبقات مشخص می‌گردد مهاربند مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه DT-SCED پیشنهادی در این پژوهش از نظر جابه‌جایی طبقات عملکرد لرزه‌ای مناسبی دارد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای بررسی رفتار لرزه‌ای که در آیین‌نامه‌ها معرفی گردیده است، جابه‌جایی نسبی طبقات یا DRIFT طبقات است. شکل (۱۶) جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان‌های نمونه در سطوح مختلف زمین لرزه اعمالی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، میزان جابه‌جایی نسبی طبقات در ساختمان همراه با مهاربند مرکزگرای DT-SCED نسبت به دو مهاربند دیگر عملکرد مناسبی از نظر لرزه‌ای دارد. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، رفتار مرکزگرا می‌تواند به صورت یک عضو یا به صورت یک سیستم در سازه عمل نماید. در این پژوهش از یک عضو مرکزگرا به عنوان مهاربند در ساختمان‌های نمونه استفاده شد. در شکل (۱۳) مشاهده گردید تمامی مهاربندهای پیشنهادی تقریباً نمودار چرخه-ای شکل دارند. مطلوب‌ترین عملکرد مهاربندهای مرکزگرا می‌تواند ایجاد رفتار پرچمی شکل در کل ساختمان باشد. برای این منظور در شکل (۱۷) جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات در ساختمان‌های همراه با مهاربندهای مرکزگرای T-SCED و DT-SCED نزدیک به صفر است.

پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه. در این پژوهش برای بررسی و مقایسه بهتر عملکرد لرزه‌ای مهاربند پیشنهادی مرکزگرای تلسکوپی دوطرفه DT-SCED از نتایج تحقیقات اروکو و همکاران استفاده شد و با نتایج آن مقایسه گردید [17]. شکل (۱۴) نمودار جابه‌جایی بام و برش پایه قاب‌های نمونه را برای زمین لرزه LA21/22 نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود رفتار ساختمان نمونه همراه با مهاربند مرکزگرای DT-SCED با دو نمونه دیگر تقریباً برابر است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی بر روی ساختمان‌های نمونه در جدول (۷) ارائه گردیده است.

برای بررسی تأثیر هریک از مهاربندهای مرکزگرا بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه پارامترهای بیشینه شتاب، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینه جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات و بیشینه برش پایه با یکدیگر مقایسه گردیدند. بیشینه شتاب در ساختمان نمونه همراه با مهاربند مرکزگرای SCED نسبت به دو ساختمان نمونه دیگر کمتر است که این امر می‌تواند ناشی از میرایی بالای این مهاربند نسبت به دو نمونه دیگر باشد. این امر در ساختمان‌های نمونه همراه با مهاربندهای مرکزگرای تلسکوپی T-SCED و DT-SCED باعث افزایش بیشینه برش پایه و جابه‌جایی گردیده است.

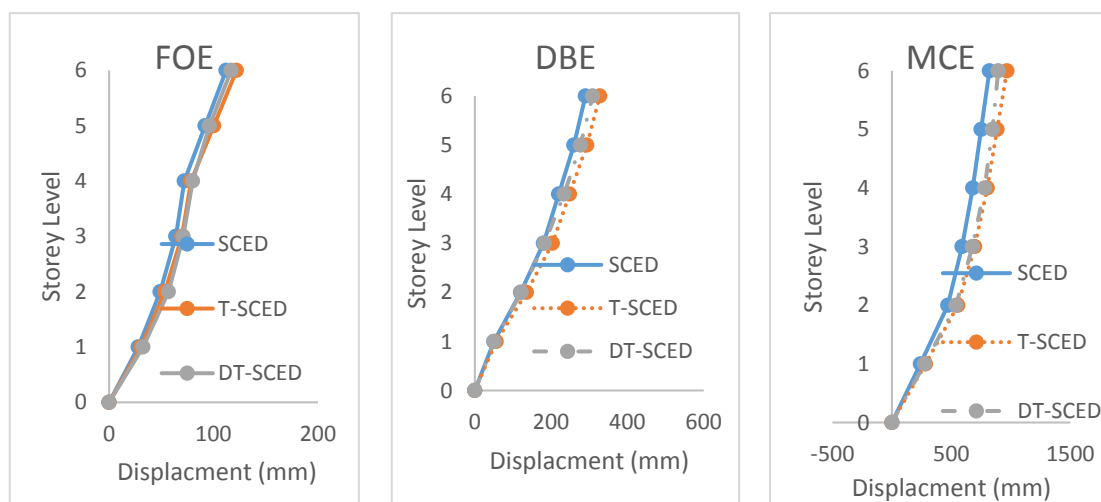
شکل (۱۵) نمودار جابه‌جایی طبقات را برای سطوح متفاوت خطرپذیری نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، در سطوح مختلف خطرپذیری زمین لرزه‌ها، میزان جابه‌جایی طبقات در ساختمان نمونه همراه با مهاربند مرکزگرای SCED از



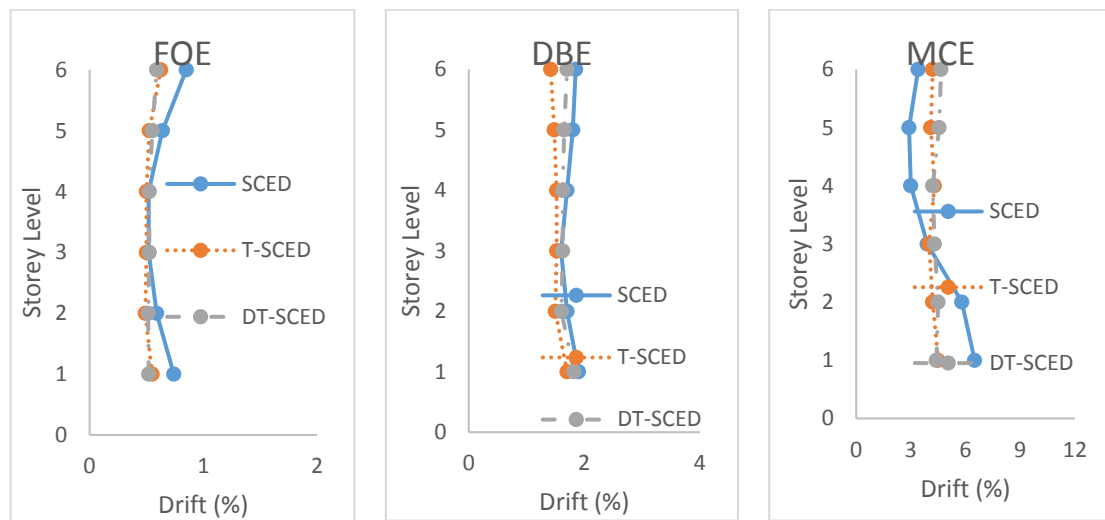
شکل (۱۴): نمودار تاریخچه پاسخ ساختمان‌های نمونه تحت زمین‌لرزه LA21/22

جدول (۷): پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه همراه با مهاربندهای مرکزگرای SCED، T-SCED و DT-SCED

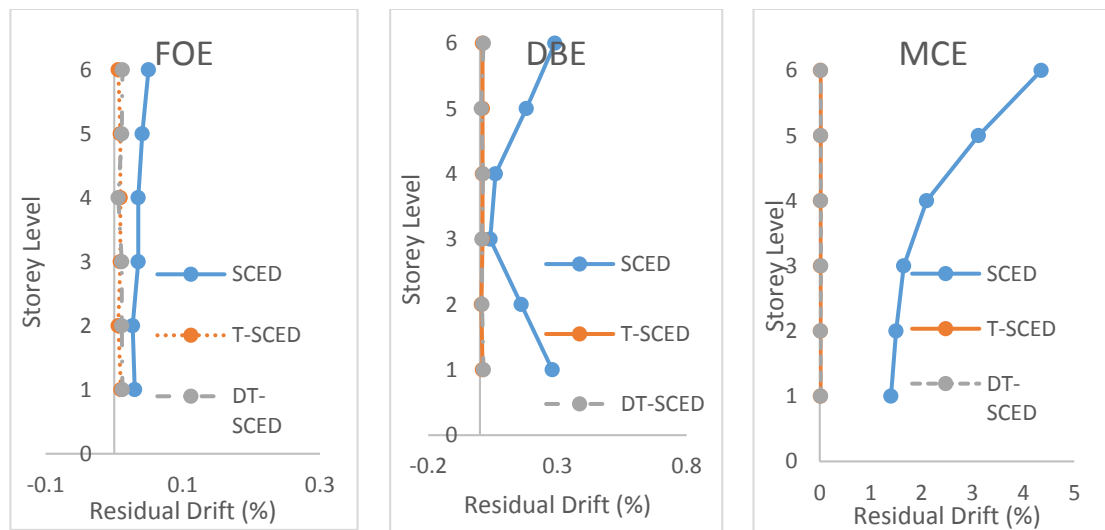
Analysis	Maximum Acceleration (g)			Peak Drift (%)			Peak Residual Drift (%)			Maximum Base Shear (Kn)		
	FOE	DBE	MCE	FOE	DBE	MCE	FOE	DBE	MCE	FOE	DBE	MCE
SCED	0.77	1.25	1.58	0.82	1.87	5.65	0.05	0.29	4.35	2160	2680	3330
T-SCED	1.08	1.64	1.97	0.57	1.79	4.88	0.01	0.01	0.02	2260	2620	3670
DT-SCED	0.92	1.49	1.85	0.59	1.81	4.66	0.012	0.014	0.022	2209	2676	3490



شکل (۱۵): نمودار بیشینه جابه‌جایی طبقات ساختمان‌های نمونه همراه با مهاربندهای مرکزگرا



شکل (۱۶): نمودار بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان‌های نمونه همراه با مهارندهای مرکزگرا



شکل (۱۷): نمودار بیشینه جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات ساختمان‌های نمونه همراه با مهارندهای مرکزگرا

نتیجه‌گیری

ساختاری با اعمال تغییراتی در ساختار مهاربند علاوه بر سادگی ساخت، امکان تولید آن در کشور ایران فراهم گردید. ظرفیت نیروی محوری تا ۱۰۰۰ کیلونیوتن افزایش یافت و مصرف کابل نیز ۴۰٪ نسبت به نمونه T-SCED کاهش یافت. درعین حال از کابل‌های جداگانه برای تحمل نیروی کششی و فشاری در مهاربند پیشنهادی استفاده شد. این موضوع سبب کاهش خستگی سیکل‌های نمودار چرخه‌ای مهاربند (DT-SCED) گردید. از لحاظ تحلیلی نیز با ساخت مدل یک‌بعدی مهاربند پیشنهادی در نرم‌افزار OPENSEES نمودار چرخه‌ای تنش کرنش

هدف کلی در این پژوهش معرفی و طراحی یک نمونه مهاربند مرکزگرا با ساختار ساده‌تر نسبت به نمونه‌های پیشین و دارای امکان ساخت در ایران بود. پس از بررسی تمامی مهاربندهای مرکزگرای پیشین نمونه‌ای پیشنهاد گردید که ساختار آن از ترکیب دو نمونه مهاربند معرفی شده توسط ژو و ژانگ در سال ۲۰۰۸ و اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۳ نشأت گرفته بود [8,13]. مهاربند پیشنهادی در این پژوهش نسبت به نمونه‌های پیشین از دو جنبه ساختاری و تحلیلی توسعه یافت. از لحاظ

ساخت در ایران، استفاده از کابل‌های مجزا برای حالت‌های فشاری و کششی مهاربند، خستگی کمتر در کابل‌ها و ایجاد امکان سیکل-های بیشتر بارگذاری دینامیکی، از مزایای مهاربند DT-SCED است؛

۲. عملکرد لرزه‌ای مهاربند DT-SCED به مراتب از مهاربند SCED در ساختمان نمونه بهتر است. در زمین‌لرزه‌های با سطح خطرپذیری MCE مهاربند DT-SCED بر خلاف مهاربند SCED رفتار کاملاً مرکزگرا دارد و جابه‌جایی باقی‌مانده نسبی ساختمان تقریباً نزدیک به صفر است؛

۳. عملکرد لرزه‌ای مهاربند DT-SCED با مهاربند T-SCED تقریباً مشابه است. میزان جابه‌جایی طبقات در ساختمان همراه با مهاربند DT-SCED نسبت به ساختمان همراه با مهاربند T-SCED کمتر است که این موضوع می‌تواند به علت استفاده از کابل‌های مجزا در حالت فشاری و کششی باشد.

پس از بررسی نتایج به دست آمده از مقایسه عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های نمونه با یکدیگر، عملکرد مهاربند مرکزگرایی تلسکوپی دوطرفه DT-SCED بسیار مثبت ارزیابی گردید.

مهاربند محاسبه گردید. در این برنامه با تغییر پارامترهای مهاربند از جمله طول، سطح مقطع اعضای داخلی و خارجی، سطح مقطع و طول کابل‌ها می‌توان نمودار چرخه‌ای مهاربند را ترسیم نمود. همچنین این برنامه می‌تواند در طراحی مهاربند مرکزگرا مورد استفاده قرار گیرد. در گام بعدی نیز برای اطمینان از عملکرد مهاربند پیشنهادی در سازه واقعی، قابی ۶ طبقه مشابه با نمونه‌های مورد بررسی کریستوپولوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ و اروکو و همکاران در سال ۲۰۱۳ طراحی و تحلیل گردید [6,13].

پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش برای تحلیل مودال عبارت بود از میزان پریرود سازه‌ها. در تحلیل استاتیکی غیرخطی میزان شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت، میزان سختی اولیه، ظرفیت نیروی محوری، نیروی فعال شدن مهاربندها و نیروی پیش‌تندگی مهاربند با یکدیگر مقایسه گردیدند. همچنین نتایج مقایسه شده در تحلیل دینامیکی عبارت بودند از: بیشینه شتاب، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینه جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده طبقات و بیشینه برش پایه.

با مقایسه نتایج ساختمان‌های نمونه با یکدیگر، موارد زیر نتیجه‌گیری گردید:

۱. ظرفیت نیروی محوری بالا، استفاده از کابل کمتر در مهاربند، سادگی ساخت متناسب با امکانات

مراجع

1. Nims, D.K., Richter, P.J., & Bachman, R.E., "The Use of the Energy Dissipating Restraint for Seismic Hazard Mitigation". *Earthquake Spectra*, 9(3), 467-489, (1993).
2. Tsopelas, T., Constantinou, M.C., "Experimental and Analytical Study of a System Consisting of Sliding Bearings and Fluid Restoring Force/Damping Devices". Eng., State University of New York at Buffalo, (1994).
3. Filiatrault, A., Tremblay, R., & Kar, R., "Performance Evaluation of Friction Spring Seismic Damper". *J. Struct. Eng.* 126 (4), 491-499, (2000).
4. Christopoulos, C., Filiatrault, A., & Folz, B., "Seismic response of self-centring hysteretic SDOF systems". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 31(5), 1131-1150, (2002).

5. Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C-M., & Folz, B., "Posttensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames". *J. Struct. Eng.* 128(9), 1111-1120, (2002).
6. Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.-J., & Lacerte, M., "Self-Centering Energy Dissipative Bracing System for the Seismic Resistance of Structure: Development and Validation". *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 96-107, (2008).
7. Rojas, P., Ricles, J.M., & Sause, R., "Seismic Performance of Post-tensioned Steel Moment Resisting Frames With Friction Devices". *J. Struct. Eng.* 131 (4), 529-540, (2005).
8. Zhu, S., & Zhang, Y., "Seismic Analysis of Concentrically Braced Frame Systems with SelfCentering Friction Damping Braces". *J.Struct.Eng.* 134(1), 121-131, (2008).
9. Erochko, J., Christopoulos, C., & Tremblay, R., "Design and Testing of an Enhanced-Elongation Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace". *J. Struct. Eng.* 137 (5), 589-599, (2011).
10. Alam, S., Rafiqul Haque, A. "Cyclic Performance of a Piston Based Self-Centering Bracing System", Structures Congress, 1:2360-2372, (2015).
11. Erochko, j.Christopoulos, C., Tremblay, R., "Design, Testing, and Detailed Component Modeling of a High-Capacity Self-Centering Energy-Dissipative Brace", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131:370-381, (2014).
12. ASCE., "Minimum design loads for buildings and other structures". SEI/ASCE standard No. 7-05, ASCE, Reston, Va, (2005).
13. Erochko, J., Christopoulos, C., & Tremblay, R., "Residual Drift Response of SMRFs and BRB Frames in Steel Buildings Designed according to ASCE 7-05". *J. Struct. Eng.* 137 (5), 589-599, (2011).
14. Rosenblueth E, & Meli R., "The 1985 Mexico earthquake: causes and effects in Mexico City". *Concrete International*, 8(5), 23-34, (1986).
15. McCormick, J., Aburano, H., Ikenaga, M., and Nakashima, M., "Permissible Residual Deformation Levels for Building Structures Considering Both Safety and Human Elements". *Proc. 14th World Conf. Earthquake Engng, Beijing, China*. Paper No. 05-06-0071, (2008).
16. Choi, H., Erochko, J., Christopoulos, C., & Tremblay, R., "Comparison of the Seismic Response of Steel Buildings Incorporating Self-Centering Energy-Dissipative Dampers", Toronto: Dept. of Civ. Eng., University of Toronto, ON, (2008).
17. Jeffrey A. Erochko., "Improvements to the Design and Use of Post-Tensioned Self-Centering Energy-Dissipative (SCED) Braces ". Toronto: Dept. of Civ. Eng., University of Toronto, (2013).

4. Individual Record Response and Hystereses

In this study, after analyzing sample frames at all three earthquake risk levels, the behavior of first-storey brace hysteresis was compared. The plots in Figure 3 shows the effect of varying seismic hazard on selected designs.

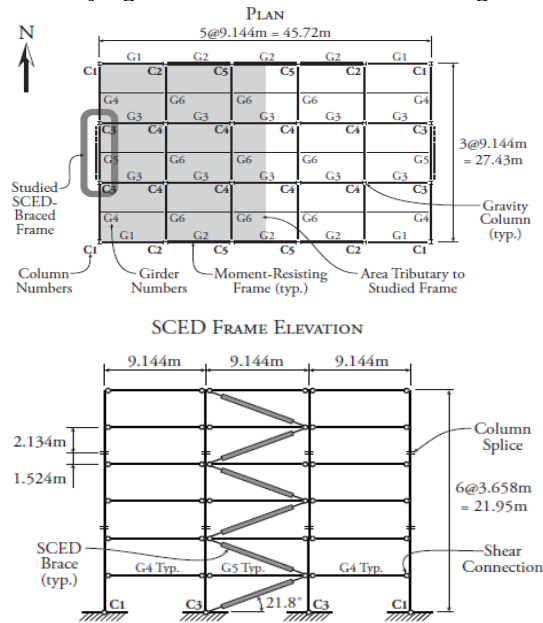


Figure 2. Six-storey SCED building design

(A): At the FOE hazard level, all three braces are flagged. The initial stiffness of all three braces is approximately the same. The area below the SCED chart is higher than the other two. The secondary stiffness of DT-SCED in the tensile state is less than that of the other samples. The residual displacement in the DT-SCED bracket is less than the other two specimens. The reason for this may be the use of shorter and longer separation cables in compression and tension modes. Generally, the seismic performance of the DT-SCED is appropriate at this level of earthquake.

(B): At the DBE hazard level, all three brace also have flagging behavior. The initial stiffness of the DT-SCED is higher than the other two. Also the area below the DT-SCED chart is higher than the other two and the residual displacement in the DT-SCED bracket is less than the other two specimens.

(C): At the MCE hazard level, unlike the two previous hazard levels, the SCED is not fully flagged and the hysteresis behavior of the SCED brace is not Self-Centering. One of the important points presented in this study is the stability of T-SCED and DT-SCED hysteresis behavior in MCE hazard level earthquakes. Other major point is the higher number of cycles of the DT-SCED hysteresis chart than the T-SCED. This stability or fatigue of the hysteresis diagram cycles can be due to the separate cable.

The most desirable performance of Self-Centering braces can be expressed as its ability to create flagging behavior in the building. It is observed that the Residual-

Drift in buildings with T-SCED and DT-SCED braces is close to zero.

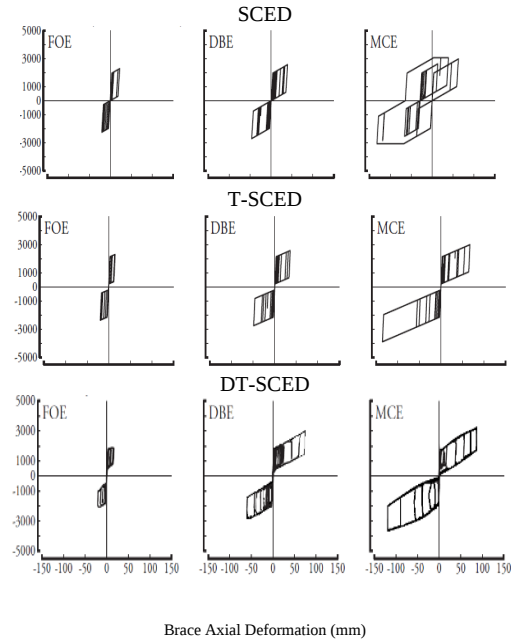


Figure 3. Hysteretic response comparison for first storey brace (MCE Earthquake LA21)

5. Conclusion

In this study, the DT-SCED was introduced. Details of the design and assembly of the brace have been provided in a detailed manner for real dimensions. In this research, after modeling and analyzing the sample frames, their seismic behavior was compared with each other. The performance of the DT-SCED showed superior characteristics. Comparison parameters were: period, initial building stiffness, the post activation stiffness, maximum acceleration (g), peak drift (%), peak residual drift (%) and maximum base shear (kN). Design dimensions of DT-SCED braces are executable and manufactured in Iran. These members were more economical than SCED and T-SCED braces in terms of outer, internal and cabling cross-sectional area. The seismic performance of the DT-SCED brace is far better than the SCED brace in the prototype building. Unlike the SCED brace, in earthquakes with an MCE hazard level the DT-SCED brace behaves completely self-centering and the Residual-DRIFT of the building is approximately zero.

The seismic performance of the DT-SCED brace is similar to the T-SCED brace. DT-SCED brace displacement is lower than the T-SCED brace, which can be due to the use of separate cables in compression and traction modes. As a result, it can be concluded that the use of DT-SCED brace improves the seismic performance of the building. Moreover, due to the ease of construction and assembly of these braces (DT-SCED), they can easily create a self-centering behavior in buildings.

Seismic Behavior of Steel Buildings with Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED)

Mohammad Hossein Baradaran Khalkhali¹ Abbas Karamodin²

1. Introduction

Telescopic Self-Centering braces are of the very successful examples of Self-Centering braces which perform well in seismic loading. In this study, a new example of Telescopic Self-Centering brace is introduced, which has superior features over other telescopic braces. These include: high axial load capacity, use of shorter cables in brace construction, simplicity of construction, use of separate cables for compressive and traction modes, less fatigue in cyclic loads and, allowing for more dynamic loading cycles. In this paper, a sample building with the double telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED) was subjected to 60 earthquakes of different scales and the results are compared with the sample buildings with the Self-Centering Energy-Dissipative Bracing (SCED) and the Telescopic Self-Centering Energy-Dissipative Bracing (T-SCED). The results of the analysis and the comparison with other samples confirm the seismic superiority of performance of the DT-SCED brace over other samples. Comparison parameters were: period, initial building stiffness, post activation stiffness, maximum acceleration (g), peak drift (%), peak residual drift (%) and maximum base shear (kn).

2. Introducing Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED)

After reviewing all previous centrifugal brackets, considering the available material and manufacturing facilities in Iran, a Double Telescoping Self-Centering Energy- dissipative Brace (DT-SCED) was proposed. The previous proposed braces all had several disadvantages, including difficulty in manufacturing, high cost, low energy dissipation, and low axial force capacity. The brace has four series cables, two of which are activated in tension and the other two in compression. Figure 1 schematically shows the brace behavior. The advantage of this type of brace over the previous models is the use of fewer cables and halved fatigue in the cables due to the separate tension and compression cables. Simplicity of construction and ease of installation are other advantages of this brace compared to previous models, which makes it easy to manufacture in Iran. The important parameters of the proposed brace are briefly described as high axial load capacity, use of shorter brace cables, simplicity of construction, use of separate cables for compression and tension modes, less fatigue in cyclic loads and allowing for more dynamic loading cycles.

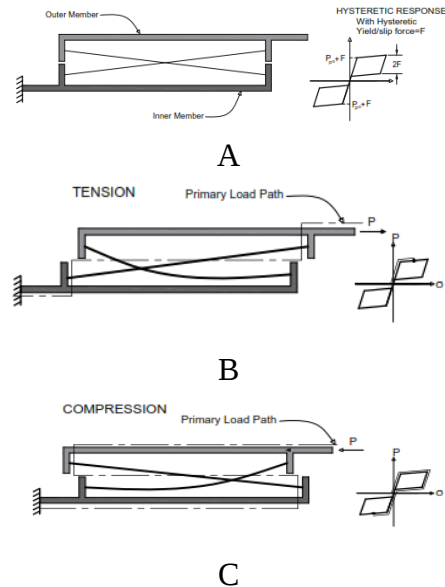


Figure 1. Schematic shape of the DT-SCED: A) no-load mode B) tensile loading C) compressive loading

3. Sample Six-Storey Building Design

In this study, a six-storey prototype frame with a (DT-SCED) was used to investigate seismic behavior in real structures. The results were compared with two other research samples. It should be noted that ASCE7-05 was used to design this structure. This prototype building was designed for normal occupancy on class D soil in downtown Los Angeles, California. The design was done using the modal response spectrum analysis procedure. The SCED braces themselves were designed using the same response modification coefficient $R=7$, overstrength factor $\Omega_0 = 2$, and deflection amplification factor $C_d=5.5$, the same as those prescribed for buckling-restrained braced frames in ASCE 7-05. All columns and beams were steel W-Sections. Concrete floor slabs acted as rigid diaphragms at every storey. The total effective seismic weight of the structure W was 32 100kN. The plan and elevation of the six-storey building are shown in Figure 2. The building lateral force resisting system consisted of SCED-braced frames in the north-south direction and special moment-resisting frames (SMRFs) in the east-west direction. For the current study, only the SCED frame response will be considered, meaning that the SCED frames have been analyzed in 2D and the contribution of the orthogonal SMRFs has been neglected. To model the DT-SCED, the hysteresis diagrams of each storey were calculated in the first step. The amount of lateral force was applied in each storey and the DT-SCED details were calculated according to the maximum axial force.

¹ PhD Candidate, Civil Engineer Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Corresponding Author. Associate Professor, Civil Engineer Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Email: a-karam@um.ac.ir.

wall and the maximum velocity is transferred to the outer wall. This is seen in the transverse velocity profiles in the second and third bends. In general, on the mobile bed, the velocity of the condensate flow increases as the concentration of the incoming flow increases. The important point in the flow rate profiles is that the rate of increase in speed depends on the changes in the form of the bed, as the concentration increases. As the concentration of concentrated flow increases, the shear stress of the bed increases. In the context of the mobile bed conditions, the particles of the active agent act as a resistive force against the inflow current. Regarding the results in the context of mobile bed conditions, concentration generally increased due to increased flow velocity, and increased flow power has also been shown to change the bed roughness.

4. Conclusion

Generally, with increasing concentrations, the shear stress of the substrate increased and the bottom of the substrate, the roughness and shear stress begin to decrease as well. Increasing the speed and formation of bed forms increases the roughness and flow resistance of the substrate, so that the substrate particles act as a force against the inflow current. With regard to the results in the context of mobile bed conditions, concentration generally increased due to increased flow velocity, and increased flow power has also been shown to change the bed roughness, and the importance of generating a bed form for creating resistance to flow. Because at the beginning of the current flow, the bed form is not yet formed, and the agent of the resistivity and roughness of the bed is negligible, and as a result, there is no resistance and decrease effect against the forehead velocity. Results of experiments on the mobile bed showed that by increasing the concentration of the incoming flow, the flow velocity of the fluid is also increases. The important point in the flow rate profiles is that the rate of increase in velocity depends on changes in the form of the bed due to the increase in concentration. By increasing concentrations of turbidity flow, the shear stress of the bed increased. When the bed form is generated, as a result showed in experiment with 25g / l concentration, the rate of velocity increase, by increasing, shear stress decreased (from 34% to 15%). Therefore, the rate of velocity will increase by removing the bed forms and reducing the roughness and shear stress of the bed.

Investigation of Velocity and Concentration Profiles of Turbidity Flow in River Bends

Marzieh Mohammadi¹

Mehdi Ghomeshi²

1. Introduction

Basically, a turbidity or dense flow is a two-phase flow that occurs due to the movement of a fluid in a different fluid with a different density, occurring in many natural environments and engineering applications. The turbidity flow in mobile bed conditions consists of three regions: clear water of the perimeter, cloudy water, and sediments (bed loads). The complex interaction of cloudy flow with two other regions makes it difficult to analyze these flows. It can be noted that there are cases such as the effect of floating force, the interaction of particles with the current and the turbulences in the common surface of the environmental fluid with the currents flow. Since in reservoirs of dams, the roughness of the bed changes with the formation of a thick stream, its effect on the flow characteristic is of great importance. In the context of a mobile bed, increasing the velocity or power of the current in the surface area create different bed forms. On the other hand, in analyzing the flow profiles of a fluid in a mobile bed, it is important that the flow resistance consists of two parts: the first part of the roughness due to the particle size and the second part of the roughness is due to the shape of the bed. Some have described gravel bed forms emplaced by the bed-load component of turbidity currents flowing in a confined channel in the Cerro Toro formation of southern Chile. At field scale, some others have measured vertical velocity profiles within the Monterey Submarine Canyon. In the laboratory, previous experimental studies have documented the vertical structure of the body of gravity flows. Only some studies have been performed over mobile beds, and even when bed forms developed, their influence on the flow was not evaluated. Bed forms have feedback mechanisms and, in turn, affect the flows that originally created them.

2. Experimental Program

This research was carried out at the Laboratory of Physical and Hydraulic Models of the Faculty of water Sciences Engineering of Shahid Chamran University of Ahwaz. To conduct the experiments, this study has a flume length of 8.5m, depth of 70cm, width 20cm and slope of the 0.001, including three consecutive 90° curves with a curvature radius of 40, 80 and 120 cm (Figure 1). The experiments were carried out in the form of saline flow and at four concentrations of 0.7, 1, 1.5 and 2 liters per second at concentrations of 10, 15, 20 and 25 grams

per liter. In order to provide a mobile bed in the flume floor, due to the special conditions of the currents (very low velocity in small laboratory flumes), comprehensive research has to be carried out on the material characteristics and their use as corrosive substrate materials. Moreover, the tests for this purpose are designed and implemented. The most important points in choosing these materials are, type of materials, specific gravity, density, ease of use. The most important feature for substrate sediments is density Particles, which make it very difficult because of the low velocities of the thick streams for the movement of these sediments, and especially the formation of bed forms, so for particles with a low specific density (in the study of Sequeiros, particles with density Specially for 1.53, and in the Rutlox research) particles with a specific density of 1.06 were used. Thus, going through above steps and attempts and errors with very different materials, deposits of polymer (expanded polystyrene) were used.

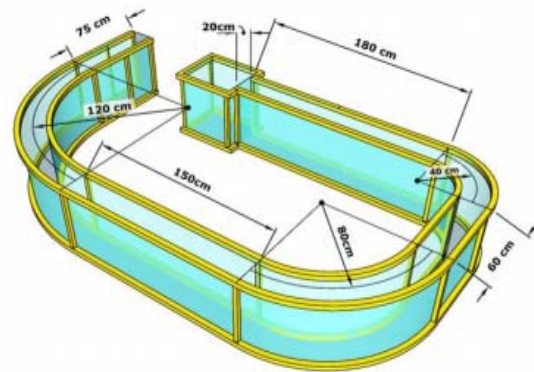


Figure 1. A schematic picture of experimental flume

3. Results and Discussion

The results showed that at all concentrations in the first bend and cross section the maximum flow velocity was at the maximum in the inner wall. With the flow into the bend due to the sudden change in the curvature and the effect of centrifugal force along the internal wall, the pressure drops and along the outer wall increases the pressure. The shear stress variations were also based on changes in the velocity profile, in other words, the greatest tension occurred in the inner wall of the bend, and then it was drawn to the outer wall of the bend. In the context of mobile bed conditions, generally increasing concentrations and thus increasing the flow velocity, the flow power also increased and the bed roughness changed to the extent that, by washing the form of the substrate, the roughness and shear stress begin to decrease. In concentrated stream, the secondary flow results in the maximum velocity approaching to the outer

¹ Corresponding Author. PhD Candidate in Hydraulic Structure, Shahid Chamran Ahvaz University.

Email: mohamadi_200035@yahoo.com

² Professor in Hydraulic Structure, Shahid Chamran Ahvaz University.

solid and better transmit the stresses between the grains. The cementation caused by chemical reactions also increased the hardness and resistance of the mixture. Due to the greater impact of lime particles at the nanoscale on the intensity of chemical reactions, the increase in shear strength of the soil-nano-lime mixture was greater than that of the soil-lime mixture.

5. Discussion

An increase in the percentage of additives (i.e., lime and nano-lime) leads to a linear increase in the maximum dry unitweight and the percentage of optimum moisture. However, the impact of calcium carbonate with nanoparticles is greater than the one with natural size, and the slope of the line related to the soil stabilized by the nano-lime is greater.

By adding 3% of nano-lime to the sandy soil, the maximum dry unitweight increases by about 4% compared to the state without additives. However, the increase in this parameter in the mixture of soil stabilized with 3% lime is approximately 1.3%. This suggests that adding calcium carbonate at the nanoscale speeds up and intensifies the hydration processes, thereby increases the efficiency of soil compaction operations.

The addition of lime and nano-lime significantly affects the optimum water content of the mixture. The percentage increase in optimummoisture content when using 3% lime and nano-lime is 4.8% and 26.9% respectively. The slope of the percentage change in the optimum water content in the sand-nano-lime mixture is about 1.9 times the slope of the changes in the sand-lime mixture.

Chemical reactions, including cementation and pozzolanic reactions, due to the presence of calcium carbonate, cause the adhesion of certain grains and thus form larger grains with rougher and angular surfaces. As a result, the friction angle increases. By adding calcium carbonate to the soil, hydrated silicate cement gels are formed as a result of chemical processes. These cement gels penetrate between the soil pores and increase the cohesion between soil particles. On the other hand, due to the presence of very fine particles in the nano-lime, the pH of the soil increases and the pozzolanic reaction rate increases, which means that the addition of nano-lime increases the shear strength of the soil more than adding lime.

6. Conclusion

Some of the most important conclusions of this study are:

1. The improvement of Chaluscoastal sand by the lime and nano-lime stabilization method improves the compaction properties (increase in dry unit weight) and the shear strength parameters (increase in internal friction angle and cohesion) of the soil.
2. By adding 3% lime and nano-lime to the sandy soil, the values of dry unitweight increases by approximately 1.3% and 4%, respectively, compared to the state without additives. This indicates a greater impact of nano-lime in accelerating and intensifying hydration processes and therefore increasing the

efficiency of soil compaction process. It should be noted that to obtain the maximum unitweight, more water is needed in the stabilized soils. For example, the optimummoisture content increases by 27% when adding 3% nano-lime.

3. Chemical reactions such as hydration, cementation, and pozzolanic reactions cause the agglomeration process, resulting in the formation of larger grains with rougher and more angular surfaces than the original soil. For this reason, the internal friction angle of the stabilized sand increases.
4. The main reason for the increase in soil shear strength due to stabilization with lime and nano-lime is the increase in the cohesion of soil particles. Hydrated silicate cement gels penetrate into the soil pores and increase the cohesion between soil particles.

Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chalus Coastal Sand

Reza Rezvani¹ Milad Azizi² Pejman Nopars³

Ali Nabizadeh⁴

1. Introduction

Iran contains problematic soil including soft soil, expansive soil, collapsible soil, and soils with low bearing capacity or high sensitivity to moisture changes. Lime or cement can be added into the problematic soil to form lime or cement-stabilized soil which is one of the methods of soil improvement.

In addition to traditional methods of soil stabilization, interest in the use of chemical additives at the nanoscale has increased considerably in recent years among geotechnical researchers.

Nanomaterials describe materials whose size is less than 100 nanometer. Nanoscale particles exhibit very different behaviors, compared to larger particles.

Various studies have been conducted to evaluate the effect of different additives on the mechanical and engineering behavior of soil deposits.

The results of previous studies have shown that the addition of lime caused an increase in shear strength of gravel sand. The addition of 4.5% lime increased the cohesion of the soil by about 10 times and the friction angle by about 1.1 times. The strength of soil increased by 3.5 times after 1000 days by adding 33% of nano-SiO₂. The effects of nano-SiO₂ on mechanical behavior of soil-cement mixtures revealed a 100% increase in compressive strength by adding 30% nanomaterials.

Some studies have focused on clay soils and have shown that the Atterberg limits increase by increasing nanoparticles.

It can be concluded from previous studies that adding chemical additives at the nanoscale has a more significant effect on mechanical behavior of soil materials.

The effect of calcium carbonate (i.e., lime) and nano-calcium carbonate (i.e., nano-lime) on the mechanical properties of the Chalus coastal sand is evaluated in this study. The mixtures were prepared with different percentages of lime and nano-lime. Compaction and strength tests were performed on the mixtures.

2. Materials

The soil of the Caspian Sea is used in this study. For this purpose, the soil was obtained from the coasts of Chalus city in the north of Iran. To evaluate the physical properties of the soil, various index tests were carried out.

The results showed that Chalus sand can be classified in poorly-graded soil.

Table 1 shows the physical properties of nano-calcium carbonate (i.e., nano-lime) used in this study.

Table 1. Physical properties of nano-lime

Property	Value
Average particle size (nm)	60
Specific surface (cm ² /gr)	60-80
Melting point (°C)	825
Purity (%)	99
pH	8-10.5

3. Sample preparation

To evaluate the effect of lime and nano-lime on compaction and shear strength behavior, Chalus sand was mixed with different percentages of additives, including 1, 2, 3, 6 and 9%. The mixtures were tested by standard proctor and direct shear tests. It should be noted that the dry deposition method was used for sample preparation in this study. To better compare the results of the direct shear tests, the initial conditions for all natural and stabilized soil samples were constant.

4. Results

To evaluate the compaction behavior of soil stabilized by lime and nano-lime, standard proctor tests were carried out on specimens with and without additives. The results showed that, firstly, increase in the water content led to an increase in the dry unit weight of the mixtures. After that, the dry density of the soil-additive mixture decreased by increasing the moisture content. This trend has been observed in soil stabilized by both lime and nano-lime.

As the lime and nano-lime particles were smaller than Chalus sand particles, the inter-particle voids in the sandy soil were filled with additive particles. As a result, the dry unit weight has been increased by increasing the amount of additives.

The specific surface of soil-lime and soil-nano-lime mixtures is increased by increasing the percentage of additives in the mixtures. A higher water content is required for the particle movement in the compaction process. The results showed that a higher water content (w) was necessary in samples with a higher lime or nano-lime content.

The evaluation of the shear parameters of the soil mixtures, including the internal friction angle and cohesion, was carried out by direct shear tests. Based on the results of this study, the improvement of the sandy soil by lime and nano-lime resulted in an increase in shear strength.

The presence of fine particles of lime and nano-lime between the pores of the sand makes the mixture more

¹ Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Eastern Guilan, University of Guilan. Email: rezvani@guilan.ac.ir.

² MSc. in Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, Tonekabon Branch.

³ MSc. in Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, Tonekabon Branch.

⁴ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University.

Table 1. Estimation of the failure probability in the first limit state function

@Risk software	RT software					Support Pressure
MCS	MCS	SORM		FORM		
P_f (%)	P_f (%)	P_f (%)	β	P_f (%)	β	
24	23.79	25.77	0.65	24.19	0.7	0
0	0.06	0.06	4	0.06	3.2	0.3
0	0	4.7×10^{-14}	7.45	4.7×10^{-14}	7.45	0.8

Table 2. Estimation of the probability of failure in the second tunnel

@RISK		SORM (RT)		Type of Method
$G_2(X)$	$G_1(X)$	$G_2(X)$	$G_1(X)$	
4.1	4.9	3.5	4.5	(%)Pf

The results of sensitivity analysis on variables showed that the deformation modulus (in all analyzes) has a very high importance and in the analysis in terms of importance and impact has the

first priority. Moreover, the results showed that the reliability index is highly dependent on the support pressure. The tunnels under study have a high probability of failure without support.

Stability Analysis of a Tunnel in Hydrostatic Conditions Using Different Reliability Methods in @Risk and RT Software

Hadi Fattahi¹

Fateme Jiryaee²

1. Introduction

Drilling underground spaces disturbs the balance of stresses in the excavated environment and creates a plastic zone with the potential for degradation around this space. Accordingly, it is necessary to analyze the stresses and study the radius of the plastic area and predict the support for it. Changes in soil properties, that is, the uncertainty of its parameters cause errors in deterministic analyses. In order to consider the uncertainty in engineering analysis, probabilistic methods and reliability are presented. In these methods, the parameter that is finally obtained using different numerical and simulation methods is the probability of failure.

In this research, using Hooke-Brown and Mohr Columbus relations, a method is presented for analyzing the stability of two tunnels (in different conditions) using powerful reliability methods including first-order reliability method, second-order reliability method and the Monte Carlo Simulation in new RT and @Risk software.

2. Reliability assessment methods

Given the complexity of calculating integrals in relation to the probability of failure, researchers have sought to find ways to approximate reliability. This defines a function called the limit state function that expresses system performance as failure or success. This function may be linear or nonlinear. In the first-order method, depending on the nonlinearity of the function, the failure probability calculations are erroneous. The function is estimated with a page or cloud page. When the limit state function has a large curvature, the linear approximation reduces the accuracy of the calculations. In nonlinear functions, the second-order method approaches a correct answer with the help of a quadratic approximation. This method is in fact an evolution of the first-order method. In addition to analytical methods, Monte Carlo simulations estimate the probability of failure. Monte Carlo simulation is random sampling to artificially simulate a large number of tests and observe their results

in the analysis of the reliability of structures in the simplest form.

3. Analysis and results

In this section, the results obtained from the reliability analysis related to the stability of the two tunnels are presented. The first tunnel is a circular one drilled in a homogeneous, isotropic, and elastic space and is subject to a hydrostatic stress field and uniform internal support pressure (P_i). The stability analysis of this tunnel is

examined in three types of P_i conditions, which include the values of 0, 0.3, and 0.8 MPa, and in each study, its value is deterministic entered in the relations. In addition, other deterministic variables are the $P_0 = 2.5$, Poisson's ratio $\nu = 0.3$ and the tunnel radius r_0 . Moreover, random variables are cohesion, friction angle, and deformation modulus.

Analyses for each tunnel have been performed in two types of limit state functions and three reliability methods, which show that in different values of P_i , different values of failure probability are obtained.

The second tunnel, like the first tunnel, is a circular tunnel that is drilled in a homogeneous, isotropic, and elastic space and is subjected to hydrostatic stress field and uniform support pressure. Its deterministic variables are the same as the first tunnel, but the support pressure is considered as a random variable.

4. Conclusion

Studies have shown that in the case of the first limit state function in the large probability of failure (in the first tunnel with zero support pressure), the first-order reliability method and the Monte Carlo simulation act almost similarly. On the other hand, in the case of very small probability of failure, all three output methods are close to each other. Monte Carlo simulation, however, at very small probability values and very high accuracy, requires the production of large amounts of random data and the simulation of each of them has a high computational cost. In this regard, its use in these conditions is not recommended.

¹. Corresponding Author: Associate Professor in Rock Mechanics Engineering, Department of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.
Email: H.fattahi@araut.ac.ir

². MSc. Student, Department of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

proposed model. According to the SWOT MATRIX analysis, if the total point of questionnaire's factors (sum of factor's score) is equal or greater than 2.5 point, the questionnaire subject has a suitable status in considered projects. This point is calculated by multiplying the weighting factors. Finally, the point of questionnaire will be obtained by adding the factor's point. If the questionnaire obtains the least point (2.5), the answer of proposed performance function will be equal to 20;

$$SF_{all} = h \times H + s \times S + ss \times SS + f \times F + p \times P + e \times E + w \times W + c \times C = 20 \quad (2)$$

As a result, the HSE condition of project obtains by comparing its SF with SF_{all} . In this way for increasing the sample data, the Monte Carlo simulation procedure is used. This procedure can simulate the project condition and consider the possible events.

4. Conclusion

In this study, a new performance function for evaluating health, safety and environment (HSE) subjects in construction projects is proposed. This process is carried out by designing questionnaires based on nine categories. First, the designed questionnaire was distributed between construction experts. To evaluate the questionnaire, the SOWT matrix procedure is used. To increase the sample data of construction projects, the Monte Carlo simulation procedure was used. the evaluation the HSE subject in construction projects was done by generating 100'000 samples for each questionnaire.

For rating and comparing the designed questionnaires and evaluating the HSE subjects in construction projects, the simulation process performed two times. First, only one questionnaire (parameter) was considered as a variable value in each process of simulation. Then, all questionnaires (parameters) were simulated in the proposed performance function.

Figure 1 shows the probability of occurrence for each parameter in tall buildings.

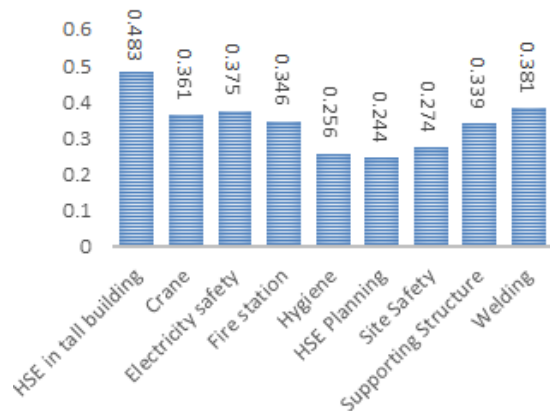


Figure 1. The probability of occurrence for different parameter in tall buildings

According to the Figure 1, the HSE planning and welding parameters have the lowest and highest risk in tall building construction projects, respectively. Also, the risk of the HSE subject in tall building projects is about 50%.

Finally, the proposed performance function can be used for evaluating the HSE issue in different construction projects. In this way, the important parameters must be identified, and then similar process, described here, can be performed.

A New Approach for the Evaluation of Workshops of Tall Buildings in Mashhad using HSE Approach (Case Study: Construction Projects)

Pouria Ildarabadi¹ Amirreza Mehrdoust²
Javad Alamatian,³

1. Introduction

New technologies and the growth of construction industry have increased the probability of accidents and errors in the manufacturing process. Therefore, the protection of human resources, equipment and environment are priorities of the construction industry. For evaluating the health (H), safety (S), and environment (E) concerns in construction projects, HSE method is used. This is a systematic procedure which is used for protection of capital, work force and environmental towards the risks arise from unpredictable events in construction projects. The HSE method is concerned with preserving and protecting human resources in the workplace. In other words, the HSE method is a professional attempt to prevent catastrophic losses. There are several methods to evaluate the health, safety, and environment of construction site. These methods use questionnaire to collect data. Questionnaires are categorized into several parts including safety legislation, industrial hygiene, workplace violence, hazardous materials, safety management, falling danger, etc. Also, there are several approaches to evaluate questionnaires such as SPSS, MATRIX analysis, SWOT matrix, and other simulation methods like Monte Carlo and Fuzzy techniques.

Considering and evaluating the health, safety and environmental subjects in construction projects are the goal of this paper. To achieve this purpose, HSE method is used for evaluating construction projects in Mashhad city. In this way, the HSE factors are identified. Eight questionnaires were designed based on HSE planning, site safety, welding, supporting structure, fire station, electricity safety, hygiene, and crane. Then, according to the questionnaires a performance function is proposed.

2. Data Collection and Analysis

To evaluate HSE in high building construction project of Mashhad, a questionnaire was designed. The necessary data was collected according to the HSE experts, project managers and supervisors of workshops comments. Then, the evaluation of questionnaires and validation of proposed performance function were carried out by SWOT matrix and Monte Carlo simulation. The name of projects, commentator, and employment history of commentators are given in table 1.

Table 1. Name of projects, commentator and employment history

Project name	Commentator	Employment history (year)
Eleman tower	Project manager	17
Yas Residential tower (Ershad Blvd)	HSE Expert	10
	Professional health expert	12
Armitazh tower	Architectural supervisor	12
	HSE supervisor	10
Yas residential and commercial tower (Janbaz Blvd)	Site manager	15
	Site manager	12
	HSE Expert	10
	HSE Expert	10

According to Table 1, number of available data is very limited. Therefore, to increase sample data, the Monte Carlo simulation procedure was used. Monte Carlo simulation is utilized to generate the sample data based on the real data properties such as mean, standard deviation, and probability density function. Therefore, the generated data have suitable validity and accuracy. Moreover, for evaluating the questionnaires, SWOT matrix method was used. This method can classify and compare different factors with assigning scores. The assigned score arises from the probability of occurrence of factors in projects. Finally, the proposed performance function runs based on the assigned score.

3. Proposed Performance Function and Numerical Results

In order to evaluate the health, safety and environment (HSE) in construction project a new model is proposed. The proposed model is defined as follows:

$$SF=h \times H+s \times S+ss \times SS+f \times F+p \times P+e \times E+w \times W+c \times C \quad (1)$$

where h, s, ss, f, p, e, w and c are weighting coefficients of hygiene, site safety, support structure, fire station, HSE planning, electricity safety, welding and crane, respectively. These coefficients are considered to increase the model efficiency and accuracy. The introduced coefficients are based on the percent of importance of designed questionnaires.

It should be mentioned that values of these coefficients are between 0 and 100. The sum of all the weights must equal to 1. Therefore, the coefficients of the factors depend on how they are done in the project. Also, factors of each questionnaire are assigned by rate 1 to 4 according to their importance in project.

SWOT MATRIX procedure is used for evaluating the

¹ PhD Candidate, Civil Engineering, Department, Islamic Azad University, Taft Branch, Taft, Iran.

² Msc, Civil Engineering, Department, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.

³Corresponding Author: Associate Professor, Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Mashhad, Iran. Email: alamatian@mshdiau.ac.ir.

density of 2680 kg/m³ with critical shields number of 0.031 and drag coefficient of 0.5. A mesh block of 360000 cells was fitted to the model geometry.

To increase the model accuracy around the pier, two mesh planes with finer resolutions were defined for both sides of the pier in x and y directions, separately. Also, two solid components were settled at the outer sides of the geometry (both for beginning and end parts of the channel) to prepare an inflow bottom at the top edge of the sediment (elevation of 0.2 m) in order to prevent against upward movement of sediments in the beginning of simulations. Boundary conditions were volume flow rate at the inlet, outflow at the outlet, wall on the bottom, right and left sides, and symmetry on the top of the block.

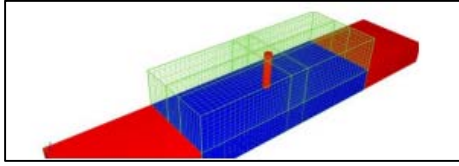


Figure 1. Meshing structure of the model for simulation of scouring

3. Results and Discussion

The proposed models are classified into four general groups. The first group (A) consist of different geometric sections (circular, round-nosed rectangular, elliptical, and lenticular), to determine the effect of flow separation and lee-wake vortices. For the second group (B series), four different levels of berms in circular geometry (i.e., 5, 6, 7, and 8 cm from the bed level) have been considered in the circular cylindrical pier to evaluate the appropriate level of the berm in controlling the down-flow at upstream of the pier. In the related literatures, several values have been suggested for the pier berm height. In the third group (C series), a new combination of the two most effective countermeasures (i.e., berm and geometry) was used. In the fourth group, combination of berm, geometry, and centered slot is considered (D series). The slot with a length of two times the berm diameter (i.e., 12 cm) is located near bed and extended into the depth of the sand recess (i.e., 5 cm above the bed and 7 cm under the bed).

The clear-water maximum scour depth at the equilibrium state for a single unprotected circular pier under the steady and uniform flow condition is located in front of the pier. In the presence of a countermeasure, the maximum scour depth occurs at the pier front. Therefore, the efficiency of the countermeasure (r_{de}) is defined in terms of the reduction of the equilibrium maximum scour depth observed in proximity to the pier as:

$$r_{de}(\%) = \frac{d_{s0} - d_s}{d_{s0}} \times 100 \quad (1)$$

where d_{s0} and d_s are the equilibrium maximum scour depth in front of the unprotected and protected piers, respectively.

The lenticular-shaped pier had the most effect on flow pattern, therefore, minimum scouring depth achieved by this model. This pier was streamlined and no flow separation was observed at its sides. The elliptical-shaped model considered as a streamlined form pier and had a relatively similar scouring process to the lenticular model. In Group B, the results showed that although the gibbosity of the berm prevented the down-flow to hit the bed, the intensified flow separation due to the increased diameter affects the efficiency of the berm. An appropriate value for the height of the berm may be considered quarter to third of water depth.

4. Conclusion

According to the results obtained in this study, it was concluded that Flow-3D is a capable model for simulation of different flow attributes (velocity and scouring depth) with/without the presence of an obstacle (like bridge pier) at different dimensions of 1D, 2D and 3D. But it has some constraints for simulation of sedimentation/scouring processes.

Numerical simulation of scouring around 10 combined model piers in clear-water condition was conducted. Identifying the effect of new proposed countermeasures on local scouring variation around non-uniform bridge piers with special attention to the two effective parameters of scouring, flow separation and down-flow, is considered. The model piers were categorized into four groups and the achieved results can be summarized as follows:

1. In A series models, the lenticular cross-section has the minimum scouring depth.
2. For B series models, an appropriate value for the berm height may be considered quarter to third times of the water depth. So, the results of A and B series reveal that the scour depth is more affected by the pier cross-section rather than the berm.
3. Combination of the berm and different cross-sections shows that adding a berm to models having various cross-sections may not be an effective tool against scouring.
4. A combination of the berm, cross-section, and a centered slot shows that intensification of bed erosion around the edges of the slot can be regarded as the main disadvantage of the slot when applied to the circular pier.

Three Dimensional Simulation of Vortex Shedding Phenomenon and Sediment Transport around Obstacles Subjected to Flow using Flow3D

Nazila Kardan¹

Habib Hakimzadeh²

Yousef Hassanzadeh³

1. Introduction

Scour or the removal of material from the bed and banks of streams and near the piers and abutments, always occurs due to flow acceleration, turbulence and erosive action of flowing water. This process is affected by a large number of variables, mainly, the flow, fluid, pier, and sediment characteristics. It can be divided into three main forms of general scour, contraction scour, and local scour. However, general scour (or evolution of the waterway) occurs naturally in river channels by aggradation and degradation of the river bed.

A change in the river hydraulic parameters is known as the major cause for this type of scouring. Contraction scour occurs by reduction of channel's cross-sectional area at the location of water structures (like bridge piers and abutments) that increases the flow velocity and bed shear stresses, and the transport of the bed sediments. Local scour is the third type of scouring that occurs in the vicinity of bridge piers or abutments. In such a scouring, downward flow is induced at the upstream end of the pier and leads to a localized erosion around the pier. It depends on the balance between streambed erosion and sediment deposition.

Based on this fact and the mode of sediment transport in the approaching flow, two types of local scour can be distinguished: clear water scour and live bed scour. In clear water scour, no sediments are delivered by the river approaching flow, while an interaction exists between sediment transport and the live bed scour process. Local type of scour has long been acknowledged as the major cause of the bridge failures around the world, causing major human and financial losses.

Monitoring local scour is a way to avoid major damages that may occur and to ensure the continued safe operation of the structure. Most of traditional monitoring techniques are based on installation of expensive underwater devices that may be damaged during a flooding event, when the highest risk of scouring exists. In such circumstances, computerized simulation of the scour occurrence can be introduced as a low cost/time consuming alternative for the prediction of the probable failures. The application of simulation software is in many ways similar to the set-up of an experiment, in which Computational Fluid Dynamics (CFD) methods

are always used for the simulation of flow process by discretization and solving of Navier-Stokes and continuity equations for the computational cells. Flow-3D is CFD software that employs numerical techniques to solve the fluid motion equations to obtain transient, three dimensional solutions to multi-scale, and multi-physics flow problems. An array of physical and numerical options allows users to apply Flow-3D to a wide variety of fluid flows and heat transfer phenomena. This software is used widely for solving different hydraulic problems.

The results showed that the maximum shear stress occurred when the foundation level was at bed level and the maximum shear stress exerted on the bed decreased by factors of 17% and 53% in the cases of foundation level to be below and above bed levels, respectively. In addition, the amount of vortex flows increased in upstream piers group and near bed in the case of setting the foundation above the bed. This is because of the fact that the volume of piers group acting as an obstacle against flow was more than other level settings. In a study, experimental results were compared with numerical simulation of bed shear stress around bridge abutment in a compound channel by Flow-3D model. In this study, scour simulation around different pier models will be further discussed. The main purpose of this study is to evaluate the effect of two key factors causing local scouring, flow separation, and downward flow in upstream of the pier, on maximum value scouring around 10 defined pier models. The countermeasures that considered in this regard include berm, cross-section, and middle slot.

2. Materials and Methods

Flow-3D uses the Volume of Fluid (VOF) method to track fluid-fluid or fluid-sediment interfaces for solving the nonlinear Navier-Stokes equations in a three dimensional space. Also, Fractional Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR) method is used to illustrate the complex boundaries of the solution domain. Flow-3D also allows for several turbulence closure schemes to be incorporated and tested. These closure schemes include simple eddy viscosity, one-dimensional Prandtl mixing length, two-equation k- ϵ , large-eddy, and four-equation ReNormalized Group (RNG) models. The 3D-CFD model implemented in Flow-3D represents a conventional channel with 0.456 m-wide rectangular inlet with the length of 6.0 m. A vertical cylindrical pier with the diameter of 0.051 m and height of 0.5 m was inserted in the center of the channel as a solid standard component. A packed sediment type component was used for the channel bottom with dimensions of 2.0, 0.456, and 0.2 m for length, width and height, respectively. Particle size diameter was 0.358 mm with a

¹ Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir

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

³ Professor, Department of Water Engineering, Center of Excellence in Hydroinformatics, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

CONTENTS

Three Dimensional Simulation of Vortex Shedding Phenomenon and Sediment Transport around Obstacles subjected to flow, Using Flow3D	N. kardan - H. Hakimzadeh - Y. Hassanzadeh	1
A New Approach for Evaluation of Workshops of Tall Buildings in Mashhad by HSE Approach (case study: construction projects)	P. Ildarabadi - A. Mehrdoust - J. Alamatian	21
Stability Analysis of a Tunnel in Hydrostatic Conditions Using Different Reliability Methods in @Risk and RT Software	Hadi Fattahi -Fateme Jiryae	39
Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand	R. Rezvani - M. Azizi - P. Nopars A. Nabizadeh	55
Investigation of Velocity and Concentration Profiles of Turbidity Flow in River Bends	M. Mohammadi - M. Ghomeshi	77
Seismic Response of Multistory Buildings with Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED)	M. H. Baradaran Khalkhali - A. Karamodin	89



**Ferdowsi University
of Mashhad**

Journal of Ferdowsi Civil Engineering

(Journal of School of Engineering)

Serial No. 30

ISSN 2008-7454

- | | |
|---|-----------|
| Three Dimensional Simulation of Vortex Shedding Phenomenon and Sediment Transport around Obstacles subjected to flow, Using Flow3D | 1 |
| N. kardan - H. Hakimzadeh - Y. Hassanzadeh | |
| A New Approach for Evaluation of Workshops of Tall Buildings in Mashhad by HSE Approach (case study: construction projects) | 21 |
| P. Ildarabadi - A. Mehrdoust - J. Alamatian | |
| Stability Analysis of a Tunnel in Hydrostatic Conditions Using Different Reliability Methods in @Risk and RT Software | 39 |
| Hadi Fattahi - Fateme Jiryae | |
| Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand | 55 |
| R. Rezvani - M. Azizi - P. Nopars - A. Nabizadeh | |
| Investigation of Velocity and Concentration Profiles of Turbidity Flow in River Bends | 77 |
| M. Mohammadi - M. Ghomeshi | |
| Seismic Response of Multistory Buildings with Double Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace (DT-SCED) | 89 |
| M .H. Baradaran Khalkhali - A. Karamodin | |

**Vol. 33, No. 2
Summer, 2020**