



# نشریه مهندسی عمران فردوسی

(نشریه دانشکده مهندسی)

## فصلنامه (علمی - پژوهشی)

- ۱ بروزی عملکرد سیستم فتوولیز در حذف هیدروروکربن-های نفتی از  
فاضلاب و مدل سازی آن  
محمدقاسم رحیمی - احمد خدادادی - بینا آینی
- ۹ مطالعه عددی آب شستگی جت ریزشی آزاد  
خسرو حسینی - حامد نویسنده - حجت کرمی - سید امین سلامتیان
- ۲۳ ارتقای کارایی شناسایی پارامترهای فیزیکی سازه با استفاده از کاهش تیغه‌گی  
مانوس‌های پاسخ در حل مکانیزم معاللات حرکت  
مجید قاسمی - بابک نقوی - سید عباس بنده
- ۴۹ توسعه یک مدل تحلیلی تغییر مکان کنترل برای رفتار چرخ‌های سازده‌ها  
در نظر معرفتن اثرات پاریکشندگی، کاهش مقاومت و لغزش  
مهران زینلیان - مهدی مختاری
- ۵۷ مدل سازی آزمایشگاهی سلول‌های گلیل در سازده‌های شناور سیار پیز-گک  
علی پریزاده قوشخانه - محمد جواد خانجانی
- ۷۷ بهبود روش انتقال پایدار بهمنظور کنترل هم‌کاری دویبه اندازه‌گیری  
عملکرد سازده‌ها  
پهلوی کشته کر
- ۹۱ ارزیابی کارایی روش پیش‌بینی موضعی ناشی از بازسازی فضای فاز و مدل  
شبکه عصبی منتهی به منظور پیش‌بینی روابط  
(مورد مطالعاتی: ایستگاه ببل تهرن، کرامات‌آباد)  
محمد ذوق‌معتمد کرامانی - خاطره امیر خانی
- ۱۰۹ پیش-بینی مقاومت نهایی تیبوروق‌های تحت اثر بار موضعی به کمک  
مانعین پرداز پیش‌بینی (SVM) (پاداصل پژوهشی)  
علیرضا کردجزی - فریدون پوریا نژاد - فرزاد شهریان
- ۱۲۵ پیش-بینی مقاومت شاری بدن‌های حاوی میکروسیلیس و پلیمر استایرن  
بوتاون به وسیله مدل ریاضی (پاداصل پژوهشی)  
علیاصحق الله‌ی - امیر طریقت - محمد شفیعی زاده

شماره پیاپی ۱۶



# نشریه مهندسی عمران فردوسی

ISSN : 2008-7454

علمی-پژوهشی

سردییر : محمدرضا اصفهانی  
مدیر مسؤول: فریدون ایرانی  
صاحب امتیاز : دانشگاه فردوسی مشهد

## هیأت تحریریه :

استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران	دکتر مجتبی ازهري
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر محمدرضا اصفهانی
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر فریدون ایرانی
دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر جعفر بلوری باز
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر سید محمود حسینی
استاد، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی عمران	دکتر علی خیرالدین
دانشیار، دانشگاه امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران	دکتر عباس سروش
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر فرزاد شهابیان مقدم
استاد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی دانشکده مهندسی عمران	دکتر رضا عطار نژاد
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر محمد غفوری
استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر محمود فغور مغربی
استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران	دکتر غلامرضا قدرتی امیری
استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران	دکتر داود مستوفی نژاد
دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران	دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا

ویراستار ادبی : الهام دهقان  
مسؤول دفتر نشریه : تکتم هوشمند

ویرایش و صفحه آرایی : سید عاطفه نوعی باغبان-تکتم هوشمند

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

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

تلفاكس: ۰۴۰-۳۸۸۰۶۰۲۴ پست الکترونیکی: [ejour@um.ac.ir](mailto:ejour@um.ac.ir) وب سایت:

چاپ: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

## فهرست مطالب

- بررسی عملکرد سیستم فتوولیز در حذف هیدروکربن‌های نفتی از  
فضاچاب و مدل‌سازی آن ۱ محمدقاسم رحیمی - احمد خدادادی - بینا آیتی
- مطالعه عددی آب‌شستگی جت ریزشی آزاد ۹ خسرو حسینی - حامد نو خاسته - حجت کرمی  
سید امین سلامتیان
- ارتقای کارایی شناسایی پارامترهای فیزیکی سازه با استفاده از  
کاهش تکینگی ماتریس‌های پاسخ در حل معکوس معادلات  
حرکت ۲۳ مجید قاسمی - بابک تقی - سعید عباس‌بندی
- توسعه یک مدل تحلیلی تغییر مکان کنترل برای رفتار چرخه‌ای  
سازه‌ها با در نظر گرفتن اثرات باریک‌شدگی، کاهش سختی،  
کاهش مقاومت و لغزش ۳۹ مهران زینلیان - مهدی مختاری
- مدل‌سازی آزمایشگاهی سلول‌های گیل در سازه‌های شناور بسیار  
بزرگ ۵۷ علی پریزاده قوشخانه - محمدجواد خانجانی
- پهلوود روش انتقال پایدار به منظور کنترل هم‌گرایی رویه  
اندازه‌گیری عملکرد سازه‌ها ۷۷ بهروز کشته‌گر
- ارزیابی کارایی روش پیش‌بینی موضعی ناشی از بازسازی فضای  
فاز و مدل شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی رواناب  
(مورد مطالعاتی: ایستگاه پل کنه، کرمانشاه) ۹۱ محمد ذونعمت کرمانی - خاطره امیرخانی
- پیش‌بینی مقاومت نهایی تیروورق‌های تحت اثر بار موضعی  
به کمک ماشین بردار پشتیبان (SVM) (یادداشت پژوهشی) ۱۰۹ علیرضا کردجزی - فریدون پویا نژاد - فرزاد شهابیان
- پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی میکروسیلیس و پلیمر  
استایرن بوتادین به وسیله مدل ریاضی (یادداشت پژوهشی) ۱۲۵ عباس حق‌الله‌ی - امیر طریقت - محمد شفیعی زاده



## بررسی عملکرد سیستم فتوالیز در حذف هیدروکربن‌های نفتی از فاضلاب و مدل‌سازی آن\*

محمدقاسم رحیمی<sup>(۱)</sup>، احمد خدادادی<sup>(۲)</sup>، بیتا آیتی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** آب آلوده به هیدروکربن‌های نفتی همواره بر روی محیط اطراف، اثرات منفی و زیان‌بار زیادی در ابعاد مختلف سلامتی جامعه، اقتصادی و محیط زیستی داشته است. بنابراین پژوهش حاضر با هدف مطالعه و بررسی تصفیه‌پذیری این نوع آلاینده‌ها از فاضلاب با استفاده از سیستم فتوالیز و همچنین مدل‌سازی آن صورت گرفت. در این سیستم به بررسی و مطالعه تأثیر COD‌های مختلف (۳۵۰، ۲۵۰، ۱۰۰، ۵۰ و ۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و شدت تابش‌های متفاوت لامپ UV-C (۶۰، ۴۰، ۲۰، ۱۰ وات) پرداخته شد. براساس میزان مصرف انرژی به‌ازای حذف هر واحد COD، غلظت و شدت تابش بهینه به ترتیب ۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۰ وات برای حذف هیدروکربن‌های نفتی بدست آمد. در مدل‌سازی این سیستم در شدت تابش ۶۰ وات علاوه بر COD‌های مذکور، COD معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیز مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج حاصل مشاهده شد که می‌توان از سیستم فتوالیز به عنوان یک واحد پیش‌تصفیه مناسب برای سیستم‌های بیولوژیکی بهره گرفت.

**واژه‌های کلیدی** فتوالیز، هیدروکربن‌های نفتی، COD، شدت تابش، انرژی مصرفی.

## Photolysis System Performance in Petroleum Hydrocarbons Removal from Wastewater and its Modeling

M. Gh. Rahimi

A. Khodadadi

B. Ayati

**Abstract** Water contaminated with petroleum hydrocarbons has harmful effects on health, economy and environment. In this study, photolysis process for treating petroleum hydrocarbons was investigated. Hence different initial CODs with different UV-C radiation power were examined. Based on the energy consumption per unit of COD removed, COD of 350 mg/L and radiation power of 80 W were chosen as the optimum conditions. To improve model prediction, in addition to the aforementioned CODs, COD=1000 mg/L in 60 W was also tested. The findings indicated that photolysis can be considered as a suitable pretreatment process for the biological systems.

**Key Words** Photolysis; Petroleum Hydrocarbons; COD; Radiation Power; Energy Consumption.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۵/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

akdarban@modares.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

مینامیدات و همکاران، طی تحقیقاتی اعلام کردند که UV-C می‌تواند باقی‌مانده سوم حشره‌کش را در آب تجزیه کند [22,23].

لذا هدف از این تحقیق، ارزیابی کارایی سیستم فتوولیز و تعیین شرایط بهینه آن به عنوان پیش‌تصفیه در شکستن هیدروکربن‌های نفتی سخت تجزیه‌پذیر و آماده‌سازی آن برای واحد تصفیه اصلی بود که در نهایت مدل‌سازی آن برای پیش‌بینی زمان مورد نیاز برای حذف بیشترین میزان COD صورت گرفت.

## مواد و روش‌ها

**روش کار.** آلاینده‌های نفتی موجود در پساب پالایشگاه شامل انواع هیدروکربن‌ها است که از واحدهای تقطیر نفت خام و آب‌زدایی نفت پالایشگاه بدست می‌آید. با توجه به گزارش چاوان و همکاران، بیشتر ترکیبات نفتی موجود در پساب پالایشگاه نفت در محدوده C<sub>14</sub>-C<sub>35</sub> هستند که میزان غلظت هیدروکربن‌های سبک بیش از سنگین می‌باشد [8]. بنابراین برای تصفیه فاضلاب سنتزی از ترکیب گازوئیل (C<sub>16</sub>-C<sub>20</sub>) با نفت خام (C<sub>8</sub>-C<sub>37</sub>) به نسبت ۱ به ۲ استفاده شد. علاوه بر این، مخلوط قبل از تزریق به سیستم به مدت ۴۸ ساعت هوادهی شد تا ترکیبات سبک، همراه با بخار آب (وارد شدن به فاز گاز) از محیط خارج شود و هیدروکربن‌های گریسی سنگین (سنگین‌تر از C<sub>35</sub>) به دیواره‌های ظرف بماند [24] و از ورود هیدروکربن‌های خیلی سبک و خیلی سنگین به رآکتور جلوگیری شود.

پس از این مرحله، فاضلاب به یک پایلوت مکعب مستطیل پلاستیکی به ابعاد ۲۴\*۱۷\*۹ سانتی‌متر مطابق شکل (۱) بر روی همزن مغناطیسی و در تماس مستقیم با اشعه UV-C (طول موج ۲۵۴ نانومتر) تزریق شد به طوری که ارتفاع فاضلاب درون پایلوت ۵ سانتی‌متر شد.

در ابتدا اثر تغییرات شدت تابش (۱۰۰، ۸۰، ۶۰، ۱۲۰ وات) و میزان COD (۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و نیز اثر هم‌زمان آن دو بررسی و

## مقدمه

فاضلاب نفتی بیشترین حجم ضایعات تولیدی در یک صنعت نفتی و یا گازی را تشکیل می‌دهد و شامل طیف وسیعی از آلاینده‌های هیدروکربنی با غلظت‌های مختلف است [1]. تصفیه این نوع فاضلاب بایستی به دلیل دارا بودن محتوای بالای ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای سمی، سرطانزا و مقاوم، در اولویت قرار گیرد [2-4]. تاکنون از روش‌های متفاوتی برای تصفیه فاضلاب‌های نفتی استفاده شده است. فرآیندهای بیولوژیکی نمونه‌ای از این روش‌ها هستند که اگرچه قابلیت حذف بسیاری از کربن‌های آلی محلول را دارند [5-7]، اما به دلیل وجود ترکیبات سخت و مقاوم در فاضلاب نفتی راندمان مناسبی ندارند [8]. COD بالای باقی‌مانده در پساب تصفیه شده میین این موضوع است [9,10]. روش‌های دیگر تصفیه شامل فرآیندهای شیمیایی مانند انعقاد [11] و اکسیداسیون شیمیایی است [4]. راندمان و نرخ واکنش این روش‌ها کم [12] و مقدار اکسیدکننده مورد نیاز آنها زیاد می‌باشد و با تولید لجن همراه است و تنها در محدوده کوچکی از pH قابل بهره‌برداری است [13,14]. لذا زمانی که حجم پساب زیاد باشد، استفاده از این روش‌ها با محدودیت مواد می‌شود [15]. برای تصفیه فاضلاب‌های نفتی کاربرد فن‌آوری‌های جدیدی نظری غشاها [16,17]، انجامد [18] و اکسیداسیون کاتالیستی هوای مرطوب با امواج ماکروویو [19] که به دلیل مشکلاتی نظری مصرف انرژی بالا از لحاظ اقتصادی مقرن به صرفه نیستند، نیز گزارش شده است.

در سال‌های اخیر، کاربرد اشعه UV در فرآیندهای تصفیه آب، رشد چشم‌گیری داشته است. اشعه UV و یون‌های اکسایشی نوری دارای پتانسیل بالقوه مناسبی در غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و تحریب طیف وسیعی از آلاینده‌ها در محیط آبی می‌باشند [20]. به عنوان نمونه، یانگ و همکاران با کاربرد UV-C، بدون استفاده از کاتالیست، تا ۱۲ درصد از غلظت پارازیتامول با غلظت اولیه ۴ میلی‌مولار را طی ۱۲/۵ روز از محیط مایع کاهش دادند [12]. هیرارا و همکاران و نیز

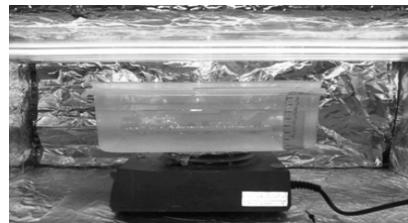
پرتوهای اشعه و بازتابش آن، اثرگذاری بیشتر اشعه در راندمان حذف و همچنین به منظور حفظ شرایط ایمنی آزمایشگاه، جداره داخلی و خارجی پایلوت به طور کامل با ورقه‌های آلومینیومی ضخیم پوشانده شد. اندازه‌گیری COD از روش رفلاکس بسته طبق دستورالعمل D ۵۲۲۰ [26] صورت گرفت. مواد دیگر مورد استفاده شامل آب دو بار تقطیر، دی‌کرومات پتاسیم ( $\text{Cr}_2\text{K}_2\text{O}_7$ )، سولفات نقره ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ), سولفات جیوه ( $\text{HgSO}_4$ ), اسید سولفوریک ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) و پتاسیم هیدروژن فتالات (KHP) برای آزمایش COD بودند.

## نتایج و بحث

بررسی اثر همزمان تغییرات شدت تابش و غلظت آلاینده. نتایج تأثیر شدت تابش در مقادیر مختلف COD در نمودار (۱) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در کلیه نمودارها در ابتدای فرآیند، میزان COD روند افزایشی دارد که به تدریج کاهش می‌یابد. این مطلب بیانگر قابلیت اشعه UV-C در تجزیه تدریجی ترکیبات پیچیده موجود در فاضلاب ستزی است [27,28].

همچنین همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش غلظت آلاینده، مدت زمان تابش اشعه UV-C برای رسیدن به راندمان حذف ثابت نیز افزایش می‌یابد و راندمان حذف در شدت تابش ثابت کاهش می‌یابد به‌طوری‌که میزان حداقل حذف آلاینده در شدت تابش ۶۰ وات در COD های مذکور به ترتیب ۵۰ (در یک روز)، ۳۷ (در دو روز)، ۲۸ (در سه روز)، ۲۵ (در چهار روز) و ۱۶ (در پنج روز) درصد می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش توان لامپ و درنتیجه شدت تابش بر واحد سطح، میزان راندمان افزایش می‌یابد به‌نحوی که در COD ورودی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر با افزایش ۲ برابری توان لامپ از ۶۰ به ۱۲۰ وات، میزان راندمان حذف برای زمان ماند ۹۶ ساعت ۴۲ درصد بیشتر شده و به ۶۰ درصد رسیده است.

مقادیر بهینه آنها تعیین گردید. در ادامه، سیستم فتوولیز در شدت تابش بهینه مدل شد.



شکل ۱ پایلوت مورد استفاده در تحقیق

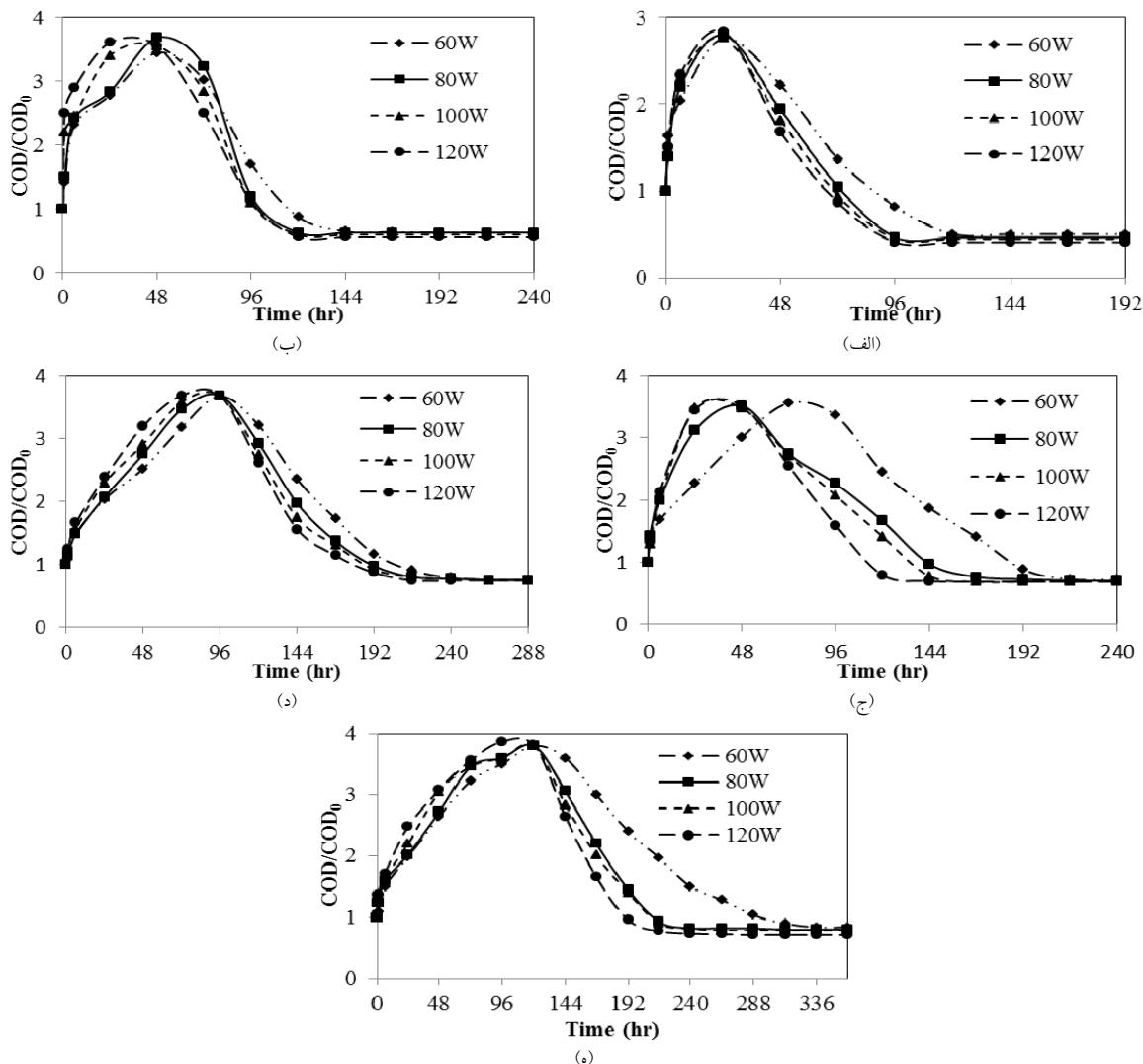
نکته قابل ذکر این‌که در هر مرحله از تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای شدت تابش و COD براساس حداقل میزان مصرف انرژی طبق روابط ۱ و ۲ صورت گرفت [25].

$$\text{EC} = W \times t \quad (1)$$

$$\text{EC/COD} = \text{EC}/(\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}) \quad (2)$$

که در آن، EC انرژی مصرفی (کیلو وات ساعت)، W برق مصرف شده برحسب کیلووات (kW)، t برابر با مدت زمان تابش برحسب ساعت (hr)، COD انرژی مصرف شده برای حذف هر میلی‌گرم بر لیتر آلاینده برحسب کیلووات ساعت می‌باشد.

**مواد و تجهیزات.** به منظور صاف‌سازی نمونه‌ها برای اندازه‌گیری پارامترهای محلول از صافی غشائی ۰/۴۵ میکرومتر استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها براساس روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب [26] انجام گرفت. برای اندازه‌گیری پارامترها از اسپکتروفوتومتر DR4000 مدل pH Carry50 متر دیجیتالی Metrohm مدل ۶۹۱، رآکتور COD ساخت شرکت Hach مدل DRB200، ترازوی دیجیتالی مدل PLS360-3 ساخت شرکت Kern با دقت ۰/۰۰۱ گرم و Ika همزن مغناطیسی مدل RH-Basic2 ساخت شرکت استفاده شد. همچنین به منظور تأمین اشعه UV-C از لامپ‌های جیوه‌ای کم فشار ۲۰ وات Philips ساخت آلمان استفاده گردید و به منظور جلوگیری از خروج



نمودار ۱ بررسی اثر هم زمان تغییرات شدت تابش و غلظت آلاینده

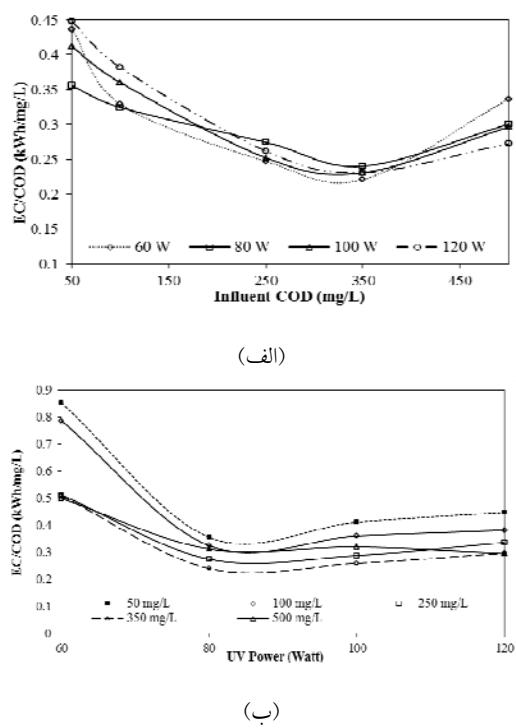
(الف) ۵۰ mg/L، (ب) ۱۰۰ mg/L، (ج) ۲۵۰ mg/L، (د) ۳۵۰ mg/L، (e) ۵۰۰ mg/L

این زمان ماند اختلاف در بین توان‌های ۸۰ و ۱۲۰ وات بسیار ناچیز بود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان لامپ UV و ثابت فرض کردن COD ورودی، نمودارها سریع‌تر به راندمان حذف ثابت میل می‌کنند. به‌طوری‌که در COD معادل ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و توان لامپ ۱۲۰ وات (نمودار ۱-الف) این نتیجه سریع‌تر حاصل می‌شود؛ اما با افزایش غلظت آلاینده و ثابت فرض کردن توان لامپ، عکس این عمل اتفاق می‌افتد؛

در COD معادل ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، افزایش توان از ۸۰ به ۱۰۰ وات و ۱۰۰ به ۱۲۰ وات در راندمان حذف تأثیر کمتری نسبت به افزایش توان از ۶۰ به ۸۰ وات داشته که این تأثیر پس از زمان ماند ۱۲۰ ساعت برای کلیه شدت تابش‌ها ناچیز بود. نتایج مشابهی برای COD‌های دیگر نیز حاصل شد.

در COD معادل ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، اختلاف راندمان حذف آلاینده در توان‌های مختلف منبع نوری تا قبل از زمان ماند ۹۶ ساعت محسوس بود؛ اما پس از



نمودار ۲ میزان مصرف انرژی بهازای (الف) COD ورودی مختلف،  
ب) توانهای مختلف

در تحقیق دلنواز (۱۳۹۰)، توان ۶۰ وات و غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر به عنوان شرایط بهینه در حذف فنل توسط فرآیند فتوکاتالیستی گزارش شد [۲۹]. عسگری (۱۳۹۲) نیز برای حذف رنگزای ۷۱ به ترتیب مقادیر ۹۰ وات و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر برای شرایط بهینه فرآیند انتخاب کرد [۳۰]. همچنین نتایج حاصل از تحقیق ملکی (۱۳۸۹) حاکی از حذف ۶۱ درصدی رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸ از فاضلاب با استفاده از سیستم فتوولیز با غلظت ۶۰ میلی گرم بر لیتر در توان ۵۵ وات بعد از دو ساعت می باشد [۳۱].

مدل تعیین زمان COD بیشینه. مدل سازی سیستم با بررسی کارایی سیستم در COD های مختلف تحت شدت تابش ۶۰ وات و نیز بهترین برآذش نقاط با مقادیر  $COD_{max}/COD_0$  برای هر غلظت بر حسب زمان در نمودار (۳) ارائه شده است. همان گونه که در نمودار (۳-الف) ملاحظه می شود، تغییرات COD/COD<sub>0</sub> نسبت به زمان در COD های مختلف روند مشابهی

به طوری که در COD معادل ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر و توان ۶۰ وات، راندمان حذف دیرتر به حالت ثابت میل می کند. همچنین ملاحظه می شود که اختلاف چندانی بین نتایج توانهای ۱۰۰ و ۱۲۰ وات در میزان حذف آلینده مشاهده نمی شود؛ ولی بین توانهای ۶۰ و ۸۰ وات اختلاف بیشتری نسبت به ۱۰۰-۸۰ و ۱۰۰-۶۰ وات مشاهده می شود که این نتیجه در نمودارهای (۱-ج) و (۱-ه) مشهودتر می باشد. تخریب بیشتر ترکیبات هیدروکربنی در شدت تابش ۸۰ وات نسبت به ۶۰ وات، دلیل اصلی اختلاف به نسبت زیاد این دو شدت تابش است. همچنین اختلاف اندک بین شدت تابش های ۸۰ و ۱۲۰ وات، به ماهیت هیدروکربن های نفتی و اثربخشی یکسان این شدت تابش ها برمی گردد.

تعیین مقادیر بهینه شدت تابش و غلظت با بررسی توانهای تابشی مختلف در COD های مورد بررسی، میزان بهینه شدت تابش و COD ورودی تعیین گردید.

طبق نمودار (۲-الف) کمترین میزان مصرف انرژی در COD معادل ۳۵۰ میلی گرم بر لیتر به میزان بهترین برابر ۰/۲۳۱، ۰/۲۳۱ و ۰/۲۴ کیلووات ساعت بهازای هر میلی گرم بر لیتر در توانهای ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ وات حاصل شد.

همچنین طبق نمودار (۲-ب) کمترین میزان مصرف انرژی مربوط به توان ۸۰ وات به میزان ۰/۲۴ کیلووات ساعت بر میلی گرم بر لیتر در COD معادل ۳۵۰ میلی گرم بر لیتر در ۰/۲۷۴ کیلووات ساعت بر میلی گرم بر لیتر در COD معادل ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر، ۰/۳۱۲ کیلووات ساعت بر میلی گرم بر لیتر در COD معادل ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، ۰/۳۲۴ کیلووات ساعت بر میلی گرم بر لیتر در COD معادل ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر و ۰/۳۶ کیلووات ساعت بر میلی گرم بر لیتر در COD معادل ۵۰ میلی گرم بر لیتر نتیجه شد؛ بنابراین COD معادل ۳۵۰ میلی گرم بر لیتر و شدت تابش ۸۰ وات، با توجه به مصرف کمترین انرژی به عنوان مقادیر بهینه در حذف هیدروکربن های نفتی در نظر گرفته شدند.

با وجود این که کاربرد چنین روابطی کنترل بهتر سیستم و برنامه‌ریزی برای آن را در شرایط مختلف به خصوص در صنعت ممکن می‌سازد اما تاکنون این موارد در هیچ پژوهشی مورد توجه قرار نگرفته‌اند که با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق بررسی‌های لازم به عمل آمد.

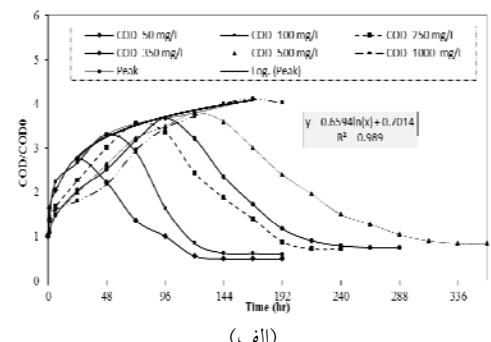
### نتیجه‌گیری

هیدروکربن‌های نفتی به دلیل سمیت، پایداری، قابلیت تجمع در بدن موجودات زنده و توانایی بقا در محیط به مدت طولانی یک تهدید جدی برای محیط زیست محسوب می‌شوند. در این تحقیق کارایی سیستم فتولیز در تصفیه فاضلاب ستزی هیدروکربن‌های نفتی بررسی شد و غلظت و شدت تابش بهینه به ترتیب ۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۸۰ وات به دست آمد. هم‌چنین با مدل‌سازی سیستم، تقریب خوب و با دقت بالایی از زمان رسیدن به COD بیشینه در حذف آلاینده به دست آمد تا پیش‌بینی عملکرد سیستم و برنامه‌ریزی برای آن در شرایط مختلف امکان‌پذیر شود. با توجه به تبدیل ترکیبات سخت تجزیه‌پذیر نفتی به ترکیبات ساده‌تر می‌توان سیستم فتولیز را به عنوان یک پیش‌تصفیه برای دیگر فرآیندها در حذف هیدروکربن‌های نفتی در نظر گرفت.

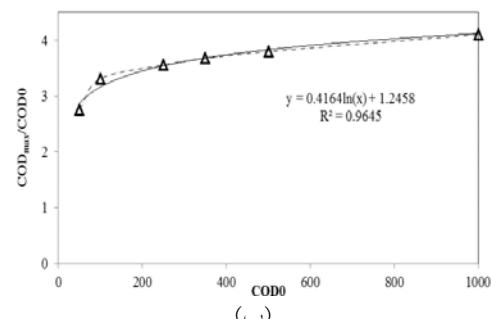
دارند که می‌توان از اتصال نقاط بیشینه آنها رابطه مناسبی را استخراج کرد نمودار (۳-ب). بهترین برازش در نمودارها رگرسیون خطی است. در این نمودارها رگرسیون لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰/۹۹ و مطابق روابط (۳) و (۴) به دست آمد (t مدت زمان حصول COD<sub>max</sub> بر حسب روز).

$$\text{COD}_{\text{max}}/\text{COD}_0 = 0.7014 \ln(t) + 0.7594 \quad (3)$$

$$\text{COD}_{\text{max}}/\text{COD}_0 = 1/2458 \ln(\text{COD}_0) + 0.4164 \quad (4)$$



(الف)



(ب)

نمودار ۳ تغییرات حذف COD در سیستم فتولیز و رگرسیون لگاریتمی مقادیر COD<sub>max</sub>/COD<sub>0</sub> (الف) بر حسب زمان، (ب) بر حسب COD<sub>0</sub> (P<sub>UV</sub>=۱۰ W)

### مراجع

1. Tellez, G. T., Nirmalakhandan, N., & Gardea-Torresdey, J. L., "Performance evaluation of an activated sludge system for removing petroleum hydrocarbons from oilfield produced water". *Advances in Environmental Research*, Vol. 6, No 4, pp.455-470, (2002).
2. Mrayyana B., Battikhi M. N., "Biodegradation of total organic carbons (TOC) in Jordanian petroleum sludge", *Journal of Hazardous Material*, No 120, pp.127-134, (2005).
3. Wake H., "Oil refineries: a review of their ecological impacts on the aquatic environment", *Estuar. Coast Shelf Sci.*, No. 62, pp. 131-140, (2005).
4. Abdelwahab O., Amin N. K., El-Ashtoukhy E. S. Z., "Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater", *Journal of Hazardous Mater*, No.163, pp.711-716, (2009).

5. Schneider E. E., Cerqueira A.C.F.P., Dezotti M., "MBBR evaluation for oil refinery wastewater treatment with post-ozonation and BAC for wastewater reuse", *Water Science & Technology*, No.63(1): pp. 143-148, (2011).
6. Gargouri B., Karray F., Mhiri N., Aloui F., Sayadi S., "Application of a continuously stirred tank bioreactor (CSTR) for bioremediation of hydrocarbon-rich industrial wastewater effluents", *Journal of Hazardous Materials*, No.189: pp.427-434, (2011).
7. Rastegar S. O., Mousavi S. M., Shojaosadati S. A., Sheibani S., "Optimization of petroleum refinery effluent treatment in a UASB reactor using response surface methodology", *Journal of Hazardous Materials*, No. 197: pp.26-32, (2011).
8. Chavan, A., and Mukherji, S., "Treatment of hydrocarbon-rich wastewater using oil degrading bacteria and phototrophic microorganisms in rotating biological contactor: Effect of N:P ratio", *Journal of Hazardous Mater*, No.154,pp. 63-72, (2008).
9. Fratila-Apachitei, L. E., Kennedy, M. D., Linton, J. D., Blume, I., & Schippers, J. C., "Influence of membrane morphology on the flux decline during dead-end ultrafiltration of refinery and petrochemical waste water", *Journal of Membrane Science*, No.182(1), pp.151-159, (2001).
10. Shokrollahzadeh, S., Azizmohseni, F., Golmohammad, F., Shokouhi, H., & Khademhaghighe, F., "Biodegradation potential and bacterial diversity of a petrochemical wastewater treatment plant in Iran", *Bioresource technology*, No. 99(14), pp. 6127-6133, (2008).
11. Santo C. E., Vilar V. J. P., Botelho C. M. S., Bhatnagar A., Kumar E., Boaventura R. A. R., "Optimization of coagulation-flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant", *Chemical Engineering Journal*, No. 183: pp. 117-123, (2012).
12. Huang C. R., Shu H. Y., "The reaction kinetics, decomposition pathways and intermediate formations of phenol in ozonation, UV/O<sub>3</sub>, and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes", *J. Hazard. Mater.*, No. 41: pp. 47-64, (1995).
13. Laoufi N. A., Tassalit D., Bentahar F., "The degradation of phenol in water solution by TiO<sub>2</sub> photocatalyst in a chemical reactor", *Global NEST J.*, No. 10: pp. 404-418, (2008).
14. Kuyukina M. S., Ivshina I. R., Serebrennikova M. K., Krivorutchko A. B., Podorozhko E. A., Ivanov R. V., Lozinsky V. I., "Petroleum-contaminated water treatment in a fluidized-bed bioreactor with immobilized Rhodococcus cells", *Int. Biodeterioration Biodegrad*, No. 63: pp. 427-432, (2009).
15. Guo J., Al-Dahhan M., "Catalytic wet air oxidation of phenol in concurrent downflow and upflow packed-bed reactors over pillared clay catalyst", *Chem. Eng. Sci.*, No. 60: pp. 735-746, (2005).
16. Li Y., Yan L., Xiang C., Hong L. J., "Treatment of oily wastewater by organic-inorganic composite tubular ultrafiltration (UF) membranes", *Desalination*, No. 196: pp. 76-83, (2006).
17. Rahman M. M., Al-Malack M. H., "Performance of a crossflow membrane bioreactor (CF-MBR) when treating refinery wastewater", *Desalination*, No. 191: pp. 16-26, (2006).

18. Gao W., Habib M., Smith D. W., "Removal of organic contaminants and toxicity from industrial effluents using freezing processes", *Desalination*, No. 245: pp. 108–119, (2009).
19. Sun Y., Zhang Y., Quan X., "Treatment of petroleum refinery wastewater by microwave-assisted catalytic wet air oxidation under low temperature and low pressure", *Sep. Purif. Technol.*, No. 62: pp. 565-570, (2008).
20. Sozzi, D. A., & Taghipour, F., "Computational and experimental study of annular photo-reactor hydrodynamics", *International journal of heat and fluid flow*, No. 27(6), pp. 1043-1053, (2006).
21. Yang L, Yu LE, Ray MB., "Degradation of paracetamol in aqueous solutions by TiO<sub>2</sub> photocatalysis", *Water Res.*, No. 42(13): pp. 3480-8, (2008).
22. Hirahara Y., Ueno H., Nakamuro K., "Comparative Photodegradation Study of Fenthion and Disulfoton under Irradiation of Different Light Sources in Liquid-and Solid-Phases", *J. Health Sci.*, No. 47(2): pp. 129-35, (2001).
23. Minamide, W., Tokumura, M., Znad, H. T., Kawase, Y., "Photodegradation of o-cresol in water by the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV process", *Journal of Environmental Science and Health Part A*, No. 41(8): pp. 1543-1558, (2006).
24. Zolfaghari M., Alamzadeh I., Vosoughi M., Tafti N., "Application of Hybrid Activated Sludge Reactor to Improve Activated Sludge Process for Oily Wastewater Treatment", *Journal of Water & Wastewater*, No. 1, pp. 43-52, (2013).
25. Damodar A. R., You S. J., Ou S. H., "Coupling of membrane separation with photocatalytic slurry reactor for advanced dye wastewater treatment", *Separation and Purification Technology*. No. 76, pp. 64–71, (2010).
26. Andrew, D. (Ed.), Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington DC, 20th Ed, (2005).
27. Konstantinou, I. K., Albanis T. A., "TiO<sub>2</sub>-assisted photocatalytic degradationof azo dyes in aqueous solution: Kinetic and mechanistic investigations-A review", *Applay. Catalyst B: Environmental*, No. 49 (1), pp. 1–14, (2004).
28. Delnavaz M., Ayati B., Ganjidoust H., Sanjabi S., "Kinetics study of photocatalytic process for treatment of phenolic wastewater by TiO<sub>2</sub> nano powder immobilized on concrete surfaces", *Toxicological & Environmental Chemistry*, No. 94(6): pp. 1086-1098, (2012).
- ۲۹ دلنواز، م، "تصیفیه فاضلاب حاوی فنل از فاضلاب با استفاده از خاصیت فتوکاتالیستی نانوذرات TiO<sub>2</sub> پوشش داده شده بر سطح بتون بهینه‌شده با مصالح بازیافتی"، رساله دکترا، مهندسی عمران (محیط زیست)، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، (۱۳۹۰).
- ۳۰ عسگری، ر، "بررسی تأثیر اسکاونجر در حذف فتوکاتالیستی رنگ DB71 با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیم پوشش داده شده بر سطح بتون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران (محیط زیست)، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، (۱۳۹۲).
- ۳۱ ملکی، ا، "مقایسه کارایی فرآیندهای فتوولیز و التراسونولیز در تجزیه رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۸"، مجله سلامت و محیط، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، (۱۳۸۹).

## مطالعه عددی آب‌شستگی جت ریزشی آزاد\*

حسرو حسینی<sup>(۱)</sup> حامد نوخارسته<sup>(۲)</sup> حجت کرمی<sup>(۳)</sup> سید امین سلامتیان<sup>(۴)</sup>

**چکیده** بررسی پدیداره آب‌شستگی پایین دست جت ریزشی پیچیده است و عوامل متعدد از جمله مشخصات جریان و رسوب و همچنین هنرآئه مجرای عبور جریان بر آن تأثیرگذار است. در تحقیق حاضر، مدل‌سازی عددی آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی از یک نمونه آزمایشگاهی، توسط نرم‌افزار SSIIM2 صورت گرفته است. مقدار زیری، مدل انتقال رسوب و مدل آشفتگی با استفاده از آزمون‌های ضربی تعیین و میانگین قدر مطلق خطا و اسنجه گردیده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که با افزایش عدد فرود مصالح و ارتفاع ریزش، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی** آب‌شستگی، مدل عددی SSIIM، عدد فرود مصالح، جت ریزشی، ارتفاع ریزش.

## Free Impinging Jets Scouring, Using Numerical Model

K. Hosseini H. Nokhasteh H. Karami S. A. Salamatian

**Abstract** Investigation on local scour phenomenon downstream of impinging jets is very complicated. Different parameters such as geometry of stream, characteristics of flow and sediments have great influences on the scour phenomenon. The present study is preceded to numerical modeling of scouring by impinging jet via SSIIM 2 model founded on a physical model tests. The numerical model is calibrated for roughness coefficient, turbulence model and the bed load sediment transport function by using the coefficient of determination and the mean absolute error. Effects of Froude number, densimetric Froude number and drop height on scouring by impinging jet were investigated. The results indicate that the maximum scour depth increases by increasing Froude number; densimetric Froude number and drop height.

**Key Words** Scouring, Numerical Modeling SSIIM, Densimetric Froude Number, Impinging Jet, Drop Height.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۴/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۴/۱۰ می‌باشد.

(۱) استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۲) دانش آموخته مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان.

(۳) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

hkarami@semnan.ac.ir  
(۴) استادیار، گروه مهندسی عمران، مؤسسه غیرانتفاعی آل طه، تهران.

ارائه شده توسط محققان مختلف برای پیش‌بینی حداکثر عمق آب شستگی ناشی از جت ریزشی آزاد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ روابط ارائه شده توسط محققان

محقق	رابطه
Martins [4]	$y_s + y_t = 0.14N - 0.73 \frac{y_t^2}{N} + 1.7y_t$ $N = 7 \left( \frac{Q^3 H^{1.5}}{d_{50}^2} \right)^{0.5}$
Jaeger [5]	$y_s = 0.6q^{0.5} H^{0.25} \left( \frac{y_t}{d_{50}} \right)^{0.333}$
Ghodsian et al. [6]	$\frac{y_s}{y_t} = a \left( \frac{y_t}{H_c} \right)^b \left( Fr_{d50} \frac{R}{H_c} \right)^c$
محبوبی [7]	$y_s = 0.526q^{0.65} 4H^{0.246} d_{50}^{-0.405}$

در این روابط  $y_s$  عمق آب شستگی،  $Q$  ( $m^3/s$ ) دبی جریان،  $q$  ( $m^2/s$ ) دبی در واحد عرض،  $H$  (m) اختلاف ارتفاع عمق آب بالادست و پایین دست،  $R$  (m) شعاع هیدرولیکی جت،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر،  $v$  (m/s) سرعت جت خروجی،  $y_t$  (m) عمق پایاب،  $H_c$  (m) ارتفاع ریزش، که در آن  $Fr_{d50}$  عدد فرود مصالح و  $a, b, c$  ضرایب ثابت می‌باشند. مرسیر و همکاران به بررسی عددی آب شستگی جت عمودی با استفاده از مدل ترکیبی اولری لاگرانژی و معادلات ناویر-استوکس آشفته و نرم‌افزار Ansys Fluent پرداختند، روش آنها هم بخش جامد و هم بخش مایع را در نظر گرفته بود که توسط رابط کاربری ایکدیگر جدا می‌شد. آنها عنوان کردند که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  برای مدل‌سازی تنش برشی و مدل  $k-\omega$  برای مدل‌سازی فشار بهترین نتیجه را می‌دهد [8]. ون یان و همکاران آب شستگی جت صفحه‌ای مستغرق را با استفاده از مدل‌های دو بعدی مدل‌سازی نمودند. در مطالعات آنها از مدل  $k-\epsilon$  برای آشفتگی استفاده شده است. آنها نیروی اصطکاک بین ذرات، نیروی نشت خلل و فرج و نیروی گرانش را نیروهای مقاوم در برابر حرکت و تنش برشی محلی جریان را عامل محرك درنظر گرفتند [9].

## مقدمه

جریان خروجی از مخزن سد دارای انرژی بسیار زیادی است. برخورد جت آب با بستر، آنرا دچار آب شستگی می‌نماید. با آگاهی از میزان تأثیر آب شستگی بر سازه‌ها و محل وقوع آن، می‌توان از وجود خرابی و مشکلات ناشی از آب شستگی جلوگیری نمود. یکی از سازه‌های تسکین جریان در پایاب سرریزها، حوضچه‌های استغراق می‌باشد. ابعاد حفره آب شستگی ناشی از جت ریزشی تابع پارامترهای متعددی می‌باشد که اطلاع کامل از این عوامل و نحوه تأثیر آنها بر حفره آب شستگی، به طراحان در جانمایی حوضچه کمک زیادی نماید.

## مواد و روش‌ها

استین و جولین در آزمایش‌های خود متوجه شدند که غلظت رسوب خروجی از حفره آب شستگی به وسیله جت ریزشی وابسته به پتانسیل جداشدنی ذرات رسوب می‌باشد. در نزدیکی هسته، غلظت رسوب حداکثر است و با عمق کاهش می‌باید و هم‌چنین غلظت رسوبات با زمان کاهش می‌باید [1]. آبیدا و تاون سند نشان دادند که طول حفره آب شستگی ( $L_s$ ) مانند عمق آب شستگی با افزایش عمق پایاب ( $y_t$ ) کاهش می‌باید. زمانی که عمق نسبی پایاب کم باشد ( $y_t/H < 0.2$ ) طول حفره آب شستگی ضرورتاً مستقل از عمق پایاب می‌باشد، افزایش عمق پایاب اثر زیادی روی طول حفره آب شستگی دارد به طوری که هر قدر عمق پایاب بیشتر می‌شود طول آب شستگی کاهش می‌باید [2]. وستریچ و کوباس نشان دادند که تأثیر ارتفاع ریزش بر آب شستگی بسیار متفاوت است. در ابتدای این پدیده، حجم آب شستگی با افزایش ارتفاع ریزش جت  $H$  افزایش می‌باید. سپس با افزایش  $H$  حجم آب شستگی ثابت می‌ماند و بعد از آن، افزایش  $H$  اثر معکوس دارد به طوری که با افزایش  $H$  حجم آب شستگی کاهش می‌باید [3]. یکی از پارامترهای مورد توجه محققان در بررسی پدیده آب شستگی، عمق حداکثر آب شستگی بوده است. تعدادی از روابط

که در آن  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) چگالی سیال، P (pa) فشار کل،  $u_i$  (m/s) مؤلفه سرعت جريان در جهت محور i،  $u_j$  (m/s) مؤلفه سرعت جريان در جهت محور j و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونیکر می‌باشد.

در رابطه (۲) عبارت اول سمت چپ ترم گذار (تغییرات زمانی) و عبارت بعدی ترم شتاب جابه‌جایی می‌باشد. اولین عبارت سمت راست در این رابطه، ترم فشار و بعدی ترم مربوط به تنش رینولدز است. برای ارزیابی عبارت اخیر به یک مدل آشفتگی نیاز می‌باشد.

### مدل آشفتگی k-ε

در نرم‌افزار SSIIM2 مدل k-ε مدل پیش‌فرض برای آشفتگی می‌باشد که به صورت رابطه (۳) توسعه یافته است.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + p_k - \epsilon \quad (3)$$

که در آن ضریب  $\sigma_k$  برابر با ۱ و  $v_T$  لزجت گردابه‌ای است که توسط رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. مقدار  $P_k$  را می‌توان از رابطه (۵) بدست آورد.

$$v_T = C_\mu \frac{K}{\epsilon^2} \quad (4)$$

$$P_k = v_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

در رابطه (۴)،  $k$  انرژی جنبشی آشفته و  $\epsilon$  بیان‌گر میزان اتلاف انرژی جنبشی است که از رابطه (۶) تعیین می‌شود. ضریب  $C_\mu$  برابر  $0.09$  می‌باشد.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} p_k + C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

ضرایب  $C_{\epsilon 1}$  و  $C_{\epsilon 2}$  به ترتیب برابر با  $1/44$  و  $1/92$  می‌باشند.

### معادلات انتقال رسوب

انتقال رسوب به دو صورت بار بستر و بار معلق انجام می‌شود. بار معلق را می‌توان به کمک معادلات پخش-انتقال با محاسبه غلظت رسوب با توجه به رابطه (۷)

نظر به این که اکثر مطالعات ارائه شده مبتنی بر داده‌های تجربی و آزمایشگاهی است، در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از نرم‌افزار SSIIM شرایط آزمایشگاهی آب‌شستگی جت ریزشی شبیه‌سازی گردد. در این راستا واسنجی ضریب زبری، مدل آشفتگی و معادله انتقال بار بستر مورد بررسی قرار گرفته است. پس از واسنجی مدل عددی، تغییر شرایط جريان و مشخصات رسوب با ارزیابی پارامترهای ارتفاع ریزش، عدد فرود جريان و عدد فرود مصالح مطالعه گردید. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان به ارزیابی جانمایی سازه‌ها و تمهیدات لازم برای مقابله با آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی پرداخت.

### معرفی مدل عددی SSIIM

مدل SSIIM یک مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی و انتقال رسوب بر مبنای روش حجم محدود است که در دو نسخه توسط السن در سال ۱۹۹۴ معرفی شد. برای مدل کردن جريان در هندسه‌های پیچیده در SSIIM1 از شبکه‌های ساختاریافته و در SSIIM2 از شبکه‌های بدون ساختار استفاده شده است. در شبکه‌های ساختار یافته سه‌بعدی هر سلول در شبکه سه شاخص (z, y, x) دارد که مشخص کردن موقعیت شبکه را آسان می‌کند. در فایل اطلاعات ورودی موقعیت و سطوح دبی ورودی و خروجی دیواره‌ها مشخص می‌گردد. در شبکه‌های بدون ساختار هر سلول یک شاخص دارد که به طور تصادفی ساخته می‌شود [۱۰].

### معادلات جريان

در نرم‌افزار SSIIM معادلات حاکم بر میدان جريان معادلات پیوستگی (معادله ۱) و ناویر-استوکس (معادله ۲) می‌باشند.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (2)$$

### مدل آزمایشگاهی سلامتیان

مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس و در یک فلوم به طول ۱۳ متر، طول مفید ۱۰ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۹ متر انجام شده است. شکل (۱) نمای کلی فلوم را از بالا به صورت شماتیک نشان می‌دهد. آزمایش انجام شده دردبی (Q) ۱۰/۱۱ لیتر بر ثانیه و ارتفاع ریزش ( $H_0$ ) برابر ۰/۶۵ صورت گرفته است.. رسوبات به کار رفته در آزمایش، از جنس سیلیس دانه‌بندی شده، یکنواخت و با چگالی مخصوص ۲/۶۳ می‌باشد. هم‌چنین  $d_{50}$  به عنوان قطر مشخصه ذرات و برابر ۱/۲۲ میلی‌متر درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که عمق پایاب در کلیه آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰/۳ متر در نظر گرفته شده است [۱۱].

### مشخصات میدان حل

شبکه‌بندی مدل به صورتی است که مخزن رسوب در طول دارای شبکه به نسبت  $x/y=0.219$  (شکل ۲-الف) و در عمق برای ارتفاع ریزش ۰/۶۵ متر دارای نسبت  $x/z=0.323$  (شکل ۲-ب) می‌باشد. بنابراین مدلی با تعداد سلول ۱۶×۲۵×۱۹۰ (i=191, j=26, k=17) ایجاد گردیده است.

تعیین نمود.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j}) \quad (7)$$

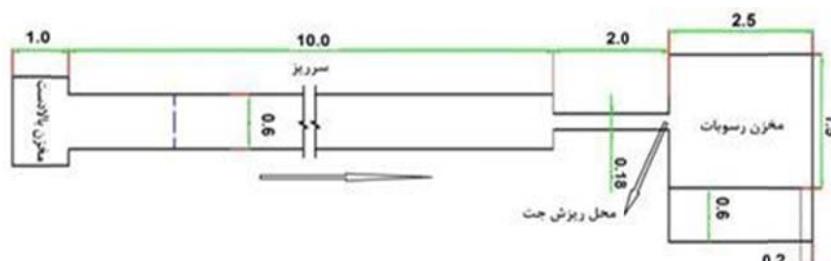
$w$  سرعت سقوط ذرات و  $\Gamma_T$  ضریب پخش می‌باشد که توسط رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$\Gamma_T = \frac{v_T}{Sc} \quad (8)$$

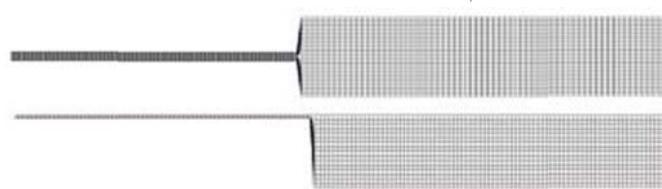
$Sc$  عدد اشمت است و به صورت پیش‌فرض برابر با یک درنظر گرفته می‌شود.  $v_T$  نیز لزجت گردابه‌ای جریان است. در مدل عددی SSIIM برای بار بستر، روابط انگلوند-هانسن، اینیشن، وو، ایکرز-وایت و فن راین تعریف شده‌اند.

### واسنجی مدل عددی

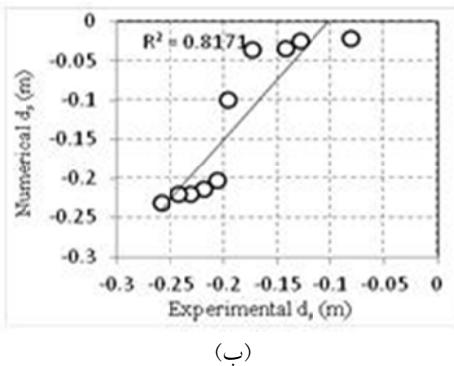
در این بخش واسنجی مدل عددی SSIIM در خصوص انتخاب زیری، تعداد سلول‌ها، مدل آشفتگی و معادله انتقال رسوب بار بستر با ارزیابی حداکثر عمق حفره آب شستگی ناشی از جت ریزشی توسط مدل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی سلامتیان [۱۱] و جن‌یان [۱۲] بررسی گردیده است.



شکل ۱ فلوم به کار رفته در آزمایشگاه (نمایی از بالا) [۱۱]



شکل ۲ مش به کار رفته در شبکه ۱۸×۲۵×۱۹۰

شکل ۳ آزمون  $R^2$  برای زبری بستر به ترتیب  $d_{50}$  و  $d_{90}$ جدول ۲ نتایج آزمون  $R^2$  و MAE

آزمون MAE	آزمون $R^2$	مدل آشفتگی	معادله انتقال رسوب بستر
۰/۰۸۹	۰/۸۸۶	k-ε	van Rijn [13]
۰/۰۸۸	۰/۹۰۹		
۰/۰۳۹	۰/۹۶۴	Local k-ε	Engelund/Hansen [14]
۰/۰۳	۰/۹۴۶		
۰/۰۹۳	۰/۹	k-ε	Einstein [15]
۰/۰۳۱	۰/۹۱	Local k-ε	
۰/۰۵۶	۰/۹۳۸	k-ε	Wu [16]
۰/۰۴۵	۰/۹۵۸	Local k-ε	

لازم به ذکر است که مدل فن راین برای جریان‌هایی با سرعت کم و عمق زیاد و مدل وو برای محاسبه انتقال رسوب در خم‌ها نتایج بهتری می‌دهد. هم‌چنین مدل آشفتگی Local k-ε به دلیل صفر کردن مؤلفه  $\epsilon$  در معادلات پنج گانه باعث افزایش سرعت و درنتیجه افزایش انرژی جنبشی و نهایتاً افزایش آب‌شستگی می‌شود.

### حساسیت نسبت به مش

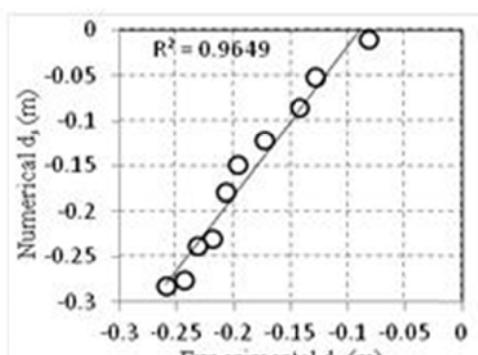
در این بخش به بررسی تأثیر ابعاد شبکه، بر تخمین عمق حفره آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی در مصالحی با قطر مشخصه ( $d_{50}$ ) مختلف توسط مدل SSIIM پرداخته شده است. بهمنظور صحت‌سنجی

### واسنجی زبری

با توجه به تمام موارد پیشنهادی محققان در خصوص انتخاب ارتفاع زبری‌ها برابر قطر شاخص رسوبات بستر، مقادیر  $d_{50}$  و  $d_{90}$  به عنوان قطرهای شاخص زبری مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعات عمق بیشینه فرسایش برای مقادیر مختلف قطر شاخص رسوب توسط نرم‌افزار تعیین شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. این مقایسه در شکل (۳) آورده شده است. ضریب همبستگی و نزدیکتر بودن نتایج عددی و آزمایشگاهی به دست آمده برای  $d_{50}$  نسبت به  $d_{90}$ ، در شکل نشان می‌دهد که  $d_{50}$  به عنوان قطر شاخص رسوبات می‌تواند استفاده گردد.

### واسنجی مدل آشفتگی و انتقال رسوب

بهمنظور واسنجی مدل آشفتگی و معادلات انتقال رسوب، عمق بیشینه آب‌شستگی در کلیه شرایط آزمایش شده بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. مقادیر ضریب تعیین  $(R^2)$  و متوسط باقی‌مانده مطلق به دست آمده و در جدول (۲) مقایسه شده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل آشفتگی k-ε به همراه معادله انتقال رسوب انگلند- هانسن بهترین هم‌خوانی را با نتایج آزمایشگاهی دارد و توانسته است آب‌شستگی پایین دست جت ریزشی را به خوبی پیش‌بینی کند.



(الف)

همچنین در شبکه‌های مدل‌سازی شده، ابعاد مش در عمق (x/z) دارای نسبت‌های  $0.377$  و  $0.705$  و  $1.011$  می‌باشد. بنابراین تعداد سلول‌ها در این مدل‌سازی به ترتیب زیر می‌باشد.

$600 \times 4 \times 34$  ( $i=601, j=5, k=35$ )

$300 \times 4 \times 34$  ( $i=301, j=5, k=35$ )

$150 \times 4 \times 34$  ( $i=151, j=5, k=35$ )

همان‌طور که در جداول (۳) تا (۵) مشاهده

می‌شود طبق آزمون‌های  $R^2$  و MAE شبکه  $301 \times 5 \times 35$  توانسته است عمق حفره آب‌شستگی و همچنین ارتفاع پشت‌های رسوبی را دقیق‌تر نسبت به شبکه  $151 \times 5 \times 35$  پیش‌بینی نماید. البته شبکه با تعداد سلول  $601 \times 5 \times 35$  نتایج دقیق‌تری نسبت به دو شبکه دیگر داده است. لیکن اختلاف معنی‌داری بین نتایج بدست آمده از این شبکه و شبکه درشت‌تر با تعداد سلول  $301 \times 5 \times 35$  وجود ندارد. از طرف دیگر، برای تحلیل‌های جریان و رسوب در شبکه با ابعاد ریز زمان محاسباتی بیشتری لازم است لذا شبکه با تعداد سلول  $301 \times 5 \times 35$  مناسب برای مدل‌سازی عددی انتخاب گردید.

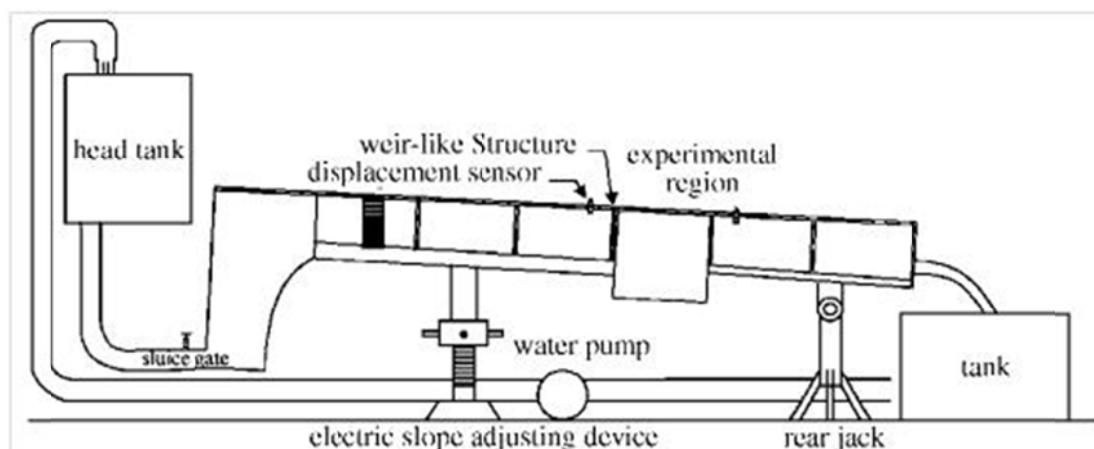
مدل، نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی چن مقایسه گردیده است [12].

فلوم استفاده شده توسط چن دارای طول  $11/5$  متر، ارتفاع  $0/6$  متر، عرض  $0/3$  متر می‌باشد. رسوبات در طولی برابر با  $1/8$  متر و عرض  $0/3$  متر در بستر فلوم قرار گرفته‌اند. مشخصات هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی و خصوصیات رسوبات به کار گرفته شده برای بار بستر به شرح زیر می‌باشد.

دبی (Q) برابر  $4/0$  لیتر بر ثانیه، ارتفاع ریزش ( $H_c$ ) برابر  $185/0$  متر می‌باشد. رسوبات به کار رفته در آزمایش از جنس ماسه دانه‌بندی شده، یکنواخت و با چگالی مخصوص  $2/63$  می‌باشد. همچنین  $d_{50}$  به عنوان قطر مشخصه ذرات، و رسوباتی با اقطاری برابر با  $15/58, 22/03, 11, 6/73, 15/08$  میلی‌متر در آزمایش استفاده شده است. عمق پایاب در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر  $0/037$  متر درنظر گرفته شده است [12].

### مشخصات میدان حل

در مدل‌سازی عددی از سه شبکه با ابعاد مختلف استفاده شده است. نسیت ابعاد مش در پلان (x/y) به ترتیب  $0.044$  و  $0.088$  و  $0.177$ . انتخاب گردیدند.



شکل ۴ شکل شماتیک فلوم به کار رفته در آزمایش [12]

جدول ۳ نتایج آزمون  $R^2$  و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکه  $50 \times 35 \times 10$ 

ناتیج آزمون MAE	ناتیج آزمون $R^2$	حداکثر عمق آب شستگی (m) در مدل عددی با شبکه $35 \times 5 \times 10$ سلولی	حداکثر عمق آب شستگی (m) در مدل آزمایشگاهی	قطر مشخصه ذرات (mm)
۰/۰۱۱	۰/۹۶۱	۰/۰۷۱۱۰	۰/۰۸	$d_{50}=6.73$
۰/۰۰۳	۰/۹۹۳	۰/۰۵۷۶۵	۰/۰۶	$d_{50}=11$
۰/۰۱۲	۰/۹۵۱	۰/۰۴۱۱۱	۰/۰۴۵	$d_{50}=15.58$
۰/۰۰۲	۰/۹۸۸	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۸	$d_{50}=22.03$

جدول ۴ نتایج آزمون  $R^2$  و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکه  $35 \times 5 \times 10$ 

ناتیج آزمون MAE	ناتیج آزمون $R^2$	حداکثر عمق آب شستگی (m) در مدل عددی با شبکه $35 \times 5 \times 10$ سلولی	حداکثر عمق آب شستگی (m) در مدل آزمایشگاهی	قطر مشخصه ذرات (mm)
۰/۰۱۳	۰/۹۵۲	۰/۰۷۲۰۸	۰/۰۸	$d_{50}=6.73$
۰/۰۰۳	۰/۹۹۰	۰/۰۵۳۵۶	۰/۰۶	$d_{50}=11$
۰/۰۱۳	۰/۹۳۴	۰/۰۳۹۰۹	۰/۰۴۵	$d_{50}=15.58$
۰/۰۰۲	۰/۹۸۲	۰/۰۲۴۳۹	۰/۰۲۸	$d_{50}=22.03$

جدول ۵ نتایج آزمون  $R^2$  و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکه  $35 \times 5 \times 10$ 

ناتیج آزمون MAE	ناتیج آزمون $R^2$	حداکثر عمق آب شستگی (m) در مدل عددی با شبکه $35 \times 5 \times 10$ سلولی	حداکثر عمق آب شستگی (m) در مدل آزمایشگاهی	قطر مشخصه ذرات (mm)
۰/۰۲۲	۰/۸۵	۰/۰۶۸۹۱	۰/۰۸	$d_{50}=6.73$
۰/۰۱۱	۰/۹۵۲	۰/۰۴۵۰۲	۰/۰۶	$d_{50}=11$
۰/۰۱۴	۰/۸۷۱	۰/۰۳۳۳۱	۰/۰۴۵	$d_{50}=15.58$
۰/۰۰۸	۰/۹۱۷	۰/۰۱۴۸۱	۰/۰۲۸	$d_{50}=22.03$

[12]. در تحقیق حاضر با تغییر شرایط دبی، قطر ذرات بستر و ارتفاع ریزش نتایج مدل آزمایشگاهی ایشان توسعه داده شده و اطلاعات جامعتری نسبت به آب شستگی ناشی از جت ریزشی استخراج گردیده است [12].

### مشخصات میدان حل

در مدل سازی عددی، محدوده شبیه سازی شده از فلوم آزمایشگاهی چن دارای طول ۲ متر و عرض  $\frac{2}{3}$  متر می باشد. مدل سازی جریان و رسوب برای شرایط زیر صورت گرفته است:

ارتفاع ریزش آب  $0/22$ ،  $0/27$  و  $0/37$  متر برای دبی های  $3/3$  و  $5/7$  و  $6/9$  لیتر بر ثانیه، عمق جریان در

### مدل سازی عددی و تحلیل نتایج

پس از واسنجی مدل عددی و انتخاب ابعاد مناسب شبکه در مدل عددی، شبیه سازی جریان و رسوب توسط مدل عددی صورت گرفته و پس از تعیین اثر پارامترهایی نظیر ارتفاع ریزش، عدد فرود مصالح، قطر مشخصه ذرات بر حداکثر عمق آب شستگی ناشی از جت ریزشی، به تحلیل نتایج آنها پرداخته شده است. در ادامه سعی شده است پارامترهای تأثیرگذار به صورت بدون بعد درآورده شود تا بتوان نتایج کلی تری از بررسی های صورت گرفته به دست آورد.

### مشخصات مدل آزمایشگاهی

مطالعه چن مبنای مدل سازی تحقیق حاضر می باشد

محدوده عدد فرود جریان بین  $0/439$  تا  $0/918$  می‌باشد. بنابراین محدوده پارامترهای مؤثر به گونه‌ای انتخاب شده که حتی الامکان در برگیرنده شرایط مختلف جریان و رسوب باشد. در این تحقیق با درنظر گرفتن تغییر شرایط جریان و رسوب، در مجموع تعداد ۳۶ بار مدل‌سازی عددی برای مطالعه بر روی آب‌شستگی جت ریزشی انجام شده است.

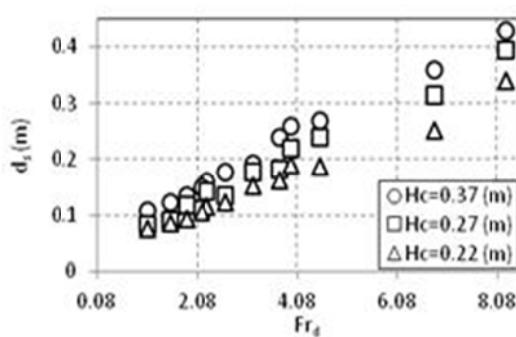
### تأثیر عدد فرود مصالح بر آب‌شستگی پایین دست جت ریزشی

قطر ذرات رسوب بدون شک تأثیر زیادی بر ابعاد حفره آب‌شستگی دارد. در حقیقت عمق آب‌شستگی با تغییر اندازه مصالح بستر، به علت تغییر تنش برشی مقاوم در برابر حرکت، برای ذرات بستر تغییر می‌کند. با تغییر قطر ذرات عدد فرود مصالح ( $Fr_d$ ) (معادله ۱۱) نیز تغییر می‌نماید.

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \quad (11)$$

که در آن  $V$  سرعت جت،  $d_{50}$  قطر مشخصه،  $s$  چگالی نسبی مصالح می‌باشد.

شکل (۶) عمق آب‌شستگی تابع عدد فرود مصالح نشان داده شده است.

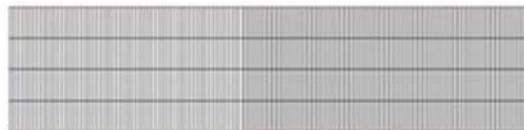


شکل ۶ تأثیر عدد فرود مصالح بر عمق آب‌شستگی در ارتفاع ریزش متفاوت

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود مصالح، عمق آب‌شستگی افزایش

بالا دست برابر  $y=0.04$  متر، عمق پایاب برابر  $y=0.15$  متر و قطر مشخصه ذرات ( $d_{50}$ ) برابر با  $0/3, 1, 2$  و  $4$  میلی‌متر در مدل‌سازی عددی انتخاب گردیدند. شبکه انتخاب شده دارای نسبت  $y/x=0.088$  در طول و برای ارتفاع  $H=0.37, 0.27, 0.22$  در  $x/z=1.367, 1.227, 1.067$  دارای نسبت مشتملای شبکه می‌باشد. شکل (۵) محدوده مدل‌شده و ابعاد شبکه را نشان می‌دهد.

به دلیل پیچیدگی پدیده آب‌شستگی و دخیل بودن پارامترهای متعدد در آن، در تحقیق حاضر سعی شده است با بررسی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی جت ریزشی شناختی جامع از این پدیده حاصل گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۵ شبکه به کار رفته در مدل‌سازی عددی برای عمق (الف) در افق، (ب) در مقطع  $H=0.37$

عدد فرود مصالح به دلیل در نظر گرفتن تأثیر توانمندی‌های رسوب و شرایط جریان، از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی جت ریزشی می‌باشد. محدوده عدد فرود مصالح در تحقیق حاضر بین  $1/08$  تا  $8/25$  می‌باشد. عدد فرود جریان در بالا دست جت ریزشی نیز به دلیل تأثیر در انرژی جت و قابلیت حمل مواد رسوبی یکی دیگر از پارامترهایی است که در تحقیق حاضر از آن استفاده شده است.

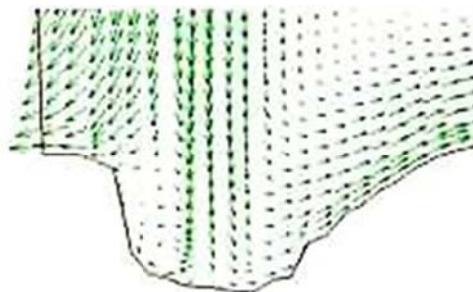
مستقیماً با سرعت و دبی جریان در ارتباط است. با افزایش عدد فرود جریان، سرعت و پتانسیل فرسایشی جت افزایش می‌یابد و درنتیجه حداکثر عمق حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد. اثر این پارامتر بر آب‌شستگی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد و این روند در هر سه دبی اتفاق می‌افتد. هم‌چنین در یک ارتفاع ریزش ثابت با افزایش عدد فرود حداکثر عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد زیرا با افزایش عدد فرود جریان، سرعت جریان افزایش می‌یابد و درنتیجه نیروهای اعمال شده توسط جریان بر بستر و عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. عمق آب‌شستگی را می‌توان وابسته به توان فرسایش‌پذیری جریان نیز مرتبط نمود. با افزایش عدد فرود جریان، توان فرسایش‌پذیری جریان افزایش می‌یابد، قدرت حمل و جابه جایی مصالح افزایش پیدا می‌کند و درنتیجه، به عمق آب‌شستگی افزوده می‌شود. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش ۵۲٪ عدد فرود جریان حداکثر عمق آب‌شستگی ۴۴٪ می‌یابد.

### تأثیر ارتفاع ریزش بر آب‌شستگی پایین دست

#### جت ریزشی

تأثیر ارتفاع ریزش بر میزان آب‌شستگی کمی پیچیده می‌باشد زیرا از یک سو با افزایش ارتفاع ریزش جت تا سطح پایاب، سرعت جت افزایش می‌یابد از سویی دیگر به علت اغتشاش داخلی، ورود هوا به داخل جت ریزشی افزایش می‌یابد و نیروی کشش سطحی کاهش می‌پذیرد و درنهایت جت آب و مخلوط هوا انرژی اولیه خود را از دست می‌دهد تا منجر به کاهش آب‌شستگی گردد. در بررسی‌های صورت گرفته در محدوده تغییرات ارتفاع ریزش تعیین شده، ورود هوا به جریان صورت نگرفته است و اثرات کاهندگی در

می‌یابد. این روند افزایش در هر سه ارتفاع ریزش آب اتفاق می‌افتد. طبق معادله (۱۱) عدد فرود مصالح با  $50$  رابطه عکس و با سرعت جریان رابطه مستقیم دارد. بنابراین با کاهش ابعاد مصالح بستر و افزایش دبی جریان، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. الگوی آب‌شستگی در چاله فرسایشی ایجاد شده تابع الگوی سرعت جریان و هم‌چنین آشفتگی جریان می‌باشد. در شکل (۷) الگوی جریان توسط بردارهای سرعت که اندازه این بردارها معرف مقدار سرعت جریان در هر نقطه می‌باشد، نشان داده شده است.

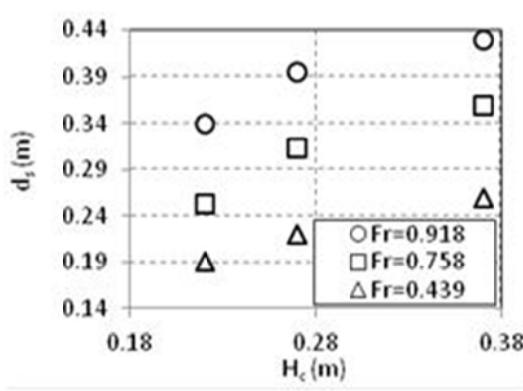


شکل ۷ نمایی از بردارهای سرعت درون حفره آب‌شستگی

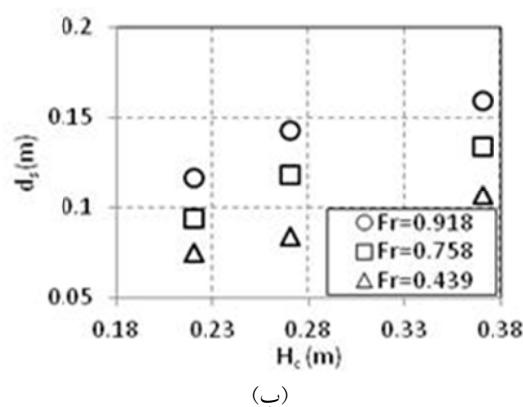
همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود شکل‌گیری حفره آب‌شستگی از محل برخورد جت به بستر که دارای بیشترین سرعت می‌باشد شروع می‌گردد. با ایجاد حفره و حرکت جت به درون آن، جریان‌های چرخشی شکل می‌گیرد و موجب خارج شدن ذرات ریزدانه از درون حفره می‌شود و درنتیجه حفره به اطراف گسترش می‌یابد تا به یک وضعیت باثبات برسد. این ذرات در دهانه خارجی حفره جایی که از پتانسیل‌های سرعت و اغتشاش جریان کاسته می‌شود، رسوب می‌کنند.

### تأثیر عدد فرود جریان بر آب‌شستگی پایین دست جت

عدد فرود جریان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پدیده آب‌شستگی پایین دست جت‌های ریزشی می‌باشد زیرا



(الف)



(ب)

شکل ۹ تأثیر ارتفاع ریزش بر حداکثر عمق آب شستگی در اعداد فرود متفاوت به ترتیب  $d_{50}=0.004$  mm,  $d_{50}=0.0003$  mm

### شناسایی پارامترهای مؤثر در آب شستگی جت ریزشی

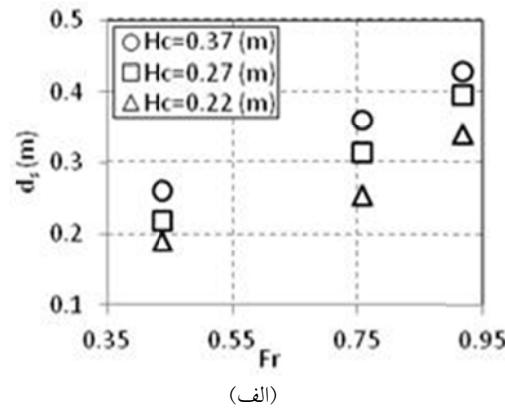
به منظور بررسی دقیقتر عوامل تأثیرگذار بر آب شستگی و تعیین حداکثر عمق آب شستگی، تجزیه و تحلیل ابعادی صورت گرفته است. به صورت کلی ۹ عامل تأثیرگذار شناسایی گردیده‌اند که در رابطه (۱۲) این عوامل نشان داده شده‌اند.

$$d_s = f_1(U, y, y_t, \rho, \rho_s, g, v, d_{50}, H_c) \quad (12)$$

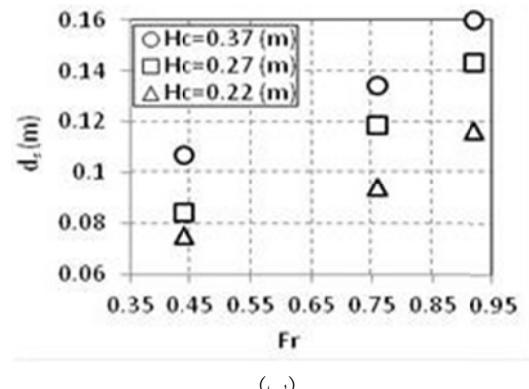
که در آن  $d_s$  حداکثر عمق آب شستگی،  $U$  سرعت جریان،  $y$  عمق جریان در بالادست،  $\rho$  چگالی آب،  $\rho_s$  چگالی رسوب،  $g$  شتاب نقل،  $v$  لزجت آب،  $d_{50}$  قطر مشخصه ذرات،  $y_t$  عمق پایاب و  $H_c$  ارتفاع ریزش می‌باشد. با ترکیب پارامترهای  $\rho_s$ ,  $\rho$  و  $g$  عبارت

فرسایش مشاهده نگردد. عمق آب شستگی برای ارتفاع‌های مختلف ریزش برای دو قطر متفاوت رسوبات بستر در شکل (۹) نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع ریزش، مقدار حداکثر عمق آب شستگی نیز افزایش می‌یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود جریان و دو مقدار قطر مشخصه ذرات اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع ریزش، سرعت اولیه برخورد جت به سطح آب افزایش می‌یابد و درنتیجه عمق نفوذ جت به درون آب بیشتر می‌شود و جت نیروی بیشتری به بستر وارد می‌کند و درنتیجه حداکثر عمق آب شستگی افزایش می‌یابد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با افزایش ۴۰٪ ارتفاع ریزش، حداکثر عمق آب شستگی ۲۱٪ افزایش می‌یابد.



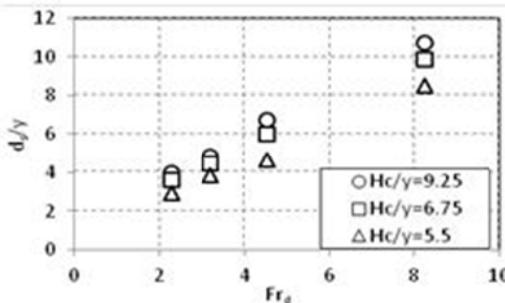
(الف)



(ب)

شکل ۸ تأثیر عدد فرود جریان بر حداکثر عمق آب شستگی در ارتفاع ریزش‌های متفاوت به ترتیب  $d_{50}=0.0003$  mm,  $d_{50}=0.004$  mm,

همچنین کاهش اندازه مصالح و درنتیجه کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت مرتبط داشت.

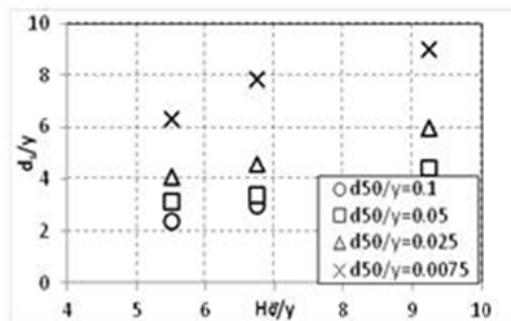


شکل ۱۰ تأثیر عدد فرود مصالح بستر و ارتفاع نسبی ریزش بر عمق آب شستگی نسبی برای مقدار ثابت  $Fr=0.918$

همچنین در یک عدد فرود مصالح ثابت با افزایش نسبت ارتفاع ریزش نسبت عمق آب شستگی افزایش می‌یابد که این روند در اعداد فرود بالا تأثیرگذاری بیشتری دارد. با ثابت نگه داشتن پارامترهای دیگر تغییرات عدد فرود مصالح در برابر نسبت عمق آب شستگی به صورت خطی تغییر می‌کند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با افزایش ۸۷٪ عدد فرود مصالح، حداقل عمق آب شستگی ۸۳٪ افزایش می‌یابد.

#### تأثیر پارامتر بی بعد نسبت ارتفاع ریزش بر نسبت عمق آب شستگی

عمق آب شستگی نسبی تابع ارتفاع ریزش نسبی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ تأثیر ارتفاع نسبی ریزش و قطر نسبی مصالح بر عمق آب شستگی نسبی برای مقدار ثابت  $Fr=0.758$

$\Delta g$  به دست می‌آید که در آن  $\Delta=s-1$  که  $s$  چگالی نسبی می‌باشد. بنابراین به جای  $3$  پارامتر  $p_s$  و  $g$  می‌توان از پارامتر  $\Delta g$  در تجزیه و تحلیل ابعادی استفاده نمود. بنابراین تعداد پارامترهای مؤثر در آب شستگی از  $9$  به  $6$  کاهش می‌یابد و درنتیجه با داشتن  $10$  عامل و تعداد سه بعد اصلی (طول، زمان و جرم) می‌توان  $7$  عدد بدون بعد به صورت رابطه (۱۳) تعریف نمود.

$$\tilde{d}_s = f_1(Fr_d, \tilde{d}, \tilde{H}, Fr, Re, \tilde{y}_t) \quad (13)$$

$$\text{که در آن } \tilde{d} = \frac{d_{s0}}{y}, \tilde{d}_s = \frac{d_s}{y}, \tilde{y}_t = \frac{y_t}{y} \text{ می‌باشند.}$$

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{\Delta g d_{s0}}} \quad \text{و} \quad \tilde{H} = \frac{H_c}{y}$$

با توجه به آشفتگی جریان در مجاورت بستر و بالا بودن عدد رینولدز در کلیه حالات جریان، تنش‌های ویسکوز در جریان ناچیز است و عملاً تأثیر ویسکوزیته بر حرکت سیال ناچیز می‌باشد. همچنین با ثابت بودن عمق پایاب و سراب برای یک دبی مشخص جریان، عملاً نسبت  $y_t/y$  از معادله بالا حذف می‌گردد. در ادامه پارامتر بدون بعد آب شستگی نسبت به دیگر پارامترها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تأثیر پارامتر بی بعد عدد فرود مصالح بر نسبت عمق آب شستگی. در شکل (۱۰) تأثیر پارامتر بدون بعد عدد فرود مصالح بر نسبت آب شستگی بدون بعد بررسی می‌گردد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود مصالح برای مقادیر مختلف نسبت ارتفاع ریزش ( $H_c/y$ ) نسبت عمق آب شستگی ( $d_s/y$ ) افزایش می‌یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود اتفاق می‌افتد. دلیل آن را می‌توان به افزایش سرعت جریان و درنتیجه افزایش انرژی جنبشی جت و

افزایش ( $d_{50}/y$ ) مقادیر ( $d_s/y$ ) به سمت یک عدد ثابت میل می‌کند. این نسبت در مقادیر  $y/d_{50}$  بیشتر از  $0/1$  اتفاق می‌افتد. این نسبت می‌تواند به عنوان شاخص مصالح حفاظت بستر در محل جت ریزشی مورد استفاده قرار گیرد. نمودار عمق آب‌شستگی تابع قطر نسبی ذرات به صورت نمایی می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

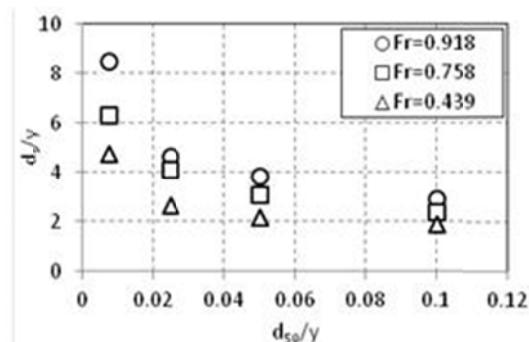
در خصوص آب‌شستگی جت ریزشی تحقیقات آزمایشگاهی زیادی صورت گرفته است. در این تحقیقات، توجه محققان به حصول حداقل عمق آب‌شستگی در فرآیند فرسایش پایین دست جت ریزشی معطوف بوده است. تأثیر عوامل مختلف شامل خصوصیات رسوب و مشخصه‌های جریان در قالب عده‌های بدون بعد ارائه گردیده است. در تحقیق حاضر، فرآیند آب شستگی به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار SSIM صورت گرفته است. برای نیل به این هدف، ابتدا واسنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت. مدل آشفتگی مناسب مدل  $k-e$ ، زبری اعمال شده در مدل قطر متوسط مصالح و معادله انتقال بار بستر معادله انگلوند-هانسن تعیین گردید. سپس حساسیت سنگی نسبت به ابعاد مش در مدل عددی صورت گرفت و مشخص گردید که یک شبکه  $30 \times 5 \times 35$  سلولی می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید.

در ادامه، با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی، عوامل بدون بعد تعیین گردیدند و نتایج عددی در قالب پارامترهای بدون بعد تحلیل شدند. در تحلیل‌های صورت گرفته، عمق فرسایش نسبی که نسبت عمق فرسایش بستر به عمق جریان در بالادست محل ریزش جریان می‌باشد، در تابعیت از پارامترهای مختلف دیگر شامل عدد فرود، عدد فرود مصالح، ارتفاع نسبی ریزش و قطر نسبی مصالح بررسی گردید. و نتایج زیر به دست آمد.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش قطر مصالح ( $d_{50}/y$ ) نسبت عمق آب‌شستگی ( $H_s/y$ ) برای مقادیر مختلف نسبت افزایش می‌یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع ریزش، سرعت جت برخورده با بستر نیز افزایش می‌یابد و سبب افزایش عمق نسبی آب‌شستگی می‌گردد.

### تأثیر پارامتر بی‌بعد نسبت قطر مشخصه ذرات بر نسبت عمق آب‌شستگی

در شکل (۱۲) عمق آب شستگی نسبی بر حسب قطر نسبی مصالح نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش نسبت قطر مصالح برای مقادیر مختلف اعداد فرود نسبت عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد که این روند برای هر سه مقدار ( $H_s/y$ ) اتفاق می‌افتد. علت آن را می‌توان افزایش مؤلفه‌های مقاومت ذره در برابر حرکت از جمله وزن دانه رسوب نام برد. در عدد فرود و ارتفاع ریزش ثابت نیروی بیشتری برای جایه‌جایی ذرات نیاز می‌باشد.



شکل ۱۲ تأثیر نسبت قطر مصالح بر نسبت عمق آب‌شستگی برای اعداد فرود متفاوت و ارتفاع نسبی ریزش ثابت  $H_s/y=5.5$

موضوع دیگر این که هرچه نسبت ( $d_{50}/y$ ) بیشتر باشد تأثیر عدد فرود جریان بر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد و به نظر می‌رسد به سمت یک مقدار ثابت می‌کند. هم‌چنین برای مقادیر ثابت عدد فرود با

قطر متوسطی در حدود ۱۰ درصد عمق جریان، تحت شرایط مختلف جریان در بالادست، عمق آب‌شستگی به ۲ برابر عمق جریان محدود می‌گردد. این نتیجه می‌تواند در انتخاب مصالح پوشش پایین دست جت ریزشی برای به حداقل رسانیدن عمق فرسایش، مؤثر باشد.

نتایجی که می‌توان از مدل عددی واسنجی شده به دست آورده بسیار فراتر از نتایجی است که در آزمایشگاه حاصل می‌گردد. در آزمایشگاه، به‌سبب محدودیت‌هایی از جمله تأمین دبی، فضای آزمایشگاهی و همچنین هزینه‌های مربوط به آزمایش‌ها، دامنه تغییرات پارامترها زیاد نمی‌باشدند. لیکن در مدل عددی واسنجی شده، می‌توان اطلاعات بیشتری را پردازش نمود و نتایج بیشتری به‌دست آورده. در مواردی نیز می‌توان بسیاری از پارامترها را که در آزمایشگاه اندازه‌گیری نشده‌اند را از نتایج مدل عددی به‌دست آورده. بنابراین مدل‌های عددی می‌توانند ابزاری باشند برای تعمیم داده‌های آزمایشگاهی و استخراج مؤلفه‌های مختلف جریان به‌دلیل محدودیت‌های مختلف که در آزمایشگاه قابل حصول نمی‌باشد.

عمق آب‌شستگی نسبی تابع خطی از عدد فرود مصالح بستر می‌باشد، به‌صورتی که تغییرات عدد فرود مصالح بستر در محدوده ۲ تا ۱۰، منجر به افزایش عمق فرسایش ۱ تا ۳ برابر عمق جریان برای محدوده تغییرات ارتفاع نسبی ۵ تا ۱۰ می‌گردد.

یک رابطه خطی با شبیه مثبت بین عمق فرسایش نسبی و ارتفاع ریزش نسبی وجود دارد به‌صورتی که با افزایش ارتفاع نسبی ۴/۵ تا ۹/۵ میزان فرسایش از ۲/۵ تا ۹ برابر عمق جریان در محدوده‌های قطر نسبی ذرات بین ۰/۷۰۰ تا ۰/۱ متغیر می‌باشد.

یک رابطه نمایی کاهشی بین عمق نسبی فرسایش و قطر نسبی مصالح بستر برای شرایط مختلف جریان وجود دارد به‌صورتی که مقدار فرسایش از ۸ تا ۲ برابر عمق جریان در کanal را برای مقادیر مختلف قطر نسبی ذرات از ۰/۰۱ تا ۱/۰ در شرایط مختلف جریان در بالادست برای عدد فرود متغیر بین ۰/۴ و ۰/۹ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که با افزایش قطر نسبی ذرات، ضمن کاهش عمق آب‌شستگی، وابستگی عمق آب‌شستگی به شرایط هیدرولیکی جریان بالادست کم می‌گردد به‌صورتی که برای مصالحی با

## مراجع

- Stein, O.R. and Julien, P.Y., "Sediment concentration below free overfall", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 9, pp. 622-624, (1994).
- Abida, H. and Townsend, R.D., "Local scour downstream of box-culvert outlets", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 3, pp. 425-440, (1991).
- Westrich, B., Kobus, H., "Erosion of uniform sand bed by continuous and pulsating jet", Proceedings of IAHR congress, No. 1(A13), Istanbul, (1973).
- Martins, R., "Contribution to the knowledge on scour action of free jets on rocky river beds", 11th Inter, Comm, on large dams, IIQ41. R44, (1973).
- Jaeger, C. h., "Über die ahnlichkeit bei flussbaulichen modellversuchen", Wasserwirtschaft und wasserTechnik, No. 23/27, (1973).
- Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D., "Local scour due to free overfall jets", *Journal of*

- Water Management*, Vol. 4, pp. 253-260, (2006).
۷. محبوبی، ا، "اثر قطر مصالح بر میزان آب شستگی ناشی از جت های ریزشی آزاد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، (۱۳۷۵).
8. Mercier, F., Bonelli, S., Anselmet, F. and Pinettes, P., "On the numerical modelling of the Jet Erosion Test", *6th International Conference on Scour and Erosion*, Paris, (2012).
9. Wanyun, X., Wenxin, H. and Zhongdong, Q., "Numerical simulation of sediment erosion by submerged plane turbulent jets", *9th International Conference On Hydrodynamics*, shanghai, (2010).
10. Olsen, N.R.B., "SSIIM User's Manual for Version 1 and 2", (2011).
۱۱. سلامتیان، س.ا، "بررسی نرخ آب شستگی پایین دست جت های ریزشی در مصالح یکنواخت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (۱۳۸۵).
12. Chen, J.Y., Ming, Y. and Hong, Y.M., "Characteristics of check dam scour hole by free over-fall flow", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 6, pp. 673-680, (2001).
13. Van Rijn, L.C., "Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport", Delft Hydr, Communication, No. 382, (1987).
14. Engelund, F. and Hansen, E., "A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams", Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, (1972).
15. Einstein, H.A. and Chien, N., "Effects of Heavy Sediment Concentration near the Bed on Velocity and Sediment Distribution", U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division Sediment Series No. 8, (1955).
16. Wu, W., Rodi, W. and wenka, T., "3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channels", *J. Hydr. Engrg.*, ASCE Vol. 1, pp. 4-15, (2000).

## ارتقای کارایی شناسایی پارامترهای فیزیکی سازه با استفاده از کاهش تکینگی ماتریس‌های پاسخ در حل معکوس معادلات حرکت\*

مجید قاسمی<sup>(۱)</sup>بابک تقیوی<sup>(۲)</sup>سعید عباس‌بندی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این مقاله شناسایی ماتریس‌های مشخصه سیستم خطی (شامل ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی) با استفاده از حل معکوس معادلات حرکت، با تمرکز بر کاهش شرایط بدوضعی دستگاه معادلات حاصل، در حوزه فرکانس ارائه گردیده است. این روش با اندازه‌گیری پاسخ‌های شتاب در درجات آزادی سازه تحت یک تحریک اجباری، به شناسایی سیستم و تشخیص خواصی‌های محتمل می‌پردازد. بدوضعی معادلات حرکت و وجود نویز در پاسخ‌های شتاب اندازه‌گیری شده به عنوان یک مشکل ناگزیر، موجب ناپایداری پاسخ مسئله تشخیص سیستم، خطای فراپنه و عدم قابلیت اعتماد در ماتریس‌های مشخصه تعیین شده می‌شود. در این مقاله الگوریتمی برای بهبود بخشیان به مشکل بدوضعی حل معکوس مسئله در روند شناسایی سیستم ارائه گردیده است که یک روش خاص بالامتشابهی سازی ماتریس است. الگوریتم پیشنهادی با شناسایی بردارهای موازی و شبکه‌موازی موجود در ماتریس ضرایب دستگاه معادلات خطی به حذف بردارهای وابسته خطی می‌پردازد و با کاهش تکینگی ماتریس، موجب پایدارسازی و ارتقای پاسخ می‌گردد. در تخمین بهینه ماتریس‌های مشخصه سیستم در روند شناسایی از روش حداقل مربعات و تابع جریمه استفاده شده است. بهمنظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، ماتریس‌های مشخصه قاب هشت طبقه غیربرتری با میرایی نامتناسب با استفاده از الگوریتم کاهش تکینگی در شناسایی سیستم، تعیین شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از الگوریتم پیشنهادی در بهبود تخمین و پایداری پاسخ‌ها کاملاً مفید است.

**واژه‌های کلیدی** شناسایی سیستم سازه، حل معکوس معادله حرکت، مسئله بدوضع، تکینگی ماتریس.

## Efficiency Improvement of the Structural System Identification by Reducing Singularity of the Response Matrixes in Inverse Solution of Equations of Motion

M. Ghasemi

B. Taghavi

S. Abbasbandy

**Abstract** This paper presents a method for identification of linear system physical parameters (structural mass, damping and stiffness matrices) using the inverse solution of equation of motion in the frequency domain, by focus on the reducing the illconditioning effect. The method utilizes the measured responses from the forced vibration test of structure in order to identify the system properties and detect the probable damages. Inputs and outputs data is gathered in an augmented matrix  $[A/b]$ , that large number of this data is caused to ill condition problem. Moreover, as an inevitable problem, there is a noise in the measurement and makes discrepancy in result of identification. Ill conditioning causes instability in the result of identification, the instability and noisy result reduce validity of the results and accordingly will be valueless statistic methods in the system identification (SI). This paper is presented an algorithm to improve the ill conditioning problem that is a special upper triangularization matrix method. The proposed algorithm can identify parallel and pseudo parallel vectors in coefficient matrix of linear equations. By removing these linearly dependent vectors and thus reducing singularity of the matrix, stabilization is resulted which is a key objective in numerical linear algebra. In order to optimal estimation of identification results, least-squares and penalty function methods is used. The validity and efficiency of the reduce singularity of matrix method is tested on a eight non shear story frame structure by using direct model updating method. Aforementioned structures have a non-proportional damped matrix and subjected to sweep harmonic forces. The results show that the proposed algorithm improves the stability of the estimation and the answer is quite useful.

**Key words** System Identification, Inverse Problem in Equation of Motion, Ill-Condition Problem, Singularity of Matrix.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۴/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۴/۲۴ می‌باشد.

(۱) استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، گروه عمران، قزوین.

(۲) نویسنده مسئول: دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، گروه عمران، قزوین.  
b.taqavi@gmail.com

(۳) استاد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، دانشکده علوم پایه، گروه ریاضی کاربردی، قزوین.

«خوش وضع (well condition problem)» و مسائلی را که در آنها یکی از سه شرط نقض گردیده باشد، مسائل «بدوضع (ill condition problem)» نامگذاری کرد. البته هادامارد بر این عقیده بود که مسائل بدوضع تنها جنبه تصنیعی دارند و نمی‌توانند در حل مسائل فیزیکی موضوعیت یابند [2]. به طور کلی مسائل بدوضع به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند، مسائل دارای «نقص رتبه» که در آنها ماتریس ضرایب دستگاه معادلات دارای تعدادی مقادیر تکین کوچک است به طوری که مقدار آنها بسیار کوچک‌تر از سایر مقادیر تکین این ماتریس است. نوع دیگر از مسائل بدوضع مربوط به حالتی است که رتبه و مرتبه عددی ماتریس ضرایب دستگاه معادلات پر است، اما باز هم تفاوت آشکاری بین مقادیر تکین کوچک و بزرگ این ماتریس وجود دارد که این حالت تحت عنوان «مسائل بدحالت (Ill posed problem)» شناخته می‌شود [3]. بر این اساس رامپ (S.M. Rump) ماتریس بدوضع با عدد وضعیت دلخواه ابداع نمود. ویژگی روش او این بود که محاسبات با دقت دلخواه فقط در بخشی از کل فرآیند حل مورد نیاز بود. کارایی روش رامپ در مقالات دیگر [4-6] نیز بررسی شد. اوhta و همکاران (T. Ohta et al) [9] روش رامپ را با کمی تغییرات در تعداد ارقام با معنی محاسباتی بررسی کردند. تعداد زیادی از روش‌های پیشنهادشده برای حل دستگاه‌های بدوضع به لحاظ تعداد فرآیند تکراری مورد نیاز برای هم‌گرایی، مقرن‌به‌صرفه نیستند (پرهزینه هستند) اگرچه برخی از آنها مانند روش (O.Strand) [11] از دقت مناسبی نیز برخوردارند. روش دیگری که برای کاهش مشکل بدوضعی پیشنهاد شده است الگوریتمی موازی برای تبدیل هاوشهولدر است که توسط لو و همکاران (M. Lu et al) [12] توسعه داده شده است. استفاده از تجزیه مقادیر تکین (SVD) در حل دستگاه معادلات بدوضع نیز طی

## مقدمه

امروزه آزمایش غیرمخرب سازه‌ها (NDT) با هدف شناسایی سیستم، تشخیص خرابی و پایش سلامت سازه در بسیاری از سازه‌های مهم مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. این روش‌ها عموماً بر پایه الگوریتم‌های شناسایی سیستم استوار هستند و در آنها به کمک اندازه‌گیری‌های میدانی، ساختار و پارامترهای مدل دینامیکی شناسایی می‌شوند. روند شناسایی سیستم مبتنی بر حل معکوس معادلات حرکت است که در آن پارامترهای سیستم به کمک اندازه‌گیری سیگنال‌های ورودی و خروجی آمیخته با نویز تعیین می‌گردد.

به طور کلی مسائل معکوس را می‌توان جزء بارزترین مسائل فیزیکی دانست که به لحاظ ریاضی بدوضع هستند مسائلی مانند مسائل معکوس پراکنش در تعیین شکل اشیا با استفاده از اندازه‌گیری شدت و فاز امواج پراکنده شده به وسیله شیء، تصویربرداری به روش توموگرافی در مبحث پزشکی، مسائل معکوس استیفان برای مدل‌سازی ذوب یخچال‌های قطبی، نمونه‌هایی از مسائل فیزیکی بدوضع هستند که مبتنی بر حل معکوس می‌باشند [2].

در حل عددی دستگاه‌های معادلات، بنابر وضعیت جواب مسئله یعنی وجود، یکتایی و یا وضعیت پایداری جواب، روش‌های گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر تا زمانی که سه شرط (۱) وجود، (۲) یکتایی، (۳) پایداری جواب تأمین باشند روش‌های معمول حل دستگاه‌های معادلات می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، اما در صورت عدم برقراری هر یک از شروط یاد شده، با یک مسئله بدوضع روبرو خواهیم بود که حل آن نیازمند تمهدات ویژه است. در اوایل قرن ۱۹، هادامارد (Jacques Salomon Hadamard) (1865-1963) کسی بود که بحث دستگاه‌های معادلات خوش وضع و بدوضع را مطرح نمود. وی دستگاه‌های معادلاتی را که در آنها سه شرط یاد شده برقرارند را مسائل

تکین (ITSVD) نامیدند. یکی دیگر از معمول‌ترین روش‌های حل مسائل بذووضع که یک روش منظم‌ساز شناخته می‌شود توسط تیخونوف (A.N Tikhonov [25]) ارائه گردید این روش خصوصاً در حل مسائل معکوس کاربرد گسترده‌ای دارد و در آن بهمنظور پایدارسازی مسئله اطلاعاتی در خصوص جواب مسئله به آن اضافه می‌گردد.

در خصوص استفاده از الگوریتم‌های پایدارساز مطرح شده در مسائل شناسایی سیستم سازه‌ای نیز تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. لسلر و همکاران (Q Leclerc et al [26]) شناسایی نیروهای موجود بر روی سازه را از طریق اندازه‌گیری‌های شتاب بررسی کردند، آنها در روند شناسایی روش خود از تجزیه ناقص مقادیر تکین با نقطه قطع تعیین شده در روش L-curve استفاده نمودند. در ادامه نزد برگ و گوستافsson (Gustafsson [27]) در روند این شناسایی از منظم‌سازی تیخونوف استفاده کردند. دیکن و همکاران (V Dicken et al [28]) از روش منظم‌سازی تیخونوف برای شناسایی بردارهای ثابت دینامیکی در سازه‌های با میرایی غیرخطی استفاده نمودند. یو و همکارانش (E Yu et al [29]) با این ایده که حل مشکل بدوضوعی و نقص رتبه مهم‌ترین مسئله در روند شناسایی پارامترهاست روشی منظم‌ساز برای به روز نمودن مدل سازه ارائه نمودند که در آن مشکلات عددی ذکر شده در فرآیند بهینه‌سازی کاهش یافته بود. روش آنها براساس حداقل مربعات متغیرهای محدود BVLS (Bounded Variables Least-Square) در آن بر روی راهکارهای ریاضی حل عددی مسئله بهینه‌سازی تمرکز شده بود. آنها روش را بر روی یک سازه با ورودی و خروجی مشخص اعمال نمودند و در آن تابع پاسخ فرکانسی را به عنوان داده‌های مسئله انتخاب گردند. آنان نشان دادند روش ارائه شده دارای سرعت هم‌گرایی بالاتر و دقت قابل قبول بوده است. (B Titurus and M.I Friswell)

یک روند طولانی توسط چند ریاضیدان بر جسته توسعه یافته است. در این روش ابتدا ماتریس ضرایب دستگاه معادلات به بردارهای ویژه و مقادیر ویژه خود تجزیه می‌گردد سپس معادلات به دست آمده برای حل دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه SVD به عنوان مهم‌ترین روش پایدارساز مسائل بذووضع شناخته می‌شود، با این حال دارای اشکالاتی نیز می‌باشد مانند از دست دادن برخی اطلاعات مفید در همان گام اول این روش (به دست آوردن مقادیر تکین ماتریس). برای حل این مشکل محققان روش‌های بسیاری ارائه نموده‌اند که از آن جمله می‌توان به G.H Golub (and Kahan [13]), الگوریتم بوزینگر و گولاب (Businger and G.H Golub [14]), الگوریتم گولاب – کاهان\_رینسک (G.H Golub and C.Reinsch [15]) اشاره نمود. الگوریتم‌های دیگری نیز بر پایه روش‌های ذکر شده توسط تی چان (T.F Chan) (T.F Chan-SVD) [16]، دمل و کاهان (J Demmel and W. Kahan) [17] و فرناندو و پارلت (K.V Fernando and B.N Parlett) [18] ارائه گردید. هم‌چنین کاربرد (الگوریتم dpls) در حل برخی دستگاه‌هایی که دارای مقادیر ویژه SVD بسیار کوچک هستند دچار مشکل می‌شود، برای حل این مشکل هنسن (G Hansen) [19] و واراه (J.M Varah) [20,21] روش تجزیه ناقص مقادیر تکین (TSVD) را پیشنهاد نمودند. با توجه به اهمیت محل قطع در روش تجزیه ناقص مقادیر تکین کوشش‌های زیادی برای پیشنهاد محل قطع بهینه انجام شده است. نمونه‌ای از این روش‌ها که کاربردهای زیادی نیز دارند روش L-curve و روش cross-validation هردو توسط هنسن [22,23] توسعه یافته‌اند. ولیخ و ویلنی (K.Y Volokh and O Vilnay) [24] نقطه قطع بهینه را بر مبنای تصویر کردن مقادیر ویژه بسیار کوچک به فضای خالی ماتریس بردارهای ویژه محاسبه نمودند آنها نام روش خود را بهبود یافته تجزیه ناقص مقادیر

**روش مستقیم شناسایی سیستم در حوزه فرکانس و استفاده از ایده کاهش تکینگی ماتریس**  
در روش مستقیم شناسایی، معادله تعادل حرکت سازه خطی با  $n$  درجه آزادی و فرض میرایی ویسکوز و با درنظر گرفتن همه درجات آزادی سازه و گام‌های زمانی اندازه‌گیری شده ( $m$  گام زمانی) منجر به  $n \times m$  معادله خواهد شد. با جداسازی ماتریس‌های مخصوصیات سیستم و پاسخ‌های سازه به عنوان مجهولات و معلومات شناسایی سیستم، فرم بلوکی رابطه (۱) را خواهیم داشت.

$$[M_{n \times n} \quad C_{n \times n} \quad K_{n \times n}] \begin{bmatrix} \ddot{U}_{n \times m} \\ \dot{U}_{n \times m} \\ U_{n \times m} \end{bmatrix} = F_{n \times m} \quad (1)$$

با تبدیل فوریه طرفین معادله و بیان پاسخ‌ها و نیروی ورودی در حوزه فرکانس معادله قابل بازنویسی است:

$$[M_{n \times n} \quad C_{n \times n} \quad K_{n \times n}] \begin{bmatrix} \ddot{U}(\omega)_{n \times m} \\ \dot{U}(\omega)_{n \times m} \\ U(\omega)_{n \times m} \end{bmatrix} = F(\omega)_{n \times m} \quad (2)$$

که  $(\omega) \ddot{U}$ ,  $(\omega) \dot{U}$ ,  $(\omega) U$  و  $(\omega) F$  به ترتیب پاسخ‌های شتاب، سرعت، جابه‌جایی و نیروی ورودی در حوزه فرکانس بوده و همگی مقادیر مختلف در حوزه فرکانس باشند. در صورتی که مقادیر پاسخ‌ها در حوزه زمان نویزدار باشند، مقادیر پاسخ‌های فرکانسی نیز نویزدار خواهند بود، ولی در موارد عملی معمولاً توزیع نویزها در همه ناحیه‌های فرکانسی یکسان نیست و میزان نسبت نویز به پاسخ فرکانسی در مقادیر فرکانس‌های خیلی کم و زیاد و همچنین در فرکانس‌های آنتی‌رزنانس‌ها بیشتر از سایر نواحی خواهد بود. در این مقاله به منظور اجتناب از وابستگی روش نسبت به نحوه توزیع نویز در محیط فرکانس، نویزها در حوزه زمان با توزیع نرمال ایجاد شده و به پاسخ‌ها اضافه شده‌اند و سپس پاسخ‌های نویزدار با تبدیل فوریه به پاسخ‌های

[30] روشی را برای به روز نمودن مدل مبتنی بر حساسیت ارائه نمودند که در آن روش بهینه‌سازی براساس تجزیه مقادیر تکین بود. آنها بیشتر در مورد حل مسئله بهینه‌سازی و روش‌های متفاوت آن تحقیق نمودند. آنها برای محاسبه مقدار بهینه، منحنی‌های مختلفی را به کار برندند و نحوه هم‌گرایی محاسبات را در این توابع بررسی کردند. در انتهای روش بر روی مدل‌های عددی اعمال شد و صحت آن مورد تأیید قرار گرفت.

در این مقاله یک الگوریتم جدید تحت عنوان «کاهش تکینگی ماتریس» برای حل مشکل بد وضعی مسئله شناسایی سیستم سازه‌ای ارائه گردیده است که از تکنیک‌های جبر خطی بهره می‌گیرد. روش شناسایی مورد استفاده در این مقاله با استفاده مستقیم از معادلات حرکت و به کارگیری بهینه‌ساز تابع جریمه به شناسایی پارامترهای سیستم در حوزه فرکانس می‌پردازد. باید توجه داشت در عمل یک هم‌پوشانی بین روش‌های پایدارسازی و مسئله بهینه‌سازی وجود دارد [۳۰]. الگوریتم ارائه شده در این مقاله ضمن کاهش تکینگی‌های ماتریس ضرایب باعث تأثیر بهتر بهینه‌ساز تابع جریمه می‌شود که به شکل یک پیش‌شرط‌ساز در فرم دستگاه معادلات جبری نمایان گردیده است. در این تحقیق سعی گردیده است با کاهش تکینگی ماتریس، ضمن کاهش عدد وضعیت ماتریس ضرایب دستگاه معادلات دقت و پایداری پاسخ مسئله شناسایی افزایش یابد. کارایی و قابلیت الگوریتم مذکور بر روی دو سیستم سازه‌ای با تعداد طبقات متفاوت و بارگذاری‌های مختلف (هارمونیک Harmonic load، تصادفی Pseudo Random load) و (Random PRBS load) بررسی گردیده است. در اینجا این نتایج برای یکی از این سازه‌ها که یک سازه هشت‌طبقه با میرایی غیرمتناوب است ارائه گردیده است.

در این روش بهینه‌ترین خصوصیات سازه به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که مجموع مربعات نیروهای ماندگار در همه درجات آزادی و در همه گام‌های زمانی منتخب کمینه گردد. در حالت بهینه‌سازی نامقید، جواب بهینه‌سازی به شرح زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial E_R^2}{\partial Q_{ij}} = 0 \Rightarrow R_R^T R_R Q = R_R^T F_R^T \quad (6)$$

در حالتی که قیدهای تقارن ماتریس‌های میرایی و سختی و قطری بودن ماتریس جرم اعمال گردد، می‌توان از روش‌هایی مانند روش تابع جریمه در روند بهینه‌سازی استفاده نمود. در این حالت قیدهای مذبور به شکل زیر قابل بیان است:

$$\begin{cases} Q_{ij} = Q_{ji} = 0 & \text{for } i \leq n \text{ and } i \neq j \\ Q_{ij} = Q_{j+n,i-n}, & \text{for } n+1 \leq i \leq 2n \\ Q_{ij} = Q_{j+2n,i-2n}, & \text{for } 2n+1 \leq i \leq 3n \end{cases} \quad (7)$$

در این حالت تابع هدف بهینه‌سازی به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$f = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n E_{kj}^2 + R_p \left( \sum_{i=j=1}^n Q_{ij}^2 + \sum_{i=n+1}^{2n} (Q_{ij} - Q_{j-n,i+n})^2 + \sum_{i=2n+1}^{3n} (Q_{ij} - Q_{j-2n,i+2n})^2 \right) \quad (8)$$

در رابطه فوق  $R_p$  به عنوان ضریب تابع جریمه بیانگر حد بزرگی تابع جریمه می‌باشد و مقدار آن براساس تابع هدف تعیین می‌گردد. انتخاب مقادیر کوچک برای  $R_p$  باعث تأثیر انداز قیدها در روند بهینه‌سازی می‌گردد، از طرف دیگر انتخاب مقادیر بسیار بزرگ برای آن باعث اختلال در روند بهینه سازی خواهد شد. بنابراین در این مقاله مقدار  $R_p$  برابر با مقدار حداقل  $E_{kj}^2$  در تابع هدف درنظر گرفته شده است که با ایجاد خطای در برقراری قیدها، مقدار جریمه‌ای با مقیاس تابع هدف اولیه به تابع جریمه افزوده گردد.

فرکانسی تبدیل شده‌اند.

با معرفی ماتریس ماتریس  $R_{\omega_{m \times 3n}} = [\dot{U}_{\omega_{m \times n}}^T \quad \dot{U}_{\omega_{m \times n}}^T \quad U_{\omega_{m \times n}}^T]$  به عنوان ماتریس پاسخ فرکانسی و  $Q_{3n \times n} = [M_{n \times n} \quad C_{n \times n} \quad K_{n \times n}]^T$  به عنوان ماتریس مشخصات مکانیکی سیستم، معادلات حرکت به صورت زیر نوشته می‌شود که پاسخ آن جواب مسئله شناسایی می‌باشد:

$$R_{m \times 3n} Q_{3n \times n} = F_{m \times n}^T \quad (3)$$

در معادله جبری فوق ماتریس  $R$  یک ماتریس فرامغین با عدد وضعیت بسیار بالاست، بنابراین در صورتی که پاسخ سازه به نویز آغازته باشد، جواب‌های محاسبه شده برای  $Q$  با استفاده از رابطه (4) منجر به خطای بسیار زیادی خواهد شد. در این صورت ماتریس نیروی ماندگار سازه در محیط فرکانس،  $E_\omega$  در  $n$  درجه آزادی سازه و  $m$  گام زمانی به صورت زیر قابل بیان است:

$$E_{\omega_{m \times 3n}} = R_{\omega_{m \times 3n}} Q_{3n \times n} - F_{\omega_{m \times 3n}}^T \quad (4)$$

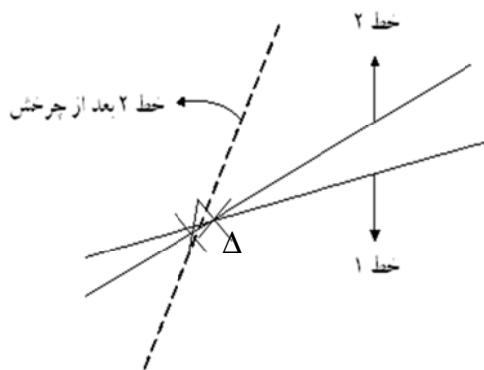
باتوجه به مختلط بودن مقادیر  $E_\omega$  در حل معادلات می‌توان از کمینه بودن مقادیر حقیقی و یا مقادیر قسمت موهومی  $E_\omega$ ، به صورت جداگانه استفاده نمود.

$$E_{R_{m \times n}} = R_{R_{m \times 3n}} Q_{R_{3n \times n}} - F_{R_{m \times n}}^T \quad (5-\text{الف})$$

$$E_{I_{m \times n}} = R_{I_{m \times 3n}} Q_{I_{3n \times n}} - F_{I_{m \times n}}^T \quad (5-\text{ب})$$

که  $Q_R$  و  $Q_I$  قسمت‌های حقیقی و موهومی ماتریس‌های پاسخ و  $F_R$  و  $F_I$  قسمت‌های حقیقی و موهومی ماتریس‌های نیروی ورودی در حوزه فرکانس هستند. غفوری آشتیانی و قاسمی [31] ثابت کردند می‌توان تخمین ماتریس  $Q_R$  را به عنوان تخمین درستی از ماتریس  $Q$  در روند شناسایی سیستم درنظر گرفت.

بردارهای موازی (و تقریباً موازی) از بدوضوعی مسئله بکاهد و پاسخ را پایدار نند، با کاهش این بردارها (تکینگی‌ها)، خطای حاصل از این چرخش ( $\Delta$ ) کمتر شود. در نتیجه خطای کمتری در نتایج مجھولات (Q) به وجود خواهد آمد. ۲) کاهش تعداد بردارهای موازی و شبیه‌موازی موجب کاهش وابسته‌های عددی و خطی ماتریس ضرایب و درنتیجه کاهش عدد وضعیت آن و پایداری بیشتر پاسخ در حضور نویز خواهد شد.



شکل ۱ نحوه عملکرد پیش‌شرط‌ساز در یک دستگاه دو معادله دو مجهول که با چرخش یکی از بردارهای شبیه‌موازی همراه است

لازم به توضیح است روند پیاده‌سازی الگوریتم کاهش تکینگی در ماتریس بلوکی  $R^T$  به صورتی بوده است که در ابتدا این الگوریتم روی ماتریس شتاب  $\ddot{X}$  لحاظ شده است و بعد از شناسایی ستون‌های وابسته از ماتریس شتاب حذف گردیده‌اند. در ادامه به صورت متناظر این ستون‌ها از ماتریس‌های سرعت و جابه‌جاگی و هم‌چنین ماتریس نیروی ورودی (F) نیز حذف گردیده‌اند.

لم: اگر A ماتریس مربعی ( $n \times n$ ) باشد و ماتریس B بالامثلی شده ماتریس A با استفاده از روش زیر باشد آن‌گاه:

درنهایت در حالت بهینه‌سازی مقید جواب بهینه تابع هدف با فرآیند مشتق‌گیری  $0 = \frac{\partial f}{\partial Q_{ij}}$  قابل تعیین است.

$$\frac{\partial f}{\partial Q_{ij}} = 0 \Rightarrow pR_R Q = pF_R^T \quad (9)$$

در رابطه (9) تابع جریمه به فرم پیش‌شرط‌ساز p در معادله جبری (4) نمایان شده است.

### الگوریتم کاهش تکینگی ماتریس singularity of matrix (RSM))

ایدها اصلی این مقاله بر پایه کاهش تکینگی ماتریس  $R^T$  استوار است که در آن از نوع خاصی از بالامثلی‌سازی استفاده شده است. الگوریتم ارائه شده قادر است با شناسایی ستون‌های وابسته عددی و وابسته خطی ماتریس  $R^T$ ، این ستون‌ها را از ماتریس حذف کند. در حقیقت هر بردار ستونی در دستگاه معادلات خطی (4) یک معادله است که در سطری از ماتریس R قرار دارد، در روند حل این دستگاه تعداد این معادلات بسیار زیاد است بنابراین بهینه‌ساز تابع جریمه به معادله اضافه شده است. تعبیر جبرخطی استفاده از تابع جریمه به فرم یک پیش‌شرط‌ساز در معادله (9) مشاهده می‌گردد. از نگاه جبر خطی عددی عملکرد یک پیش‌شرط‌ساز در دستگاه معادلات خطی دوران ماتریس ضرایب است، به طور مثال در فرم دومعادله دومجهول (مطابق شکل ۱)، این عملکرد به تبیین نقطه قطع می‌پردازد که موجب پایدار شدن پاسخ خواهد شد، البته در طی این روند خطای ناگریز ( $\Delta$ ) به وجود خواهد آمد. در روش پیشنهادی این مقاله سعی می‌گردد با استفاده از کاهش تکینگی ماتریس ضرایب تعداد معادلات (معادلات تکراری یا وابسته) کاهش یابد. این روش به لحاظ مبانی ریاضی دارای دو مزیت عمده است: ۱) در روند اعمال پیش‌شرط‌ساز معادله (9) قبل از این‌که پیش‌شرط‌ساز با اعمال دوران

وابستگی خطی دارند. باید توجه داشت اکثر مسائل فیزیکی بدوضع که مبنی بر جمع آوری اطلاعات میدانی هستند از نوع مسائل «بدحالت» می‌باشند، بنابراین در اینجا رابطه  $\epsilon = A_i + \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \dots + \lambda_t A_t$  بهجای رابطه قبل مقیاس بدوضعی خواهد بود، درواقع در این حالت بهجای وابستگی خطی بردارهای سطري و ستونی  $A$ ، وابستگی عددی آنها مدد نظر قرار می‌گیرد؛ بنابراین بهجای استفاده از عدد صفر در تشخیص وابستگی در الگوریتم ذکر شده بایستی یک عدد نزدیک به صفر اختیار گردد.

**بررسی نتایج شناسایی بر روی سازه هشت طبقه**  
نتایج شناسایی به کمک روش ارائه شده بر روی سازه‌های سه و هشت طبقه و تغییر بارگذاری در طبقات، با هم مقایسه شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد هر چه درجات آزادی سازه بیشتر باشد، با توجه به این‌که ماتریس نگاشت ( $R$ ) دارای عدد وضعیت بزرگ‌تری خواهد شد تأثیر استفاده از کاهش تکینگی ماتریس در بهبود نتایج بیشتر خواهد بود. این موضوع توسط سه نوع بارگذاری هارمونیک، تصادفی و PRBS با حالت‌های متفاوت از لحاظ محل اعمال بار، بر روی دو سازه سه و هشت طبقه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این مقاله تنها یکی از حالات فوق به منظور مقایسه با نتایج غفوری آشیانی و قاسمی [31] آورده شده است.

**تشريح سازه، نحوه بارگذاری و مدل‌سازی سیستم.**  
سازه مورد نظر یک قاب دو بعدی هشت طبقه غیربرشی با میرایی نامتناسب می‌باشد. با فرض صلب بودن سقف‌ها، درجات آزادی سازه و جرم طبقات در تراز تیرها متمرکز شده‌اند و این درجات آزادی به صورت افقی مستقل تعریف گردیده‌اند. ماتریس سختی سازه با استفاده از مدل اجزای محدود و ماتریس میرایی سیستم، با

سطر  $i$  ام ماتریس  $A$ ، ( $1 \leq i \leq n$ ) وابسته خطی است اگر همه درایه‌های سطر  $i$  ام ماتریس  $B$  صفر باشد.

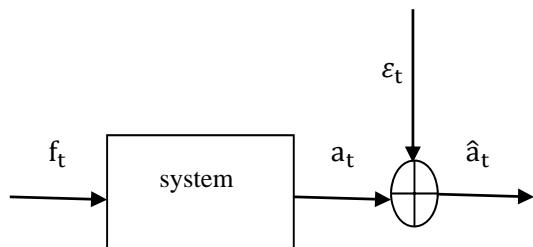
### روش بالامثلی‌سازی

از سه عمل سطري مقدماتی (1.  $e_{(p,q)}$ , 2.  $e_{\lambda(p)}$ , 3.  $e_{(p)+\lambda(q)}$  (در اینجا  $e$  یک عملگر مقدماتی (سطري مقدماتي) است،  $p$  و  $q$  دو سطر از فهرست موجود هستند. و  $\lambda$  یک اسکالر می‌باشد) فقط عمل دوم و سوم استفاده گردد. (جایه‌جایی سطر و یا ستون در ماتریس  $A$  نداشته باشیم). ( $\lambda \in \mathbb{N}$ ).

(1)  $A_{i,i} (1 \leq i \leq n)$  به عنوان عنصر محورگیری انتخاب شود و قبل از اجرای اعمال سطري مقدماتي در صورت امکان ناصر گردد.  
(2) در روند اجرای الگوریتم هر کجا  $A_{i,i}$  برابر صفر شد، محورگیری از  $A_{i+1,i+1}$  ادامه یابد.  
اثبات: فرض کنید اسکالارهای غیرصفر،  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t)$  وجود داشته باشد و سطرهای  $A$  نیز به صورت  $A_1, A_2, \dots, A_t, A_{t+1}, \dots, A_n$  مشخص شده باشند ( $t=i-1$ ). آن‌گاه اگر  $\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \dots + \lambda_t A_t + A_i = 0$  باشد، سطر  $i$  ام ماتریس  $A$  وابسته خطی (به سطرهای ماقبل خود) خواهد بود.

به منظور استفاده از الگوریتم فوق در حل معادله (9) دو نکته مهم بایستی مد نظر قرار گیرد، اول این‌که ماتریس  $R$  ماتریسی  $n \times m$  است که برای استفاده از قضیه فوق باید تبدیل به زیرماتریس‌های  $n \times n$  گردد. دوم این‌که حالتی که در الگوریتم فوق  $\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \dots + \lambda_t A_t + A_i = 0$  به صورت  $A$  ماتریس در نظر گرفته شد، در صورتی است که ماتریس  $A$  دارای «نقض رتبه» باشد، به عبارتی سطرهای و یا ستون‌هایی در ماتریس  $A$  هستند که به سایر سطرهای و ستون‌های ماتریس  $A$

درجات آزادی پاسخ می‌باشد به پاسخ‌ها و نیروی ورودی صحیح افروده شده است.



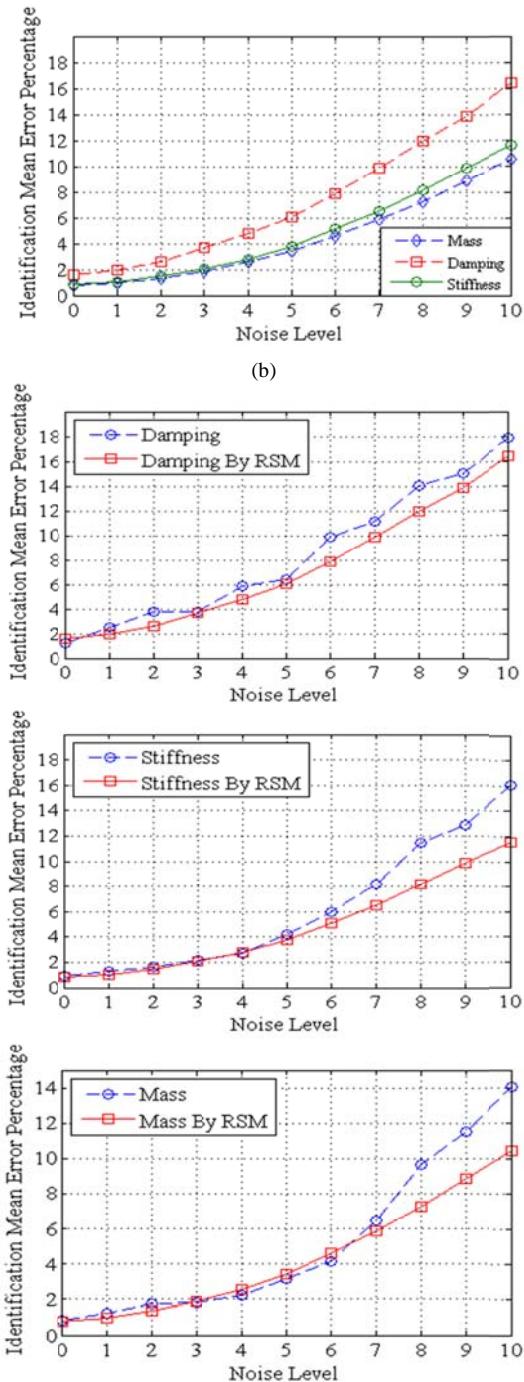
شکل ۳ ایجاد نویز در سیستم

جایگزینی ماتریس سختی سازه با هندسه مشابه ولی اعضاً متفاوت محاسبه شده است. خصوصیات سازه در (شکل ۲) آورده شده است.

با توجه به فرکانس‌های سازه به عنوان نیروی ورودی به سیستم، بار هارمونیک جارویی (با فرکانس‌های متغیر ۱ تا ۱۰ هرتز) در طبقه اول لحظه شده و بر طبق آن پاسخ شتاب سازه به دست آمده است. به جهت مدل‌سازی نویز نیز مطابق شکل (۳)،  $\epsilon_t$  به‌شکل یک نویز سفید با توزیع نرمال و مقدار میانگین صفر که میزان آن براساس نسبت مقدار جذر مربعات سیگнал نویز به مقدار میانگین جذر مربعات پاسخ در

	طبقه	1	2	3	4	5	6	7	8
جرم (ton)	70	55	40	55	40	60	60	55	
ماتریس میرایی ( $\text{KN.sec/mm}$ ) $\times 10^{-2}$	4.81	-3.59	0.05	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.07	
	-3.59	4.92	-1.08	-0.33	0.01	0.01	0.00	0.00	
	0.05	-1.08	2.11	-1.14	0.06	0.00	0.00	0.03	
	0.01	-0.33	-1.14	2.82	-1.06	-0.36	0.00	0.07	
	0.00	0.01	0.06	-1.06	2.03	-1.10	0.03	0.04	
	-0.01	0.01	0.00	-0.36	-1.10	3.47	-2.23	0.21	
	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	-2.23	4.25	-2.06	
	0.07	0.00	0.03	0.07	0.04	0.21	-2.06	1.65	
ماتریس سختی ( $\text{KN/mm}$ )	16.61	-9.53	-0.16	0.31	-0.16	0.16	0.01	0.14	
	-9.53	10.94	0.36	-2.02	0.21	-0.06	-0.01	-0.04	
	-0.16	0.36	2.74	-2.89	-0.42	0.23	0.03	0.19	
	0.31	-2.02	-2.89	5.93	0.51	-1.81	-0.03	-0.03	
	-0.16	0.21	-0.42	0.51	2.46	-3.1	0.11	0.41	
	0.16	-0.06	0.23	-1.81	-3.1	8.99	-4.50	0.10	
	0.01	-0.01	0.03	-0.03	0.11	-4.50	8.51	-4.12	
	0.14	-0.04	0.19	-0.03	0.41	0.10	-4.12	3.35	
Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	
فرکانس سازه (HZ)	0.607	2.027	2.815	3.919	5.509	6.379	7.895	9.662	

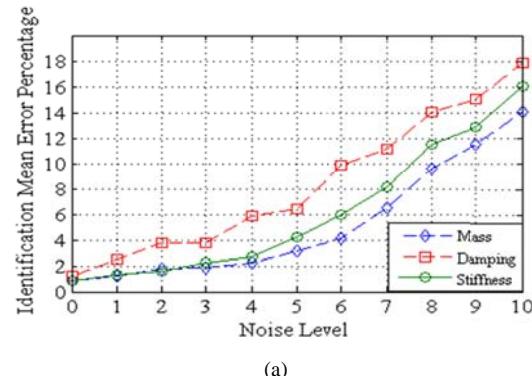
شکل ۲ سازه نمونه و خصوصیات آن



شکل ۴ مقایسه نتایج شناسایی عناصر قطری ماتریس‌های خصوصیات سیستم براساس تغییرات میزان نویز در پاسخ‌ها و نیروی در حالت بارگذاری هارمونیک جارویی ۱ تا ۱۰ هرتز بر روی طبقه اول از سازه هشت طبقه در دو حالت: (a) بدون استفاده از کاهش تکینگی ماتریس، (b) با استفاده از کاهش تکینگی ماتریس (RSM)، (در سه شکل دیگر نیز مقایسه نظریه نظریه ماتریس‌های خصوصیات سیستم در دو روش نشان داده شده است)

### نتایج شناسایی

حساسیت شناسایی سیستم در دو حالت استفاده و عدم استفاده از الگوریتم کاهش تکینگی ماتریس در تعیین خصوصیات سیستم با استفاده از شبکه‌پاسخ‌های سرعت و جابه‌جایی بهمیزان نویز (۱ تا ۱۰ درصد) در پاسخ شتاب و نیروی ورودی در شکل (۴) مقایسه شده‌اند. خطای نشان داده شده در این شکل، براساس میانگین خطای درایه‌های قطری ماتریس‌های تعیین شده سازه در ۱۰۰ نمونه‌سازی بهروش مونت کارلو محاسبه شده‌اند که نتایج نشان می‌دهد برتری نسبی از نظر مقدار خطای روشی است که از کاهش تکینگی استفاده می‌کند که این برتری با افزایش سطح نویز نمایان‌تر می‌گردد. بنابراین کاهش خطای  $\Delta$  در اثر پیش‌شرط‌ساز تابع جریمه که به عنوان یک ایده و هدف مطرح شده بود در عمل مشاهده می‌گردد. دلیل این که چرا بهبود نتایج با افزایش سطح نویز بیشتر می‌شود نیز به خصوصیات شناسایی سیستم در حوزه فرکانس بر می‌گردد، در واقع شناسایی سیستم در حوزه فرکانس در یک بازه خاص (بازه مفید فرکانسی) صورت می‌گیرد. با افزایش سطح نویز یک سری داده نامفید به این بازه وارد می‌شود که در ماتریس ضرایب به شکل بردار نمود پیدا می‌کند، این بردارها با بردارهای موجود در ماتریس ضرایب مشابهند و موجب ناپایداری پاسخ و افزایش خطای  $\Delta$  می‌گردند، درنتیجه با حذف آنها به کمک روش کاهش تکینگی ماتریس بهبود نتایج به دست خواهد آمد. لازم به ذکر است داده‌های قابل ذکر شده در سطح نویز پایین قادر به ورود به بازه مفید فرکانسی نیستند.



(a)

میرایی و سختی در هر دو حالت تقریباً یکسان، و برای عناصر غیر قطعی برتری نسبی با روشی است که از کاهش تکینگی ماتریس استفاده می‌کند، بنابراین تا سطح نویز  $\%3$  استفاده از کاهش تکینگی ماتریس تأثیر چندانی در کاهش خطای شناسایی ندارد. هم‌چنین ضریب تغییرات برای کلیه درایه‌های ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی (عناصر قطعی و غیرقطعی) در حالت استفاده از کاهش تکینگی ماتریس نسبت به حالت عدم استفاده از آن نتایج مطلوب‌تری دارد. بنابراین از کاهش ضریب تغییرات به عنوان یک معیار پایداربودن پاسخ، می‌توان فهمید در سطح نویز کم (همانند  $\%3$ ) نیز کاهش بذوپوشی مسئله قابل استنباط می‌باشد. از دیگر نتایج مشاهده شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱) در حالت عدم استفاده از کاهش تکینگی ماتریس، میانگین خطای کلیه درایه‌های ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی به ترتیب  $\%1/78$ ,  $\%0/72$  و  $\%1/42$  می‌باشد.

۲) در حالت استفاده از کاهش تکینگی، میانگین خطای کلیه درایه‌های ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی به ترتیب  $\%1/80$ ,  $\%0/57$  و  $\%1/13$  می‌باشد.

۳) در حالت عدم استفاده از کاهش تکینگی، میانگین ضرایب تغییرات درایه‌های ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی به ترتیب  $\%1/12$ ,  $\%0/33$  و  $\%1/15$  می‌باشد.

۴) در حالت استفاده از کاهش تکینگی، میانگین ضرایب تغییرات درایه‌های ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی به ترتیب  $\%0/94$ ,  $\%0/28$  و  $\%1/02$  می‌باشد.

۵) به طور کلی در هر دو حالت دقت و قابلیت اعتماد درایه‌های غیر قطعی ماتریس‌های تعیین شده بیشتر از عناصر قطعی هستند.

هدف دیگری که در این ارائه مورد توجه قرار گرفته است کاهش ناپایداری پاسخ می‌باشد. در یک مسئله پایدار افزایش نسبی سطح نویز و نتایج حاصل رابطه منظمی با یکدیگر دارند. همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد نحوه افزایش خطاهای خصوصیات تعیین شده در اثر افزایش میزان نویز در حالتی که از کاهش تکینگی ماتریس استفاده شده باشد رفتار منظم‌تری نسبت به حالت غیر آن دارد که نشان می‌دهد با کاهش تکینگی‌ها می‌توان به پایدارسازی پاسخ (کاهش اثر بذوپوشی در پاسخ مسئله) رسید.

### بررسی آماری دقت و قابلیت درایه‌های ماتریس‌های مشخصه سیستم

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده گردید نتایج شناسایی برای عناصر قطعی ماتریس‌های مشخصه سازه، در هر دو حالت استفاده و عدم استفاده از کاهش تکینگی ماتریس، تا سطح نویز  $\%5$  تقریباً برابر بوده است و از این میزان نویز به بعد به تدریج کارایی روش کاهش تکینگی ماتریس در کاهش خطای پاسخ نمایان می‌گردد. در این قسمت برای اطمینان از قابلیت روش پیشنهادی نتایج آماری ۱۰۰۰ بار شناسایی، برای کلیه درایه‌های ماتریس‌های مشخصه سازه، با نمونه‌سازی مونت کارلو مربوط به سطح نویز  $\%3$  (که نتایج شناسایی نزدیک به هم دارند) بررسی گردیده و در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. بدین منظور دو معیار آماری متوسط خطای و ضریب تغییرات برای بررسی کاهش خطای و پایدارسازی پاسخ برای کلیه درایه‌های ماتریس مشخصات سیستم سازه‌ای در دو حالت استفاده و عدم استفاده از کاهش تکینگی ماتریس محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد درصد خطای عناصر قطعی ماتریس‌های جرم،

۶) به طور کلی در هر دو حالت قابلیت اعتماد ماتریس زیرا ضریب تغییرات آن کمتر است.  
سختی بیش از ماتریس‌های جرم و میرایی می‌باشد

جدول ۱ خصوصیات تعیین شده ماتریس‌های میرایی و سختی در حالت عدم استفاده از روش کاهش تکینگی ماتریس با ایجاد ۳٪ نویز در پاسخ‌ها و نیروی ورودی برای حالت بارگذاری هارمونیک در یک گره از سازه (درصد خطای مقیاس شده و ضریب تغییرات به ترتیب از چپ به راست در پرانتز نشان داده شده است)

Storey	1	2	3	4	5	6	7	8
Mass of storey (ton)	69.44 (-0.8,0.1)	54.40 (-1.1,0.1)	39.60 (-1.0,0.5)	53.90 (-2.0,0.8)	39.44 (-1.4,1.4)	56.88 (-5.2,1.9)	59.04 (-1.6,2.2)	54.40 (-1.1,2.0)
Damping Matrix (KN.sec/mm) $\times 10^{-2}$	4.91 (3.0,0.7)	-3.54 (1.4,0.3)	0.10 (1.5,1.0)	-0.05 (-1.7,0.7)	-0.02 (-0.5,0.8)	-0.02 (-0.2,0.3)	0.00 (-0.2,0.4)	0.10 (1.0,0.7)
	-3.54 (1.5,0.3)	4.88 (-1.1,0.7)	-1.03 (1.5,0.7)	-0.34 (-0.4,0.6)	0.01 (0.0,0.6)	0.03 (0.5,0.6)	-0.04 (-1.2,0.7)	-0.01 (-0.3,0.7)
	0.09 (1.3,0.8)	-1.03 (-1.1,0.7)	2.13 (0.7,0.9)	-1.15 (-0.3,0.5)	0.04 (-0.5,0.8)	0.01 (0.3,1.2)	-0.05 (-1.4,1.2)	0.06 (0.9,0.8)
	-0.04 (-1.5,0.6)	-0.35 (-0.6,0.5)	-1.15 (-0.4,0.5)	2.78 (-1.1,1.0)	-1.04 (0.5,0.9)	-0.30 (1.8,1.0)	-0.04 (-1.3,1.5)	0.03 (-1.1,1.2)
	-0.01 (-0.3,0.6)	0.01 (0.0,0.5)	0.05 (-0.4,0.8)	-1.04 (0.5,0.9)	1.95 (-2.6,1.4)	-1.10 (2.9,1.0)	-0.09 (-3.6,2.1)	0.04 (0.0,1.7)
	-0.01 (-0.1,0.3)	0.03 (0.5,0.6)	0.01 (0.3,1.2)	-0.30 (1.8,1.0)	-1.01 (2.9,1.0)	3.30 (-5.1,3.9)	-2.04 (5.8,2.5)	0.26 (1.6,2.2)
	0.00 (-0.3,0.4)	-0.04 (-1.2,0.7)	-0.05 (-1.1,1.2)	-0.04 (-1.3,1.5)	-0.09 (-3.6,2.1)	-2.04 (5.8,2.5)	3.87 (-11.8,4.0)	-2.04 (0.6,3.3)
	0.10 (0.8,0.6)	-0.01 (-0.2,0.6)	0.06 (0.9,0.8)	0.03 (-1.1,1.3)	0.04 (0.0,1.7)	0.26 (1.6,2.2)	-2.04 (0.6,3.3)	1.66 (0.2,2.4)
Stiffness Matrix (KN/mm)	16.45 (-2.1,0.4)	-9.43 (1.3,0.2)	-0.17 (-0.2,0.2)	0.32 (0.2,0.1)	-0.16 (0.0,0.2)	0.15 (-0.2,0.1)	0.02 (0.2,0.1)	0.14 (0.0,0.2)
	-9.43 (1.3,0.4)	10.83 (-1.5,0.2)	0.36 (0.0,0.1)	-1.99 (0.4,0.2)	0.21 (0.0,0.2)	-0.06 (0.0,0.0)	-0.01 (0.0,0.1)	-0.03 (0.1,0.1)
	-0.17 (-0.2,0.2)	0.36 (0.0,0.1)	2.70 (-0.6,0.2)	-2.82 (0.9,0.3)	-0.40 (0.3,0.1)	0.21 (-0.3,0.1)	0.05 (0.3,0.3)	0.19 (0.0,0.1)
	0.32 (0.2,0.1)	-1.99 (0.4,0.2)	-2.82 (0.9,0.3)	5.77 (-2.1,0.7)	0.48 (-0.4,0.2)	-1.71 (1.3,0.4)	-0.09 (-0.8,0.3)	-0.02 (0.1,0.1)
	-0.16 (0.0,0.2)	0.21 (0.0,0.2)	-0.40 (0.3,0.1)	0.48 (-0.4,0.2)	2.39 (-0.9,0.2)	-2.96 (1.9,0.6)	0.06 (-0.7,0.3)	0.43 (0.3,0.2)
	0.15 (-0.2,0.1)	-0.06 (0.0,0.0)	0.2 (-0.3,0.1)	-1.71 (1.3,0.4)	-2.96 (1.9,0.6)	8.54 (-6.1,1.7)	-4.28 (2.9,0.9)	0.07 (-0.4,0.3)
	0.02 (0.2,0.1)	-0.01 (0.0,0.1)	0.05 (0.3,0.2)	-0.09 (-0.8,0.3)	0.06 (-0.7,0.3)	-4.28 (2.9,0.9)	8.26 (-3.3,2.0)	-4.20 (1.3,0.9)
	0.14 (0.0,0.2)	-0.03 (0.1,0.1)	0.20 (0.1,0.1)	-0.02 (0.1,0.1)	0.43 (0.3,0.2)	0.07 (-0.4,0.3)	-4.02 (1.3,0.9)	3.32 (-0.4,0.9)

جدول ۲ خصوصیات تعیین شده ماتریس های میرایی و سختی در حالت استفاده از کاهش تکینگی ماتریس با ایجاد ۳٪ نویز در پاسخها و نیروی ورودی برای حالت بارگذاری هارمونیک در یک گره از سازه (در صد خطای مقیاس شده و ضریب تغییرات به ترتیب از چپ به راست در پرانتز نشان داده شده است)

Storey	1	2	3	4	5	6	7	8
Mass of storey (ton)	69.44 (-0.8,0.1)	54.37 (-1.2,0.1)	39.54 (-1.0,0.4)	54.01 (-2.0,0.8)	39.36 (-1.4,0.1)	56.86 (-5.2,1.9)	59.02 (-1.6,2.1)	54.34 (-1.2,2.0)
Damping Matrix (KN.sec/mm) $\times 10^{-2}$	4.90 (3.0,0.6)	-3.56 (0.9,0.3)	0.06 (0.8,0.1)	-0.03 (-1.4,0.7)	-0.02 (-0.5,0.7)	-0.02 (-0.2,0.3)	0.00 (0.0,0.4)	0.09 (1.0,0.7)
	-3.56 (1.5,0.3)	4.90 (-1.0,0.7)	-1.04 (1.2,0.1)	-0.34 (-0.3,0.6)	0.01 (0.0,0.6)	0.01 (0.2,0.6)	-0.03 (-1.2,0.6)	-0.01 (-0.3,0.7)
	0.06 (0.9,0.8)	-1.04 (-1.8,0.5)	2.13 (-0.7,0.9)	-1.15 (-0.3,0.5)	0.04 (-0.5,0.8)	0.01 (0.3,1.2)	-0.05 (-1.6,1.0)	0.03 (0.3,0.8)
	-0.03 (-1.2,0.6)	-0.34 (-0.3,0.5)	-1.15 (-0.3,0.5)	2.78 (-1.1,1.0)	-1.07 (0.2,0.8)	-0.34 (1.4,0.8)	-0.06 (-1.5,1.2)	0.03 (-1.1,1.1)
	-0.01 (-0.3,0.6)	0.01 (0.0,0.5)	0.05 (-0.4,0.8)	-1.07 (0.1,0.9)	1.94 (-2.8,1.0)	-1.06 (1.0,1.1)	-0.07 (-3.4,2.1)	0.02 (-0.4,1.1)
	-0.01 (-0.1,0.3)	0.01 (0.1,0.6)	-0.02 (-0.5,1.2)	-0.34 (0.5,1.0)	-1.06 (1.0,0.9)	3.28 (-5.2,3.0)	-2.16 (2.4,2.4)	0.18 (-0.8,2.1)
	0.00 (-0.1,0.4)	-0.03 (-1.1,0.7)	-0.05 (-1.4,1.2)	-0.04 (-1.3,1.5)	-0.09 (-3.9,2.0)	-2.16 (2.4,2.2)	3.9 (-10.7,3.5)	-2.08 (-0.6,3.1)
	0.09 (0.7,0.3)	-0.02 (-0.4,0.5)	0.04 (0.4,0.4)	0.02 (-1.1,0.3)	0.03 (-0.0,1.5)	0.24 (-1.2,2.2)	-2.11 (-0.6,3.1)	1.57 (-0.3,1.9)
Stiffness Matrix (KN/mm)	16.46 (-2.1,0.4)	-9.47 (0.7,0.1)	-0.17 (-0.1,0.2)	0.32 (0.1,0.1)	-0.16 (0.0,0.1)	0.15 (0.0,0.1)	0.02 (0.2,0.1)	0.14 (0.0,0.2)
	-9.47 (0.8,0.1)	10.87 (-1.4,0.2)	0.36 (0.0,0.1)	-1.99 (0.3,0.3)	0.21 (0.0,0.2)	-0.06 (0.0,0.0)	0.01 (0.0,0.0)	-0.03 (0.1,0.1)
	-0.17 (-0.1,0.2)	0.36 (0.0,0.1)	2.70 (-0.6,0.1)	-2.83 (0.8,0.3)	-0.40 (0.2,0.1)	0.22 (-0.2,0.1)	0.05 (0.3,0.2)	0.19 (0.1,0.1)
	0.32 (0.1,0.2)	-1.99 (0.3,0.3)	-2.83 (0.8,0.3)	5.80 (-2.0,0.6)	0.49 (-0.3,0.2)	-1.73 (-0.9,0.5)	-0.06 (-0.5,0.3)	-0.02 (0.1,0.1)
	-0.16 (0.0,0.2)	0.21 (0.0,0.1)	-0.40 (0.2,0.1)	0.49 (-0.3,0.2)	2.40 (-0.8,0.1)	-2.98 (1.6,1.0)	0.07 (-0.4,0.3)	0.42 (0.2,0.1)
	0.15 (0.0,0.1)	-0.06 (0.0,0.0)	0.22 (-0.2,0.1)	-1.73 (1.0,0.3)	-2.98 (1.6,0.4)	8.63 (-5.9,1.6)	-4.32 (2.3,1)	0.09 (-0.1,0.2)
	0.02 (0.2,0.1)	0.00 (0.0,0.0)	0.05 (0.3,0.2)	-0.06 (-0.5,0.3)	0.08 (-0.4,0.3)	-4.33 (2.3,0.8)	8.32 (-3.0,1.6)	-4.03 (1.1,0.7)
	0.14 (0.0,0.2)	-0.03 (0.1,0.1)	0.19 (0.1,0.1)	-0.02 (0.1,0.1)	0.42 (0.2,0.8)	0.09 (-0.1,0.2)	-4.03 (1.1,0.8)	3.33 (-0.4,0.8)

درجات آزادی سازه تحت یک تحریک اجباری و

کاهش تکینگی ماتریس های حاصل از پاسخها،

### نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از اندازه گیری پاسخ سازه در

به کاهش عدد وضعیت ماتریس نگاشت به کمک حذف تکینگی‌های این ماتریس می‌باشد. به‌منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی در تعیین ماتریس‌های خصوصیات سیستم، قاب هشت‌طبقهٔ غیربرشی انتخاب شده است. در حالت کلی نشان داده شد روش کاهش تکینگی ماتریس، با کاهش عدد وضعیت ماتریس پاسخ دقت خصوصیات تعیین شده را بهبود می‌بخشد، این قابلیت با افزایش سطح نویز نمایان‌تر می‌شود و می‌توان به کمک آن شناسایی‌های با برداشت‌های پراختلال را به‌نحو مطلوب‌تر انجام داد. در پایان به‌منظور بررسی آماری نتایج، دو معیار پذیرفته‌شده میانگین خطأ و ضریب تغییرات در یک سطح نویز نسبتاً کم، برای کلیه درایه‌های ماتریس‌های مشخصهٔ سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نشان داده شد استفاده از کاهش تکینگی ماتریس می‌تواند در پایدارسازی پاسخ و کاهش خطأ در روند شناسایی سیستم عملکرد مناسبی داشته باشد.

ماتریس‌های مشخصهٔ سیستم خطی (شامل ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی) با استفاده از حل معکوس معادلات حرکت در حوزهٔ فرکانس در روند شناسایی سیستم به روش بهروزسانی مدل تعیین گردیده‌اند. اگر پاسخ‌های سازه بدون نویز باشند، ماتریس‌های مشخصهٔ سیستم خطی به صورت دقیق تعیین می‌گردند، ولی در حالت پاسخ‌های نویزدار، بهینه‌ترین مقادیر ماتریس‌های خصوصیات سازه، با استفاده از حذف تکینگی ماتریس‌های پاسخ، روش حداقل مربعات و کمینه نمودن مجموع نیروهای ماندگار معادلات حرکت در همه درجات آزادی و همه نقاط فرکانسی منتخب تعیین می‌گردند. در روش مذکور از کاهش تکینگی قسمت حقیقی ماتریس تبدیل فوریهٔ شتاب سازه، تحت یک تحريك اجباری در حل معکوس معادلات حرکت استفاده شده است.

به‌منظور بهبود بخشیدن حساسیت روش به میزان نویز، فرم جبری مسئله مورد بازبینی و بررسی قرار گرفته است و الگوریتمی پیشنهاد گردیده است که قادر

## مراجع

1. Morras,A., Vestroni,F., "Dynamic Methods for Damage Detection in Structures, Springerwien", New York, (2008).
2. Isakov,Victor., "Inverse Problems For Partioal Differential Equations", Springer Science & Business Media, (1998).
3. Hanse,P.C., "Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems", Siam, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, (1998).
4. Rump, S.M., "Approximate inverses of almost singular matrices still contain useful information", Technical Report 90.1, Faculty for Information and Communication Sciences, Hamburg University of Technology, (1990).
5. Rump,S.M., "A class of arbitrarily ill-conditioned floating-point matrices", *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, Vol. 12 (4), pp. 645–653, (1991).
6. Ogita,T., Rump,S.M., Oishi,S., "Accurate sum and dot product", *SIAM J. Sci. Comput.*, Vol. 26(6), pp. 1955–1988, (2005).
7. Ohta,T., Ogita,T., Rump,S.M., Oishi,S., "Numerical verification method for arbitrarily ill-conditioned

- linear systems", *Trans. JSIAM*, Vol. 15(3), pp. 269–287 (in Japanese), (2005).
8. Rump,S.M., Ogita,T., Oishi, S., "Accurate floating-point summation", 41 pages, 2006, submitted for publication, preprint is available from <http://www.ti3.tu-harburg.de/publications/rump>. Technical Report 05.12, Faculty for Information and Communication Sciences, Hamburg University of Technology, (2005).
  9. Ohta,T., Ogita,T., Rump, S.M., Oishi, S., "Numerical verification method for arbitrarily ill-conditioned linear systems", *Trans. JSIAM*, Vol. 15 (3), pp. 269–287, (in Japanese),(2005).
  10. Moszynski,K., "On solving linear algebraic equations with an ill-conditioned matrix", *Appl. Math.*, Vol. 22 (4), pp. 499-513, (1995).
  11. Strand,O., "Theory and methods related to the singular-function expansion and Landweber's iteration for integral equations of the first kind", *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol. 11 (4), pp. 798-824, (1974).
  12. Lu,M.,Liu,K., "Parallel algorithm for Householder transformation with applications to illconditioned problem", *Int. J. Comput. Math.*, Vol. 64, pp. 89-101, (1997).
  13. Golub,G.H.,and Kahan,."Calculating the singular value and pseudo-inverse of a matrix", *SIAM J. Num. Anal.* Vol. 2, pp. 205-224, (1965).
  14. Businger,P.A., and Golub,G.H., "Linear least squares solution by Householder transformation", (1965).
  15. Golub,G.H., and Reinsch, C., "Singular value decomposition and least squares solution", *Numer. Math.*, Vol. 14 pp. 403-420, (1970).
  16. Chan,T.F., "An improved algorithm for computing the singular value decomposition" .ACM Trans., Vol. 8(1), pp. 72-83, (1982).
  17. Demmel,J., and Kahan, W., "Accurate singular value of bidiagonal matrices", *SIAM J. Sci. and Stat. Comput.*, Vol. 11(5), pp. 873-912, (1990).
  18. Fernando,K.V., andParlet, B.N., "Accurate singular and differential qd algorithms", *Numerische Mathematik*, Vol. 67(2), pp. 191-229, (1994).
  19. Hansen., "A numerical method for solving Fredholm integral equations of the first kind using singular values",*SIAM J. Numer. Anal.*, Vol. 8(3), pp. 616-622, (1971).
  20. Varah,J.M., "On the numerical solution of ill-conditioned linear systems with applications to ill-posed problems", *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol. 10(2), pp. 257-267,(1973).
  21. Varah,J.M., "A practical examination of some numerical methods for linear discrete ill-posed problems", *SIAM Review*, Vol. 21(1), pp. 100-111, (1979).
  22. Hansen, P. C., "Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve". *SIAM Review*, Vol. 34(4), pp. 561–80, (1992).
  23. Hansen, P. C., O'Leary DP. "The use of the L-curve in the regularizationof discrete ill-posed

- problems". *SIAM J Sci. Compute* Vol. 14, pp. 1487–503, (1993).
24. Volokh,K. Y.,and Vilnay,O.,"Pin-pointing solution of ill-conditioned square systems of linear equations", *Appl. Math. Lett.* Vol. 13(7), pp. 119-124, (2000).
25. Tikhonov,A.N., "Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method,Dokl. Akad. Nauk", SSSR 151(1963), 501-504, Soviet Math. Dokl. 4, pp. 1035-1038, (1963).
26. Leclere, Q., Pezerat, C., Laulagnet, B., Polac, L.,"Indirect measurement of main bearing loads in an operating dieselengine",*Journal of Sound and Vibration*, Vol. 286(1) pp. 341–361, (2005).
27. Nordberg, T.P., Gustafsson, I.,"Dynamic regularisation of input estimation problems by explicit block inversion", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195(44), pp. 5877–5890, (2006).
28. Dicken, V., Menz, I., Maass, P., Niebsch, J., Ramlau, R.,"Inverse imbalance reconstruction for nonlinearly damped systems", *Inverse Problems in Science and Engineering* 2005, Vol. 13(5), pp. 507–543, (2005).
29. Yu, E., Taciroglu, E., and Wallace, J.W., "Parameter Identification of Framed Structures using an Improved Finite Element Model-updating Method", *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 36, pp. 619-639, (2007).
30. Titurus, B., and Friswell, M.I., "Regularization in Model Updating", *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.75(4), pp. 440-478, (2008).
31. Ghafori-Ashtiani,M., and Ghasemi,M., "System Identification Method by Using Inverse Solution of Equations of Motion in Frequency Domain", *Journal of vibration and control*, Vol. 19(11), pp. 1633-1645, (2012).



## توسعه یک مدل تحلیلی تغییر مکان کنترل برای رفتار چرخه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن اثرات باریک‌شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش\*

(۱) مهران زینلیان

(۲) مهدی مختاری

**چکیده** ارزیابی و ارائه مدل‌های تحلیلی مناسب برای بررسی و پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای سازه‌ها همواره مورد توجه محققان و طراحان سازه بوده است. در این مقاله یک مدل تحلیلی برای نشان دادن رفتار چرخه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن اثرات کاهنده‌گی شامل باریک‌شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش معرفی شده است. این مدل بر مبنای مدل مستقل می‌باشد، به طوری که اثر لغزش نیز مورد توجه قرار گرفته است. این مدل براساس یک سیستم تک درجه آزادی، چندخطی و نیز توسعه معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی مرتبط بیان می‌شود. مدل پیشنهادی مشخصات اصلی سیکل‌های چرخه‌ای را با استفاده از پارامترهای قابل اندازه‌گیری سازه از طریق آزمایش، نشان می‌دهد. از آن‌جا که معمولاً آزمایش‌های رفتار لرزه‌ای صورت گرفته بر روی قاب‌های سازه‌ای توسط محققان، به صورت تغییر مکان-کنترل می‌باشند، لذا برای تطبیق مناسب نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی، مدل ارائه شده به صورت تغییر مکان-کنترل نیز توسعه داده شده است. این مدل برای ترکیبات سازه‌ای مختلف با انواع مصالح مختلف از جمله فولاد، بتون و... استفاده می‌گردد. رژیم بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده به مدل براساس روش B استاندارد ASTM E2126-07 می‌باشد. بهمنظور بهتر نشان دادن عوامل کاهنده‌گی بر رفتار چرخه‌ای سازه و ارزیابی عملکرد مدل ارائه شده، مثال‌های متعادلی از یک سیستم سازه‌ای ارائه گردیده است. نتایج حاصل، نشان‌دهنده اثر قابل ملاحظه هر یک از اثرات کاهنده‌گی بر پاسخ چرخه‌ای انواع سیستم‌های سازه‌ای می‌باشد. هم‌چنین نشان داده مدل اصلاح شده تغییر مکان کنترل، تطبیق بهتری با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دارد.

**واژه‌های کلیدی** رفتار چرخه‌ای، مدل تحلیلی، تغییر مکان-کنترل، باریک‌شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت، لغزش.

## Displacement Control Based Analytical Description of Pinching, Sliding, Degrading Hysteretic System

M. Zeynalian

M. Mokhtari

**Abstract** In this paper, an analytical model is introduced to show the cyclic behavior of the structures, considering degradation phenomena including pinching, stiffness degradation, strength deterioration and sliding effects. This model is based on well-known Mostaghel's model though some essential modifications as well as sliding effect are also taken into account. This model is developed based on a simple single degree of freedom and multi-degree of freedom multi-linear mechanical systems and developing of partial differential equations. The proposed model includes basic characteristics of the hysteresis cycles that can be easily measured through the experimental tests. It is notable that usually the experiments conducted on the structural members are displacement-control based. Hence, in order to properly implement the analytical model with the experimental results, the proposed model has been developed according to displacement-control. The cyclic loading regime applied to this model is based on standard ASTM E2126-07 method B. In order to demonstrate the degrading phenomena of the hysteresis behavior of the structures, several examples of a structural system are presented to show that the proposed analytical model can provide realistic descriptions of the structural hysteretic performances.

**Key Words** Hysteretic Behavior, Analytical Model, Displacement-Control, Pinching, Stiffness Degradation, Strength Deterioration, Sliding.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۵/۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۱۰/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان. m.mokhtari.civil@gmail.com

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

۲) کار حاصل از نیروهای اصطکاکی در اثر لغزش بین اتصالات و همچنین باز و بسته شدن متنابع ترک‌ها. در موارد کاربردی از قبیل تحلیل‌های لرزه‌ای، پاسخ اجزای سازه تحت اثر بارگذاری‌های متنابع چرخه‌ای و درنظر گرفتن رفتار غیرالاستیک آنها، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. زیرا هنگامی که اجزا تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای قرار می‌گیرند، معمولاً چهار کاهش سختی و کاهش مقاومت می‌گردند.

مدل‌های چرخه‌ای متعددی طی سالیان ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ برای سازه‌های بتن مسلح ارائه گردید. کلاف و جانستون [1] اولین مدل کاهندگی سختی را ارائه کردند. ایوان [2] رفتار چرخه‌ای را با معرفی مدل توزیع المان به صورت عددی بررسی و توسعه داد. باک [3] یک مدل چرخه‌ای ملايم پیشنهاد داد. مدل‌های چرخه‌ای ملايم، اشاره به مدل‌هایی با تغییر پیوسته سختی ناشی از تسلیم شدگی و تغییرات شدید رفتار چرخه‌ای مربوط به باربرداری و رفتار کاهندگی دارد. بیسر و نوری و کاسیاتی [5,4] و رینهورن و همکارانش [6]، اصلاحات گسترده‌ای در مدل باک-ون با در نظر گرفتن اثرات کاهندگی اعمال نمودند. براساس مدل‌های مذکور، محققان دیگر نیز مدل‌های متعدد دیگری شامل اثرات کاهندگی ارائه دادند. ماهین و لین [7] مدل دوخطی کاهندگی سختی را معرفی کردند. مستقل [8,9] مدل چرخه‌ای دیگری براساس ترکیبی از جرم و فرها ارائه داد. مستقل در ابتدا با استفاده از معادله دینامیکی سیستم جرم و فنر و همچنین معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی به بررسی اثرات کاهندگی شامل باریک شدگی، کاهش سختی و کاهش مقاومت بر روی مدل دوخطی رفتار چرخه‌ای و پاسخ این سیستم به اثرات فوق پرداخت؛ و سپس این مدل را برای رفتار چند خطی و همچنین سیستم‌های چند درجه آزادی دو خطی تعیین داد. وی در مدل خود دو نوع باریک شدگی را مطرح

## مقدمه

رفتار چرخه‌ای یکی از خواص مهم سیستم‌های سازه‌ای است، که بیانگر نوع عملکرد و میزان استهلاک انرژی سازه به هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای به سازه‌ها می‌باشد به طوری که چرخه حاصل ابتدا وارد ناحیه الاستیک و سپس وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. عملکرد غیرخطی رفتار چرخه‌ای به طور گسترده در اغلب سیستم‌های سازه‌ای مشهود است. به عبارت بهتر، هنگامی که اعضای سازه‌ای تحت اثر بارهای دینامیکی قوی از قبیل زمین‌لرزه، دچار تغییر شکل‌های پلاستیک می‌گردند، رفتار چرخه‌ای ظاهر می‌شود. چنان‌چه رفتار چرخه‌ای به صورت خطی فرض شود، از بخش زیادی از ظرفیت سازه برای مستهلك نمودن انرژی وارد به آن، صرف‌نظر خواهد شد. لذا تخمین‌های غیرمحافظه‌کارانه و به دنبال آن طراحی‌های غیراقتصادی را در پی خواهد داشت. بنابراین لازم است رفتار چرخه‌ای سازه‌ها به صورت واقعی و با درنظر گرفتن بخش غیرخطی آنها در محاسبات مد نظر قرار گیرند. خاطرنشان می‌سازد، عدم درنظر گرفتن عوامل کاهندگی مؤثر بر رفتار چرخه‌ای مانند باریک شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش نیز سبب تخمین‌های نامناسب در امر طراحی می‌گردد، که این موضوع می‌تواند یکی از عوامل مهم در خرابی سازه به هنگام زلزله باشد. به عبارت دیگر، سازه‌های در معرض عوامل کاهندگی مذکور از جذب و استهلاک انرژی پایین‌تری نسبت به سازه‌های بدون کاهندگی برخوردار هستند.

به منظور ارزیابی عملکرد اعضای سازه و کنترل رفتار سیستم سازه‌ای تحت اثر بارهای لرزه‌ای، لازم است رفتار چرخه‌ای سازه مورد بررسی قرار گیرد. رفتار چرخه‌ای یک سیستم سازه‌ای به دو عامل اصلی وابسته است، که عبارتند از:

- ۱) تغییر خواص اعضا به واسطه تسلیم شدگی و درنتیجه ایجاد رفتار غیرالاستیک در عضو.

مثال‌های متعددی از یک سیستم سازه‌ای، عملکرد رفتار چرخه‌ای تحت عوامل کاهنگی مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

خطارنشان می‌سازد مدل ارائه شده در این مقاله، دارای تفاوت‌های اساسی زیر نسبت به مرجع [13] می‌باشد که عبارتند از:

(۱) تعمیم اثر لغزش بر رفتار چندخطی سازه‌های تک درجه آزادی.

(۲) حذف اثر نیروی کترول و اعمال اثر تغییر مکان کترول برای شبیه‌سازی کامل نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی.

### عملکرد چرخه‌ای سیستم‌های سازه‌ای

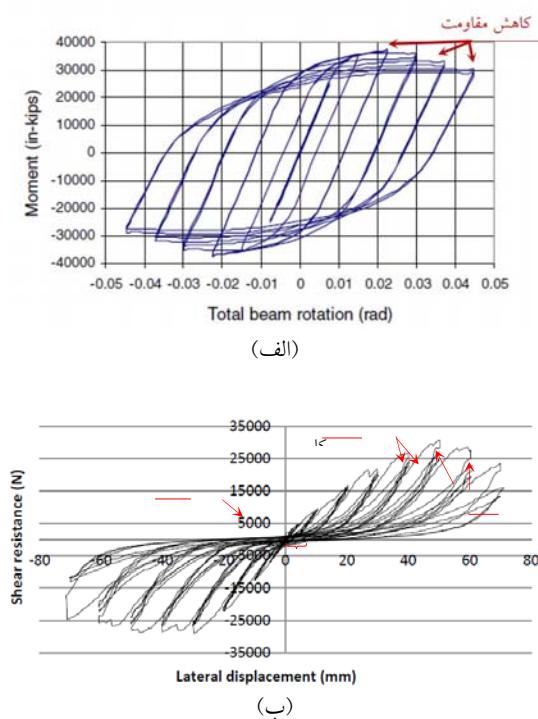
خواص سازه، به‌ویژه رفتار چرخه‌ای آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری سازه در برابر زلزله دارد. اگر مقاومت و سختی یک سازه تحت بارگذاری متناوب در محدوده غیرارتجاعی ثابت بماند، رفتار چرخه‌ای را ثابت می‌خوانند و اگر کاهش یابد آن را کاهنده می‌نامند. همچنین کاهش سختی و مقاومت از پایداری لرزه‌ای کاسته و موجب افزایش جابه‌جایی سازه در زلزله می‌شود. بنابراین، در یک سازه هر قدر خواص چرخه‌ای از ثبات زیادتری برخوردار باشد، درجه ایستایی سازه در برابر زلزله زیادتر است [۱۵].

پژوهشگران طی چند دهه گذشته تلاش زیادی برای تبیین خواص چرخه‌ای انواع سازه‌ها نموده‌اند. به‌کمک نتایج این تحقیقات می‌توان رفتار لرزه‌ای سازه را شناسایی و کترول نمود. در واقع این تحقیقات منجر به شناسایی نقاط ضعف انواع سازه‌ها گردیده است و به‌کمک نتایج آن می‌توان این نقاط ضعف را بر طرف نمود و به حاشیه اطمینان بیشتری دست یافت. بسیاری از ضوابط آیین‌نامه‌های زلزله در زمینه بارگذاری زلزله و نحوه ساخت و اجرای ساختمان‌های آجری، بتی، فولادی و انواع دیگر سازه‌ها متأثر از نتایج همین تحقیقات می‌باشند [۱۵]. عملکرد غیرخطی چرخه‌ای

نمود که عبارت بودند از:

- ۱) نابرابری مقاومت در دو جهت مخالف بارگذاری و
- ۲) سخت‌شدنگی. سیواسلوان و رینهورن [11,10] براساس مدل‌های اولیه ایوان و مستقل مدل چرخه‌ای ملایمی را با درنظر گرفتن مشخصات باریک‌شدنگی، کاهش سختی و کاهش مقاومت توسعه دادند. ایبارا و همکارانش [12] مدلی براساس انرژی چرخه‌ای وابسته به عوامل کاهنگی بیان کردند. لازم به ذکر است، مستقل و سایر محققان اثر لغزش را در مدل خود استفاده نکردند. اما با توجه به اثر قابل ملاحظه لغزش بر میزان استهلاک انرژی و عملکرد سازه به هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای در برخی از سازه‌ها، مانند سازه‌های سرد نوردوشده فولادی، باید مورد بررسی قرار بگیرد. به این منظور زینلیان و همکاران [13] مدل دوخطی مستقل را با در نظر گرفتن اثر لغزش توسعه دادند. ایشان همچنین با بررسی مدل دو خطی مستقل به این نتیجه رسیدند که، معادلات مطرح شده توسط مستقل برخی شرایط مرزی مربوط به حلقة اولیه چرخه را ارضاء نمی‌کنند؛ لذا یک اصلاح اساسی در مدل مستقل اعمال نمودند.

در سال‌های اخیر، اغلب تحقیقات صورت گرفته بر روی رفتارهای چرخه‌ای براساس تحریک‌های دینامیکی خارجی مانند زلزله بر سازه بوده است. از آنجا که عدمه آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سازه‌ها به صورت تغییر مکان-کترول می‌باشد، در تحقیق حاضر سعی شده است تا به منظور تطبیق بهتر نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی، پاسخ سیستم سازه‌ای براساس تغییر مکان-کترول ارائه گردد. رژیم بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق، به صورت تغییر مکان-کترول و براساس روش B استاندارد ASTM E2126-07 می‌باشد [14]. این استاندارد مبنای بررسی رفتار لرزه‌ای و آزمایش قاب‌های سازه‌ای تحت اثر اعمال تغییر مکان‌های جانبی می‌باشد. جزئیات این روش در ادامه توضیح داده شده است. در پایان، به منظور تبیین بهتر مدل تحلیلی توسعه داده شده در این پژوهش، با ذکر



شکل ۱ نمودار چرخه‌ای برای: (الف) یک عضو سازه فولادی [16]، (ب) یک قاب سازه‌ای سرد نورده‌شده فولادی [17]

### مدل دوخطی مستقل

مستقل در سال ۱۹۹۹ از یک مدل تحلیلی برای بیان ریاضی یک سیستم مکانیکی تک درجه آزادی استفاده کرد. این سیستم مطابق شکل (۲) شامل جرم  $m$ ، دو فنر  $x$  و  $y$  و یک میراگر ویسکوز با ضریب میرایی  $\mu$  می‌باشد. فنر با سختی  $\alpha k$  مستقیماً و فنر با سختی  $\mu(1-\alpha)k$  از طریق یک لغزنه با ضریب اصطکاک  $(t)$  به جرم متصل هستند. سختی کل سیستم  $k$  و  $\alpha$  بین صفر و یک است.  $P(t) = \bar{P}_0 p(t)$  بار خارجی سیستم است که  $\bar{P}_0$  دامنه آن است. خاطرنشان می‌سازد مدل مستقل براساس نیرو بیان شده است؛ به عبارت دیگر با اعمال نیروی خارجی  $P(t)$ ، جابه‌جایی سیستم (جرم و فنر) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

یک سیستم سازه‌ای تحت بارگذاری‌های متناوب دینامیکی، مانند زلزله در حوزه غیرتجاعی، یکی از مشخصات اصلی اغلب سازه‌های است. شکل رفتار چرخه‌ای سازه، متأثر از تغییر خواص اعضا ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک و یا تغییر شکل سازه به واسطه بارهای وارد می‌باشد. پاسخ چرخه‌ای یک سازه علاوه بر تغییر شکل آنی اجزا، به تاریخچه تغییر شکل اعضا نیز بستگی دارد؛ به طوری که، نمایانگر نحوه انرژی تلف شده می‌باشد. از طرف دیگر، پاسخ چرخه‌ای به نوع سیستم سازه‌ای نیز بستگی دارد؛ به نحوی که در سازه‌هایی مانند سازه‌های فولادی گرم نورده شده با طراحی مناسب (شکل ۱-الف) [16]، حلقه‌های چرخه‌ای ثابت باقی می‌مانند و در سازه‌های سرد نورده شده فولادی مطابق شکل (۱-ب) [17]، حلقه‌های چرخه‌ای به طور همزمان در معرض باریک شدن، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش قرار می‌گیرند. اثر باریک شدن باعث باریک شدن حلقه‌های چرخه‌ای در وسط نمودار می‌گردد؛ به طوری که، حلقه‌های چرخه‌ای در وسط نمودار کم عرض و در دو انتهای عریض هستند. سازه‌های سرد نورده شده فولادی و بسیاری از انواع دیگر سازه‌ها، هنگام باربرداری و بارگذاری مجدد به واسطه کاهش نیروی اصطکاک در سطوح لغزشی دچار کاهش سختی جانی می‌گردند. این رفتار را می‌توان با کاهش شیب در حلقه‌های چرخه‌ای مشاهده نمود. کاهش نیروی اصطکاک بین سطوح لغزشی ترک‌ها، باعث کاهش جابه‌جایی تسلیم نیز می‌گردد، که به دنبال آن کاهش مقاومت را در پی خواهد داشت. لغزش به واسطه تغییر شکل‌های پلاستیک در اجزای سازه‌ای مانند اتصالات رخ می‌دهد.

$$\begin{aligned}\bar{N}(x) &= 0.5[1 + \text{Sgn}(x)]\{1 - [1 - \text{Sgn}(x)]\} \\ &= \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x \leq 0 \end{cases}\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\bar{M}(x) &= 0.5[1 - \text{Sgn}(x)]\{1 + [1 + \text{Sgn}(x)]\} \\ &= \begin{cases} 0 & \text{if } x > 0 \\ 1 & \text{if } x \leq 0 \end{cases}\end{aligned}\quad (4)$$

$$\text{Sgn} = \begin{cases} -1 & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ 1 & \text{if } x > 0 \end{cases}\quad (5)$$

که  $\text{Sgn}$  تابع علامت نامیده می‌شود.  $N(x)$  تابع پله‌ای واحد است و سایر توابع نیز بر حسب آن قابل تعریف می‌باشند.

با توجه به شکل (۲) معادله تعادل دینامیکی حاکم بر این سیستم عبارت است از:

$$m\ddot{x} + cx + \alpha kx + (1 - \alpha)ku = P(t) \quad (6)$$

حداکثر نیروی موجود در لغزنده (نیروی اصطکاکی کولمب) عبارتست از:

$$\mu mg = (1 - \alpha)k\delta \quad (7)$$

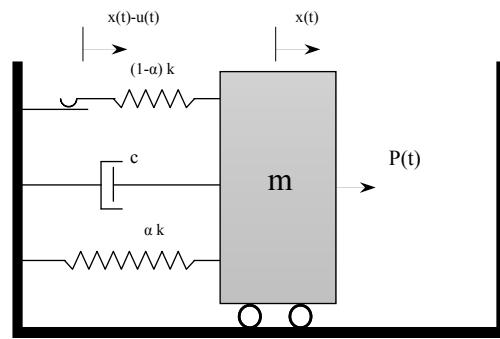
که در آن  $\delta$  ماقریم تغییرشکل فنر متصل به لغزنده است؛ به طوری که،  $-\delta \leq u \leq \delta$  می‌باشد.

به عبارتی، هنگامی که این فنر دچار تغییرشکل ماقریم  $\delta$  گردد، لغزنده شروع به لغزیدن می‌نماید. بنابراین، سختی کل سیستم از  $k$  به  $\alpha k$  کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل (۲) تغییرشکل لغزنده  $x_s(t)$  عبارتست از:

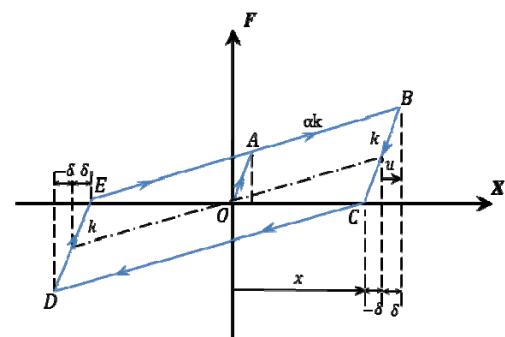
$$x_s(t) = x(t) - u(t) \quad (8)$$

با توجه به این که معادله (۶) شامل دو مجھول  $x$  و  $u$  می‌باشد؛ لذا برای حل آن بایستی معادله دیگری ذکر گردد. به این منظور مستقل با درنظر گرفتن شرایط مرزی یک حلقه چرخه‌ای دوخطی مطابق شکل (۳) و با



شکل ۲ سیستم مکانیکی تک درجه آزادی

شکل (۳) نمایانگر یک سیستم دوخطی است، که ابتدا وارد ناحیه الاستیک (بخش OA) و سپس وارد ناحیه غیرالاستیک (بخش AB) می‌شود. قسمت‌های با سختی  $k$  بخش غیرلغزشی و قسمت‌های با سختی  $\alpha k$  بخش لغزشی حلقه چرخه‌ای محاسبه می‌شوند.



شکل ۳ رفتار چرخه‌ای دوخطی سیستم تک درجه آزادی

مستقل برای بیان معادلات و روابط ریاضی از توابع پایه زیر استفاده کرد. دلیل استفاده وی از روابط زیر به منظور تطبیق معادلات همسازی با شرایط مرزی نمودار چرخه‌ای می‌باشد:

$$\begin{aligned}N(x) &= 0.5[1 + \text{Sgn}(x)]\{1 + 1 - [\text{Sgn}(x)]\} \\ &= \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases}\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}M(x) &= 0.5[1 - \text{Sgn}(x)]\{1 - [1 + \text{Sgn}(x)]\} \\ &= \begin{cases} 0 & \text{if } x \geq 0 \\ 1 & \text{if } x < 0 \end{cases}\end{aligned}\quad (2)$$

$$f = \alpha y + \alpha_s (|y| - \gamma_s) \operatorname{sgn}(y) \bar{N}(|y| - \gamma_s) + (1 - \alpha)z \quad (10)$$

که در آن  $\alpha$  نسبت سختی،  $\alpha_s$  نسبت سخت شدگی،  $\gamma_s$  نسبت فاصله سخت شدگی و  $\lambda_p$  نسبت مقاومت می‌باشد.

همچنان معادله (۹) شامل تمامی پدیده‌های کاهندگی مانند باریکشدن، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش به صورت ذیل قابل بیان می‌باشد.

$$\begin{aligned} \dot{z} = & \dot{y} \Phi_k \{ N(\dot{y}) [M(z - \lambda_p \Phi_1) \bar{M}(y - \delta_0) \\ & + M(z - \Phi_1) \bar{N}(y - \delta_0)] \\ & + M(\dot{y}) [\bar{N}(z + \lambda_p \Phi_1) N(y - \delta_0) \\ & + \bar{N}(z + \Phi_1) M(y - \delta_0) \bar{M}(y + \delta_0)] \} \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن  $\Phi_k$  و  $\Phi_1$  به ترتیب توابع کاهندگی سختی و کاهندگی مقاومت می‌باشد، و به صورت زیر قابل تعریف هستند:

$$\Phi_k = \frac{1}{1 + \lambda_k h(t)} \quad (12)$$

$$\Phi_1 = \frac{1}{1 + \lambda_1 h(t)} \quad (13)$$

که  $\lambda_k \geq 0$  و  $\lambda_1 \geq 0$  به ترتیب ضرایب کاهش سختی و کاهش مقاومت می‌باشد.  $h(t)$  تابع انرژی کل چرخه‌ای است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{h} = & \Phi_1 (1 - \alpha) |\dot{y}| [N(\dot{y}) N(y - \gamma_p) \\ & + \bar{M}(\dot{y}) M(y + \gamma_p) + \lambda_p \bar{N}(\dot{y}) M(y) + \lambda_p M(\dot{y}) N(y)] \\ & \times |1 - \{N(\dot{y}) [M(z - \lambda_p \Phi_1) \bar{M}(y - \delta_0) \\ & + M(z - \Phi_1) \bar{N}(y - \delta_0)] \\ & + M(\dot{y}) [\bar{N}(z + \lambda_p \Phi_1) N(y - \delta_0) \\ & + \bar{N}(z + \Phi_1) M(y - \delta_0) \bar{M}(y + \delta_0)]\}| \end{aligned} \quad (14)$$

که در این رابطه

$$\gamma_p = \frac{\delta_p}{\delta} = (1 - \lambda_p) \quad (15)$$

استفاده از توابع پایه (روابط ۱ تا ۴) به تفسیر آن بر طبق بندهای زیر پرداخت.

(۱) سرعت  $\dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t}$ ، در امتداد مسیرهای OA، DE و EAB مثبت و در امتداد مسیرهای BC و CD منفی است.

(۲) با توجه به این که  $u$  تغییرشکل فنر متصل به لغزنده می‌باشد، تا زمانی که سیستم در حالت لغزشی است (یعنی فنر با سختی  $k(1 - \alpha)$  به تغییرشکل ماقریم خود  $\delta$  رسیده است)، تغییرشکل در این فنر ثابت باقی خواهد ماند. بنابراین، در امتداد مسیرهای لغزشی EAB و CD، سرعت  $\dot{u} = 0$  است و در امتداد مسیرهای OA، BC و DE سرعت  $\dot{u} = \dot{x}$  است.

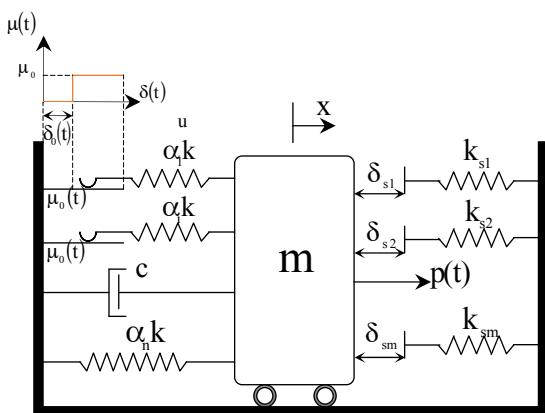
(۳) همچنان، در امتداد مسیر BC تغییرشکل فنر  $u \leq -\delta$  و در امتداد مسیر DE  $u \geq -\delta$  می‌باشد. با درنظر گرفتن روابط (۱) تا (۴) و اوضاع حالت‌های ذکر شده در هر مسیر، داریم:

$$\dot{u} = \dot{x} [\bar{N}(\dot{x}) \bar{M}(u - \delta) + M(\dot{x}) N(u + \delta)] \quad (9)$$

مستقل با درنظر گرفتن شرایط مرزی مشابه با حالت قبل، به بیان معادلات حاکم بر رفتار چرخه‌ای دارای اثرات کاهندگی پرداخت. وی همچنان با استفاده از روابطی به شرح ذیل، و به منظور ساده‌سازی، معادلات مذکور را بی بعد نمود. این روابط عبارتند از:

$$\begin{aligned} x &= \delta y; \quad u = \delta z; \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \xi = \frac{c}{2m\omega}; \\ \tau &= \omega t; \quad x_s = \delta y_s; \quad P_0 = \frac{P_0}{k\delta}; \\ F &= k\delta f; \quad k_s = \alpha_s k; \quad \delta_p = \gamma_p \delta; \quad \delta_s = \gamma_s \delta \end{aligned}$$

با درنظر گرفتن روابط فوق، معادلات بی بعد حاکم بر سیستم دوخطی به صورت زیر بیان می‌گردند. نیروی مقاوم سیستم عبارت است از:



شکل ۴ سیستم تک درجه آزادی چندخطی

رابطه نیرو و جابه‌جایی مربوط به این سیستم،  
توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$F = \alpha_n kx + \sum_{i=1}^m \alpha_i u_i + \alpha_{si} k \sum_{i=1}^m (|x| - \gamma_{si} \delta) \operatorname{sgn}(x) \bar{N}(|x| - \gamma_{si} \delta) \quad (17)$$

$$\alpha_{si} = \frac{k_{si}}{k}; \quad \gamma_{si} = \frac{\delta_{si}}{\delta} \quad (18)$$

که  $\alpha_{si}$  نسبت سخت شدگی و  $\gamma_{si}$  نسبت فاصله سخت شدگی برای فنر با سختی  $k_{si}$  هستند. ضریب اصطکاک مربوط به لغزنه آن،  $\mu_i(t)$  متغیر با زمان است. حداقل نیروی اصطکاک در هر فنر متصل به لغزنه عبارت است از:

$$\mu_i gm = \alpha_i k \delta_i = k \delta_i \alpha_i \left( \frac{\delta_i}{\delta_1} \right) = k \delta_i \alpha_i \gamma_i \quad (19)$$

که  $\delta_i$  تغییر شکل حدی (جابه‌جایی تسلیم) فنر آن و  $\gamma_i = \frac{\delta_i}{\delta_1}$  و  $\delta_1 \leq \delta_2 \leq \dots \leq \delta_{n-1} \leq \delta_n$  می‌باشد. با فرض رفتار متقارن برای هر فنر،  $\delta_i \leq u_i \leq -\delta_i$  خواهد بود.

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + \alpha_n kx + k \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i u_i + \alpha_{si} k \sum_{i=1}^m (|x| - \gamma_{si} \delta) \operatorname{sgn}(x) \bar{N}(|x| - \gamma_{si} \delta) = P(t) \quad (20)$$

و  $\delta_0(t)$  تابع لغزش نسبی اولیه لغزنه در هر سیکل می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\delta_0(t) = \Delta_0 \left[ \frac{t}{2\pi} \right] \quad (21)$$

در این رابطه  $\Delta_0$  ضریب مقیاس فیزیکی است و از طریق آزمایش تعیین می‌گردد. علامت [ ] نیز نشان‌دهنده تابع جزء صحیح می‌باشد.

### توسعه مدل چندخطی مستقل با درنظر گرفتن لغزش

به منظور توسعه معادلات حاکم بر رفتار چندخطی سیستم‌های سازه‌ای، یک سیستم تک درجه آزادی مشکل از یک جرم،  $(n+m)$  فنر و یک میراگر ویسکوز با ثابت  $c$  مطابق شکل (4) درنظر گرفته شده است [8]. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، فنر با سختی  $\alpha_n k$  مستقیماً به جرم متصل شده است. تغییرشکل این فنر متناظر با  $x$  می‌باشد. (n-1) فنر دیگر، به صورت موازی از طریق یک لغزنه با ضریب اصطکاک متغیر  $\mu(t)$  به جرم متصل شده‌اند، که دارای سختی  $\alpha_i k$  و تغییرشکل  $u_i$  می‌باشند. خاطرنشان می‌سازد مجموع سختی تمامی فنرهای متصل به جرم، معادل  $k$  است. لذا مجموع  $\alpha_i$  ها برابر واحد خواهد شد. علاوه بر این، سیستم شامل  $m$  فنر دیگر با سختی  $k_{si}$  و فاصله اولیه  $\delta_{si}$  در دو طرف جرم به‌طور متقارن می‌باشد. (در شکل (4) برای پرهیز از تراکم فنرهای فنرهای با سختی  $k_{si}$  فقط در یک طرف جرم نشان داده شده‌اند). خاطرنشان می‌سازد با توجه به نوافع و محدودیت‌های مطرح شده توسعه زینلیان و همکاران [13] در مدل مستقل، برای بیان رفتار چندخطی از مدل اصلاح شده مستقل، که در سال ۲۰۱۲ توسعه زینلیان و همکاران [13] ارائه گردید، استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{h}_i &= \Phi_{li}\alpha_i\gamma_i|\dot{y}|[N(\dot{y})N(y - \gamma_{pi}) + \bar{M}(\dot{y})M(y + \gamma_{pi}) \\ &+ \lambda_{pi}\bar{N}(\dot{y})M(y) + \lambda_{pi}M(\dot{y})N(y)] \\ &\times |1 - \{N(\dot{y})[M(z_i - \lambda_{pi}\gamma_i\Phi_{li})\bar{M}(y - \delta_0) \\ &+ M(z_i - \gamma_i\Phi_{li})\bar{N}(y - \delta_0)] \\ &+ M(\dot{y})[\bar{N}(z_i + \lambda_{pi}\gamma_i\Phi_{li})N(y - \delta_0) \\ &+ \bar{N}(z_i + \gamma_i\Phi_{li})M(y - \delta_0)\bar{M}(y + \delta_0)]| \end{aligned} \quad (26)$$

در تمامی روابط فوق  $i = 1, 2, \dots, n-1$  می‌باشد.  
به منظور بی بعدسازی معادلات فوق از روابط زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} x &= \delta_1 y; \quad u_i = \delta_1 z_i; \quad \dot{u}_i = \delta_1 \dot{z}_i; \\ x_{si} &= \delta_1 y_{si}; \quad \gamma_i = \frac{\delta_i}{\delta_1} \end{aligned} \quad (27)$$

در مجموع معادلات (۲۲)، (۲۳) و (۲۶)،  
(۲n-1) معادله برای بیان کامل رفتار چندخطی شامل اثرات باریک شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش فراهم می‌کنند. با حل هم‌زمان دستگاه معادلات دیفرانسیل به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار متمتیکا (Mathematica) پاسخ سیستم قابل محاسبه خواهد بود. بدین منظور با ارائه مثال‌هایی، اثرات فوق در قالب نمودار نشان داده می‌شود.

به منظور نشان دادن اثرات باریک شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش بر روی یک سیستم چهارخطی، از تابع هارمونیکی  $P(\tau) = 2.5 \sin \beta \tau$  برای  $\beta = 1$  و مدت زمان  $\tau = 18.9$  استفاده شده است. در این سیستم از پارامترهای موجود در مقاله‌های [۸, ۱۳] استفاده گردیده است، که عبارتند از:

$$\begin{aligned} \xi &= 0, \alpha_1 = 0.65, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 0.1, \alpha_4 = 0.05, \\ \gamma_1 &= 1, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 3, \Delta_0 = 0.2, \\ \lambda_p &\equiv \lambda_{pi} = 0.2, \lambda_k \equiv \lambda_{ki} = 0.1, \\ \lambda_l &\equiv \lambda_{li} = 0.05, i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \alpha_{si} &= 0.1, \alpha_{s2} = 0.2, \alpha_{s3} = 0.3, \\ \gamma_{s1} &= 4, \gamma_{s2} = 5, \gamma_{s3} = 6 \end{aligned} \quad (28)$$

معادلات بی بعد حاکم بر سیستم چندخطی عبارتند از:

$$\begin{aligned} f &= \alpha_n y + \\ &\sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i z_i + \sum_{i=1}^m \alpha_{si}(|y| - \gamma_{si}) \operatorname{sgn}(y) \bar{N}(|y| - \gamma_{si}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} + 2\xi\dot{y} + \alpha_n y + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i z_i \\ + \sum_{i=1}^m \alpha_{si}(|y| - \gamma_{si}) \operatorname{sgn}(y) \bar{N}(|y| - \gamma_{si}) = P_0 p(\tau) \end{aligned} \quad (22)$$

معادله نهایی بی بعد، شامل پدیده‌های باریک شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش را می‌توان به شکل ذیل بیان نمود:

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= \dot{y} \Phi_{ki} \{N(\dot{y})[M(z_i - \lambda_{pi}\gamma_i\Phi_{li})\bar{M}(y - \delta_0) \\ &+ M(z_i - \gamma_i\Phi_{li})\bar{N}(y - \delta_0)] \\ &+ M(\dot{y})[\bar{N}(z_i + \lambda_{pi}\gamma_i\Phi_{li})N(y - \delta_0) \\ &+ \bar{N}(z_i + \gamma_i\Phi_{li})M(y - \delta_0)\bar{M}(y + \delta_0)]\} \end{aligned} \quad (23)$$

در این معادله  $1 \leq \lambda_{pi} \leq 0$  نسبت مقاومت آمین فنر را نشان می‌دهد.  $\Phi_{ki}$  و  $\Phi_{li}$  به ترتیب توابع کاهنده‌گی سختی و کاهنده‌گی مقاومت فنر آم محسوب می‌شوند، که به صورت زیر قابل تعریف هستند:

$$\Phi_{ki} = \frac{1}{1 + \lambda_{ki} h_i(t)} \quad (24)$$

$$\Phi_{li} = \frac{1}{1 + \lambda_{li} h_i(t)} \quad (25)$$

که  $\lambda_{ki} \geq 0$  و  $\lambda_{li} \geq 0$  به ترتیب ضرایب کاهش سختی و کاهش مقاومت هستند.  $h_i(t)$  تابع انرژی کل جذب شده توسط لغزنه متصصل به فنر آم است و به صورت زیر قابل تعریف است:

چهارخطی بدون درنظر گرفتن اثرات کاهنده‌گی را نشان می‌دهد، که در شکل (۶) این اثرات نیز لحاظ گردیده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در این شکل اثر لغزش درنظر گرفته نشده است، اما با توجه به اثر قابل ملاحظه لغزش در میزان جذب و استهلاک انرژی، بایستی این عامل مورد توجه قرار گیرد. همان‌طور که ذکر گردید، مستقل اثر لغزش را در مدل خود مطرح نکرد. لذا با درنظر گرفتن این اثر در مدل تک‌درجه آزادی چندخطی مستقل شکل (۷) حاصل می‌گردد.

### توسعه مدل تحلیلی مستقل بر مبنای

#### تغییر مکان سازه

سیستم تک‌درجه آزادی دوخطی. همان‌طور که قبل از اشاره شد، از آنجا که معمولاً آزمایش‌های بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های سازه‌ای براساس استانداردهای موجود به صورت تغییر مکان کنترل صورت می‌پذیرند، در این پژوهش سعی شده است به جهت تطبیق بهتر نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی، مدل مستقل بر مبنای تغییر مکان به شرح ارائه شده در بخش بعد اصلاح گردد. هم‌چنین در تحقیق حاضر، برای نشان دادن اثرات کاهنده‌گی از معادلات اصلاح شده زینلیان استفاده گردیده است.

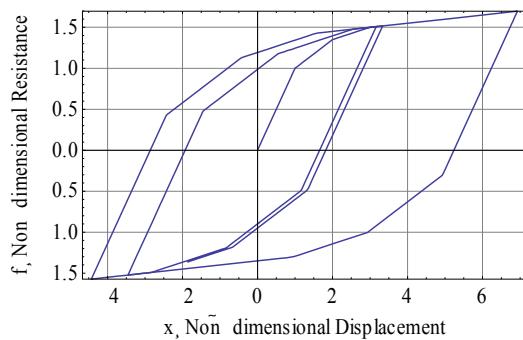
بارگذاری چرخه‌ای مورد استفاده در این تحقیق بر مبنای روش B استاندارد ASTM می‌باشد. در این روش دامنه جابه‌جایی‌های سیکلی براساس جابه‌جایی جانبی هدف  $\Delta_m$  انتخاب می‌شوند. هم‌چنین سرعت بارگذاری در این روش بین ۱ تا ۶۳ میلی‌متر بر ثانیه توصیه می‌گردد. همان‌طور که از جدول (۱) و شکل (۸) مشخص است، این روش بارگذاری شامل یک دوره کامل در درصدهای ۱/۲۵، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ و سه دوره کامل در درصدهای ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ می‌باشد، و این روند تا زمانی ادامه دارد که گسیختگی و یا کاهش چشمگیر در مقاومت رخ

دهد [۱۴].

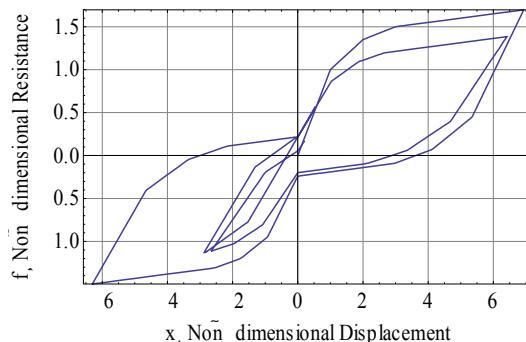
تابع لغزش نیز عبارتست از:

$$\delta_0(\tau) = 0.2 \times \left[ \frac{\tau}{2\pi} \right]$$

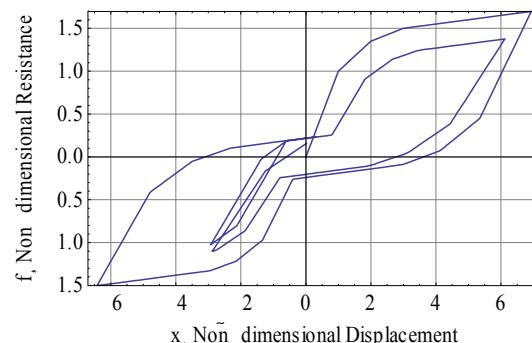
نتایج به صورت نمودارهای زیر حاصل می‌شود:



شکل ۵ پاسخ سیستم تک‌درجه آزادی چهارخطی بدون اثرات کاهنده‌گی



شکل ۶ پاسخ سیستم چهارخطی با درنظر گرفتن اثرات باریک‌شدنگی، کاهش سختی و کاهش مقاومت

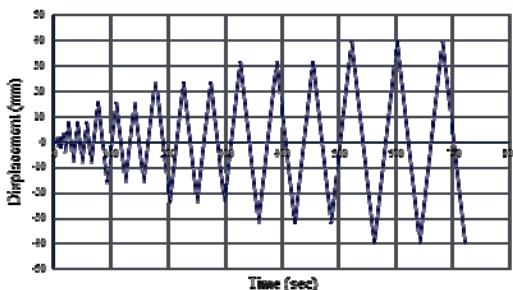


شکل ۷ پاسخ سیستم چهارخطی با درنظر گرفتن اثرات باریک‌شدنگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش

شکل (۵) پاسخ یک سیستم تک‌درجه آزادی

جدول ۲ بارگذاری چرخهای با فرض  $\Delta_m = 40$  میلی‌متر برای سیکل‌های مختلف

روش B استاندارد ASTM E2126-07- دامنه سیکل‌های برگشتی		
گام	تعداد سیکل‌ها	دامنه جابجایی (mm)
۱	۱	۰/۵
۲	۱	۱
۳	۱	۲
۴	۱	۳
۵	۱	۴
۶	۳	۸
۷	۳	۱۶
۸	۳	۲۴
۹	۳	۳۲
۱۰	۳	۴۰



شکل ۹ جابجایی چرخهای برای سیکل‌های مختلف بر حسب زمان

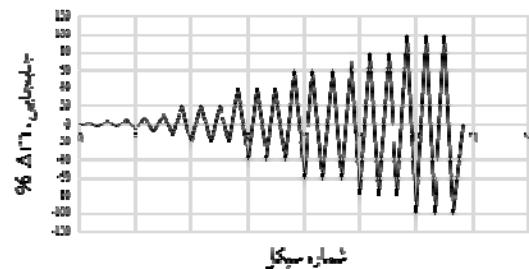
خطاطرنشان می‌سازد در روش تغییر مکان-کنترل نیرو برابر صفر است و با توجه به معلوم بودن جابجایی  $\gamma$ , نیازی به استفاده از معادله (۶) در به دست آوردن مجهولات نمی‌باشد. در ادامه با ذکر مثال‌هایی به ارزیابی اثرات کاهندگی یک سیستم تک درجه آزادی دوخطی براساس تغییر مکان-کنترل پرداخته می‌شود. پارامترهای مورد استفاده در این مثال‌ها به صورت زیر هستند:

$$\alpha = 0.05, \lambda_p = 0.1, \alpha_s = 0.2, \gamma_s = 2, \lambda_k = 0.02, \lambda_l = 0.01$$

$$\delta_0(t) = 0.2 \left[ \frac{t}{2\pi} \right]$$

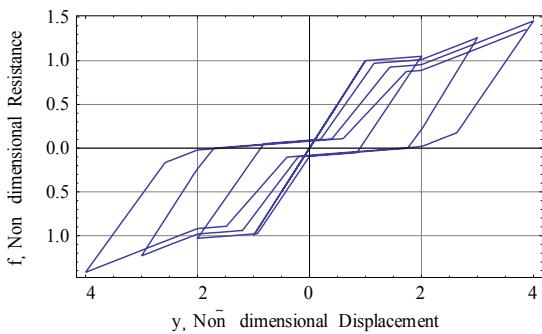
جدول ۱ بارگذاری چرخهای، روش B استاندارد [۷] ASTM E2126-07- دامنه سیکل‌های رفت و برگشتی

الگو	گام	تعداد سیکل	جابجایی بر حسب درصدی از
			جابجایی هدف
۱	۱	۱	۱/۲۵
	۲	۱	۲/۵
	۳	۱	۵
	۴	۱	۷/۵
	۵	۱	۱۰
	۶	۳	۲۰
	۷	۳	۴۰
	۸	۳	۶۰
	۹	۳	۸۰
	۱۰	۳	۱۰۰
افزایش ۲۰ درصدی در هر گام (تا لحظه گسیختگی)			
۱۱			



شکل ۸ بارگذاری چرخهای، روش B - ASTM E2126-07

در این پژوهش، دامنه جابجایی جانبی انتخاب شده براساس روش B استاندارد ASTM مطابق جدول (۱) و شکل (۸) می‌باشد. متوسط سرعت بارگذاری نیز ۲ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب می‌گردد [۱۷]. با انتخاب  $\Delta_m = 40$  میلی‌متر [۱۷] برای درصدهای مختلف  $\Delta_m$  موجود در جدول (۱)، نتایج مطابق با جدول (۲) و شکل (۹) حاصل می‌گردند.

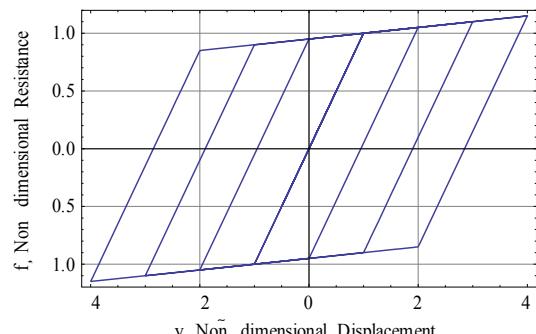


شکل ۱۴ پاسخ سیستم دوخطی در معرض اثرات باریکشده‌گی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش

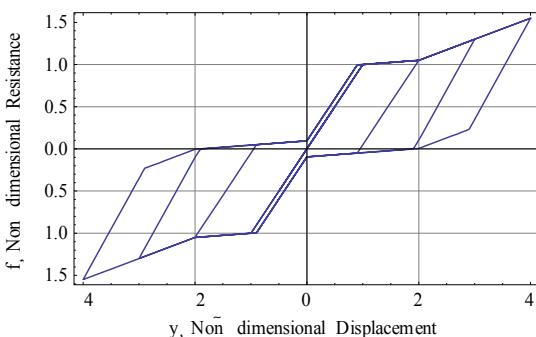
نمودارهای فوق از حل همزمان معادلات (۱۰)، (۱۱) و (۱۴) در نرمافزار متماتیکا [18] حاصل گردیده‌اند.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، شکل (۱۰) پاسخ یک سیستم دوخطی بدون درنظر گرفتن اثرات کاهنده‌گی را نشان می‌دهد. با درنظر گرفتن اثرات کاهنده‌گی شکل‌های (۱۴-۱۱) حاصل می‌گردند. شکل (۱۱) پاسخ سیستم چرخه‌ای دوخطی ناشی از باریکشده‌گی به‌واسطه دو عامل نابرابری مقاومت در دو جهت مخالف بارگذاری و اضافه سختی را نشان می‌دهد. شکل (۱۴) تأثیر همزمان کلیه اثرات کاهنده‌گی بر رفتار چرخه‌ای را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) با شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد که عدم لحاظ هر یک اثرات کاهنده‌گی سبب نادیده گرفتن بخش زیادی از انرژی کل چرخه‌ای می‌گردد؛ چرا که اثر عوامل کاهنده‌گی بر رفتار چرخه‌ای سبب کاهش مساحت حلقه‌ها با گذر زمان می‌شود که این کاهش مساحت معادل با کاهش انرژی می‌باشد. همچنین با مقایسه دو شکل (۱۳) و (۱۴) می‌توان اثر قابل ملاحظه لغزش بر رفتار چرخه‌ای را به‌وضوح مشاهده نمود؛ این در حالی است که مستقل این اثر را درنظر نگرفته بود.

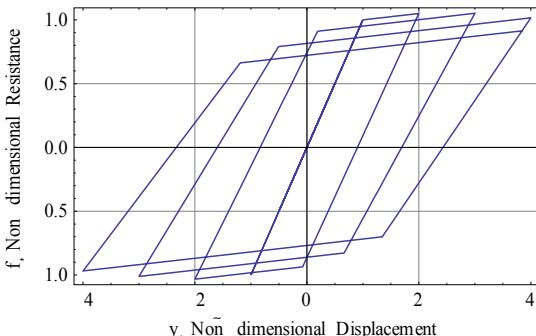
بررسی اثرات کاهنده‌گی بر روی رفتار چرخه‌ای سیستم چند درجه آزادی چندخطی. لازم به ذکر است یک سیستم چند درجه آزادی، خود متشکل از ترکیبی از درجات آزادی به‌طور مجاز است، و هر درجه آزادی



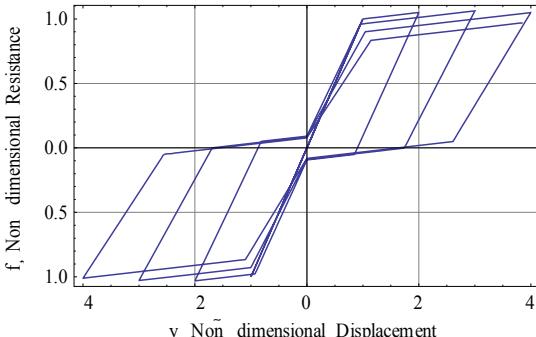
شکل ۱۰ پاسخ سیستم دوخطی بدون اثرات کاهنده‌گی



شکل ۱۱ پاسخ سیستم دوخطی در معرض اثر باریکشده‌گی ناشی از نابرابری مقاومت در دو جهت مخالف بارگذاری و اضافه سختی



شکل ۱۲ پاسخ سیستم دوخطی در معرض اثرات کاهش سختی، کاهش مقاومت



شکل ۱۳ پاسخ سیستم دوخطی در معرض اثرات باریکشده‌گی، کاهش سختی و کاهش مقاومت

با توجه به این که نیرویی به سیستم اعمال نمی‌گردد و بارگذاری به صورت تغییر مکان-کتسل فرض شده است، مطابق با شکل (۱۵) می‌توان معادله تعادل دینامیکی جرم  $m$  را به فرم معادله زیر و به صورت ماتریسی بیان نمود:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + \alpha_n K x + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i K_s u_i = 0 \quad (28)$$

که  $M$ ,  $K$  و  $K_s$  به ترتیب ماتریس قطری جرم و ماتریس‌های سختی هستند و به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_N \end{bmatrix};$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & k_2 & -k_3 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -k_N \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_N \end{bmatrix} \quad (29)$$

جزء سوم رابطه (۲۸) مربوط به فنرهایی است که مستقیماً به جرم متصل هستند و جزء چهارم این رابطه نیز مربوط به فنرهایی است که به لغزنه متصل می‌باشند.

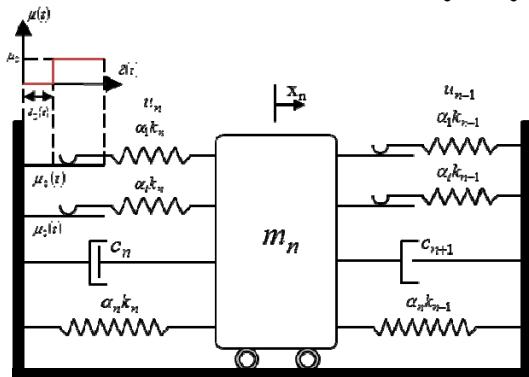
بردار نیروی مقاوم سیستم عبارت است از:

$$f = \alpha_n Kx + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i K_s u_i \quad (30)$$

به منظور درنظر گرفتن پدیده‌های کاهنده‌گی، با استفاده از توابع پایه (۱ تا ۵) بایستی معادله‌ای ارائه گردد که شرایط مرزی حلقه‌های چرخه‌ای مشابه با شرایط مرزی ذکرشده در بخش (۳) را ارضاء کند. با درنظر گرفتن این شرایط معادله نهایی به صورت زیر

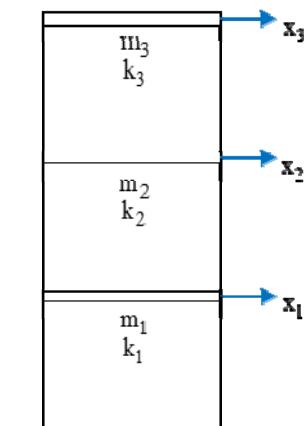
به طور مستقل از درجات آزادی دیگر تعریف می‌گردد، هر چند معادلات هر یک از درجات آزادی کاملاً یکسان است و تنها تفاوت در تعریف مشخصات هر درجه آزادی شامل سختی، جرم و پارامترهای مشابه می‌باشد، لذا توسعه مدل برای یک سازه چند درجه آزادی (به جای استفاده از مدل‌های یک درجه آزادی برای درجات آزادی مجزا) سبب کاهش قابل توجه حجم محاسبات و تسريع در آنالیز سیستم مذکور می‌گردد.

شکل (۱۵) سیستم جرم و فنر چند درجه آزادی چندخطی را به صورت شماتیک نشان داده است؛ که در آن  $m_n$ ,  $m_{n-1}$ ,  $c_n$  و  $k_n$  به ترتیب جرم، سختی و میرایی ویسکوز می‌باشند. فنرها با سختی  $\alpha_n k_n$  و  $\alpha_{n+1} k_{n+1}$  مستقیماً به جرم متصل و دارای تغییرشکل  $(x_n - x_{n-1})$  می‌باشند. همچنین در هر طرف جرم  $m_{n-1}$ ,  $m_n$  و  $m_n$  فنر به طور متقابن و به صورت موازی، از طریق یک لغزنه با ضریب اصطکاک متغیر  $(t) \mu(t)$  به جرم متصل شده‌اند، که به ترتیب دارای سختی  $\alpha_1 k_1$  و  $\alpha_n k_{n+1}$  و تغییرشکل‌های  $u_n$  و  $u_{n+1}$  برای هر درجه آزادی می‌باشند. لازم به ذکر است، مجموع سختی تمامی فنرهای متصل به جرم معادل  $k$  است؛ لذا مجموع  $\alpha_i$ ‌ها برابر یک می‌شود.  $1 \leq \alpha_i \leq 1$  معرف نسبت سختی پیش تسلیمی است. دو حالت حدی  $\alpha=1$  و  $\alpha=0$  به ترتیب بیانگر سیستم‌های خطی و سیستم‌های الاستیک-پلاستیک کامل می‌باشند. جایه‌جایی کل جرم نیز متناظر با  $x_n$  است.



شکل ۱۵ سیستم جرم و فنر سیستم چند درجه آزادی - چندخطی

مثال: یک قاب برشی سه طبقه با جرم و سختی یکسان برای تمامی طبقات مطابق شکل (۱۷) درنظر گرفته می‌شود. ماتریس‌های بی بعد متضاد با جرم و سختی طبقات و مشخصات سازه‌ای به صورت زیر هستند:



شکل ۱۶ قاب برشی سه‌درجه آزادی

$$\mu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \kappa = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\kappa_s = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_1 = 0.65, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 0.1, \alpha_4 = 0.05, \zeta = 0, \lambda_p = 0.1,$$

$$\lambda_k = 0.1, \lambda_l = 0.01, \alpha_s = 0.2, \gamma_s = 2$$

$$\delta_0(t) = 0.125 \text{Floor}\left[\frac{t}{2\pi}\right]$$

با انتخاب  $\Delta_m$  مشابه با بخش (۱-۵)، برای درصدهای مختلف  $\Delta_m$  از جدول (۱)، نتایج مربوط به طبقات مختلف (در این پژوهش سه‌طبقه) در جدول (۳) و شکل (۱۶) حاصل می‌شوند. جابه‌جایی‌های کنترل شده بر طبقات براساس الگوی مثلثی و به صورت خطی فرض شده است. برای نشان دادن اثرات کاهندگی بر عملکرد چرخه‌ای مثال زیر ارائه

حاصل گردیده است [۹]:

$$\begin{aligned} \dot{z}_n &= \Phi_n(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}) \\ &\quad \{N(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})[M(z_n - \lambda_p \Psi_n)\bar{M}(y_n - y_{n-1} - \delta_0) \\ &\quad + M(z_n - \Psi_n)\bar{N}(y_n - y_{n-1} - \delta_0)] \\ &\quad + M(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})[\bar{N}(z_n + \lambda_p \Psi_n)N(y_n - y_{n-1} - \delta_0) \\ &\quad + \bar{N}(z_n + \Psi_n)M(y_n - y_{n-1} - \delta_0)\bar{M}(y_n - y_{n-1} + \delta_0)]\} \end{aligned} \quad (۳۱)$$

در این رابطه  $\Phi_n$  و  $\Psi_n$  به ترتیب توابع کاهندگی سختی و کاهندگی مقاومت درجه  $n$  می‌باشند، و به صورت زیر تعریف می‌گردند [۹]:

$$\Phi_n = \frac{1}{1 + \lambda_k h_n(t)} \quad (۳۲)$$

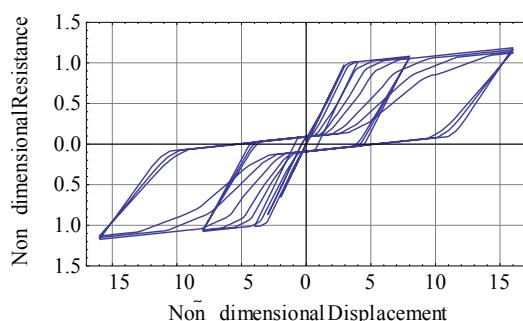
$$\Psi_n = \frac{1}{1 + \lambda_l h_n(t)} \quad (۳۳)$$

که  $\lambda_l \geq 0$  و  $\lambda_k \geq 0$  به ترتیب ضرایب کاهش سختی و کاهش مقاومت هستند.  $h(t)$  تابع انرژی کل سیستم چرخه‌ای است و عبارتست از [۹]:

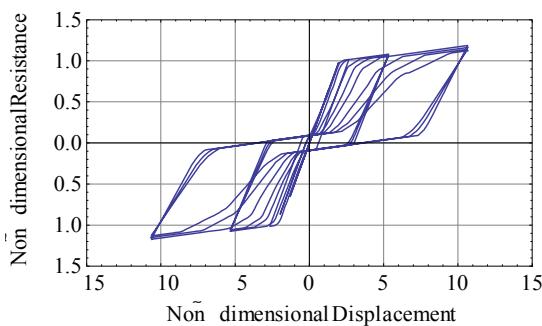
$$\begin{aligned} \dot{h}_n &= \Psi_n \alpha_i |\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1}| [N(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})N(y_n - y_{n-1} - \gamma_p) \\ &\quad + \bar{M}(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})M(y_n - y_{n-1} + \gamma_p) \\ &\quad + \lambda_p \bar{N}(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})M(y_n - y_{n-1}) + \\ &\quad \lambda_p M(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})N(y_n - y_{n-1})] \\ &\times |1 - \{N(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})[M(z_n - \lambda_p \Psi_n)\bar{M}(y_n - y_{n-1} - \delta_0) \\ &\quad + M(z_n - \Psi_n)\bar{N}(y_n - y_{n-1} - \delta_0)] \\ &\quad + M(\dot{y}_n - \dot{y}_{n-1})[\bar{N}(z_n + \lambda_p \Psi_n)N(y_n - y_{n-1} - \delta_0) \\ &\quad + \bar{N}(z_n + \Psi_n)M(y_n - y_{n-1} - \delta_0)\bar{M}(y_n - y_{n-1} + \delta_0)]\}| \end{aligned} \quad (۱)$$

$$\gamma_p = \frac{\delta_p}{\delta} = (1 - \lambda_p) \quad (۳۵)$$

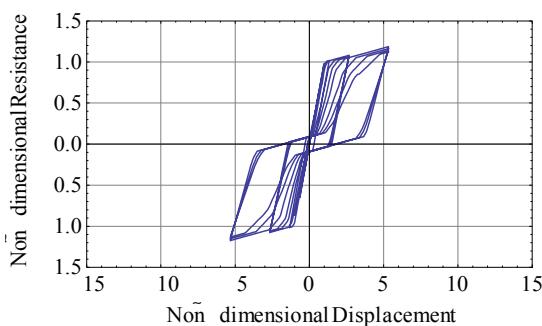
با حل همزمان معادلات (۳۰)، (۳۱) و (۳۴) در نرم‌افزار متمتیکا، و انتخاب شرایط اولیه مناسب، پاسخ یک سیستم چند درجه آزادی-چند خطی شامل تمامی عوامل کاهندگی حاصل می‌شود.



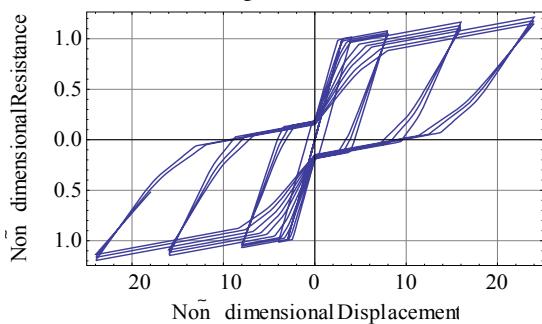
شکل ۱۸ پاسخ نیرو- جابه‌جایی طبقه سوم شامل تمامی اثرات کاهندگی



شکل ۱۹ پاسخ نیرو- جابه‌جایی طبقه دوم شامل تمامی اثرات کاهندگی



شکل ۲۰ پاسخ نیرو- جابه‌جایی طبقه اول شامل تمامی اثرات کاهندگی

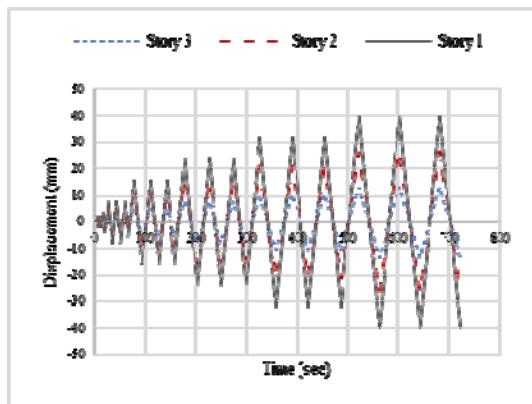


شکل ۲۱ پاسخ نیرو- جابه‌جایی شامل باریک‌شدگی، کاهش مقاومت و کاهش سختی بدون اثر لغزش برای طبقه سوم

می‌گردد:

جدول ۳ بارگذاری چرخه‌ای با  $\Delta_m$  برابر ۴۰ میلی‌متر

روش B استاندارد ASTM E2126-07- دامنه سیکل‌های رفت و برگشتی				
گام	تعداد سیکل‌ها	دامنه جابجایی، $\Delta_m$ (mm)		
		طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول
۱	۱	۰/۵	۰/۳۳	۰/۱۷
۲	۱	۱	۰/۶۷	۰/۳۳
۳	۱	۲	۱/۳۳	۰/۶۷
۴	۱	۳	۲	۱
۵	۱	۴	۲/۶۷	۱/۳۳
۶	۳	۸	۵/۳۳	۲/۶۷
۷	۳	۱۶	۱۰/۶۷	۵/۳۳
۸	۳	۲۴	۱۶	۸
۹	۳	۳۲	۲۱/۳۳	۱۰/۶۷
۱۰	۳	۴۰	۲۶/۶۷	۱۳/۳۳



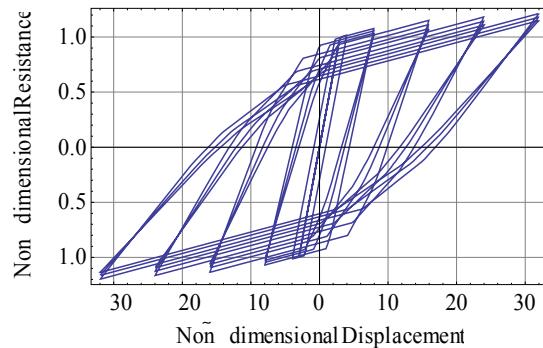
شکل ۱۷ جابه‌جایی چرخه‌ای طبقات اول تا سوم

با اعمال پارامترهای فوق در معادلات (۲۴)، (۲۷) و (۳۰) و حل هم‌زمان این معادلات در نرم‌افزار متماتیکا، نتایج به صورت شکل‌های زیر حاصل می‌گردند:

مدل تحلیلی ارائه شده در این پژوهش، به لحاظ کاربرد همه جانبه آن برای انواع سیستم‌های تک درجه آزادی و چند درجه آزادی و همچنین برای انواع رفتارهای چرخه‌ای دوخطی و چندخطی، می‌تواند نسبت به سایر مدل‌های تحلیلی ذکر شده تا به امروز به طور واقعی‌تری رفتار چرخه‌ای انواع سیستم‌های سازه‌ای را تحت هر یک اثرات کاهنده‌گی ذکر شده و یا ترکیبی از آنها به طور تحلیلی بیان کند. از طرفی تعداد پارامترهای مورد استفاده در این مدل برای بیان مشخصات سازه‌ای، بسیار کمتر از سایر مدل‌ها است و همین امر سبب سهولت و تسريع در آنالیز سیستم مورد نظر خواهد شد.

این مدل توسعه مدل پیشنهادی مستقل است، که اثر نیرو از مدل مستقل حذف گردیده و با درنظر گرفتن اثر لغزش و براساس تغییر مکان توسعه داده شده است. تست‌های آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی قاب‌ها عمده‌تاً بر مبنای تغییر مکان-کنترل می‌باشند؛ به همین منظور در این تحقیق سعی گردید برای تطبیق بهتر نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی، از استاندارد ASTM E2126-07 روش B استفاده گردد. به عبارت بهتر مدل مذکور می‌تواند عملکرد واقعی سیستم‌های چرخه‌ای را شامل تمام اثرات کاهنده‌گی نشان دهد. خاطرنشان می‌سازد در این مدل اثر لغزش نیز با توجه به اهمیت آن در میزان جذب و استهلاک انرژی کل سیستم سازه‌ای موردن ارزیابی قرار گرفته است، چرا که در بسیاری از سیستم‌های سازه‌ای، مانند سازه‌های سرد نورد شده فولادی، این عامل کاملاً مشهود است.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۴-۱۲) مشخص است عوامل کاهنده‌گی باریک‌شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان جذب و اتلاف انرژی چرخه‌ای نسبت به سیستم بدون کاهنده‌گی (شکل ۱۱) دارند. همان‌طور که ملاحظه گردید، عدم در نظر گرفتن هر یک از اثرات کاهنده‌گی می‌تواند منجر به نادیده گرفتن بخش زیادی از انرژی کل سازه شود و به‌دلیل آن تخمین‌های



شکل ۲۲ پاسخ نیرو- جابه‌جایی تحت اثر کاهش سختی و کاهش مقاومت برای طبقه سوم

شکل‌های (۲۰-۱۸) نشان‌گر تأثیر هم‌زمان اثرات کاهنده‌گی شامل باریک‌شدگی، کاهش سختی، کاهش مقاومت و لغزش بر رفتار چرخه‌ای یک قاب سه‌درجه آزادی چهارخطی می‌باشد؛ که برای هر طبقه به‌طور مجزا ترسیم شده است. همان‌طور که در صورت مسئله ذکر گردید، مشخصات هر سه طبقه یکسان است و با توجه به این موضوع نمودارهای چرخه‌ای حاصل برای هر سه طبقه مشابه با یکدیگر است، با این تفاوت که میزان جابه‌جایی (منتظر با محور افقی) از طبقه سوم به طبقه اول کاهش می‌یابد. شکل (۲۱) نیز رفتار چرخه‌ای طبقه سوم را، بدون در نظر گرفتن اثر لغزش نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل و شکل (۱۸) مشاهده می‌شود که اثر لغزش همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر گردید، می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان جذب و استهلاک انرژی توسط سازه داشته باشد، لذا در نظر گرفتن آن هم از لحاظ طراحی محافظه‌کارانه و هم به لحاظ طراحی اقتصادی حائز اهمیت می‌باشد. شکل (۲۲) نیز نمایانگر رفتار چرخه‌ای طبقه سوم شامل اثرات کاهنده‌گی سختی و مقاومت و بدون در نظر گرفتن اثرات باریک‌شدگی و لغزش می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود عدم لحاظ هر یک از اثرات کاهنده‌گی سبب حذف بخش زیادی از انرژی کل سازه خواهد شد و این امر می‌تواند خرابی‌های عظیمی به هنگام زلزله در پی داشته باشد.

### نتیجه‌گیری

مستقل این ویژگی و قابلیت را داراست که به جای آنالیز کل سازه چند درجه آزادی، تک‌تک درجات آزادی را مورد تحلیل قرار می‌دهد و این امر سبب کاهش حجم محاسبات و کاهش مدت زمان آنالیز خواهد گردید.

لازم به ذکر است توابع کاهندگی مورد استفاده در این مدل لزوماً بهترین و مناسب‌ترین تابع نیست و به‌منظور تطبیق مناسب‌تر مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی، می‌توان با انتخاب توابع کاهندگی و پارامترهای مناسب به نتایج مطلوب‌تری دست یافت.

غیر محافظه‌کارانه‌ای در زمینه‌های ایمنی، پایداری و اقتصادی سازه در بی خواهد داشت؛ به طوری که این امر می‌تواند موجب خرابی‌های زیادی در سازه به هنگام زلزله گردد.

از آنجا که انجام آنالیزهای مربوط به سازه‌های چند درجه آزادی به خصوص برای سازه‌های با درجات آزادی بالاتر، بعضی پیچیده و زمانبر می‌باشد؛ لذا این گونه سازه‌ها را می‌توان با یک سازه تک‌درجه آزادی معادل شبیه‌سازی کرد و تحلیل‌های مورد نظر را بر روی این سازه انجام داد. مدل چند درجه آزادی اصلاح شده

## مراجع

1. Clough, R. W., "Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements", University of California, Department of Civil Engineering, (1966).
2. Iwan, W. D., "A distributed-element model for hysteresis and its steady-state dynamic response", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 33, p. 893, (1966).
3. Bouc, R., "Modèle mathématique d'hystérésis", *Acustica*, vol. 24, pp. 16-25, (1971).
4. Baber, T. T. and Noori, M. N., "Random vibration of degrading, pinching systems", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 111, pp. 1010-1026, (1985).
5. Casciati, F., "Stochastic dynamics of hysteretic media", *Structural Safety*, vol. 6, pp. 259-269, (1989).
6. Madan, A., Reinhorn, A., Mander, J. and Valles, R., "Modeling of masonry infill panels for structural analysis", *Journal of structural engineering*, vol. 123, pp. 1295-1302, (1997).
7. Mahin, S. A. and Lin, J., "Construction of inelastic response spectra for single-degree-of-freedom systems", University of California, Earthquake Engineering Research Center, (1984).
8. Mostaghel, N., "Analytical description of pinching, degrading hysteretic systems", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 125, pp. 216-224, (1999).
9. Mostaghel N. and Byrd, R. A., "Analytical description of multidegree bilinear hysteretic system", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 126, pp. 588-598, (2000).
10. Sivaselvan, M. V. and Reinhorn, A. M., "Hysteretic models for deteriorating inelastic structures", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 126, pp. 633-640, (2000).
11. Sivaselvan, M. V. and Reinhorn, A. M., "Lagrangian approach to structural collapse simulation", *Journal of Engineering mechanics*, vol. 132, pp. 795-805, (2006).
12. Ibarra, L. F. and Krawinkler, H., "Global collapse of frame structures under seismic excitations", Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2005).

13. Zeynalian, M., Ronagh, H. and Dux, P., "Analytical description of pinching, degrading, and sliding in a bilinear hysteretic system", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 138, pp. 1381-1387, (2012).
  14. USA., "ASTM-E2126-07. Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shearresistance of walls for buildings", ed, (2007).
۱۵. مقدم، حسن، "مهندسی زلزله: مبانی و کاربرد"، تهران، (۱۳۸۷).
16. Deylami, A. and Moslehi Tabar, A., "Effect of column panel zone characteristics on instability of beams with RBS moment resisting connections", *Proceedings of 13th world conference on earthquake engineering*, (2004).
  17. Zeynalian, M. and Ronagh, H., "An experimental investigation on the lateral behavior of knee-braced cold-formed steel shear walls", *Thin-Walled Structures*, vol. 51, pp. 64-75, (2012).
  18. Wolfram Research, I., "Mathematica", vol. Version 9.0, ed. Champaign, Illinois Wolfram Research, Inc., (2012).



## \* مدل سازی آزمایشگاهی سلول‌های گیل در سازه‌های شناور بسیار بزرگ \*

علی پریزاده قوشخانه<sup>(۱)</sup>

محمد جواد خانجانی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** سازه‌های شناور بسیار بزرگ وقتی به طور نامتقارن بارگذاری می‌شوند، اختلاف خیز سازه بین مرکز و لبه‌های آن افزایش می‌یابد. یکی از روش‌های مؤثر کاهش اختلاف خیز استفاده از سلول‌های گیل است. این سلول‌ها قسمت‌هایی از سازه هستند که نیروی شناوری در محل قرارگیری آنها حذف می‌شود. در این مطالعه با ساخت مدل آزمایشگاهی و انجام دو آزمایش مجزا رفتار آنها بررسی شده است. نتایج آزمایش استاتیکی نشان داد که استفاده از ۱۰ درصد سلول گیل در دو انتهای مدل، بهترین عملکرد در کاهش اختلاف خیز را دارد. همچنین مدل دارای ۵ درصد سلول گیل با چینش L شکل متقارن در گوشها، بیشترین کاهش انگر خمی را داشته است. از نتایج آزمایش دینامیکی می‌توان دریافت که در مدل با ۱۵ درصد سلول گیل کمترین تنفس ایجاد شده است. اگرچه این سلول‌ها توانسته‌اند به طور قابل قبولی تنفس مدل را کاهش دهند، اما جایه‌جایی سازه در برابر امواج را به طور کلی کاهش ندادند. از این نتیجه می‌توان دریافت که برای عملکرد بهتر سلول گیل در کاهش جایه‌جایی باید این روش همزمان با سایر روش‌ها مانند استفاده از اتصالات مفصلی در طول سازه، به کار گرفته شود.

**واژه‌های کلیدی** سازه شناور بسیار بزرگ، سلول گیل، مدل سازی آزمایشگاهی، اختلاف خیز، آزمایش دینامیکی.

### Gill Cells Experimental Modeling in Very Large Floating Structures

A. Parizadeh Qushkhaneh

M. Javad Khanjani

**Abstract** When very large floating structures unevenly is loaded in the central portion, the difference deflection between its central section and corners will increase. One effective solution for reducing the differential deflection is gill cell. These cells are compartments in the VLFS that the buoyancy forces are eliminated at their locations. In this study, to investigate the gill cells behavior, an experimental model was conducted and two separate experiments were performed. Static experiments results showed that the model with 10% of gill cells at both its ends has best performance in difference deflection reduction. Also, the model with 5% of gill cells with symmetric L-shape arrangement in its corners has highest degree of bending moment reduction. Dynamic experiments results showed that in the model with 15 percent of gill cell has been created the lowest stress. Although these cells could reduce the stress acceptability in model, generally, they did not reduce the model displacement against waves. From this result can be realized, for better performance in reducing the displacement, gill cells must be used with other methods such as hinge connection in the structure.

**Key Words** Very large floating structure, Gill cell, Difference deflection, Experimental modeling, Dynamic experiment.

---

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۵/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۷/۱۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفت، کرمان.

ali.parizadeh22@yahoo.com

(۲) استاد، مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

در بارگذاری سنگین و غیریکنواخت مانند انباشت کانتینرها در وسط سازه، قسمت میانی سازه شناور دچار تغییرشکل کاسه‌ای می‌شود؛ درنتیجه اختلاف جابه‌جایی عمودی بین مرکز و بخش‌های بیرونی سازه زیاد می‌شود [11]. با افزایش سختی سازه در تمام قسمت‌های شناور از طریق افزایش ارتفاع یا ضخامت صفحات بالا و پایین آن، می‌توان اختلاف خیز را کاهش داد. با توجه به این‌که این راهکار روی ابعاد و شکل شناور تأثیر می‌گذارد، موجب بالا رفتن هزینه ساخت می‌گردد. یکی دیگر از راه حل‌ها، سازه شناور پله‌ای است؛ در این روش عمق سازه در قسمت‌های تحت بار افزایش و در بخش‌های بدون بار کاهش می‌باید [12]. روش اخیر نیز به دلیل محدودیت اجرای چنین سازه‌ای برای بررسی کاهش اختلاف خیز به کار گرفته نشده است. در سال ۲۰۰۶ ونگ روشی برای کاهش اختلاف خیز پیشنهاد کرده است. ایشان با ایجاد سوراخ و شیارهایی در صفحه کف شناور، اجازه ورود و خروج آزادانه آب به داخل بعضی اجزا را فراهم کرد. چون جریان آزاد آب از این شیارها و سوراخ‌ها مانند آبشش‌های ماهی است، سلول‌های آبششی یا سلول گیل (Gill cell) نام‌گذاری شده‌اند [10]. زیجیان و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک ترمینال کانتینر شناور به ابعاد  $10 \times 470 \times 520$  متر را با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی کردند. آنها با استفاده از روش اجزای محدود در مدل‌سازی با این نرم‌افزار، کاربرد سلول‌های گیل در بارگذاری استاتیکی را مورد تحلیل قرار دادند؛ [12]. ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک سازه دایره‌ای شکل با شعاع ۲۰۰ متر و ارتفاع ۲ متر را براساس تئوری کلاسیک صفحات نازک مدل‌سازی و خیز سازه را به صورت تحلیلی محاسبه کردند. آنها با تغییر شعاع و مقدار بارگذاری، تأثیر تعداد سلول‌های گیل را بررسی نموده‌اند. همچنین تأثیر تغییرات عمق آزاد و ضخامت صفحات بالا و پایین سازه، عملکرد سلول‌های گیل را بررسی کردند [13]. فم و ونگ در

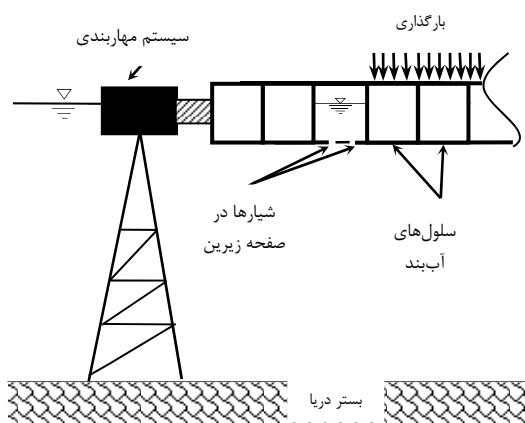
## مقدمه

با افزایش جمعیت و گسترش شهرها، طراحان و مهندسان با کمبود زمین روبه‌رو هستند. کشورهای جزیره‌ای دارای خط ساحل طولانی به خشک کردن دریا و ایجاد خشکی در آن رو آورده‌اند. سازه‌های شناور بسیار بزرگ (VLFS) یک راه حل جایگزین برای روش سنتی استحصال زمین از دریا است. با استفاده از تکنولوژی سازه شناور بدون نیاز به حجم زیاد خاکریزی در دریا می‌توان خشکی به وجود آورد. از این سازه‌ها می‌توان برای اهداف متفاوتی مانند فرودگاه، پل، مخازن ذخیره سوخت و موج‌شکن شناور استفاده نمود [1]. سازه‌های شناور یا پانتون‌ها (Pontoon) مانند یک صفحه بزرگ روی سطح آب باقی می‌ماند. این نوع سازه‌ها اغلب برای آب‌های آرام مانند برکه‌ها، خلیج‌ها و خطوط ساحلی مناسب هستند [2]. سازه‌های شناور بسیار بزرگ می‌توانند در هر شکلی ساخته شوند. شکل مستطیلی آن به دلیل مسائل اجرایی بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

در ساخت این نوع سازه‌ها باید پاسخ هیدرولاستیک سازه را کاهش داد. در این راستا زیلمن و میلو در سال ۲۰۰۰ سازه دایره‌ای شکل را مورد بررسی قرار دادند [3]. هاما ماموت و فوجیتو در سال ۲۰۰۲ پانتون‌های X، T، C، L شکل و آندریانو و هرمنس در سال ۲۰۰۶ سازه حلقی را آنالیز کردند [4,5]. همچنین راهکارهایی مانند نصب یک صفحه کاهنده حرکت (Anti motion) به ابتدای سازه شناور با اشکال و زوایای مختلف [6,7]، ساخت سازه چندجزئی و اتصال آنها به صورت مفصلی مورد بررسی واقع شده‌اند [8,9]. علاوه بر موارد ذکر شده تحقیقات بسیاری در زمینه تحلیل و طراحی سازه‌های شناور انجام گردیده؛ اما کمتر به مسئله اختلاف خیز در آنها پرداخته شده است [10].

با توجه به بزرگ بودن ابعاد سطح این سازه‌ها در مقایسه با ضخامت آنها مانند صفحه عمل می‌کنند.

وجود شیارها یا سوراخ‌هایی در کف سلول‌های گیل، آب می‌تواند به راحتی وارد آنها شود و از آن خارج شود. ارتفاع آب در داخل سلول‌ها برابر سطح تراز دریا خواهد بود. شکل (۱)، تصویر یک سازه شناور دارای سلول گیل را نشان می‌دهد. با جای‌گذاری مناسب این سلول‌ها می‌توان انحنای خمش در سازه را تغییر داد و سازه شناور به شکلی هموارتر درآید. باید به این نکته اشاره کرد که چون شیارها و سوراخ‌های کف سلول‌های گیل در مقایسه با ابعاد آن خیلی کوچک‌ترند، وجود آنها در سختی خمشی سازه شناور تأثیرگذار نخواهد بود [۱۲].



شکل ۱ نمایش سلول گیل در سازه شناور بسیار بزرگ [۱۲]

### مدل آزمایشگاهی

معیار رفتار هیدرولاستیک در سازه شناور. زمانی که پاسخ دینامیکی جسم شناور در اثر امواج تحلیل می‌شود، فشار ناشی از سیال بر جسم شناور باید ارزیابی شود. با جابه‌جایی جسم شناور، مایع اطراف آن نیز جابه‌جا خواهد شد؛ درنتیجه برای ارضای رابطه برنولی فشار پیرامون جسم شناور تغییر خواهد کرد. از طرف دیگر با تغییر فشار، جابه‌جایی جسم نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این چنین ارتباط متقابل را اندرکنش سازه و سیال شناخته می‌شود. حال اگر جابه‌جایی سازه شامل تغییرشکل‌های الاستیک آن باشد، اندرکنش سیال

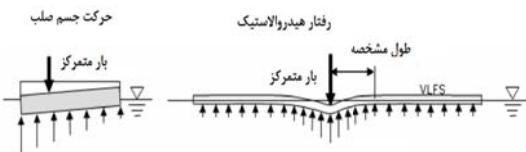
سال ۲۰۱۰، یک روش عددی را برای بهینه‌سازی محل و تعداد سلول‌ها در شکل‌های دلخواه بررسی کردند. آنها براساس تئوری صفحه میندلین (برای مطالعه این تئوری به مرجع [۱۴] مراجعه شود) سازه شناور با بارگذاری یکنواخت در بخش مرکزی را مدل‌سازی کردند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، محل و تعداد بهینه سلول‌های گیل را محاسبه نمودند [۱۵]. هم‌چنین در سال ۲۰۱۳، گاؤ و همکاران با ترکیب سلول‌های گیل و اتصال مفصلی بین اجزای سازه شناور، عملکرد سلول‌ها را بررسی نموده‌اند [۱۶].

استفاده از سلول گیل برای کاهش اختلاف خیز سازه روشنی کم‌هزینه و از نظر تئوری ممکن به نظر می‌رسد. اما تاکنون این راهکار با استفاده از نرم‌افزار به صورت عددی و تنها تحت بارگذاری ثقلی مدل‌سازی شده است. برای مشاهده عملی بودن و بررسی عملکرد سلول‌های گیل در محیط واقعی، سازه شناور دارای این سلول‌ها در آزمایشگاه شبیه‌سازی شد. از آنجایی که چالش مهم در مورد این سازه‌ها به کارگیری آنها در نواحی دور از ساحل و در معرض امواج فراساحلی است، علاوه بر بارگذاری ثقلی با اعمال امواج با ۵ دوره تناوب مختلف، اختلاف خیز و تنش در مدل‌ها اندازه‌گیری گردید. برای این کار مدلی از جنس آلومینیوم با ابعاد  $200 \times 50 \times 7/5$  سانتی‌متر ساخته شد. آزمایش‌ها برای مدل بدون سلول گیل و چهار حالت مختلف چینش آنها در مدل انجام شده است. در ادامه به معرفی بیشتر سلول‌های گیل پرداخته می‌شود.

### معرفی سلول‌های گیل

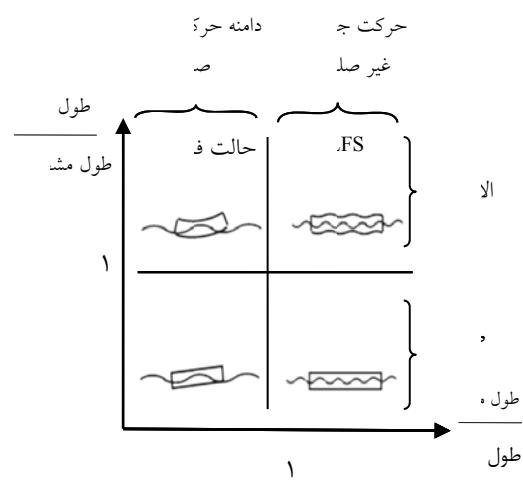
سازه‌های شناور بسیار بزرگ از اجزای آب‌بندی تشکیل شده است که نیروی شناوری را تأمین می‌کنند. در مقابل سلول‌های گیل قسمت‌هایی را تشکیل می‌دهند که نیروی شناوری در زیر این نواحی حذف می‌شود. نحوه عملکرد این سلول‌ها به این صورت است که به دلیل

سازه بسیار زیاد باشد، طول مشخصه به بینهایت میل خواهد کرد. در این حالت سازه رفتاری مشابه جسم صلب خواهد داشت.



شکل ۲ مقایسه رفتار یک سازه‌ایستیک و یک سازه صلب با درنظر گرفتن طول مشخصه [17]

شکل (۳)، حالت‌های مختلف رفتار یک سازه شناور را با توجه به طول موج و طول مشخصه در قالب نمودار نشان داده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، در صورتی که طول موج از طول سازه بزرگ‌تر باشد، حرکت سازه به صورت حرکت جسم صلب خواهد بود و اگر طول مشخصه از طول سازه بیشتر باشد، تغییر شکل در سازه مانند جسم صلب می‌شود. درنتیجه برای این‌که رفتار سازه هیدرولاستیک باشد، باید طول مشخصه و طول موج از طول سازه کم‌تر باشد [17].



شکل ۲ بررسی حالات مختلف در سازه شناور بسیار بزرگ از لحاظ رفتار صلب و الاستیک [17]

و سازه با عنوان رفتار هیدرولاستیک معرفی می‌شود. با توجه به این‌که نسبت ابعاد افقی سازه‌های شناور بسیار بزرگ نسبت به ضخامت آن زیاد هستند؛ مانند یک صفحه الاستیک رفتار می‌کنند، درنتیجه پاسخ عمودی آنها به طور معمول به صورت هیدرولاستیک در نظر گرفته می‌شود.

هر سازه شناور با ابعاد بسیار بزرگ را نمی‌توان سازه شناور بسیار بزرگ (VLFS) نامید و رفتار آن را هیدرولاستیک تحلیل کرد؛ بلکه باید طولی بزرگ‌تر از طول امواج و طول مشخصه (Characteristic length) داشته باشد. در سازه‌هایی با چنین ابعادی، رفتار الاستیک بر حرکت صلب آنها غالب است. در شکل (۲)، طول مشخصه به صورت شماتیک نشان داده شده است و مقدار آن از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [17].

$$\lambda_c = 2\pi \left[ \frac{EI}{k_c} \right]^{1/4}, \quad k_c = \rho_w g B \quad (1)$$

در رابطه‌های بالا، EI، سختی خمشی سازه است که E، مدول الاستیسیته و I، ممان اینرسی مقطع سازه می‌باشد؛ B، عرض شناور؛ g، شتاب گرانش و  $\rho_w$ ، چگالی آب است.

در رابطه (۱)، ثابت ارجاعی نیروی بازگرداننده هیدرولاستاتیک نامیده می‌شود و  $k_c$ ، طول مشخصه؛ در واقع طولی از سازه الاستیک است که تحت بار مرکز دچار تغییرشکل موضعی ایجاد می‌شود. در شکل (۲)، طول مشخصه به صورت شماتیک نشان داده شده است. این مفهوم نشان می‌دهد که در این نوع سازه‌ها در اثر اعمال بار، تغییرشکل الاستیک به این طول محدود می‌گردد [17]. به عبارت دیگر در نقطه انتهای محدوده طول مشخصه، تغییرشکل وجود ندارد و پس از این نقطه خط مماس بر سازه افقی خواهد بود. طول مشخصه وابسته به ویژگی‌های سازه است؛ در واقع هر چه سختی سازه زیاد یا عرض سازه کم باشد، طول مشخصه سازه بزرگ‌تر خواهد بود. در حالت حدی، مثلاً حالتی که سختی

برای شبیه‌سازی سلول‌های گیل مانند شکل (۵) در دو سر مدل به طول ۴۰ سانتی‌متر حفره‌های مکعبی شکل با ابعاد ۶×۶ سانتی‌متر ایجاد شد. از آنجایی که در آزمایش‌ها باید تعداد خاصی از سلول‌ها پرآب و بقیه خالی باشند و آب از یک سلول به دیگری نفوذ نکند؛ داخل سلول‌ها با چسب آب‌بندی شدن.



شکل ۴ تصویر بخش تحتانی مدل ساخته شده دارای سلول‌های گیل به عمق ۷/۵ سانتی‌متر و ابعاد ۶×۶ سانتی‌متر در دو سر مدل

**محاسبه سختی و طول مشخصه مدل.** برای محاسبه سختی خمسي مدل از آزمایش تیر یک‌سرگیردار استفاده شد. در این آزمایش یک طرف مدل با قرار دادن وزنهای سنگین روی آن ثابت گردید. سپس جابه‌جایی قائم سر دیگر مدل نسبت به حالت افقی تحت وزنش اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری از سنسورهای جابه‌جایی سنج التراسنیک دارای دقیق ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است، (شکل ۶). آزمایش برای سه طول ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. هر آزمایش ۵ بار تکرار گردید. میانگین خیز هر یک از طول‌های آزاد در جدول (۱) آورده شده است. برای محاسبه سختی از رابطه زیر استفاده شده است [۱۱]:

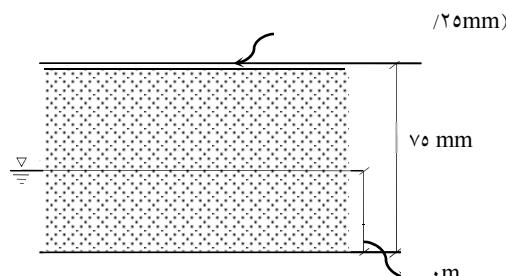
$$y = WL^4 / 8EI \quad (3)$$

در رابطه فوق  $W$ ، وزن واحد طول مدل؛  $L$ ، طول بخش آزاد مدل؛  $y$ ، خیز سرآزاد و  $EI$  سختی خمسي می‌باشد.

**ابعاد و نحوه ساخت مدل.** مشخصات هندسی و سازه‌ای یک مدل باید طوری باشد که نتایج آزمایش‌ها بیانگر رفتار سازه واقعی باشد. مهم‌ترین ویژگی سازه شناور بسیار بزرگ رفتار هیدرولاستیک آن است. یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در این زمینه سختی خمسي مدل است و باید به اندازه‌ای باشد که به‌طور الاستیک عمل کند [۲]. برای شبیه‌سازی رفتار سازه شناور از ابعاد و ویژگی‌های سازه شناور واقعی دارای طول ۳۰۰ متر، عرض ۶۰ متر و سختی خمسي  $10^{11} / 77 \times 4$  نیوتون متر مربع استفاده شده است [۱۵, ۱۶, ۱۸, ۱۹]. نسبت سختی خمسي در مدل و نمونه واقعی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$EI_p = \alpha^5 EI_m \quad (2)$$

در رابطه بالا  $EI_p$ ، سختی خمسي نمونه واقعی؛  $EI_m$ ، سختی خمسي مدل و  $\alpha$ ، نسبت مقیاس است. مقیاس  $1/150$  برای ساخت مدل در آزمایشگاه انتخاب شده است. با توجه به رابطه (۲)، سختی مدل باید  $6/28$  نیوتون مترمربع باشد. برای تأمین این سختی، مدلی یک لایه از جنس آلومینیوم به ضخامت  $1/25$  میلی‌متر و ابعاد  $2 \times 0/5$  متر انتخاب گردید. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود؛ برای تأمین شناوری از پلی‌ایلن به ضخامت  $7/5$  سانتی‌متر در زیر ورق آلومینیمی استفاده شده است. برای تأمین عمق آبخور از بار ثابت یکنواخت در کل طول مدل استفاده شده است.



شکل ۳ مقطع عرضی مدل فیزیکی ساخته شده از جنس آلومینیوم و پلی‌ایلن

توانایی ساخت موج‌های منظم و نامنظم تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و پریودهای  $۰/۵$  تا  $۴$  ثانیه را دارد. از سنسورهای موج‌سنج برای اندازه‌گیری لحظه‌به‌لحظه ارتفاع سطح آب استفاده شده است. دقت این سنسورها ۱ میلی‌متر بوده و در هر ثانیه  $۱۰$  داده را ثبت می‌کنند. سه عدد از این سنسورها جلوی مدل و سه عدد دیگر در پشت مدل در طرف ساحل نصب شده‌اند. شکل (۷)، نمایی از فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفتۀ کرمان را نشان می‌دهد. در این شکل سنسورهای موج‌نگارها با نگهدارنده‌های آبی‌رنگ مشخص هستند. در انتهای فلوم یک ساحل مصنوعی به طول  $۳$  متر با سنگ‌هایی به ابعاد  $۳$  تا  $۵$  سانتی‌متر ساخته شده است. بدین ترتیب موج‌هایی که به انتهای کانال می‌رسند، مستهلک و از بازگشت آنها جلوگیری می‌شود، (شکل (۸)).



شکل (۶) نمایی از فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفتۀ کرمان با طول  $۱۶$  متر، عرض و ارتفاع یک متر



شکل (۵) اندازه‌گیری جابه‌جایی قائم مدل در تیر یکسر گیردار برای محاسبه سختی خمشی

با درنظر گرفتن جرم مخصوص  $۲۷۰۰$  کیلوگرم بر مترمکعب، برای ورق آلومینیوم، مقدار وزن واحد طول مدل  $۱۶/۵$  N/m محاسبه شده است. با استفاده از رابطه (۳)، مقادیر EI محاسبه و در جدول (۱) آورده شده است. با میانگین گیری از مقادیر سختی خمشی، EI مدل برابر  $۶/۵۸$  نیوتن مترمربع محاسبه شده است.

جدول ۱ نتایج آزمایش‌ها و محاسبه سختی برای طول‌های مختلف مدل در آزمایش تیر یکسر گیردار

سختی خمشی (N.m <sup>2</sup> )	خیز سرآزاد (mm)	طول آزاد (cm)
۵/۸۹	۸/۹	۴۰
۶/۱۸	۲۰/۹	۵۰
۷/۶۶	۳۵/۰	۶۰

طبق رابطه (۱)، با توجه به سختی خمشی به دست آمده برای مدل، مقدار طول مشخصه برابر  $۱/۱۸$  متر خواهد شد. این مقدار از طول مدل ( $۲$  متر) کمتر است. هم‌چنین همه طول موج‌های آزمایش نیز از طول مدل کمتر انتخاب شده‌اند تا رفتار آن هیدرولاستیک باشد. ویژگی موج‌ها به‌طور کامل در بخش شرح آزمایش آورده شده است.

### آزمایشگاه و تجهیزات اندازه‌گیری

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفتۀ کرمان انجام شد. فلوم آزمایشگاه دارای طول  $۱۶$  متر، عرض و ارتفاع یک متر است. عمق آب قابل تنظیم است و شرایط آزمایشگاهی را شبیه‌سازی می‌کند. دستگاه موج‌ساز

در رابطه‌های بالا  $M$ , لنگر خمی؛  $EI$ , سختی خمی؛  $c$ , فاصله تار ختنا مقطع تا دورترین تار مقطع؛  $\sigma$ , تنش و  $\epsilon$ , کرنش مدل است.

برای این‌که بتوان از حرکت افقی مدل در داخل کanal جلوگیری و در عین حال شرایطی یکسان در همه آزمایش‌ها ایجاد کرد؛ از سیستم قاب مهاربندی استفاده شده است (شکل ۹). لازم به ذکر است سیستم مهاربندی از سازه فاصله داشت به طوری که مدل در داخل آن آزادانه حرکت می‌کرد. همچنین محل برخورد لبه‌های مدل با نیشی‌ها با گریس روانکاری می‌شد. بدین ترتیب شرایط یکسانی در همه آزمایش‌ها برای حرکت مدل فراهم بوده و مهاربندی در نتایج و جایی‌ها تأثیرگذار نبوده است.



شکل ۹ سیستم مهاربندی قائم و افقی‌با هدف جلوگیری از حرکت افقی مدل در برابر امواج

در شکل (۱۰)، کanal و مدل آزمایش همراه با تجهیزات اندازه‌گیری به صورت شماتیک نشان داده شده است. شکل (۱۱)، پلان فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان را نمایش می‌دهد.



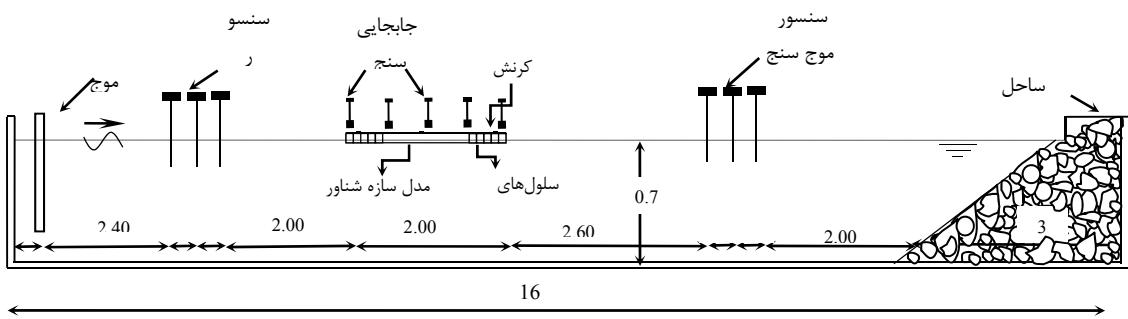
شکل ۷ ساحل انتهای کanal آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان برای مستهلک کردن امواج در انتهای کanal

برای ثبت جابه‌جایی قائم مدل بر اثر برخورد موج از سنسورهای التراسونیک استفاده شده است. این سنسورها برای برآورد فاصله، از امواج مافق صوت استفاده می‌کنند. طرز کار آنها به این صورت است که فاصله زمانی بین ارسال امواج تا دریافت سیگنال بازگشتی را اندازه‌گیری و با توجه به سرعت صوت در آن محیط، فاصله تا مatum را برآورد می‌کنند. داده‌های سنسورها بعد از انتقال به یک مبدل، در رایانه ثبت می‌شوند. این سنسورها دارای دقت  $0.1$  میلی‌متر است و می‌توانند هر میلی‌ثانیه جابه‌جایی قائم سطح مدل را ثبت کنند.

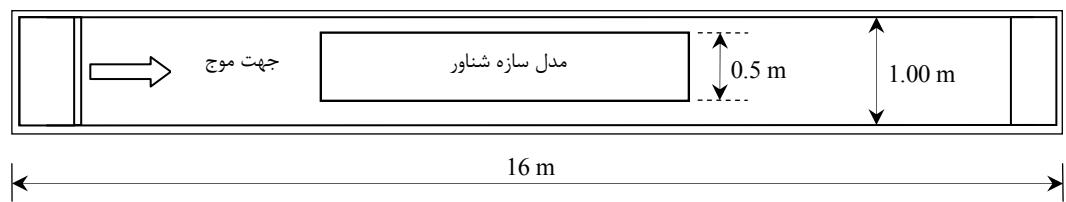
برای اندازه‌گیری کرنش در طول مدل‌ها از کرنش سنج دینامیکی سه محوره دارای شبکه‌بندی دلتا استفاده شده است. مدل کرنش سنج TML و نوع آن FRS-2-23 بوده است. مدل دستگاه ثبت کننده کرنش‌ها DC-104R است و در هر ثانیه  $100$  داده مربوط به کرنش را ثبت می‌نمود. لازم به ذکر است برای بالا بردن دقت و کاهش مقاومت از سیم‌هایی با جنس نقره استفاده گردید. با توجه به زیاد بودن طول نسبت به عرض مدل، تنش محوری در محور عرضی و تنش برشی ناچیز هستند؛ با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵) ممان خمی سطح مدل محاسبه می‌شود [۲]:

$$\sigma = EI\epsilon \quad (4)$$

$$M = EI\varepsilon/c \quad (5)$$



شکل ۸ نمایش محل قرارگیری مدل و سنسورها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفتہ کرمان



شکل ۹ پلان فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفتہ کرمان

جدول ۲ نتایج تحلیل انعکاس امواج

طول موج (m)	۰/۷	۱/۰۰	۱/۳۰	۱/۶۰	۱/۹۰
$C_r$ بین مدل و پارو (-)	۰/۰۶۹	۰/۰۸۵	۰/۰۹۰	۰/۱۰۵	۰/۱۱۱
$C_r$ در ساحل فلوم (-)	۰/۰۲۹	۰/۰۳۲	۰/۰۴۱	۰/۰۴۵	۰/۰۵۲

نرم‌افزار که به نام Wave Lab شناخته می‌شود، قابلیت تجزیه امواج برخورده و انعکاسی را با استفاده از سری‌های زمانی ثبت شده بین دو نقطه دارد. براساس تحقیقات انجام شده [۲۲] بیشترین و کمترین فاصله مجاز بین دو موج‌نگار برای رسیدن به نتایج مطلوب مطابق معادلات (۶) و (۷) می‌باشد.

$$f_{\min} = \frac{\Delta x}{\lambda} = 0.05 \quad (6)$$

$$f_{\max} = \frac{\Delta x}{\lambda} = 0.45 \quad (7)$$

در این روابط  $\Delta x$ ، فاصله بین دو موج‌نگار؛  $\lambda$ ، طول موج و  $f_{\min}$  و  $f_{\max}$  به ترتیب مقادیر حداقل و

### تحلیل انعکاس امواج

از مهم‌ترین و اوّلین مراحل بررسی پدیده‌های هیدرودینامیکی در سازه‌های دریایی بحث ترکیب امواج برخورده و انعکاسی است. محققان زیادی از جمله تورنتون و کالن (۱۹۹۹)، گودا و سوزوکی (۱۹۷۶)، منسارد و فانک (۱۹۸۰)، بالداک و سیمونندز (۱۹۹۱) روش‌های متفاوتی برای تجزیه امواج برخورده و انعکاس‌یافته به منظور برآورد ضریب انعکاس موج معرفی کردند [۲۰]. در این تحقیق عملیات تجزیه امواج با استفاده از روش منسارد (۱۹۸۰) به روش تحلیل طیفی انجام پذیرفته است [۲۰, ۲۱]. به این منظور از یک نرم‌افزار توسعه‌یافته در دانشگاه آلبرت دانمارک استفاده شده است. این

می شود.

**حالات مختلف مدل فیزیکی.** همان‌طور که بیان شد در مدل بدون سلول گیل، هر سلول در ابتدا آب‌بند بوده و امکان ورود آب به آنها وجود نداشته است. سپس با توجه به تعداد و نحوه قرارگیری سلول‌ها در سازه با ایجاد شیار در قسمت زیرین هر سلول، امکان ورود آب به‌طور مجزا برای هر یک از سلول‌ها فراهم می‌شود. هم‌چنین برای این‌که سلول‌های گیل در ارتباط با جو باشند در هر سلول گیل یک سوراخ در صفحه بالایی (صفحه آلومینیومی) ایجاد شد. تا هوا داخل این سلول‌ها از سطح بالایی انتقال یابد و فشار هوای داخل سلول مانع ورود و خروج آب به آن نشود. به عبارت دیگر همواره آب داخل سلول گیل با سطح کانال هم‌طراز است و جایه‌جایی آب در سلول به صورت ثقلی خواهد بود. در حالت اول در هر طرف مدل شش سلول گیل مطابق جدول (۳)، ایجاد شد. در حالت دوم، تعداد سلول‌ها به دوازده عدد افزایش یافت و به شکل مستطیلی در گوشه‌های مدل قرار گرفت. برای حالت سوم، سلول‌های گیل در دو ردیف بیرونی شبکه مشبك جای‌گذاری شدند. در حالت چهارم، چیدمان سلول‌ها مثلثی بود ولی تعداد آنها به ۱۸ عدد در هر طرف افزایش پیدا کرد.

**آزمایش بارگذاری قائم (بارگذاری استاتیکی).** در آزمایش بارگذاری استاتیکی پنج مرحله بارگذاری انجام شده است. در هر مرحله ۵۳ نیوتون بار در بخش میانی به حالت قبلی اضافه شد. پس از ثابت شدن نوسانات مدل و پایدار شدن مقادیر کرنش، تغییر جایه‌جایی و کرنش‌ها اندازه‌گیری گردید. یادآور می‌شود در این بخش از آزمایش موج به مدل اعمال نمی‌شد. برای کاهش خطا، هر یک از حالات مدل آزمایش‌ها در هر بارگذاری حداقل چهار مرتبه تکرار شده است. در این آزمایش جایه‌جایی قائم و کرنش‌ها در دو سر و وسط

حداکثر نسبت می‌باشند. از آن‌جایی که کمترین و بیشترین طول موج‌ها در آزمایش‌ها ۰/۷ و ۱/۹ متر است، فاصله ۳۰ سانتی‌متری بین موج‌نگارها برای همه طول موج‌ها روابط (۶) و (۷) را ارضا می‌نماید. هم‌چنین به‌منظور صرف‌نظر نمودن از اغتشاشات سطح آب در نزدیکی مدل و پاروسنسورها باید حداقل یک طول موج از پارو و مدل فاصله داشته باشد [۲۳]. برای این منظور سنسورها در حد وسط سازه و پارو قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از تلاطم ایجادشده ناشی از بازتاب‌های چندگانه از پارو تعداد امواج تولیدشده به حدود ۲۰۰-۱۸۰ موج برای هر یک از موج‌ها محدود شد. نتایج ضرایب انعکاس برای هر یک از امواج برگشتی از پارو و ساحل انتهای فلوم در جدول (۲) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساحل جاذب انتهای فلوم، امواج را به‌خوبی مستهلک کرده است. در جلوی سازه نیز با توجه به ضرایب محاسبه شده می‌توان از اثر امواج انعکاسی در تحلیل جایه‌جایی و تنش‌های مدل صرف‌نظر نمود.

### شرح آزمایش

آزمایش‌ها از دو بخش بارگذاری استاتیکی و دینامیکی تشکیل شده‌اند. در بخش اول تنش و جایه‌جایی‌ها تنها تحت بارگذاری قائم بررسی شدند. بخش دوم آزمایش‌ها با اعمال موج به مدل انجام گردید. در هر دو آزمایش، بار ثابت ۲۲۰ نیوتون بر واحد سطح برای افزایش عمق مستغرق بر مدل وارد شده است. این مقدار بار در همه آزمایش‌ها وجود داشته است. در هر یک از موارد فوق آزمایش‌ها ابتدا برای مدل بدون سلول گیل انجام شد، در این وضعیت امکان ورود آب به هیچ‌کدام از سلول‌ها وجود نداشت. خاطرنشان می‌کند، عمق آب در آزمایشگاه ۷۰ سانتی‌متر بوده است. برای بررسی تأثیر تعداد و نحوه چیدمان سلول‌های گیل در سازه، چهار حالت درنظر گرفته شد. در زیر به توضیح بیشتر حالت‌ها و آزمایش‌ها پرداخته

منظم بودند. نسبت طول موج‌ها به طول سازه کمتر از یک به صورت  $0/35$ ,  $0/50$ ,  $0/65$ ,  $0/80$  و  $0/95$  انتخاب شدند. با توجه به این‌که طول مدل دو متر است، طول موج‌ها  $70$ ,  $100$ ,  $130$ ,  $160$  و  $190$  سانتی‌متر می‌باشند.

با استفاده از رابطه (۸) که به رابطه پراکنده‌گی (Dispersion equation) معروف است، دوره تناوب

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (8)$$

موج‌ها محاسبه می‌شوند [۲۴]:

در رابطه بالا  $h$ : عمق آب؛  $\lambda$ : طول موج؛  $g$ : شتاب گرانش زمین و  $T$ : دوره تناوب موج است. با توجه به رابطه (۸)، دوره تناوب موج‌ها به ترتیب طول موج کوچک‌تر  $0/67$ ,  $0/91$ ,  $0/80$ ,  $0/101$  و  $0/10$  ثانیه محاسبه شدند. در جدول (۴) ویژگی امواج آورده شده است.

جدول ۴ ویژگی امواج اعمال شده بر مدل در آزمایشگاه

ویژگی موج	موج ۱	موج ۲	موج ۳	موج ۴	موج ۵
نسبت طول موج به طول سازه (-)	$0/35$	$0/50$	$0/65$	$0/80$	$0/95$
طول موج (m)	$\lambda$				
پریود موج (s)	$T$				
ارتفاع موج H (cm)					۲
زاویه موج (deg)					۹۰°

موج‌ها با ارتفاع دو سانتی‌متر در آزمایشگاه ساخته شدند و راستای آنها بر عرض مدل عمود بود. جایه‌جایی قائم در پنج نقطه به فاصله  $50$  سانتی‌متری از یکدیگر و کرنش‌ها در دو سر و وسط مدل اندازه‌گیری شدند. برای کم کردن خطا در اندازه‌گیری و جلوگیری از تصادفی بودن داده‌ها، اعمال هر موج سه مرتبه تکرار می‌گردید.

## بحث و تحلیل نتایج

### نتایج آزمایش بارگذاری قائم (استاتیکی)

در شکل (۱۱) روند تغییرات اختلاف خیز بین مرکز و

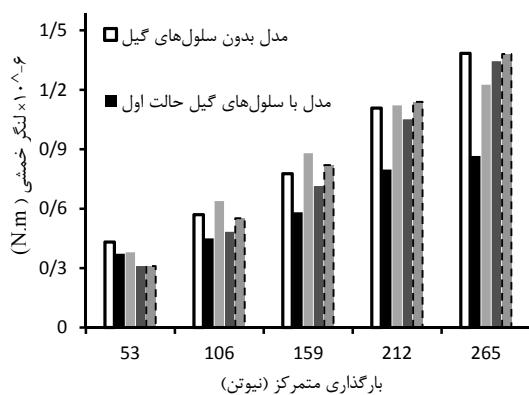
مدل اندازه‌گیری شدند.

جدول ۳ نمایش حالت‌های مختلف چیش سلول‌های گیل

تعداد سلول‌های گیل	نحوه قرار گیری سلول‌های گیل در مدل آزمایشگاهی
مدل بدون سلول گیل	
حالات اول، ۵ درصد سلول گیل در کل سطح	
حالات دوم، ۱۰ درصد سلول گیل در کل سطح	
حالات سوم، ۱۰ درصد سلول گیل در سطح کل	
حالات چهارم، ۱۵ درصد سلول گیل در کل سطح	

آزمایش با اعمال موج (بارگذاری دینامیکی). در آزمایش بارگذاری دینامیکی علاوه بر بار ثابت  $220$  نیوتون بر واحد سطح که برای افزایش عمق مستغرق، به‌طور یکنواخت در طول مدل قرار داده شد، برای شبیه‌سازی بارگذاری در سازه‌های شناور، بار متتمرکز  $200$  نیوتون نیز در بخش میانی مدل اعمال شد. موج‌های تولید شده در آزمایشگاه از نوع سینوسی و

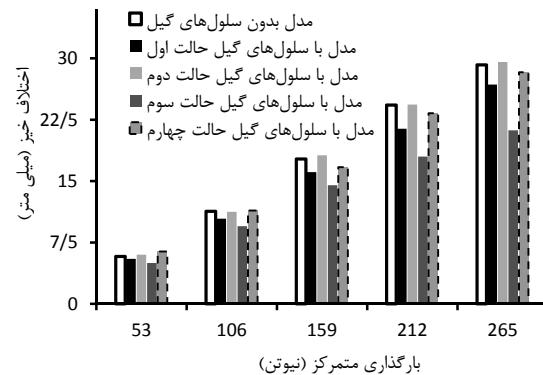
کرنش مدل ساخته شده تحت بار استاتیکی در وسط و به دلیل تقارن فقط در یک طرف مدل اندازه‌گیری شده است. روند تغییرات لنگر خمثی وسط مدل در شکل (۱۲) نشان داده شده است. حالت اول یعنی قرارگیری سه سلول در هر گوش بهترین عملکرد را در کاهش خمثی در مقایسه با حالت بدون سلول گیل داشته است. درصد کاهش خمثی در این حالت نسبت به سایر حالات کمتر است. در این حالت نسبت به حالت بدون سلول گیل برای بارگذاری ۵۳، ۱۰۶، ۱۵۹، ۲۱۲ و ۲۶۵ نیوتون به ترتیب ۱۳/۶، ۲۱۲، ۱۵۹، ۱۰۶ و ۲۵۶ نیوتون به ترتیب ۲۷/۴ و ۳۷/۴ بوده است. این اعداد تأثیرگذاری سلول‌های گیل در مقادیر بارگذاری بیشتر را تأیید می‌کند. همچنین حالت سوم در رتبه دوم از این لحاظ قرار دارد.



شکل ۱۱ مقایسه لنگر خمثی مرکز مدل در حالتهای مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها تحت بارهای استاتیکی قائم

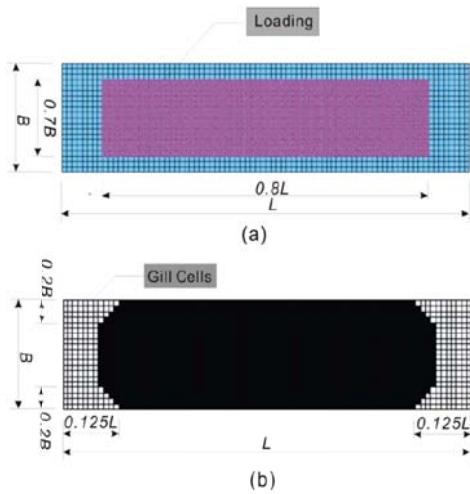
روند لنگر خمثی در ابتدای سازه برای هر بارگذاری در شکل (۱۳) آورده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که خمثی در این قسمت از مدل در همهٔ حالات دارای سلول گیل از حالت مدل معمولی کمتر بوده است. در ابتدای مدل نیز مانند وسط آن، لنگر خمثی در حالت اول کاهش بیشتری نسبت به بقیهٔ حالات داشته است. حالت‌های دوم و چهارم نیز بعد از حالت اول کمترین خمثی را داشته‌اند ولی حالت سوم با وجود این‌که از مدل معمولی لنگر خمثی کمتری داشته ولی نسبت به بقیهٔ حالات عملکرد ضعیف‌تری داشته است. در حالت اول نسبت به حالت بدون سلول

لبه مدل برای حالتهای مختلف آورده شده است. نتایج این نمودار نشان می‌دهد که کاهش اختلاف خیز در بارگذاری با مقادیر کم، چشم‌گیر نبوده است. با افزایش بارگذاری اختلاف خیز در حالت سوم نسبت به سایر حالات کمتر است. در این حالت نسبت به حالت بدون سلول گیل برای بارگذاری ۵۳، ۱۰۶، ۱۵۹، ۲۱۲ و ۲۶۵ نیوتون، اختلاف خیز به ترتیب ۱۳/۸، ۱۸/۱، ۱۵/۹، ۲۵/۹ و ۲۷/۴ درصد کاهش یافته است. در این حالت دو دریف آخر به سلول گیل اختصاص داده شده است و مساحت آن ده درصد کل سازه است. بعد از حالت سوم، حالت اول بهترین عملکرد را داشته است. در این وضعیت در هر یک از گوش‌های مدل سه عدد سلول گیل ایجاد شده است و در مجموع پنج درصد سطح کل را تشکیل می‌دهند. با وجود این‌که در حالت دوم نیز مانند حالت سوم، میزان سطح سلول‌های گیل ده درصد بوده است ولی چون نحوه چینش آنها متفاوت بوده، عملکرد خوبی در کاهش اختلاف خیز نداشته است. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد در حالت چهارم که حدود ۱۵ درصد سطح کل را سلول گیل تشکیل می‌دهد؛ بهبودی در کاهش اختلاف خیز حاصل نشده است. می‌توان نتیجه گرفت هر چند افزایش تعداد سلول‌های گیل می‌تواند اهمیت داشته باشد، اما چینش آنها باید طوری باشد که بیشترین فاصله را از محل بارگذاری داشته باشند.



شکل ۱۰ مقایسه اختلاف خیز مرکز و لبه مدل در حالتهای مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، تحت بارهای استاتیکی

نرم افزار آباکوس و الگوریتم ژنتیک بررسی کرده است. مکان و آرایش سلول‌های گیل را مانند شکل (۱۴) گزارش نموده است [12]. چینش ارائه شده در شکل مذکور مشابه نتیجه‌ای است که در آزمایش‌ها به عنوان بهترین حالت (حالت سوم در آزمایش‌ها) شناخته شد. البته بارگذاری در آزمایش‌ها در نیمه میانی مدل انجام شده است که در تحقیق زیجیان در هشتدهم طول، مطابق شکل (۱۴-a) بوده است.

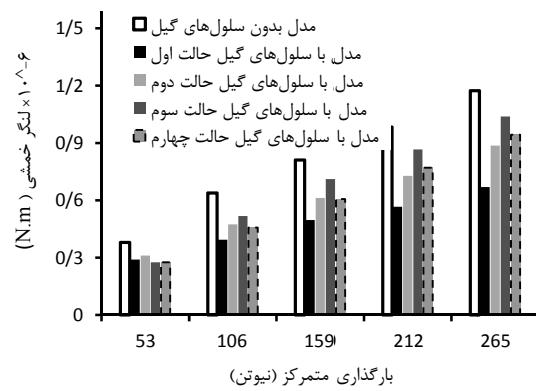


شکل ۱۳ (a) ناحیه بارگذاری، (b) طرح بهینه سلول‌های گیل برای سازه شناور با  $L/B=4$  [12]

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، محققان دیگری نیز اثر سلول گیل در سازه دایره و مربع شکل به صورت عددی مدل‌سازی کردند و استفاده از سلول گیل را مفید ارزیابی نموده‌اند. هر چند ابعاد و مقدار بارگذاری تحقیقات فم و همکاران با ابعاد مدل ساخته شده در آزمایشگاه متفاوت است، ولی می‌توان بررسی کارایی سلول‌های گیل که بیشتر هدف این پژوهش بوده را با تحقیقات آنها به‌طور نسبی مقایسه کرد. ایشان در مقاله خود با مدل‌سازی سازه با ابعاد  $180 \times 240$  متر با روش اجزای محدود در حالت بهینه؛ کاهش اختلاف خیز را  $55\%$  و کاهش تنش در مرکز سازه را  $24\%$  اعلام نمودند [15]. این مقادیر با توجه به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب  $28\%$  و  $37/4\%$  در بیشترین

گیل در بارگذاری اول تا پنجم مقدار لنگر خمی به ترتیب  $23/6$ ،  $38/4$ ،  $38/7$ ،  $42/4$  و  $43$  درصد کاهش داشته است. از مقایسه این مقادیر با مقادیر مشابه لنگر خمی وسط مدل می‌توان دریافت که لنگر خمی در ابتدای مدل از وسط مدل بیشتر کاهش یافته است.

باتوجه به اهمیت هر کدام از پارامترهای خیز و لنگر خمی در ساخته شناور می‌توان هر یک از حالت‌های اول و سوم را انتخاب کرد. هم‌چنین باتوجه این‌که این دو حالت از بقیه حالات مناسب‌تر رفتار کرده‌اند، می‌توان با ترکیب آنها الگویی را پیشنهاد کرد که به‌طور نسبی خمی و اختلاف خیز کمتری در سازه ایجاد کند. این الگو می‌تواند شبیه حالت سوم باشد ولی دو یا چهار سلول از ردیف دوم حذف شده باشد.



شکل ۱۲ مقایسه لنگر خمی ابتدای مدل در حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها تحت بارهای استاتیکی نتایجی هم‌راستا با نتایج آزمایش در ارتباط اختلاف خیز در تحقیق ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ مشاهده می‌شود. آنها یک ترمینال کانتینر مربع‌شکل با سلول‌های گیل در چهار ضلع سازه و بارگذاری نامتقارن را با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی نمودند. آنها نیز استفاده از این سلول‌ها را مؤثر دانسته‌اند، همچنین در نتایج خود مانند مشاهدات آزمایش - ابراز می‌دارند که کارایی این روش در تعداد کانتینر بیشتر (بارگذاری بیشتر) مؤثرتر بوده است [10]. در تحقیق دیگری زیجیان در سال ۲۰۰۷ یک سازه طولی را با استفاده از

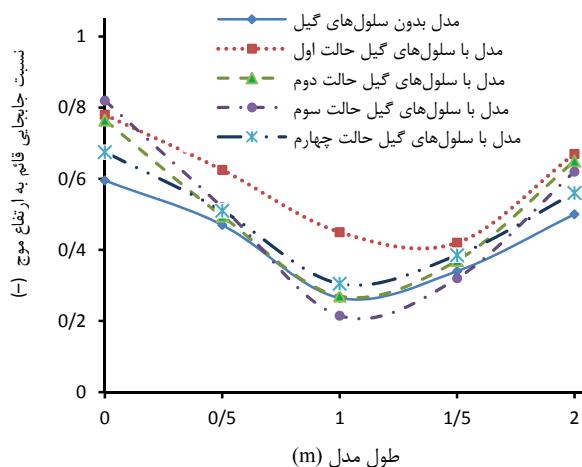
است. در دو موج با دوره تناوب  $0/8$  و  $0/91$  ثانیه، رفتار مدل بدون سلول گیل تقریباً مشابه با مدل دارای سلول گیل در حالت اول است.

در موج با دوره تناوب‌های  $1/01$  و  $1/1$  ثانیه (موج با طول‌های بلندتر)، مدل‌های دارای سلول‌های گیل در قسمت‌هایی از طولشان عملکرد بهتری داشته‌اند. در شکل (۱۸) حالت چهارم، جابه‌جایی را در نیمه اول مدل کاهش داده است. هم‌چنین با توجه به شکل (۱۹) جابه‌جایی نیمه اول مدل در حالت سوم نسبت به مدل بدون سلول گیل کاهش یافته است. با دقت در نمودارها و مقایسه بین مدل‌ها، برای کل طول مدل نمی‌توان روند خاصی برای آنها پیش‌بینی کرد.

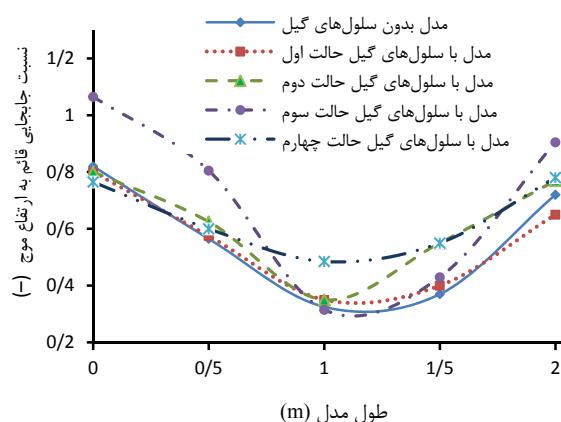
بارگذاری مدل بوده‌اند. تأکید می‌شود؛ هرچند ابعاد و شکل سازه‌ها در بررسی اخیر با یکدیگر مشابه نبوده است ولی در یک مقایسه نسبی، نتایج مدل آزمایشگاهی نیز عملکرد سلول گیل در سازه شناور را مفید و امکان‌پذیر می‌داند.

#### نتایج آزمایش اعمال موج (بارگذاری دینامیکی)

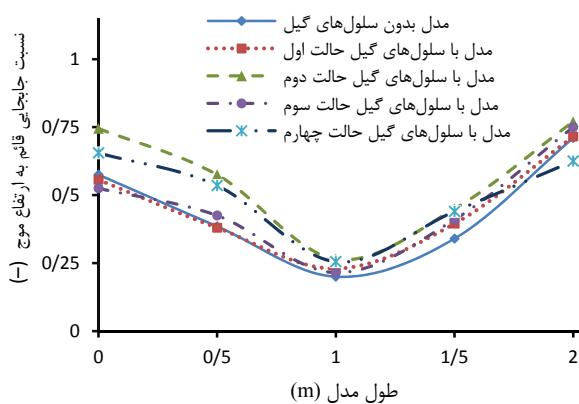
نسبت جابه‌جایی قائم مدل به ارتفاع موج در آزمایشگاه (۲ سانتی‌متر) در شکل‌های (۱۵) تا (۱۹) آورده شده است. در موج اول با دوره تناوب  $0/67$  ثانیه، مدل دارای سلول گیل در حالت چهارم در وسط مدل از بقیه حالت‌ها عملکرد بهتری داشته است، ولی در دو سر مدل قادر سلول گیل جابه‌جایی کمتری داشته



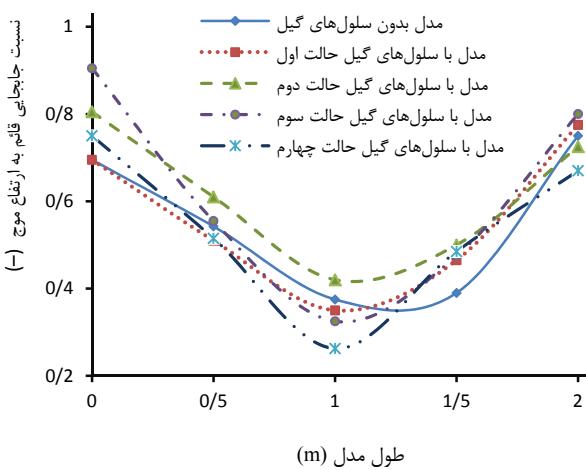
شکل ۱۴ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دوره تناوب  $0/67$  ثانیه



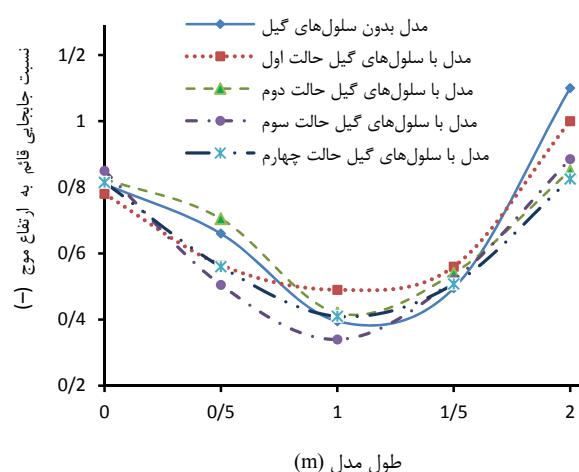
شکل ۱۵ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دوره تناوب  $0/8$  ثانیه



شکل ۱۷ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۹۱ ثانیه



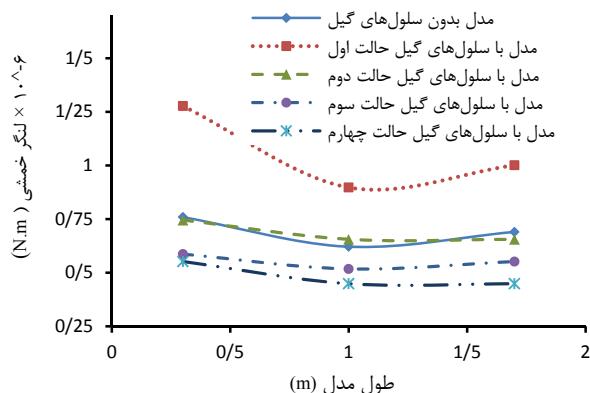
شکل ۱۸ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه



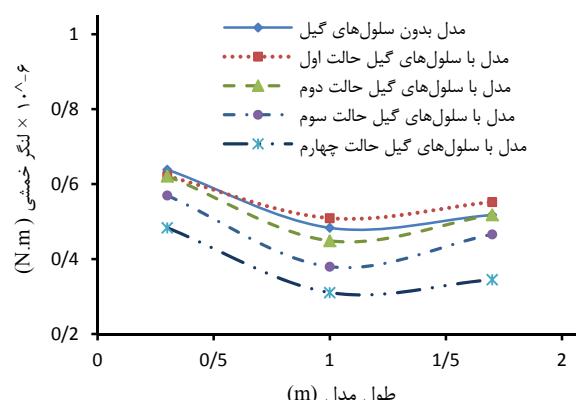
شکل ۱۹ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه

تناوب ۱/۱ ثانیه)، کارکرد حالت سوم بهتر بوده و لنگر خمثی ایجادشده در آن کمتر شده است. با توجه به این‌که کاربرد سلول گیل در آزمایش بارگذاری دینامیکی به شکل قابل قبولی تنش در سازه را کاهش داده است، برای استفاده از این روش در محیط‌های دور از ساحل باید مسئله جابه‌جایی سازه را در نظر گرفت و در صورت نیاز با دیگر روش‌ها آن را کاهش داد.

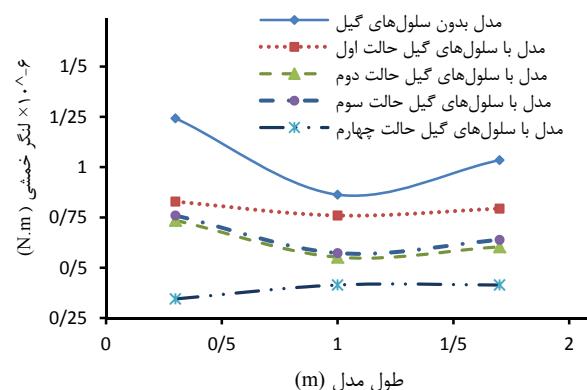
تأثیر سلول‌های گیل در تغییرات تنش در مدل سازه شناور ساخته شده در شکل‌های (۲۰) تا (۲۴) برای موج‌های پنج گانه آورده شده است. روند تغییرات در این نمودارها نشان می‌دهد که کاربرد سلول‌های گیل در کاهش خمثی مدل مؤثر بوده است. در اثر اعمال چهار موج اول، حالت چهارم قرارگیری سلول‌ها نسبت به سایر حالات و مدل بدون سلول گیل عملکرد بهتری داشته است. در مورد موج آخر (موج با دوره



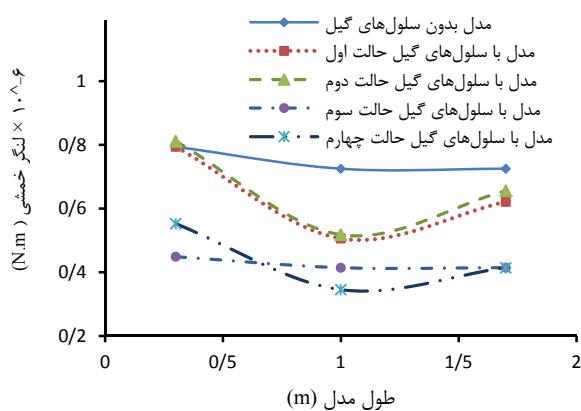
شکل ۲۰ لنگر خمثی در طول مدل با مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه



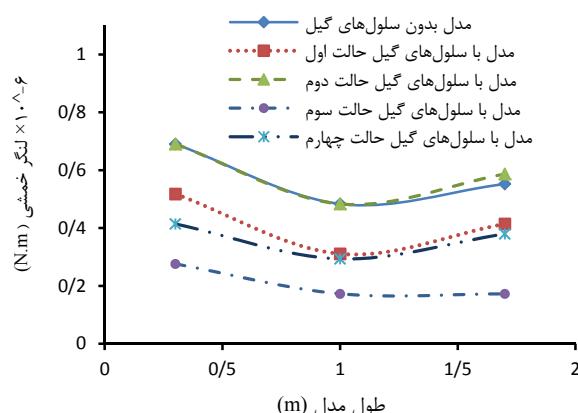
شکل ۲۱ لنگر خمثی در طول مدل با مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۸ ثانیه



شکل ۲۲ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۹۱ ثانیه



شکل ۲۳ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۰۱ ثانیه



شکل ۲۴ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۱/۱ ثانیه

آزمایش اوّل تنها بارگذاری قائم بر سازه اعمال شد. در آزمایش دوم با اعمال موج های مختلف عملکرد سلول های گیل در سازه شناور بررسی شد. در این آزمایش ها جابه جایی و کرنش در دو سر و وسط مدل اندازه گیری گردید.

در آزمایش بارگذاری قائم، پنج نوع بار  $53, 106, 159, 212$  و  $256$  نیوتن در وسط مدل اعمال شد. نتایج آزمایش ها نشان داد که:

(۱) حالت سوم چینش سلول های گیل، عملکرد بهتری نسبت به بقیه وضعیت ها در کاهش اختلاف خیز داشته است. از این نتیجه می توان دریافت هر چه سلول ها از مرکز سازه دورتر باشند، عملکرد بهتری خواهند داشت.

(۲) حالت اوّل با داشتن پنج درصد سلول گیل بیشترین کاهش خم ش را در ابتدا و وسط مدل داشته است.

(۳) با توجه به درجه اهمیت هر یک از پارامتر ها خیز و لنگر خم شی می توان هر یک از حالت های اوّل یا سوم را ملاک طراحی قرار داد. هم چنین می توان با ترکیب آنها الگویی پیشنهاد کرد که به طور هم زمان خم ش و جابه جایی در سازه را کاهش دهد.

(۴) تأثیر گذاری سلول های گیل در بارگذاری های زیاد بیشتر بوده است.

از آزمایش دوم (آزمایش تحت بار دینامیکی) که با اعمال پنج موج مختلف با دوره تناوب های  $0.80, 0.91, 1.01$  و  $1.10$  ثانیه صورت گرفت؛ نتایج زیر حاصل شد:

(۱) در حالت چهارم با داشتن بیشترین سطح سلول گیل، لنگر خم شی کمتری در مدل بر اثر برخورد امواج به وجود آمده است.

(۲) در مورد پارامتر جابه جایی؛ هر چند در بعضی حالات مدل دارای سلول گیل عملکرد بهتری داشته است ولی به طور یک روند کلی نمی توان گفت که کدام حالت از مدل های دارای سلول های گیل تحت

تاكنون تحقیقات صورت گرفته بیشتر در زمینه بارگذاری ثقلی وارد بر سازه های دارای سلول گیل بوده است. مطالعات کمی در رابطه عملکرد این روش در برابر امواج انجام شده است. با این وجود در سال ۲۰۱۳ گا<sup>۱</sup> و همکاران سازه ای با سلول های گیل واقع شده در یک طرف آن با روش عددی مدل سازی نموده اند که خاطرنشان می کند نسبت طول موج به طول سازه تحلیل شده آنها مشابه نسبت طول موج تولید شده به طول مدل در آزمایشگاه نمی باشد. باید اظهار کرد که گا<sup>۱</sup> و همکاران نیز در این تحقیق خود به دنبال بهبود عملکرد این روش با استفاده از اتصالات انعطاف پذیر هم زمان با سلول های گیل بوده اند [16].

### جمع بندی

سازه شناور بسیار بزرگ در صورتی که تحت بارهای استاتیکی به صورت غیر یکنواخت قرار گیرند، نقاط زیر بار از سایر قسمت ها خیز بیشتری خواهند داشت. برای رفع این مشکل سلول های گیل پیشنهاد شده است. نفوذ آب به داخل سلول ها باعث می شود نیروی شناوری زیر آنها حذف شود و اختلاف خیز بین محل های بارگذاری شده و فاقد بار کاهش یابد. برای بررسی تحریبی عملکرد و اثرات این راهکار مدل آزمایشگاهی این سلول ها ساخته شد. مدل از جنس آلومینیوم با ضخامت  $1/25$  میلی متر، طول  $2$  متر و عرض  $0.5$  متر انتخاب شد. برای تأمین شناوری صفحات پلی اتیلن به ضخامت  $7/5$  سانتی متر زیر ورق آلمینیومی چسبانده شد. آزمایش ها برای مدل بدون سلول گیل و چهار حالت مختلف چینش این سلول ها انجام گرفت. دو سر مدل به طول  $4$  سانتی متر به سلول های به ابعاد  $6 \times 6$  سانتی متر تقسیم شدند.

دو آزمایش مجزا، یکی برای شبیه سازی شرایط محیط دریاهای آرام و خلیج ها و دیگری برای مدل سازی محیط های دور از ساحل که در آن امواج، نیروهای غالب هستند؛ انجام پذیرفت. در فرآیند

سلول گیل برای کاهش تنش در سازه موثر خواهد بود.

۴) هم‌چنین می‌توان برای کاهش رفتار هیدرولاستیک در برابر امواج راهکار سلول‌های گیل با روش‌های دیگر مانند اتصالات لولایی، ترکیب شوند.

اثر موج عملکرد بهتری در کاهش جابه‌جایی داشته است.

۳) دو مشاهده فوق؛ گویای این مطلب مهم است که در صورتی جابه‌جایی یک سازه با توجه به شرایط بهره‌برداری آن در حد قابل قبول باشند، استفاده از

## مراجع

1. Watanabe, E., Wang, C.M., Utsunomiya, T. and Moan, T., "Very large floating structures: applications, analysis and design", *Core report of centre for offshore research and engineering national university of Singapore*, No. 2, pp. 1-30, (2004).
2. Wang, C.M., Watanabe, E. and Utsunomiya, T., "Very Large Floating Structure", *Taylor & Francis*, New York, First Edition, pp. 141-164, (2008).
3. Zilman, G. and Miloh, T., "Hydroelastic buoyant circular plate in shallow water: a closed form solution", *Applied Ocean Research*, Vol. 22, pp. 191-198, (2000).
4. Hamamoto, T. and Fujita, K., "Wet-mode superposition for evaluating the hydroelastic response of floating structures with arbitrary shape", *Proceding of the 12th International Conferance Offshore and Polar Engineering*, pp 290–297, (2002).
5. Andrianov, A.I. and Hermans, A.J., "Hydroelastic behavior of a floating ring-shaped plate", *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 54, pp. 31-48, (2006).
6. Watanabe, E., Utsunomiya, T., Kuramoto, M., Ohta, H., Torii, T. and Hayashi, N., "Wave response analysis of VLFS with an attached submerged plate", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 13, pp. 190-197, (2003).
7. رضایت، ز.، "مطالعه آزمایشگاهی رفتار سازه شناور بسیار بزرگ با اتصال صفحه ضد موج"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفت، ۱۳۹۲.
8. Gao, R.P., Tay, Z.Y., Wang, C.M., Koh, C.G., "Hydroelastic response of very large floating structure with a flexible line connection", *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp. 1957–1966, (2011).
9. Fu, S.X., Moan, T., Chen, X.J., Cui, W.C., "Hydroelastic analysis of flexible floating interconnected structures", *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 1516–1531, (2007).
10. Wang, C.M, Wu, T., Choo, Y., Ang, K., Toh, A., Mao, W. and Hee, A., "Minimizing differential deflection in a pontoon-type, very large floating structures via gill cells", *Marine structures*, Vol. 19, pp. 70-82, (2006).
11. Pham, D.C., "Innovation solution for minimizing differential deflection and heaving motion in very large floating structures", Ph.D Thesis, National University of Singapore, (2009).
12. Zijian, X.Y., "Very large floating container terminal and optimal layout of gill cells", M. Sc Thesis,

- National University of Singapore, (2007).
13. Wang, C.M., Pham, D.C. and Ang, K., "Effectiveness and optimal design of gill cells in minimizing differential deflection in circular VLFS", *Engineering structures*, Vol. 29, pp. 1845-1853, (2007).
  14. Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. and Woinowsky, S., "Theory of Plates and Shells", Second Edition, McGraw-hill, New York, pp. 378-393, (1959).
  15. Pham, D.C. and Wang, C.M., "Optimal layout of gill cells for very large floating structures", *Structural Engineering*, Vol. 136, pp. 907-916, (2010).
  16. Gao, R., Wang, C.M. and Koh, C., "Reducing hydroelastic response of pontoon-type very large floating structures using flexible connector and gill cells", *Engineering Structures*, Vol. 52, pp. 372-383, (2013).
  17. Suzuki, H. and Yoshida, K., "Design flow and strategy for safety of very large floating structure", Proceedings of the International Workshop on Very Large Floating Structures, pp. 21-28, (1996).
  18. Chen, X., Jensen, J.J., Cui, W. and Fu, S., "Hydroelasticity of a floating plate in multidirectional waves", *Ocean Engineering*, Vol. 30, pp. 1997-2017, (2003).
  19. Yago, K. and Endo, H., "On the hydroelastic response of box-shape floating structure with shallow draft", *The Society of Naval Architect of Japan*, Vol. 180, pp. 341-352, (1996).
  ٢٠. عبدالعلی، ع. و کلاهدوزان، م.، "مقایسه روش‌های تحلیلی تجزیه امواج بهمنظر محاسبه ضریب انعکاس موج"، نشریه مهندسی دریا، سال هفتم، شماره ١٤، (١٣٩٠).
  21. Mansard, E.P.D and Funke, E.R., "The Measurement of incident and reflected spectra using a least squares method", *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference*, pp. 154-172, (1980).
  22. Goda, Y. and Ippen, A. T., "Theoretical and experimental investigations of wave energy dissipators composed of wire mesh screens", Hydrodynamics Laboratory Report, Deptement of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, No. 60, 58 pages. (1963).
  ٢٣. حسین‌زاده، ه.، وفایی، ف. و آق‌تومان، پ.، "بررسی آزمایشگاهی ارتفاع بھینه تیغه بر روی میزان عبور امواج از موج‌شکن‌های شناور پانتوئی تیغه‌ای"، نشریه مهندسی دریا، سال ششم، شماره ١١، (١٣٨٩).
  24. Boccotti, P., "Wave Mechanics for Ocean Engineering", Elsevier Science B.V, Amsterdam, First Edition, pp. 10-13, (2000).



## \* بهبود روش انتقال پایدار به منظور کنترل هم‌گرایی روش اندازه‌گیری عملکرد سازه‌ها

بهروز کشتگار<sup>(۱)</sup>

**چکیده** روش برای ارزیابی قیلهای احتمالاتی در مسائل طراحی بهینه براساس قابلیت اعتماد سازه‌ها می‌باشد. روش مقدار متوسط ارتقا یافته (AMV) به صورت ساده و کارایی برای روش PMA مناسب است. روش تکرار AMV ممکن است در بعضی از قیلهای احتمالاتی غیرخطی دچار واگرایی به صورت نوسانی یا اختشاش گردد. در مقاله حاضر، یک روش انتقال پایدار برای هم‌گرایی مناسب توابع عملکرد غیرخطی ارائه شده است. این روش براساس تعریف یک طول گام مناسب بین صفر و یک که به مسادگی برمنای نتایج جدید روش AMV و نتایج تکرار قبلی روش بهبودیافته انتقال پایدار قابل محاسبه است، پایه‌گذاری شده است. به منظور هم‌گرایی مناسب روش بهبودیافته انتقال پایدار، شرط شیب در تکرارهای متوالی لاحظ شده است. نتایج عددی چندین تابع غیرخطی عملکرد مسائل بهینه برمنای قابلیت اعتماد نشان می‌دهد که روش بهبودیافته انتقال پایدار موجب کنترل نایپایداری حل روش PMA می‌شود و هم‌چنین، در مسائل سازه‌ای با عملکرد غیرخطی، نسبت به روش AMV توانمندتر و نسبت به روش انتقال پایدار، کارآتر است.

**واژه‌های کلیدی** روش اندازه‌گیری عملکرد، مقدار متوسط پیشرفت، طراحی بهینه براساس قابلیت اعتماد، روش بهبودیافته انتقال پایدار.

## Improved Stability Transformation Method to Control Convergence of Structural Performance Measure Approach

B. Keshtegar

**Abstract** Performance measure approach (PMA) is a method for evaluating the probabilistic constraints in reliability-based design optimization of structures. The advanced mean-value (AMV) method is suitable for PMA, simply and efficiently. The iterative AMV scheme could be yielded to unstable solutions such as periodic-oscillation and chaos for highly nonlinear performance functions. In the present paper, an improved stability transformation method (ISTM) is proposed for appropriate convergence of nonlinear performance functions. This iterative approach has been established based on a suitable stepsize between one and zero that is simply calculated on the basis of the new results of AMV scheme and the previous results of the improved stability transformation iterative formula. The descent condition was applied in the iterative sequences of the ISTM to achieve stable convergence. The results of several nonlinear performance functions in reliability-based design optimization demonstrate that the ISTM is laded to control instability solutions of PMA and also, it is more robust than AMV and more efficient than stability transformation method in structural problems with nonlinear performance functions.

**Key Words** Performance Measure Approach, Advanced Mean-Value, Reliability-Based Design Optimization, Improved Stability Transformation Method.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۶/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۸/۴ می‌باشد.

bkeshtegar@uoz.ac.ir

(۱) استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زابل.

(U) با استفاده از شاخص قابلیت اعتماد هدف (target reliability index)  $\beta_t$  ارزیابی می‌گردد [1,5]

$$\text{find } U_t, \min g(U) \quad (2)$$

Subjected to  $\|U\| = \beta_t$

رویه تحلیل اندازه‌گیری عملکرد می‌تواند در مسائل معکوس قابلیت اعتماد نیز مورد استفاده قرار گیرد [7]. هم‌چنان نشان داده شده است که رویه PMA نتایجی مشابه به رویه RIA در قیدهای احتمالاتی ارائه داده است اما توانمندی آن برای محاسبه نقطه هدف عملکرد کمینه بیشتر از رویه RIA است [6] و پایداری عددی بالایی در ارزیابی احتمالاتی دارد [1,6,8].

رویه تکرار مقدار متوسط ارتقا یافته (AMV) (Advanced mean-value) به سادگی و با کارایی بالای در تحلیل PMV مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات عددی نشان داده است که رویه AMV در روش PMV، برای ارزیابی قیدهای احتمالاتی غیرخطی مسائل RBDO، ناپایداری تکرار دارد و به طور ناکارآمد و غیر مؤثری می‌تواند به صورت اغتشاش [5] و نوسانی تناوب [5,9] هم‌گرا گردد [5,6]. چندین الگوریتم بهبود یافته برای ارتقای هم‌گرایی رویه AMV توسط مراجع پیشنهاد شده است [12]. اخیراً، الگوریتم ترکیبی مقدار متوسط (Hybrid mean value) (HMV) برای بهبود کارایی و پایداری عددی الگوریتم PMV معرفی گردیده است [9,10]. هم‌چنان، روش مقدار متواتر مزدوج (Conjugate mean value method) (CMV) [10] برای جستجوی نقطه حداقل عملکرد توسعه داده شده که کاربردهایی از آن توسط مراجع [11,12] ارائه شده است. اخیراً، با استفاده از نگاشت غیرخطی انتقال پایدار  $Y_i$  و  $Y_j$  ناپایداری عددی رویه AMV را براساس کنترل اغتشاشات بهبود بخشیده‌اند [5]. آنها براساس انتخاب یک طول گام بسیار کوچک قیدهای احتمالاتی غیرخطی مسائل RBDO را ارزیابی نمودند و نشان دادند که رویه انتقال پایدار STM (Stability Transformation Method) علاوه بر هم‌گرایی و پایداری عددی حل، توانمندی رویه

## مقدمه

به طور معمول روش‌های طراحی بهینه برای سیستم‌های مهندسی براساس مدل‌های معین صورت می‌پذیرد. عدم اطمینان‌های مسائل فیزیکی از قبیل خطاهای ساخت و اجرا، خواص مصالح و بارهای بهره‌برداری را نمی‌توان در طراحی سازه‌ها نادیده گرفت. در مسائل مهندسی، عدم قطعیت در پارامترهای اعضای سازه‌ای موجب می‌شود تا طراح با یک مسئله تصادفی مواجه گردد. واضح است طراحی برمنای قابلیت اعتماد (RBDO) (optimization) (RBDO) Reliability-based design یک ابزار قابل قبول برای طراحی با عملکرد مطلوب فراهم می‌سازد و معرفی طرح عملکرد سازه‌ها، می‌تواند یک زمینه طراحی بهینه مناسب و ایمن را ایفا نماید [1-3].

مدل‌های طراحی RBDO علاوه بر تأمین مسائل اقتصادی یک سازه موجب طرح مطمئن با عملکرد مناسب نیز می‌گردد. به طوری که در یک طرح بهینه سازه، اطمینان از عملکرد بالای آن نیز حاصل می‌گردد.

در مسائل PBDO حداقل‌سازی هزینه برمنای قیدهای با توابع عملکرد احتمالاتی می‌باشد. تحلیل قابلیت اعتماد قیدهای احتمالاتی برمنای دو رویه معمول؛ ۱) رویه تحلیل شاخص قابلیت اعتماد Performance measure (RIA) (Reliability index approach) اندازه‌گیری عملکرد (approach)، ۲) رویه RIA، براساس تحلیل قابلیت اعتماد قیدهای احتمالاتی Most probable با هدف جستجوی نقطه حداقل محتمل (point) (U\*) تابع شرایط حدی (قید احتمالاتی) (g(U))

در فضای نرم‌الاستاندارد پایه‌گذاری شده است [6,8].

$$\text{find } U^*, \min \beta = \|U\| \quad (1)$$

Subjected to  $g(U) = 0$

که در آن  $\beta$  شاخص قابلیت اعتماد است.

در حالی که رویه PMA قیدهای احتمالاتی مسئله را براساس جستجوی نقطه حداقل عملکرد Minimum (point performance target) (U\*) روی سطح خرابی

مسئله بهینه‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل ریاضی طرح بهینه بر مبنای قابلیت اعتماد را می‌توان به طور کلی مطابق با رابطه زیر بیان نمود [5,6,8]:

$$\begin{aligned} \text{find } d, \quad \min f(d) \\ \text{s.t. } P_f(g_i(d, x) \leq 0) \leq P_{i,ft} \quad (i=1,2,\dots,p) \\ d^L \leq d \leq d^U \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $d$  بردار متغیرهای طراحی مسئله است که به صورت یک پارامتر معین یا یک متغیر تصادفی که با استفاده از تابع توزیع احتمال با خواص آماری مانند میانگین، انحراف معیار قابل بیان است،  $x$  بردار متغیری تصادفی مسئله است که عدم قطعیت‌های مسئله بهینه به کمک آن براساس توابع شرایط حدی یا عملکرد قابل بیان هستند.  $P_f(g(d, x) \leq 0) \leq P_{i,ft}$  می‌باشد. احتمال خرابی حداکثر (احتمال خرابی هدف) می‌باشد که می‌تواند براساس تابع عملکرد به صورت زیر محاسبه گردد [13,14]:

$$P_f = P[g(d, x) \leq 0] = \int_{g(d,x) \leq 0} f_X(x) dX \quad (4)$$

که در آن  $(x)$  تابع چگالی توأم متغیرهای تصادفی پایه  $X$  می‌باشد. برای محاسبه انتگرال فوق می‌توان از روش‌های شبیه‌سازی از جمله مونت کارلو استفاده نمود روش مونت کارلو، برآورده بسیار مناسبی از انتگرال معادله (4) با توجه به شبیه‌سازی کافی ارائه دهد اما، به علت شبیه‌سازی زیاد در احتمال خرابی پایین یا مسائل دینامیکی و اجزای محدود بسیار وقت‌گیر می‌باشد [13,14] از این‌رو، استفاده از First-روش‌های اولین مرتبه تحلیل قابلیت اعتماد (First-order reliability method) در محاسبه احتمال خرابی اجتناب‌ناپذیر است. این روش‌ها بر مبنای یک رابطه تکرار با هدف تعیین شاخص قابلیت اعتماد ( $\beta$ ) برآورده بسیار مناسبی از احتمال خرابی ارائه می‌دهند [15,16].

$$P_f \approx 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\|U^*\|) \quad (5)$$

تکرار PMV را نیز افزایش داده است.

در حقیقت روش‌های HMV و ارتقا یافته HMV بر پایداری عددی تکرارهای رویه PMA تمرکز داشته‌اند که نیاز به اطلاعات زیادی از قبل تغیر یا تحبد تابع عملکرد و چندین بردار نرمال از تکرارهای متوالی دارد که موجب پیچیدگی الگوریتم می‌شود. به طوری که، ممکن است در مسائل مقعر و اگرا گردد یا هم گرایی کنندی داشته باشد [5,10]. از طرفی، رویه انتقال پایدار برای افزایش توانمندی رویه PMA نیاز به انتخاب طول گام پایین دارد. لذا، موجب افزایش تعداد تکرار می‌شود و در مسائل با درجهٔ غیرخطی متوسط نسبت به الگوریتم‌های CMV و HMV از کارایی کمتری برخوردار است. اما در مسائل با درجهٔ غیرخطی بالا، هم‌گرایی مناسبی دارد و توانمندی آن نسبت به رویه تکرار PMA بیشتر است. در این مقاله روش انتقال پایدار با استفاده از یک طول گام دینامیکی پیشنهادی بهبود بخشیده شده و با نام روش بهبودیافته انتقال پایدار معرفی شده است. این طول گام دینامیکی در رویه انتقال پایدار برای ارزیابی تابع عملکرد قیدهای احتمالاتی مسائل RBDO به کار گرفته شده است. برای تضمین هم‌گرایی روش بهبودیافته انتقال پایدار، شرایط شبیه در محاسبه طول گام دینامیکی لاحظ شده است. نتایج عددی حاکی از آن است که الگوریتم بهبودیافته انتقال پایدار بر مبنای طول گام دینامیکی نسبت به روش انتقال پایدار از کارایی بیشتری و نسبت به رویه تکرار AMV از توانمندی بیشتری برخودار است.

## رویه اندازه‌گیری عملکرد قیدهای احتمالاتی RBDO مسائل

در ده سال اخیر، تمايل تحلیل و طراحی بهینه بر مبنای قیدهای احتمالاتی با در نظر گرفتن متغیرهای تصادفی هم‌چون بار، هندسه، شرایط مرزی، خواص مصالح و هم‌چنین خطای مدل‌سازی، افزایش یافته است [10]. از این‌رو، تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها در طرح مطمئن یک

گرادیان تابع عملکرد در نقطه جدید ممکن است موازی با بردار یکه نقاط قبلی گردد. لذا، تکرار روش AMV ممکن است دچار واگرایی به صورت نوسانی تنابوی و اغتشاش گردد [5].

### رویه انتقال پایدار برای تعیین عملکرد روش

#### PMA

استفاده از تئوری دینامیک اغتشاشات برای تحلیل پاسخ عملکرد قیدهای احتمالاتی مسائل RBDO براساس رویه انتقال پایدار روش AMV توسط Yong و Yi معرفی شد که رابطه تکرار AMV برای تعیین نقطه MPTP به صورت زیر تحت رویه انتقال پایدار بهبود بخشیده شده است [5]:

$$U_{k+1} = U_k + \lambda C[f(u_k) - U_k] \quad (9)$$

که در آن  $C$  ماتریس غیرعمدی است که یک ماتریس ثابت و معین است.  $C$  به صورت یک ماتریس متعادم تعریف گردیده است که در هر سطر و ستون این ماتریس فقط عدد ۱ یا  $-1$  دارد و بقیه درایه‌های ماتریس صفر است [5,17].  $\lambda$  طول گام است که عددی بین صفر و یک است و عمدتاً مقدار آن خیلی کمتر از یک انتخاب می‌گردد. یک نگاشت گستته برای سیستم دینامیکی تحلیل PMA می‌باشد [5,15,17] که می‌تواند به صورت نگاشت زیر گستته‌سازی شود:

$$f(u_k) = U_{k+1} = -\beta_t \frac{\nabla_u g(d, U_k)}{\|\nabla_u g(d, U_k)\|} \quad (10)$$

که در آن  $U_{k+1}$  نقطه گستته در گام  $k+1$  و  $f(u_k)$  مقدار تابع براساس رویه AMV می‌باشد. اگر مقدار  $\lambda$  برابر با ۱ و  $C=1$  انتخاب گردد، رویه تکراری رابطه (۹) بدون کنترل و مطابق با رویه AMV صورت می‌پذیرد. انتخاب مناسب ضریب  $\lambda$  وابسته به مقدار شعاع طیفی ماتریس هسیان تابع عملکرد در نقطه طراحی است. اگر شعاع طیفی ماتریس هسیان (بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس هسیان) بزرگ باشد، برای دست‌یابی به پاسخ پایدار، مقدار ضریب  $\lambda$  کوچک‌تری بایستی اتخاذ گردد. براساس فرمولاسیون

که در آن  $\Phi$  تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است. در مسائل RBDO، قیدهای احتمالاتی را  $(i=1,2,\dots,p)$  می‌توان با استفاده از رابطه (۵) و شاخص قابلیت اعتماد هدف  $(\beta_t \approx -\Phi^{-1}(P_{ft}))$  با تلاش برای تعیین نقطه حداقل عملکرد  $(U_t)$  به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$g_i(d, x) = F_{g_i}^{-1}[\Phi(-\beta_{i,t})] \geq 0 \quad (i=1,2,\dots,p) \quad (6)$$

که در آن  $\beta_{i,t}$  مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف برای قید احتمالاتی  $i$  ام مسئله RBDO می‌باشد.  $F_{g_i}^{-1}$  معکوس تابع توزیع تجمعی احتمال برای قید احتمالاتی  $i$  با تابع عملکرد  $(d, x)$  است. تلاش اساسی در رویه PMA ارزیابی عملکرد قیدهای احتمالاتی توابع عملکرد مسئله RBDO است. با استفاده از انتقال متغیرهای تصادفی  $X$  به صورت نرمال استاندارد و غیروابسته  $U$  براساس انتقال به فضای نرمال استاندارد به صورت نگاشت  $U = T(X)$  [14,16]، عملکرد مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر ارزیابی نمود [5,9,10]:

$$\text{given } d \text{ and find } U_t, \min g(d, U) \quad (7)$$

Subjected to  $\|U\| = \beta_t$

مسئله فوق به دنبال پیدا کردن نقطه‌ای روی تابع عملکرد  $(g(d, U))$  است که فاصله آن در فضای نرمال استاندارد برابر با  $\beta_t$  گردد. به طوری که، مقدار تابع عملکرد در این نقطه هدف حداقل عملکرد  $(U_t)$  کمینه گردد. روش تکرار مقدار متوسط ارتقا یافته (AMV) می‌تواند به طور مناسب و ساده‌ای برای تعیین نقطه هدف حداقل عملکرد (Minimum performance point)، مطابق با رابطه تکراری زیر مورد استفاده قرار گیرد [7-12].

$$U_{k+1} = -\beta_t \frac{\nabla_u g(d, U_k)}{\|\nabla_u g(d, U_k)\|} \quad (8)$$

که در آن  $\nabla_u g(d, U_k)$  بردار گرادیان تابع عملکرد نسبت به بردار متغیرهای تصادفی  $U$  مسئله RBDO در نقطه  $U_k$  است. در رابطه تکراری رویه AMV (رابطه ۸) برای مسائل با توابع عملکرد غیرخطی، مقدار بردار

در هر تکرار تنظیم شده است به‌طوری‌که، در تکرارهای اولیه به‌علت اختلاف زیاد بینتابع عملکرد  $(g(d, U_{k+1}) - g(d, U_k))$  بیشترین مقدار طول گام محاسبه می‌گردد. لذا، سرعت هم‌گرایی الگوریتم فوق افزایش می‌یابد. هم‌چنین در تکرارهای نهایی این الگوریتم اختلاف بینتابع عملکرد  $(g(d, U_{k+1}) - g(d, U_k))$  بسیار ناچیز می‌باشد لذا، طول گام کوچکی محاسبه گردیده که این امر در مسائل غیرخطی ممکن است موجب پایداری حل رویه بهبودیافته انتقال پایدار گردد. از طرفی طول گام دینامیکی کمتر از واحد، منجر می‌شود تا احتمال موازی شدن بردار امتداد جستجوی جدید با بردار یکه قبلی کاهش یابد لذا این رویه دچار ناپایداری حل به‌صورت نوسانی نمی‌گردد. در تکرارهای متوالی این الگوریتم، مقدار طول گام به‌علت کاهش مقدار بردار امتداد جستجو  $D_k$  ممکن است عدد بزرگی محاسبه گردد لذا، تکرار الگوریتم بدون کنترل صورت می‌پذیرد. برای کنترل طول گام الگوریتم بهبودیافته انتقال پایدار مقدار طول گام و دست‌یابی به هم‌گرایی بدون اغتشاش، احتمالاتی مسائل  $RBDO$  به‌صورت زیر می‌باشد [18,19]:

$$\|U_{k+1} - U_k\|^2 \leq \eta \|U_k - U_{k-1}\|^2 \quad \text{for } k \geq 1 \quad (15)$$

که در آن  $\eta \leq 0.5$  می‌باشد. در صورت برقراری نامساوی فوق رابطه تکرار (12) پایداری مناسب را دارد و بردار طراحی جدید مطابق با رابطه (12) قابل محاسبه است. اما، در صورت عدم برقراری شرط فوق یعنی  $\|U_{k+1} - U_k\|^2 > \eta \|U_k - U_{k-1}\|^2$  طول گام رابطه (13) به‌صورت زیر تصحیح می‌گردد:

$$\lambda_k = \eta \lambda_k \quad (16)$$

باتوجه به رابطه فوق، طول گام حاصل کمتر از مقدار قبلی می‌باشد. با جایگزینی مقدار طول گام (16) در رابطه تکرار بهبودیافته انتقال پایدار (12) شرط شیب مطابق با رابطه (15) دوباره چک می‌گردد. مشخص است که در تکرار رویه بهبودیافته انتقال پایدار (روابط

انتقال پایدار رابطه (9)، شعاع طیفی ماتریس هسیان مسائل عملکرد پیچیده و غیرخطی برای هم‌گرایی پایدار می‌تواند باستفاده از ضریب  $\lambda$  و ماتریس  $C$  به‌ نحو مناسب انتخاب گردد [5,15].

$$\bar{H} = I + \lambda C(H - I) \quad (11)$$

که در آن  $H = \frac{\partial^2 g}{\partial u_i \partial u_j}$  ماتریس هسیان تابع عملکرد است. این روش اگرچه هم‌گرایی یک مسئله بهینه را با قیدهای احتمالاتی تضمین می‌کند؛ اما هم‌گرایی رویه انتقال، پایدار وابسته به انتخاب ماتریس  $C$  و طول گام  $\lambda$  است که عموماً، برای تأمین پایداری لازم مقدار ضریب  $\lambda$  بسیار ناچیز انتخاب می‌گردد. این امر تعداد تکرار زیادی برای هم‌گرایی و تحلیل عملکرد قیود احتمالاتی را منجر می‌گردد. لذا، زمان تحلیل تابع عملکرد در این نوع مسائل افزایش می‌یابد. اگرچه این الگوریتم نسبت به رویه تکرار AMV توانمندتر است اما در مسائل با درجهٔ غیرخطی معتل و مقعر ممکن است کارایی بسیار پایینی داشته باشد.

### روش بهبودیافته انتقال پایدار برای تحلیل اولین مرتبه PMA

به‌منظور افزایش کارایی روش انتقال پایدار رابطه تکرار معادله (9) به‌صورت زیر بهبود بخشیده شده است.

$$U_{k+1} = U_k + \lambda_k C[f(u_k) - U_k] \quad (12)$$

که در آن  $\lambda_k$  یک طول گام دینامیکی است که براساس اطلاعات مربوط به تکرار AMV به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$\lambda_k = \min\left\{1, \left| \frac{1}{\delta |D_k|^2} \left[ 1 - \frac{g(d, U_{k+1})}{g(d, U_k)} \right] \right| \right\} \quad (13)$$

که در آن  $\delta$  یک ضریب مثبت  $< 1$  و  $g(d, U_{k+1})$  مقدار تابع عملکرد جدید رویه PMV و  $g(d, U_k)$  مقدار تابع عملکرد قبلی رویه بهبودیافته انتقال پایدار است.  $D_k$  بردار امتداد جستجو می‌باشد که به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

$$D_k = f(u_k) - U_k \quad (14)$$

مطابق با روابط فوق، طول گام به‌صورت دینامیکی

مناسب)، پایداری (هم‌گرایی صحیح) و کارایی (تعداد تکرار) روش‌های مورد بررسی تحلیل عملکرد مقایسه شده است. پارامتر طول گام برای روش انتقال پایدار برابر با  $\lambda = 0.1$  و پارامترهای الگوریتم بهبودیافته انتقال پایدار به صورت  $\delta = 0.5$  و  $\eta = 0.95$  در نظر گرفته شده است.

**مثال ۱: تابع عملکرد غیرخطی.** یک تابع عملکرد با درجه غیرخطی بالا، مطابق با رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود [5]:

$$g_1 = x_1^3 + x_2^3 - 18 \quad (17)$$

که در آن  $x_1 \sim N(10, 5)$ ،  $x_2 \sim N(9.9, 5)$  و  $\beta_t = 3.0$  که  $N(\mu, \sigma)$  تابع توزیع احتمال نرمال با میانگین  $\mu$  و انحراف معیار  $\sigma$  است. این تابع توسط مرجع [5] تحلیل شده است که نتایج مقدار تابع عملکرد آن برابر با  $-31/0.6004$  و بردار عملکرد هدف آن برابر با  $X_t = [-2/89011, 2/22937]$  حاصل گردیده است. این مثال توسط الگوریتم بهبودیافته انتقال پایدار تحلیل عملکرد گردیده است که مقدار نتایج هم‌گرا شده بردار هدف و تابع عملکرد به ترتیب بعد از ۴۲ تکرار برابر با  $X_t = [-2/89058, 2/22974]$  و  $-31/0.66473$  نتیجه شده است. در شکل (۱) تاریخچه هم‌گرایی مقدار تابع عملکرد و در شکل (۲) تاریخچه هم‌گرایی نقطه حداقل عملکرد برای مثال (۱) نشان داده شده است. مشخص است که رویه AMV هم‌گرایی مغلوشی داشته و رویه انتقال پایدار (STM) با ۱۲۶ تکرار هم‌گرا گردیده است. لذا الگوریتم ارائه شده بهبودیافته انتقال پایدار (ISTM) علاوه بر تضمین پایداری با تعداد تکرار بسیار کمتری نسبت به رویه STM هم‌گرا گردیده است. روش بهبودیافته انتقال پایدار در تکرارهای ابتدایی طول گام بالایی نسبت به روش انتقال پایدار داشته، اما در تکرارهای نهایی مقدار اندازه امتداد جستجوی ناچیزی محاسبه گردیده است.

(۱۶-۱۲) برای برقراری شرایط شبیه نیازی به محاسبه بردار گرادیان می‌باشد. روش بهبودیافته انتقال پایدار مطابق با گام‌های زیر می‌تواند در یک برنامه کامپیوتری لحاظ گردد.

(۱) تعریف تابع عملکرد قید احتمالاتی مسئله RBDO و خواص آماری متغیرهای تصادفی (X) و نیز تعیین متغیرهای طراحی مسئله (d).

(۲) مقدار اولیه بردار طراحی متغیرهای تصادفی مسئله  $X_0 = \mu_x$ ،  $\delta$  و  $\eta$ .

(۳) انتقال متغیرهای تصادفی در فضای نرمال استاندارد  $U = T(X)$ .

(۴) محاسبه بردار گرادیان تابع عملکرد  $\nabla_u g(d, u_k)$ .

(۵) محاسبه مقدار  $f(u_k)$  بر مبنای رابطه (۱۰).

(۶) محاسبه طول گام با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴).

(۷) محاسبه مقدار جدید بردار طراحی متغیرهای تصادفی تابع عملکرد براساس رابطه (۱۲).

(۸) برای  $k \geq 1$  کترل شرایط شبیه به صورت

$$\|U_{k+1} - U_k\|^2 \leq \eta \|U_k - U_{k-1}\|^2$$

در صورت برقراری ادامه تکرار مطابق با گام ۹.

در عدم برقراری محاسبه طول گام بر مبنای  $\eta \lambda_k = \lambda_k$  و بازگشت به مرحله ۷.

(۹) محاسبه شاخص قابلیت اعتماد  $\beta_{k+1} = \|U_{k+1}\|$ .

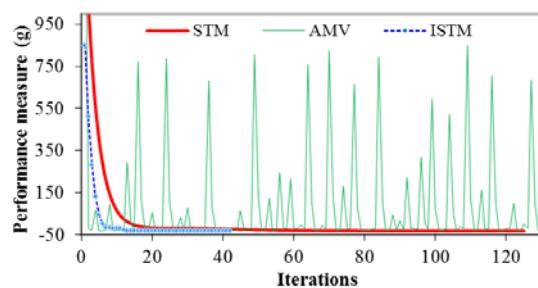
(۱۰) کترل معیار هم‌گرایی رویه تکرار به صورت  $\|D_k\| \leq 10^{-5}$  در صورت برقراری توقف و در غیر این صورت بازگشت به گام ۴.

### بررسی مثال‌های عددی و سازه‌ای

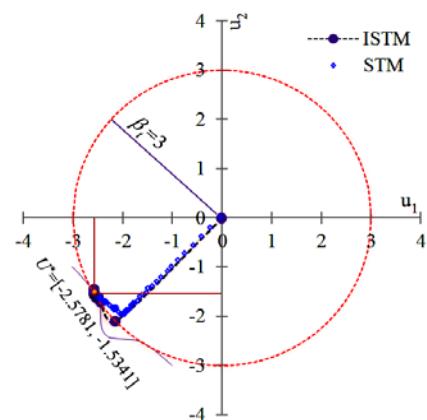
از پنج تابع عملکرد ریاضی و سازه‌ای برای ارزیابی هم‌گرایی الگوریتم بهبودیافته انتقال پایدار ارائه شده، استفاده شده است. برای تحلیل عملکرد این توابع، برنامه‌ای به زبان MATLAB تدوین شده است. نتایج تحلیل سه روش تکرار شامل: رویه AMV، روش انتقال پایدار و روش بهبودیافته انتقال پایدار برای این توابع مقایسه شده است. معیارهایی مانند توانمندی (هم‌گرایی

$$\begin{aligned} g_2 = & -0.75 + 0.489x_1x_4 + 0.843x_2x_3 - 0.0432x_5x_6 \\ & + 0.0556x_5x_7 + 0.000786x_7^2 \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن  $x_1 - x_4 \sim N(1, 0.05)$  ،  $\beta_i = 3.0$  و  $x_5 \sim N(0, 10)$  ،  $x_6, x_7 \sim N(0.3, 0.006)$  است. این مثال توسط مرجع [5] تحلیل عملکرد گردیده است که مقدار هم‌گرا شده بردار طراحی هدف  $X = [0/97643, 0/96006, 0/97643, 0/97643, 0/97643, 0/97643, 0/97643]$  و مقدار تابع عملکرد برابر با  $g_2 = 0/07536$  حاصل گردیده است. این مثال به کمک روش STM تحلیل عملکرد شده است که مقدار بردار هدف و مقدار تابع عملکرد هم‌گرا شده به ترتیب برابر با  $[0/97645, 0/96008, 0/97645, 0/96008, 0/97645, 0/96008, 0/97645]$  بعد از ۱۲ تکرار نتیجه شده است. در شکل ۲ تاریخچه هم‌گرایی تابع عملکرد این تابع نشان داده شده است. روش بهبود یافته انتقال پایدار با تعداد بسیار کمتری (در حدود ۰/۱ برابر) نسبت به روش انتقال پایدار هم‌گرا گردیده است و روش AMV هم‌گرایی به صورت نوسانی به دو نقطه عملکرد  $\{0/56651, 1/39554\}$  نشان داده است.

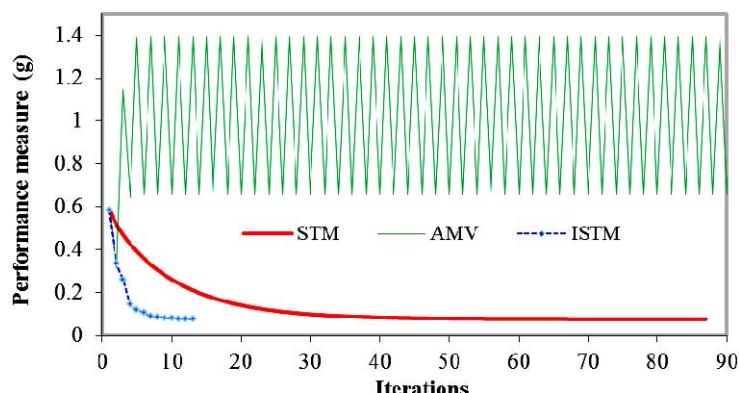


شکل ۱ مقایسه هم‌گرایی روش‌های PMA برای مثال ۱

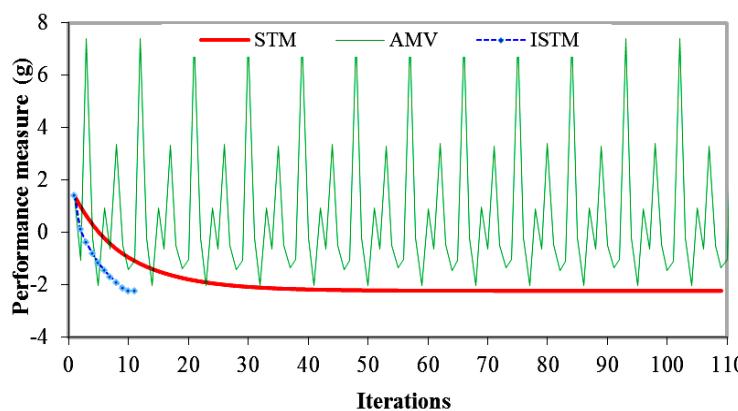


شکل ۲ تاریخچه هم‌گرایی نقطه حداقل عملکرد برای مثال ۱

مثال ۲: تابع عملکرد غیرخطی با تعداد متغیر زیاد. یک تابع عملکرد غیرخطی با هفت متغیر تصادفی نرمال مطابق با رابطه زیر درنظر گرفته می‌شود [11]:



شکل ۳ مقایسه هم‌گرایی روش‌های PMA برای مثال ۲

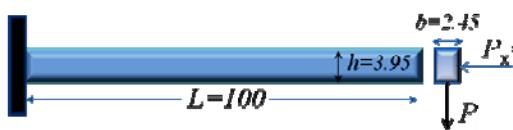


شکل ۴ مقایسه همگرایی روش‌های PMA برای مثال ۳

بارهای عمودی در دو جهت متعامد مطابق با شکل (۵) برای این مثال درنظر گرفته شده است. براساس طراحی بهینه، ارتفاع و عرض تیر کنسول نشان داده شده توسط مراجع [۱,۸] با مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف ۳/۰۱۲ به ترتیب برابر با ۲/۴۵۵ و ۳/۸۸ حاصل شده است.

$$g_4 = 2.5 - \frac{4L^3}{bhE} \sqrt{\left(\frac{P_x}{h^2}\right)^2 + \left(\frac{P_y}{b^2}\right)^2} \quad (20)$$

که در آن  $E$  مدول ارتجائی می‌باشد که از تابع توزیع احتمال نرمال با میانگین  $7 \times 10^{-7}$  و انحراف معیار  $1/45 \times 10^{-7}$  و  $P_x$  از تابع نرمال با میانگین ۵۰۰ و انحراف معیار ۱۰۰ و نیز  $P_y$  از تابع احتمال نرمال با میانگین ۱۰۰۰ و انحراف معیار ۱۰۰ پیروی می‌کند.



شکل ۵ تیر کنسول مثال ۴

مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف برابر با ۳ درنظر گرفته شده است. در جدول (۱) نتایج همگرایی سه الگوریتم مورد بررسی AMV، رویه انتقال پایدار (STM) و روش بهبودیافته انتقال پایدار (ISTM) درج شده است. تاریخچه همگرایی عملکرد تیر کنسول برای

مثال ۳: تابع عملکرد غیرخطی ریاضی. تابع عملکرد غیرخطی مطابق با رابطه زیر برای این مثال در نظر گرفته می‌شود [11]:

$$g_3 = 0.3x_1^2x_2 - x_2 + 0.8x_1 + 1 \quad (19)$$

که در آن  $x_2 \sim N(1, 0.42)$ ،  $x_1 \sim N(1.2, 0.42)$  و  $\beta_1 = 6.0$  لحاظ گردیده است. این مثال توسط مرجع [11] با استفاده از رویه ترکیبی و بهبودیافته ترکیبی اندازه‌گیری عملکرد تحلیل گردیده است که تابع عملکرد همگرا شده به ترتیب برابر با ۲/۲۳۹۳ و ۰/۰۹۶، ۳/۱۶۱، ۲/۲۳۹۴، بردار عملکرد به ترتیب  $[X_i = -0/104, 3/156]$  نتیجه شده است. تاریخچه همگرایی تابع عملکرد این مثال در شکل (۴) نشان داده شده است. رویه ISTM با تعداد تکرار بسیار پایینی (۱۰ تکرار) همگرا گردیده است که مقدار بردار طراحی هدف و تابع عملکرد این مثال برابر با  $[X_i = -0/10423, 3/156242]$  و  $-2/22934$  نتیجه شده است. مشخص است که این مثال با تعداد تکرار مناسب، نتایج پایداری از تحلیل عملکرد این مثال ارائه نموده است. لذا، الگوریتم ارائه شده بهبودیافته انتقال پایدار با توجه به طول گام دینامیکی، توانایی و کارایی مناسبی برای رویه اولین مرتبه PMA نشان داده است.

مثال ۴: تابع عملکرد یک تیر. یک تیر کنسول تحت

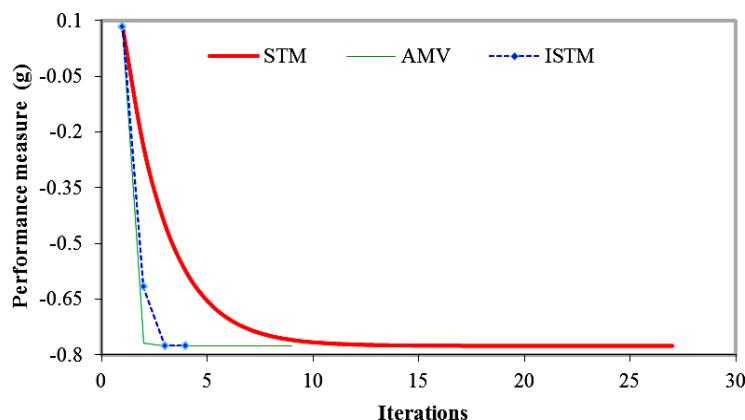
در دو جدول (۲) و (۳) به ترتیب تأثیر شاخص قابلیت اعتماد هدف و تأثیر تابع توزیع احتمال متغیرهای تصادفی پایه به صورت غیرنرمал بر نتایج هم‌گرایی و میزان تابع عملکرد درج شده است. مشخص است که با افزایش شاخص قابلیت اعتماد هدف از تابع عملکرد کاسته شده است.

با غیرنرمال شدن متغیرهای تصادفی پایه علاوه بر تغییر عملکرد تعداد تکرار برای هم‌گرایی نیز افزایش یافته است اما، تعداد تکرار آنها تغییرات زیادی نشان نداده است. این الگوریتم توانایی تحلیل مسائل غیرخطی با متغیرهای غیرنرمال را دارد. به طوری که، برای تحلیل مسائل با متغیرهای غیرنرمال می‌تواند با تکرار مناسب به نتایج پایداری هم‌گرا گردد.

الگوریتم‌های مورد بررسی در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طوری که مشخص است الگوریتم ارائه شده ISTM با تکرار کمتری به نتایجی مشابه با سایر الگوریتم‌ها هم‌گرا شده است. روش AMV نسبت به رویه STM کارایی بیشتری داشته است لذا، روش STM برای مسائل با درجهٔ غیرخطی متوسط یک الگوریتم ناکارآمد است.

جدول ۱ مقادیر نتایج هم‌گرا شده تابع عملکرد مثال ۴

$P_y$	$P_x$	E	$g(X)$	روش
۱۲۴۵/۷۳۴	۵۱۵/۰۳۱۲	۲۶۵۱۲۱۶۷	-۰/۷۷۵۹۴	AMV
۱۲۴۵/۶۳۵	۵۱۵/۰۳۲۱	۲۶۵۱۲۲۲۴	-۰/۷۷۵۹۲	STM
۱۲۴۵/۴۶۲	۵۱۵/۶۰۹۱	۲۶۵۹۴۳۶۲	-۰/۷۷۵۹۵	ISTM



شکل ۶ مقایسه هم‌گرایی روش‌های PMA برای مثال ۴

جدول ۲ مقایسه شاخص قابلیت اعتماد هدف بر عملکرد تیر

۶	۴/۵	۳/۵	$\beta_t$
-۱/۸۳۵۲۸	-۱/۲۷۲۷۵	-۰/۹۳۵۳۸	$g(X)$
.۲۳۱۰۸۱۲۸	.۲۴۹۱۸۱۸۹	.۲۶۰۰۵۷۷۸	$X_t$
.۰۲۳/۷۲	.۰۱۹/۹۷	.۰۱۶/۸۳	
۱۴۴۰/۸۳	۱۳۵۰/۵۱	۱۲۸۲/۰۹	
۱۲	۹	۷	NI

پایدار و روش بهبود یافته انتقال پایدار ارائه شده، تحلیل عملکرد گردیده است. روش AMV همگرایی به صورت نوسانی به دو نقطه حداقل عملکرد به صورت  $\{0/13507, 0/13502\}$  داشته است. همچنان، روش انتقال پایداری ناپایداری به صورت اغتشاش نشان داده است. روش بهبود یافته ارائه شده انتقال پایدار، به نتایج پایدار بعد از ۹ تکرار همگرا شده که نقطه حداقل عملکرد برای این مثال در جدول (۵) درج گردیده است.

مشخص است که طول گام پیشنهادی موجب حل مناسب مسائل غیرخطی سازه‌ای می‌شود و با تعداد تکرار بسیار پایین به نتایج مناسبی همگرا می‌گردد.

**مثال ۵: تابع عملکرد یک سازه دودکش.** تابع عملکرد یک دودکش مخروطی برگرفته از مرجع [14] به صورت زیر است:

$$g_5 = 1 - \frac{\sqrt{3(1-v^2)}}{\pi E t^2 \cos^2 \alpha} \times \left( \frac{P}{2\gamma} + \frac{M}{\eta r_i} \right) \quad (21)$$

که در آن  $M$  و  $P$  به ترتیب نیروی محوری و لنگر خمی وارد بر سازه است. پارامترهای  $\alpha = 7^\circ$  و  $t = 0.33$  در نظر گرفته می‌شود. مقدار شاخص قابلیت اعتماد هدف ( $\beta$ ) برابر با  $0.75$  لحاظ شده است. این مثال شامل ۶ متغیر غیروابسته است که خواص آماری آنها در جدول (۴) درج گردیده است.

این مثال مطابق با روش‌های AMV، روش انتقال

جدول ۳ مقایسه تابع توزیع متغیرهای تصادفی بر عملکرد تیر

NI	X <sub>t</sub>	g(X)	متغیر
۷	۰/۲۶۸۹۸۰۶۶		(نرمال) E
	-۰/۵۰۱۶۹۷	-۰/۸۴۶۱۴	(لوگ-نرمال) P <sub>x</sub>
	۱۲۹۲/۷۴۵		(لوگ-نرمال) P <sub>y</sub>
۱۳	۰/۲۷۷۵۷۳۴۹		(لوگ-نرمال) E
	-۰/۴۸۸۴۳۴	-۱/۰۹۹۸۵	(گامبل) P <sub>x</sub>
	۱۴۳۸/۸۸۲		(گامبل) P <sub>y</sub>
۱۰	۰/۲۷۷۰۹۷۸۹		(نرمال) E
	-۰/۴۹۵۹۹۷	-۱/۰۹۹۸۴	(لوگ-نرمال) P <sub>x</sub>
	۱۴۳۵/۹۸۷		(گامبل) P <sub>y</sub>

جدول ۴ خواص آماری متغیرهای تصادفی مثال ۵

متغیر	توصیف	تابع توزیع	میانگین	ضریب تغییرات
E	مدول ارتجائی (MPa)	لوگ-نرمال	۷۰۰۰۰	۰/۰۵
t	ضخامت (m)	نرمال	۰/۰۰۲۵	۰/۰۵
$\alpha$	زاویه شب (rad)	نرمال	۰/۵۲۴	۰/۰۲
$r_l$	قطر داخلی (m)	نرمال	۰/۹	۰/۰۲۵
M	لنگر (N-m)	گامبل	۸۰۰۰۰	۰/۰۸
P	نیروی محوری (N)	گامبل	۷۰۰۰۰	۰/۰۸

جدول ۵ نتایج روش بهبودیافته انتقال پایدار برای مثال ۵

متغیرها	X*	U*
E	۶۶۰۹۹/۸۷	-۱/۱۲۲۳۰
t	۰/۰۰۲۱۵۸	-۲/۷۳۷۰۶
$\alpha$	۰/۰۲۷۰۲۰	۰/۲۸۸۱۸
$r_1$	۰/۸۹۰۴۶۷	۰/۴۲۳۷۶
M	۹۸۰۰۷/۷۸	۲/۱۶۸۰۹
P	۷۲۳۷۸/۹۴	۰/۵۹۰۱۳
$g(X^*)$	۰/۱۳۵۰۳	

جدول ۶ مقایسه الگوریتم‌های تحلیل مرتبه اول PMA

روش	ISTM		STM		AMV		مثال
	g(X)	NI	g(X)	NI	g(X)	NI	
۱	-۳۱/۰۶۶۵	۴۲	-۳۱/۰۶۱۵	۱۲۶	حل مغشوش		
۲	-۰/۰۷۵۳	۱۲	-۰/۰۷۵۳	۸۶	تناوب به ۲ نقطه		
۳	-۲/۲۲۹۳	۱۰	-۲/۲۲۹۳	۱۰۹	تناوب به ۸ نقطه		
۴	-۰/۷۷۵۹	۴	-۰/۷۷۵۹	۳۷	-۰/۷۷۵۹	۹	
۵	۰/۱۳۵۰	۹	حل مغشوش	حل مغشوش	تناوب به ۲ نقطه		

### انتخاب طول گام براساس شرایط شبی و مقدار

توابع عملکرد در تکرارهای پیاپی موجب شده است که الگوریتم ISTM با تعداد تکرار خیلی مناسب به هم‌گرایی صحیحی از توابع عملکرد غیرخطی قیدهای احتمالاتی مسائل RBDO منجر گردد. به طوری که این الگوریتم توانمندی بسیار بالاتری نسبت به رویه AMV دارد و از طرفی، به نتایجی مشابه با رویه انتقال پایدار هم‌گرا شده می‌رسد اما، نسبت آن کارایی بسیار بالاتری دارد.

### خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله یک رویه تحلیل عملکرد براساس تئوری اغتشاشات بر مبنای روش انتقال پایدار ارائه شده است. یک الگوریتم بهبودیافته انتقال پایدار با طول گام دینامیکی براساس شرایط شبی پایه‌گذاری شده است. محاسبه طول گام رویه بهبودیافته انتقال پایدار براساس شرایط شبی، موجب پایداری عددی توابع عملکرد

### بحث نتایج عددی

نتایج سه الگوریتم رویه اندازه‌گیری عملکرد مانند AMV (که در آن طول گام و ماتریس  $C$  برابر با واحد درنظر گرفته شده (رابطه ۸)، روش انتقال پایدار (STM) (با طول گام برابر با  $1/0.1$  و ماتریس  $C = I$ ) و روش بهبودیافته انتقال پایدار (ISTM) (با طول گام دینامیکی مطابق با رابطه (۱۵) به ازای ضرایب  $\zeta = 0.5$  و  $\eta = 0.95$  و ماتریس  $C = I$ ) مقایسه شده است. مقدار تابع عملکرد ( $g(X)$ ) و تعداد برآورد مشتق تابع عملکرد (NI) برای این الگوریتم‌ها در جدول ۶ درج شده است. مشخص است که الگوریتم AMV، هم‌گرایی پایداری در مسائل غیرخطی نداشته است. رویه AMV در مثال ۴ هم‌گرا شده است و تعداد تکرار این الگوریتم برای هم‌گرا شدن خیلی کمتر از رویه STM می‌باشد. تعداد تکرار رویه ISTM خیلی کمتر از رویه STM بوده است و نیز در مثال ۴ نیز با تعداد تکرار کمتری نسبت به رویه AMV هم‌گرا شده است.

- نسبت به STM کمتر است.
- (۳) الگوریتم ISTM نسبت به رویه AMV توانمندی بیشتری دارد و برخلاف رویه تکرار AMV در تمامی مثال‌ها هم‌گرا شده است.
- (۴) رویه بهبودیافته انتقال پایدار یک رویه تکرار توانمند با هم‌گرایی مناسب است. انتخاب طول گام دینامیکی در رویه بهبودیافته انتقال پایدار موجب افزایش توانمندی آن شده و نسبت به رویه انتقال پایدار با تعداد تکرار بسیار کمتری هم‌گرا گردیده است.
- غیرخطی شده است. کارایی، توانمندی صحت هم‌گرایی و پایداری عددی رویه ISTM با الگوریتم‌های STM و AMV، مقایسه شده است که به طور خلاصه نتایج زیر استنتاج شده است.
- (۱) رویه AMV یک الگوریتم ساده برای تحلیل عملکرد می‌باشد اما در مسائل غیرخطی توانمندی مناسب ندارد و نتایج پایداری از تحلیل عملکرد توابع غیرخطی نشان نداده است (مثال‌های ۱ تا ۳ و ۵)
  - (۲) رویه تکرار AMV در صورت هم‌گرا شدن از رویه انتقال پایدار کارایی بیشتری دارد اما، توانمندی آن

## مراجع

1. Yang, R.J., Gu, L., "Experience with approximate reliability-based optimization methods", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 26, No. 2, pp. 152-159, (2004).
2. Cheng, G.D., Xu, L., Jiang, L., "A sequential approximate programming strategy for reliability-based optimization", *Computers and Structures*, Vol. 84, No. 21, pp. 1353-1367, (2006).
3. Chiralaksanakul, A., Mahadevan, S., "First-order approximation methods in reliability-based design optimization", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, pp. 851-857, (2005).
4. Tu, J., Choi, K.K., Young, H.P., "A new study on reliability-based design optimization", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 121, No. 4, pp. 557-564, (1999).
5. Yang, D., Yi, P., "Chaos control of performance measure approach for evaluation of probabilistic constraints", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 38, pp. 83-92, (2009).
6. Lee, J.O, Yang, Y.S., Ruy, W.S., "A comparative study on reliability-index and target-performance-based probabilistic structural design optimization", *Computers and Structures*, Vol. 80, pp. 257-269, (2002).
7. Li, H., Foschi, R.O., "An inverse reliability method and its application", *Structural Safety*, Vol. 20, pp. 257-270, (1998).
8. Yi, P., Cheng, G.D., Jiang, L., "A sequential approximate programming strategy for performance-measure-based probabilistic structural design optimization", *Structural Safety*, Vol. 30, No. 2, pp. 91-109, (2008).
9. Youn, B.D., Choi, K.K., "An investigation of nonlinearity of reliability-based design optimization approaches", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 126, No. 5, pp. 403-411, (2004).
10. Youn, B.D., Choi, K.K., Park, Y.H., "Hybrid analysis method for reliability based design optimization", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 125, No. 3, pp. 221-232, (2003).

11. Youn, B.D., Choi, K.K., Du, L., "Adaptive probability analysis using an enhanced hybrid mean value method", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 29, pp. 134–148, (2005a).
12. Youn, B.D., Choi, K.K., Du, L., "Enriched performance measure approach for reliability-based design optimization", *AIAA Journal*, Vol. 43, No.4, pp. 874–884, (2005b).
13. Gong, J.X., Yi, P., "A robust iterative algorithm for structural reliability analysis", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 43, No. 4, pp. 519–527, (2011).
14. Keshtegar, B., Miri, M., "An enhanced HL-RF Method for the computation of structural failure probability based on relaxed approach", *Civil Engineering Infrastructures*, Vol. 1, No. 1, pp. 69-80, (2013).
15. Yang, D., "Chaos control for numerical instability of first order reliability method", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 5, No. 10, pp. 3131-3141, (2010).
16. Santosh. T. V., Saraf. R.K., Ghosh. A.K., Kushwaha. H.S., "Optimum step length selection rule in modified HL-RF method for structural reliability", *International journal of Pressure Vessels Piping*, Vol. 83, No. 10, pp. 742–748, (2006).
17. Schmelcher, P., Diakonos, F. K., "General approach to the localization of unstable periodic orbits in chaotic dynamical systems", *Physical Review Letters*, Vol. 57, No.1, pp. 2739-2754, (1998).
18. Keshtegar, B., Miri, M., "Introducing Conjugate gradient optimization for modified HL-RF method", *Engineering Computations*, Vol. 31, No. 4, pp. 775-790, (2014).
19. Narushima,Y., Yabe, H., "Conjugate gradient methods based on secant conditions that generate descent search directions for unconstrained optimization", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 236, pp. 4303-4317, (2012).



## ارزیابی کارایی روش پیش‌بینی موضعی ناشی از بازسازی فضای فاز و مدل شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی رواناب (مورد مطالعاتی: ایستگاه پل کنه، کرمانشاه)\*

محمد ذونعمت کرمانی<sup>(۱)</sup>خاطره امیرخانی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در این تحقیق دو روش شبکه عصبی مصنوعی و روش پیش‌بینی موضعی بر پایه تئوری آشوب به منظور پیش‌بینی روزانه، هفتگی و ماهانه رواناب ایستگاه پل کنه بر روی خانه قره‌سو به کار گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از پیش‌بینی با استفاده از روش پیش‌بینی موضعی مبین نزدیکی نتایج با داده‌های مشاهداتی در مقیاس‌های روزانه و هفتگی و عدم تطابق مناسب در مقیاس ماهانه بوده است که بیانگر وجود آشوبناکی در مقیاس‌های روزانه و هفتگی است. هم‌چنین نتایج پیش‌بینی شده با استفاده از شبکه عصبی در مقیاس‌های روزانه و هفتگی برخلاف مقیاس ماهانه ضعیفتر از روش پیش‌بینی موضعی بوده است.

**واژه‌های کلیدی** سری زمانی رواناب، نظریه آشوب، پیش‌بینی موضعی، شبکه عصبی مصنوعی.

## Efficiency Assessment of Local Prediction Method Considering Reconstruction of Phase Space and Artificial Neural Network Model for Prediction of Runoff (Case Study: Pole-Kohneh Station, Kermanshah)

M. Zounemat-Kermani

Kh. Amirkhani

**Abstract** In this research, prediction methods of artificial neural network and local prediction method (LPM) based on the chaos theory are employed to predict daily, weekly and monthly runoff. For achieving this purpose, runoff series data observed at Pole-Kohneh located in the Qareh-Soo River were utilized. The nonlinear predictions of LPM are found to be in close agreement with the observed runoff, with high correlation coefficient for daily and weekly time scales. Predicted results of monthly time scale are not satisfying which indicating the signs of existing chaos behavior in daily and weekly scales. The predicted results of ANN are inferior to LPM for daily and weekly scales but superior to LPM for monthly scale.

**Key Words** Runoff Time Series, Chaos Theory, Local Prediction Method.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۸/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۸/۲۴ می‌باشد.

zounemat@uk.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

پیش‌بینی رواناب روزانه با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی پیشرو و تابع شعاعی پرداختند [۳]. نتایج حاصل از تحقیق برتری روش غیرخطی شبکه عصبی را نسبت به روش‌های خطی محرز می‌سازد. یکی دیگر از شیوه‌های مدل‌سازی غیرخطی، استفاده از مفاهیم تئوری آشوب می‌باشد. نظریه آشوب به دلیل داشتن خاصیت دینامیکی غیرخطی و قطعی بودن، مورد توجه خاص در بررسی فرآیندهای هیدرولوژیکی بوده است [۴]. هم‌چنین پیش‌بینی موضعی که مبتنی بر پارامترهای نظریه آشوب می‌باشد یک روش جدید در پیش‌بینی چنین پارامترهایی است. آشوب در لغت به معنای هرج و مرج و بی‌نظمی است. انگار اصلی و کلیدی تئوری آشوب این است که هر بی‌نظمی، نظمی نهفته است. به این معنا که نباید نظم را تنها در یک مقیاس جستجو کرد، پدیده‌ای که در مقیاس محلی، کاملاً تصادفی و غیر قابل پیش‌بینی به‌نظر می‌رسد چه بسا در مقیاس بزرگ‌تر، کاملاً پایا و قابل پیش‌بینی باشد. سه مزیت عمده از نظریه آشوب برای تحلیل سیستم‌های هیدرولوژیکی وجود دارد:

- (۱) برای سیستم شدیداً غیرخطی قابل اجراست.
- (۲) به‌طور طبیعی کلیه دینامیک‌های مهم سیستم را محاسبه می‌نماید.
- (۳) اطلاعات و روابط سیستم را بدون نیاز به کشف قوانین یا روابط تحت دینامیک کشف می‌کند. اگرچه تحلیل آشوب، یک رابطه برای استخراج مدل متداول تهیه نمی‌کند، اما اطلاعات ارزشمندی در رابطه با همه سیستم‌های دینامیکی برای کاربرد کلی، از قبیل پیش‌بینی داده‌ها استخراج می‌کند. نظریه آشوب به‌نظر می‌رسد به‌طور طبیعی برای سیستم‌های هیدرولوژیکی قابل اجرا باشد [۵].

از آنجایی که پیش‌بینی و تعیین میزان کمی فرآیندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوضه آبخیز از اهمیت خاصی برخوردار است بررسی وضعیت دینامیکی سری زمانی رواناب می‌تواند در

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین مطالعاتی که در هیدرولوژی انجام می‌شود، بررسی و تعیین مقدار رواناب و برآورد حداکثر سیلان و تهیه آب نمود آن می‌باشد. هم‌چنین برآورد رواناب حاصل از رواناب‌های جوی از اهمیت خاصی در هیدرولوژی و مدیریت حوضه‌های آبخیز و حفاظت از آب و خاک برخوردار است. مسائل مربوط به رواناب، گوناگون است و طبیعت بسیار پیچیده‌ای دارد. بدلیل وقوع رواناب در حوضه آبریز رودخانه‌ها، فرسایش‌های عظیمی در سطح حوضه اتفاق می‌افتد و نهایتاً مشکلات عدیده‌ای را در پایین دست به وجود می‌آورد که ناشی از تهشینی و انباشته شدن رسوب است. برای کنترل و هدایت رواناب و تخلیه جریان‌های سطحی در اراضی کشاورزی و انتقال آنها به محل مناسب و خارج از منطقه، مدل‌های متفاوتی توسط محققان، سازمان‌های مطالعاتی - تحقیقاتی در کشورهای مختلف جهان ارائه شده و مورد استفاده نیز قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به روش‌های تجربی و غیرمستقیم اشاره کرد که هر کدام دارای یکسری ضرایب منطقه‌ای خاص به‌خود بوده و تحت آن شرایط توسعه داده شده‌اند. به این دلیل در سایر مناطق ممکن است غیرقابل استفاده باشد یا استفاده از آنها همراه با خطاهایی باشد. با وجود روابط غیرخطی، عدم قطعیت و عدم صراحة زیاد و ویژگی‌های متغیر زمانی و مکانی در سیستم‌های گردش آبی، هیچ‌یک از مدل‌های آماری و مفهومی پیشنهادشده به‌منظور الگوسازی دقیق نتوانسته به عنوان یک مدل برتر و توانا شناخته شوند. امروزه شبکه‌های غیر خطی به عنوان یکی از سیستم‌های هوشمند در پیش‌بینی یک چنین پدیده‌های پیچیده بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از آن جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان مدل‌های جعبه‌سیاه، ابزاری توانمند برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی هستند و قادرند روابط پیچیده حاکم بر این فرآیندها را مدل نمایند [۲ و ۳]. ذونعمت کرمانی و همکاران (۲۰۱۳) به

رفتار دینامیکی رواناب با روش‌های بعد همبستگی، طیف توانی تبدیل فوریه و بازسازی فضای فاز پرداختند و سپس با روش پیش‌بینی غیرخطی پیش‌بینی رواناب را انجام دادند. نتایج حاکی از وجود رفتار آشوبناک با بعد کم در این سری زمانی و پیش‌بینی نسبتاً دقیقی با روش غیرخطی بود [9]. کوچاک و همکاران [10] پیش‌بینی جریان ماهانه سد یاملا را با استفاده از مدل پیش‌بینی موضعی نظریه آشوب انجام دادند. آنها نشان دادند که برای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت، این روش نتیجه بهتری نسبت به روش‌های دیگر دارد [10]. هو و هوانگ به بررسی آشوبناکی سری رواناب در ایستگاه فودیدین در چین پرداختند. بررسی‌های آنها حاکی از وجود نشانه‌های قانع‌کننده‌ای از آشوب در این سری زمانی می‌باشد [11].

پژوهشگران کشورمان نیز تحقیقاتی را با استفاده از نظریه آشوب بر روی پدیده‌های مختلف هیدرولوژیکی انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات فرزین و همکاران درخصوص تحلیل آشوب‌پذیری رواناب ماهانه [12]، قربانی و همکاران در رابطه با پیش‌بینی ذرات معلق رسوب در رودخانه [4]، حسن‌زاده و همکاران در زمینه پایش خشکسالی [13]، مرادی‌زاده و همکاران در ارتباط با تخمین جریان رودخانه [14]، انیس‌حسینی و ذاکر مشقق به منظور تحلیل فرآیند بارش‌رواناب [15]، قربانی و همکاران درخصوص تحلیل رواناب [16] و جانی و همکاران در رابطه با تحلیل خصوصیات دینامیکی بارش ماهانه [17] اشاره نمود. در این میان، انیس‌حسینی و ذاکر مشقق کاربرد نظریه آشوب در تحلیل فرآیند بارش‌رواناب را در حوضه رودخانه کشکان با استفاده از روش بعد همبستگی و توان لیاپانف مورد بررسی قرار دادند [15]. آنها از داده‌های روزانه دبی رودخانه کشکان بدین منظور استفاده نمودند. نتایج نشان دادند که شواهد قانع‌کننده‌ای از وجود آشوب در فرآیند رواناب-رواناب حوضه مذکور مشاهده می‌شود بنابراین شرایط برای پیش‌بینی

انتخاب و گزینش مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی و یا پیش‌بینی آن راهگشا باشد. در همین راستا، با بررسی تصادفی و یا آشوبناک بودن سری زمانی مورد نظر می‌توان به اطلاعات ارزشمندی در رابطه با نحوه رفتار این پدیده دست یافت و با استفاده از آن به بررسی روش‌های پیش‌بینی مختلف و یافتن روشی مناسب و دقیق به منظور پیش‌بینی رواناب دست یافت. ذیلاً پژوهش‌ها و تحقیقات مرتبط در این زمینه معرفی و بررسی می‌گردد.

جایاواردن رواناب را براساس روش تقریب محلی مورد پیش‌بینی قرار داد [6]. نتایج حاصل این تحقیق نشان دادند که روش تقریب محلی می‌تواند روشی مناسب برای پیش‌بینی رواناب باشد در حالی که باید در مناطق دیگر که دارای توپوگرافی متفاوتی هستند این روش مورد آزمایش قرار گیرد. سیواکومار و همکاران آشوبناکی فرآیند بارش-رواناب ماهانه در حوضه رودخانه گوتا در سوئد را با استفاده از روش بعد همبستگی روی سری‌های بارش، رواناب و ضرایب رواناب بررسی نمودند. با وجود رفتار آشوبی در سه نوع سری زمانی مورد مطالعه، نتیجه گرفته شد که فرآیند بارش-رواناب حوضه مذکور رفتاری آشوبناک نشان می‌دهد [7]. در تحقیق دیگر سیواکومار و همکاران [8] به پیش‌بینی رواناب ماهانه در حوضه رودخانه اوراکیوری در برزیل با استفاده از بازسازی فضای فاز پرداختند. آنها از روش پیش‌بینی خطی با استفاده از چندجمله‌ای‌های محلی که بر اساس پارامترهای تصوری آشوب توسعه یافته، استفاده نمودند. نتایج نشان دادند که رواناب دارای رفتاری آشوبناک است و روش پیش‌بینی خطی با توجه به ضریب همبستگی  $0.89$  و ضریب بهره‌وری  $0.94$  روشی مناسب برای پیش‌بینی رواناب می‌باشد [8]. اسلام و سیواکومار [9] به بررسی خصوصیات و پیش‌بینی رواناب با یک دید دینامیکی غیرخطی پرداختند. آنها با استفاده از داده‌های رواناب روزانه حوضه لندربورگ در دانمارک ابتدا به بررسی

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز قره‌سو به مختصات جغرافیایی "۳۴°۰۰'۲۴" تا "۳۴°۵۵'۰۸" عرض شمالی و "۴۶°۲۲'۲۶" تا "۴۷°۲۲'۰۵" طول شرقی با مساحت ۵۴۴۲/۷ کیلومتر مربع از حوضه‌های داخلی استان کرمانشاه می‌باشد. این حوضه از حوضه‌های سرشاخه کرخه است و از جنوب استان کردستان آغاز می‌شود و تا جنوب شرقی استان کرمانشاه ادامه می‌یابد [۱۸].

به منظور بررسی سری زمانی رواناب حوضه قره‌سو، اطلاعات مورد نیاز از سازمان آب منطقه‌ای غرب در استان کرمانشاه مربوط به دوره‌های آماری ایستگاه پل کهنه (داده‌های روزانه از تاریخ ۱۳۶۷/۰۷/۰۱ لغایت ۱۳۷۸/۰۶/۳۱) گرفته شد. مشخصات ایستگاه مورد نظر در جدول (۱) نشان داده شده است. هم‌چنین موقعیت جغرافیایی حوضه قره‌سو و ایستگاه پل کهنه در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد. افزون بر این مشخصات آماری سری زمانی رواناب در ایستگاه پل کهنه در جدول (۲) و نمودار تغییرات رواناب در مقیاس ماهانه در شکل (۲) ارائه شده است.

رفتار این فرآیند به کمک روش‌های مبتنی بر نظریه آشوب مناسب تلقی می‌شود. هم‌چنین قربانی و همکاران کاربرد نظریه آشوب و الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی سری زمانی رواناب را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. آنها نشان دادند که رواناب رفتاری آشوبناک دارد و پیش‌بینی این سری زمانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

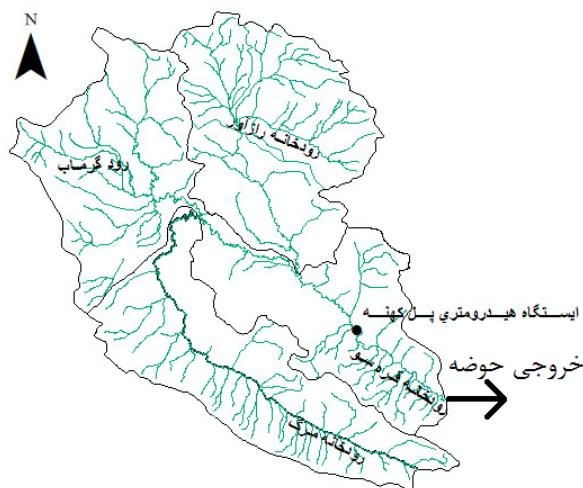
با توجه به اهمیت پیش‌بینی سری زمانی رواناب و محدود بودن منابع تحقیقاتی مرتبط با استفاده از نظریه آشوب در بررسی این پدیده در داخل کشور، در مقاله حاضر به بررسی توانایی نظریه آشوب در مدل‌سازی پدیده رواناب پرداخته شد که در ابتدا آشوبناکی سری زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه در ایستگاه پل کهنه واقع در حوضه آبریز قره‌سو بررسی گردید، سپس پیش‌بینی رواناب با بهره جستن از روش غیرخطی پیش‌بینی موضعی صورت پذیرفت. به منظور ارزیابی کارایی روش پیش‌بینی موضعی، پیش‌بینی رواناب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه نیز انجام شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ مشخصات ایستگاه هیدرومتری پل کهنه (شرکت آب منطقه‌ای غرب، ۱۳۸۳)

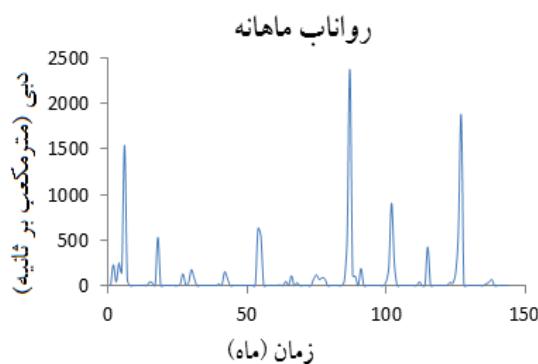
سال تأسیس	مختصات جغرافیایی				روندخانه	ایستگاه
	ارتفاع از سطح دریا(متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی			
۱۳۳۴	۱۲۸۳	۳۴-۲۱	۴۷-۰۷	قره‌سو	پل کهنه	

جدول ۲ مشخصات آماری سری زمانی رواناب در ایستگاه پل کهنه (کلیه واحدها بر مترمکعب بر ثانیه می‌باشد)

	ایستگاه پل کهنه					مقیاس زمانی
	تعداد داده	حداقل مقدار	حداکثر مقدار	انحراف معیار	میانگین	
۴۳۹۲	۰	۳۳۸/۰۹۶	۱۹/۳۶۷	۳/۰۳۱	روزانه	
۶۲۴	۰	۱۷۲۲/۰۳۱	۱۱۳/۲۷۸	۲۱/۳۳۷	هفتگی	
۱۴۴	۰	۲۳۷۵/۱۵۹	۳۰۴/۴۰۸	۹۲/۴۶۰	ماهانه	



شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز قرهسو و ایستگاه هیدرومتری پل کنه



شکل ۲ نمودار سری زمانی رواناب در مقیاس ماهانه در ایستگاه پل کنه در بازه زمانی سال‌های ۱۳۶۷ الی ۱۳۷۸

مؤلفه‌های سیستم در یک فضای چندبعدی با توجه به زمان تأخیر مناسب سیستم و بعد محاط سری زمانی نگاشت می‌شوند. به‌منظور تعیین زمان تأخیر می‌توان از روش‌های همچون نمودار همبستگی‌نگار،تابع اطلاعات میانگین متقابل و یا بعد همبستگی استفاده نمود که در این بین روش اطلاعات میانگین متقابل به علت توانایی در آخذ خصوصیات غیرخطی سری زمانی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. افزون بر این جهت تعیین بعد محاط می‌توان از روش نزدیک‌ترین همسایگی کاذب استفاده نمود.

الگوریتم بعد همبستگی گراسبرگر-پروکاشیا. آنالیز تابع همبستگی که به عنوان روش بعد همبستگی نیز

## مواد و روش‌ها

### تحلیل غیرخطی بر پایه مفاهیم تئوری آشوب

این بخش به بررسی و تحلیل غیرخطی براساس مفاهیم تئوری آشوب شامل بازسازی فضای فاز، تعیین بعد همبستگی و بزرگ‌ترین نمای لیپانف می‌پردازد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل موارد فوق می‌توان وضعیت آشوبناکی و یا تصادفی بودن سری زمانی را تعیین نمود.

**بازسازی فضای فاز.** در بررسی دینامیک سیستم‌های آشوبناک، بازسازی فضای فاز فرآیندی مهم به شمار می‌رود. روش‌های مختلفی برای این مقوله وجود دارد که رایج‌ترین آنها برای بازسازی فضای فاز سری زمانی، روش ارائه‌شده توسط تاکز می‌باشد [5]. در این روش،

حالت تصادفی می‌باشد و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$v = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \quad (3)$$

به طور کلی شبیه به وسیله برآش یک خط مستقیم با روش حداقل مربعات داخل یک ناحیه معین به نام ناحیه مقیاس‌گذاری برآورد می‌گردد. اگر توان همبستگی با افزایش بعد محاط به مقدار اشباعی برسد، پس به طور کلی سیستم دارای دینامیک آشوبناک می‌باشد. مقدار اشباع از توان همبستگی به عنوان بعد همبستگی (d) از جاذب تعریف می‌شود [19,20].

**بزرگ‌ترین نمای لیپانف.** نمای‌های لیپانف، مقدار نمای‌های متوسط از واگرایی یا همگرایی مدارها در فضای فاز می‌باشند. برخی از محققان بیان کرده‌اند که وجود یک نمای لیپانوف مثبت حاکی از حضور آشوب در سیستم می‌باشد [21] در حالی که برخی دیگر بیان کرده‌اند که این شرط لازم است اما کافی نیست [22]. در اغلب موارد، یک سیستم با حداقل یک نمای لیپانوف مثبت، آشوبناک درنظر گرفته می‌شود [23]. روزنستین (۱۹۹۳)، شیوه جدیدی برای محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیپانوف با استفاده از سری‌های زمانی ارائه نمود. این روش، بعد از بازسازی فضای فاز مناسب با استفاده از مقادیر  $\tau$  و  $m$ ، یک نقطه  $Y_{n_0}$  را انتخاب و تمام نقاط همسایه  $Y_n$  با فاصله‌ای نزدیک‌تر از یک فاصله  $r$  از آن را پیدا می‌کند و متوسط فاصله آنها از آن نقطه را محاسبه می‌کند [24]. این روند برای محاسبه یک مقدار متوسط  $S$  به نام فاکتور کشش، برای  $N$  نقطه در طول مسیر تکرار می‌شود [25]:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{n_0=1}^N \ln \left[ \frac{1}{|u_{Y_{n_0}}|} \sum |Y_{n_0} - Y_n| \right] \quad (4)$$

تعداد همسایه‌های یافت شده در اطراف نقطه  $Y_{n_0}$  می‌باشد. در سیستم‌های دارای رفتار بی‌نظم، طرح فاکتور کشش  $S$  در برابر تعداد نقاط  $N$  یا زمان  $t = N \Delta t$ ، یعنی نمودار  $S$  بر حسب  $N$  یا  $t$  نشان

شناخته می‌شود یکی از تکنیک‌هایی است که به طور گسترده برای بررسی وجود یا فقدان آشوب در سری‌های زمانی استفاده می‌شود. از میان تعداد زیادی الگوریتم‌های موجود برای محاسبه تابع همبستگی، الگوریتم گراسبرگر-پروکاشیا معمولاً بیش از سایر روش‌ها استفاده می‌شود [5]. الگوریتم گراسبرگر-پروکاشیا با استفاده از بازسازی فضای فاز سری زمانی مقدار بعد همبستگی را تعیین می‌نماید. فضای فاز یک فضای انتزاعی است که میزان درجه آزادی حرکت سیستم می‌باشد. برای سری زمانی اسکالر  $X_i$  که در آن  $N, i=1,2,3,\dots$  فضای فاز را می‌توان با استفاده از روش زمان تأخیر به دست آورد [7]. در روش زمان تأخیر  $X_i$  و زمان‌های بعدی آن با هم ترکیب می‌شوند و مختصات یک سری زمانی برداری را تعیین می‌کنند [19]: که در آن  $\tau / \Delta t$  می‌باشد که بعد محاط نام دارد و  $T$  به عنوان پارامتر زمان تأخیر بیان می‌شود. برای فضای فاز  $m$  بعدی تابع همبستگی  $C(r)$  به صورت زیر می‌باشد:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j}^{(1 \leq i < j \leq N)} H(r - |Y_i - Y_j|) \quad (1)$$

که در آن  $H$  تابع هویسايد پلهای با  $H(u)=1$  برای  $u>0$  و  $H(u)=0$  برای  $u \leq 0$  می‌باشد و  $|Y_i - Y_j|$  تعداد نقاط در فضای مزبور،  $r$  شعاع کره به مرکز  $Y_i$  یا  $Y_j$  می‌باشد.  $|Y_i - Y_j|$  فاصله بین بردار تأخیر  $m$  بعدی به دست آمده از معادله (1) می‌باشد. چنان‌چه سری زمانی به وسیله یک جاذب  $r$  توصیف شود پس انتگرال همبستگی  $C(r)$  با شعاع به صورت زیر وابسته می‌شود:

$$C(r)_{r \rightarrow 0} \approx ar^v \quad (2)$$

در این رابطه  $a$ ، یک مقدار ثابت است و  $v$  توان همبستگی یا شبیه منحنی  $C(r)$  در مقابل  $\log(r)$  می‌باشد که نشان‌دهنده میزان انحراف یک سری زمانی از

$$\begin{aligned} X_i &= \left( x_i, x_{i-\tau}, \dots, x_{i-(m-1)\tau} \right) \in R^m \\ i &= 1 + (m-1)\tau, 2 + (m-1)\tau, \dots, N-1, N \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن  $X_i$  یک بردار  $m$  بعدی می‌باشد. زمانی که  $m \geq 2d+1$  است تبدیل ذکر شده یک محاطسازی است که در آن فضای حالت کاذب ایجاد شده، ساختار جاذب محاطشده در فضای حالت اصلی را حفظ می‌کند. در چنین فضای  $m$  بعدی، پیش‌بینی به وسیله تخمین تغییر  $\Delta t$  با زمان صورت می‌گیرد. با درنظر گرفتن ارتباط میان نقاط  $X_t$  و  $X_{t+p}$  در زمان  $p$ ، جاذب توسطتابع  $F$  به صورت زیر تقریب زده می‌شود (کوچک و همکاران، ۲۰۰۷):

$$X_{t+p} \equiv F(X_t) \quad (8)$$

در روش تقریب موضعی پیش‌بینی، فرض می‌شود که تغییر  $X_t$  با زمان در جاذب، در نقطه  $t$  با نقاط نزدیک آنها ( $X_{T_h}, h = 1, 2, \dots, n$ ) یکسان باشد. در اینجا  $X_{t+p}$  توسط ترتیب  $d$  از تابع چندگانه  $F(X_t)$  به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} X_{t+p} &\equiv f_0 + \sum_{k_1=0}^{m-1} f_{1k_1} X_{t-k_1\tau} + \sum_{\substack{k_2=k_1 \\ k_1=0}}^{m-1} f_{2k_1k_2} X_{t-k_1\tau} X_{t-k_2\tau} + \\ &\dots + \sum_{k_d=k_{d-1}}^{m-1} f_{dk_1k_2\dots k_d} X_{t-k_1\tau} X_{t-k_2\tau} \dots X_{t-k_d\tau} \end{aligned} \quad (9)$$

با استفاده از  $n$  تعداد  $X_{T_k}$  و  $X_{T_{k+p}}$  برای مقادیر از پیش تعیین شده، ضرایب  $f$  توسط معادله زیر تعیین می‌شوند:

$$x \equiv Af \quad (10)$$

که در این رابطه:

$$x = \left( x_{T_{1+p}}, x_{T_{2+p}}, \dots, x_{T_{n+p}} \right) \quad (11)$$

خواهد داد که این منحنی در ابتدا به صورت خطی آغاز می‌شود و دارای یک ناحیه مسطح در امتداد آن می‌باشد. شبیه این نمودار نشان‌دهنده تقریب بزرگ‌ترین نمای لیپانوف می‌باشد همچنین با توجه به بزرگ‌ترین نمای لیپانوف به دست آمده، مقدار افق پیش‌بینی ( $\Delta t$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta t = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

که در این رابطه  $\lambda$  بزرگ‌ترین نمای لیپانوف است. در این تحقیق از روش روزنستین به منظور محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیپانوف استفاده شده است.

### فرآیند پیش‌بینی

در این تحقیق از دو روش غیرخطی برای پیش‌بینی رواناب استفاده شده است. روش نخست (پیش‌بینی موضعی) بر پایه ایجاد فضای فاز و توجه به زمان تأخیر بنا شده است. در حالی که در روش دوم که می‌توان یکی از رایج‌ترین روش‌های پیش‌بینی غیرخطی برشمرد، از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه استفاده شده است.

**پیش‌بینی موضعی.** فرض می‌شود که داده‌های سری زمانی از یک سیستم دینامیک آشوبناک با بعد همبستگی  $d$  در فضای فاز تشکیل شده باشد. فضای فاز جدیدی را می‌توان با اضافه نمودن مختصات مستقل اضافی تشکیل داد. یکی از این مختصات‌های مستقل، خود سری زمانی است و بقیه مختصات‌ها با تأخیر دادن ( $m-1$ ) برابر زمان تأخیر (یعنی  $\tau(m-1)$ ) سری زمانی اصلی به دست می‌آیند به طوری که همبستگی بین مختصات‌ها صفر شود. در این صورت سری زمانی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود (کوچک و همکاران، ۲۰۰۷):

$$x_i \in R, i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

بازسازی به صورت زیر انجام می‌گیرد:

معیارهای ارزیابی مدل. معیارهای عددی که در تعیین کارایی مدل‌ها و درنتیجه انتخاب بهترین مدل به کار می‌رود شامل: ضریب همبستگی ( $r$ ) و جذر میانگین مربعات خطأ (RMSE) می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{mi} - X_{pi})^2} \quad (15)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{mi} - \bar{X}_m)(X_{pi} - \bar{X}_p)}{\left[ \sum_{i=1}^N (X_{mi} - \bar{X}_m)^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^N (X_{pi} - \bar{X}_p)^2 \right]^{0.5}} \quad (16)$$

که در این روابط  $X_{mi}$ ، داده مشاهداتی و  $X_{ni}$ ، داده محاسبه شده با پیش‌بینی موضعی و شبکه عصبی است. همچنین  $\bar{X}_m$  و  $\bar{X}_p$  به ترتیب متوسط داده مشاهداتی و محاسباتی است و  $N$  برابر با تعداد داده‌های صحت‌سنجی می‌باشد. به طور کلی مقادیر ضریب همبستگی نزدیک به عدد واحد و مجدول میانگین مربعات خطأ نزدیک به صفر میان عملکرد مناسب مدل در پیش‌بینی سری زمانی است.

## نتایج و بحث

به منظور بررسی وجود آشوب در سری زمانی رواناب ابتدا زمان تأخیر هر یک از مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل (AMI) به دست آمده که در این روش اولین کمینه محلی از میانگین اطلاعات متقابل به عنوان زمان تأخیر در نظر گرفته می‌شود و مقدار بعد محاط با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی کاذب با استفاده از زیربرنامه‌های نرم افزار تیسن محاسبه گردیده است. نمودار تغییرات اطلاعات متقابل سری زمانی رواناب در برابر زمان‌های تأخیر متفاوت در مقیاس‌های زمانی مختلف رسم گردیده است (شکل ۳).

همچنین مقادیر درصد خطای نزدیک‌ترین همسایگی کاذب به ازای مقادیر مختلف بعد محاط برای

$$f = (f_0, f_{10}, f_{11}, \dots, f_{1(m-1)}, f_{200}, \dots, f_{d(m-1)(m-1)\dots(m-1)}) \quad (12)$$

و  $A$  ماتریس ژاکوبین! می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

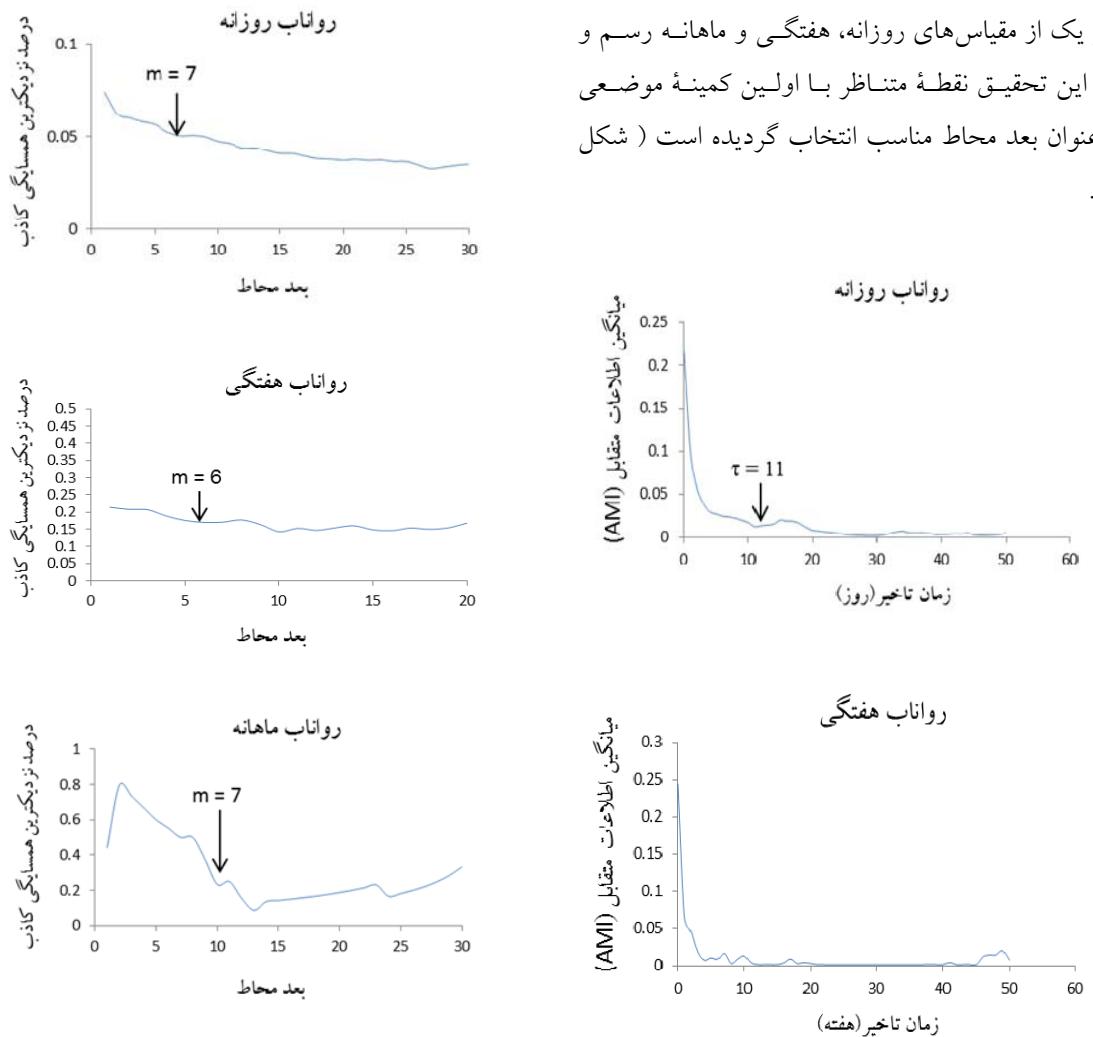
$$A = \begin{bmatrix} X_{T_1} & X_{T_{1-\tau}} & \dots & X_{T_{1-(m-1)\tau}} & X_{T_1}^2 & \dots & X_{T_{1-(m-1)\tau}}^d \\ X_{T_2} & X_{T_{2-\tau}} & \dots & X_{T_{2-(m-1)\tau}} & X_{T_2}^2 & \dots & X_{T_{2-(m-1)\tau}}^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{T_n} & X_{T_{n-\tau}} & \dots & X_{T_{n-(m-1)\tau}} & X_{T_n}^2 & \dots & X_{T_{n-(m-1)\tau}}^d \end{bmatrix} \quad (13)$$

برای دست‌یابی به یک راه حل بهینه و مناسب، تعداد سطرهای ماتریس ژاکوبین  $A$  بهتر است از رابطه زیر تبعیت کند [26]:

$$n \geq \frac{(m+d)!}{m!d!} \quad (14)$$

**شبکه‌های عصبی مصنوعی.** شبکه‌های عصبی مصنوعی نگاشت یا تبدیل از یک فضای چندبعدی به فضای چندبعدی دیگر را انجام می‌دهند و قابلیت‌هایی از قبیل شناسایی الگو، تفکیک الگو، نگاشت غیرخطی، حافظه انجمنی، خودسازماندهی و کنترل را دارا می‌باشند [2,3].

شبکه‌های چندلایه پیش‌خور یکی از مهم‌ترین ساختارهای شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشند. به طور معمول این شبکه‌ها شامل مجموعه‌ای از واحدهای حسی (نرون‌های پایه) می‌باشند که تشکیل دهنده لایه ورودی، یک یا چندلایه پنهان و یک لایه خروجی می‌باشند. سیگنال ورودی در خلال شبکه و در مسیری روبروی جلو به صورت لایه‌به‌لایه منتشر می‌شود. این نوع شبکه معمولاً با عنوان پرسپترون چند لایه (MLP) نامیده می‌شود. از میان روش‌های مختلف آموزش به روش پس‌انتشار خطأ، الگوریتم لونبرگ-مارکوآد، به دلیل هم‌گرایی سریع‌تر در آموزش شبکه‌های با اندازه متوسط، برای استفاده در تحقیق حاضر انتخاب شده است.

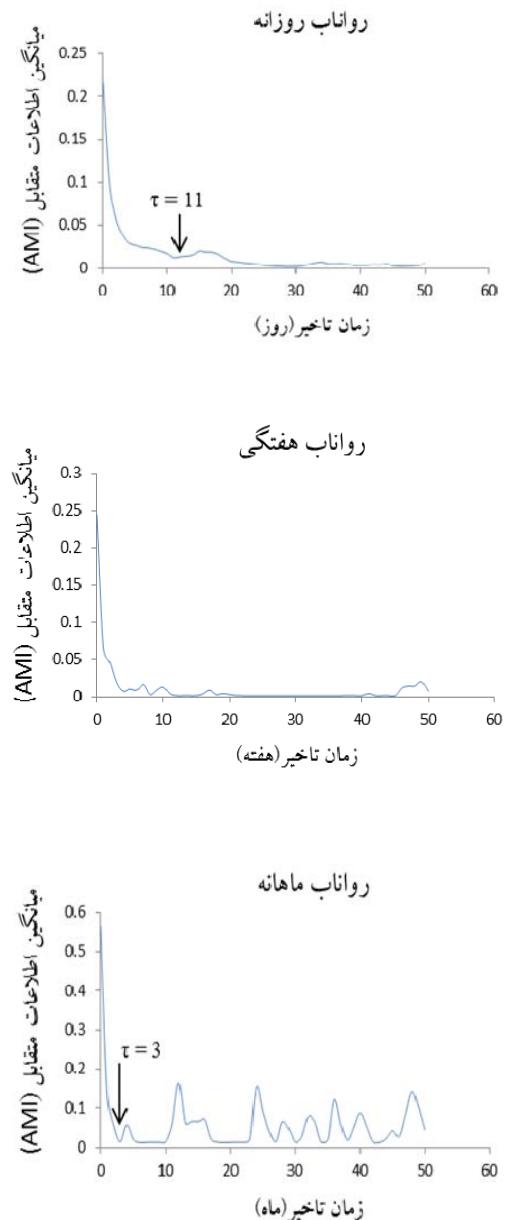


شکل ۴ مقادیر نزدیکترین همسایگی کاذب بهمازای ابعاد محاط مختلف در سری زمانی رواناب

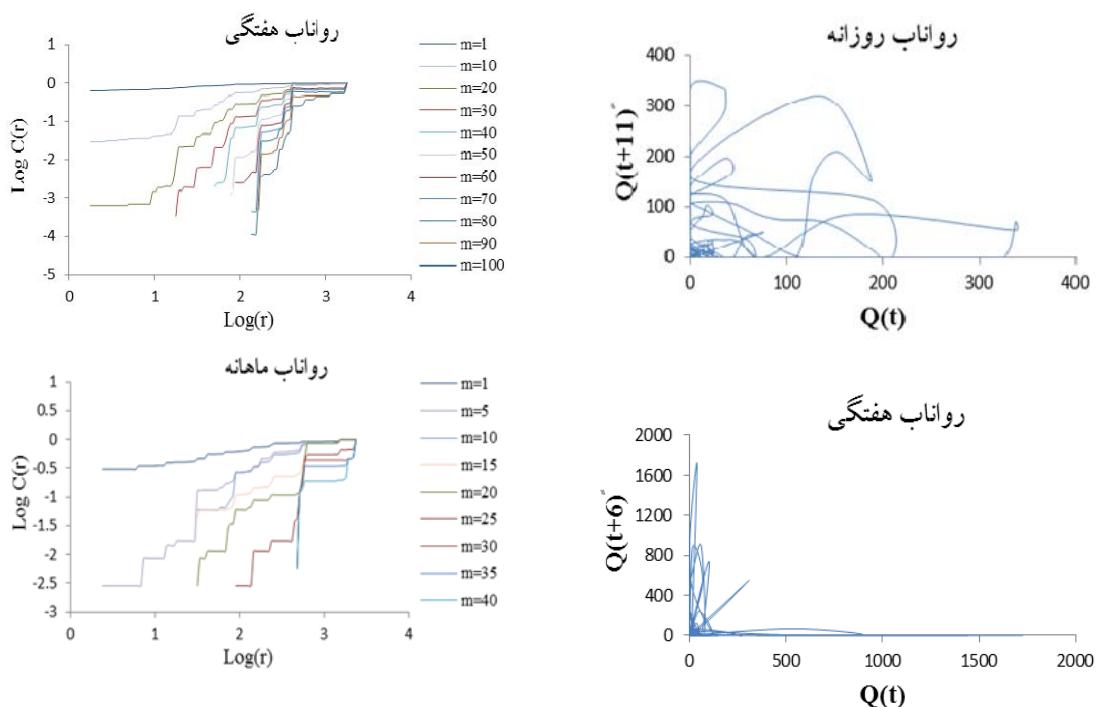
ترسیم داده‌های سری زمانی داخل فضای فاز امکان نمایش سری‌های زمانی را در یک حالت مکانی می‌دهد. درنهایت با توجه به مقادیر زمان تأخیر بهدست آمده از روش تابع اطلاعات متقابل در شکل (۵) نمودارهای فضای فاز دوبعدی سری زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی مختلف ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش مقیاس زمانی از روزانه تا ماهانه تفکیک‌پذیری خط سیرها کاهش یافته است.

همچنین  $P(t)$  رواناب در زمان  $t$  و  $P(t+n)$  رواناب در زمان  $t+n$  و مقدار زمان تأخیر می‌باشد.

هر یک از مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه رسم و در این تحقیق نقطه متناظر با اولین کمینه موضعی بهعنوان بعد محاط مناسب انتخاب گردیده است (شکل ۴).



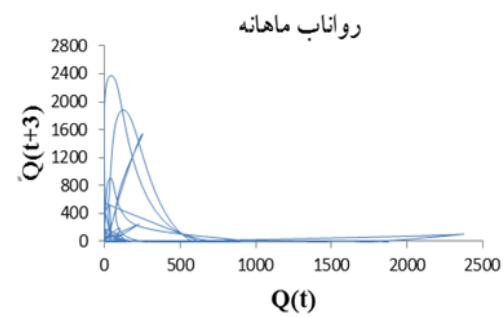
شکل ۳ نمودار تابع اطلاعات متقابل در مقیاس‌های زمانی مختلف، سری زمانی رواناب



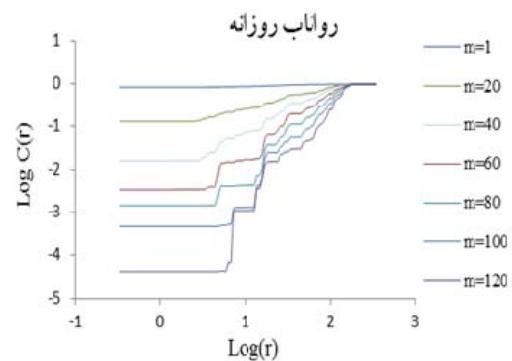
شکل ۶ نمودار مربوط به ارتباط میان تابع همبستگی ( $C(r)$ ) و شعاع  $r$  با افزایش بعد محاط ( $m$ ) در سری زمانی رواناب

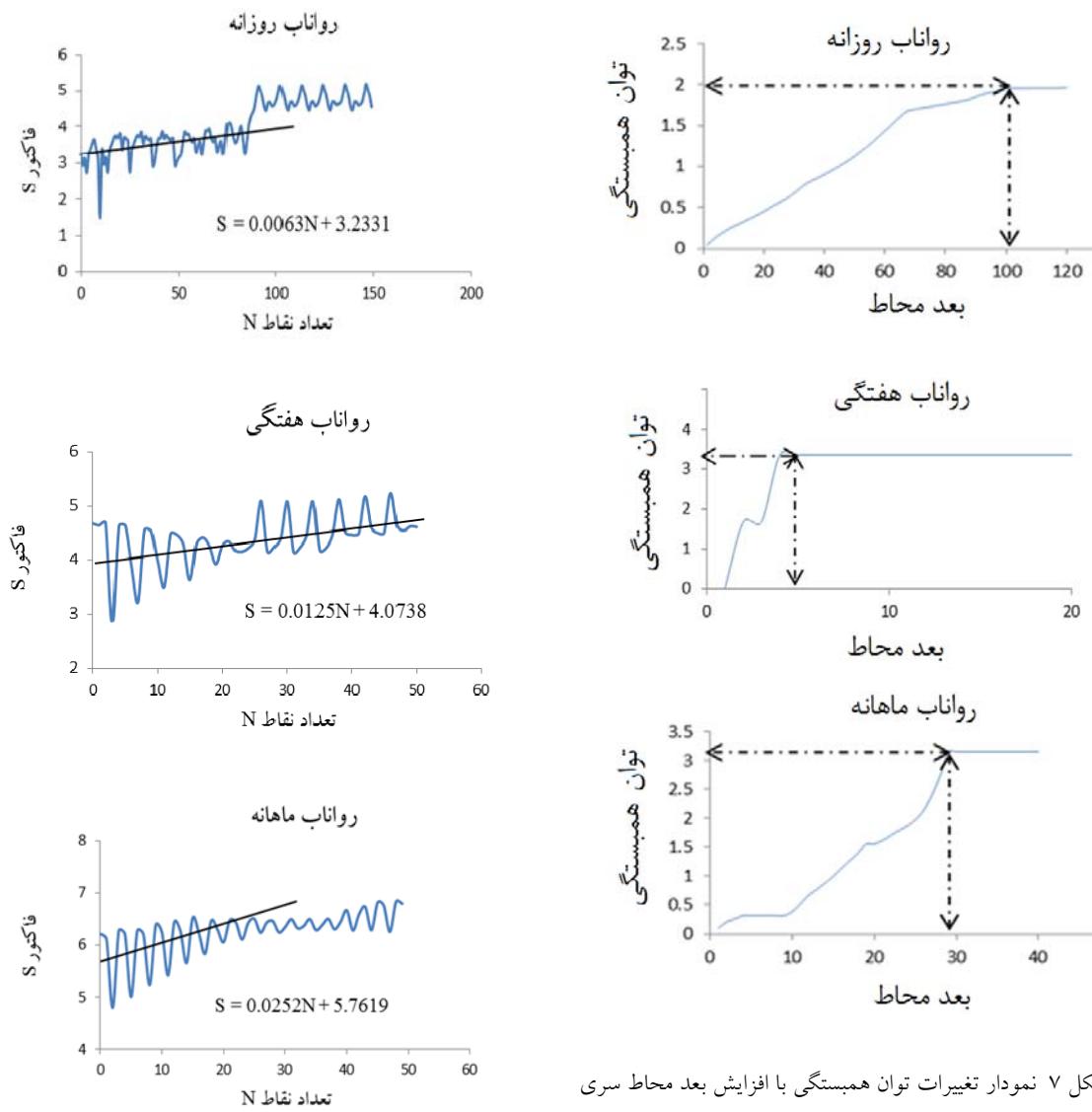
در این مرحله به منظور محاسبه تابع همبستگی رواناب در مقیاس‌های زمانی مختلف ابتدا نمودار تغییرات  $\log C(r)$  در مقابل  $\log(r)$  ترسیم می‌گردد. در نمودار شکل (۷)، بخش مسطحی در محدوده  $\log(r) > 0$ ، بخش مسطوحی در محدوده  $\log C(r)/\log(r) > 1$  مشاهده می‌شود که در آن نسبت  $\log C(r)/\log(r)$  به مقدار ثابتی می‌رسد، بنابراین ناحیه مقیاس‌گذاری را می‌توان در این محدوده انتخاب و مقدار بعد همبستگی موجود را محاسبه نمود. در ادامه به منظور تعیین بعد همبستگی، نمودار توان همبستگی رسم گردید (شکل (۶)).

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود مقادیر توان همبستگی به ازای سری زمانی رواناب در هر سه مقیاس با افزایش بعد محاط زیاد شده و در نقاطی خاص به مقدار اشباع رسیده است. اشباع توان همبستگی در مقدار معینی از بعد محاط، بیانگر امکان وجود دینامیک قطعی و رفتار آشوبناک در سیستم می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سری زمانی رواناب احتمالاً دارای رفتار آشوبناک می‌باشد.



شکل ۵ فضای فاز دو بعدی سری زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه (دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه)





شکل ۷ نمودار تغییرات توان همبستگی با افزایش بعد محاط سری زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی مختلف

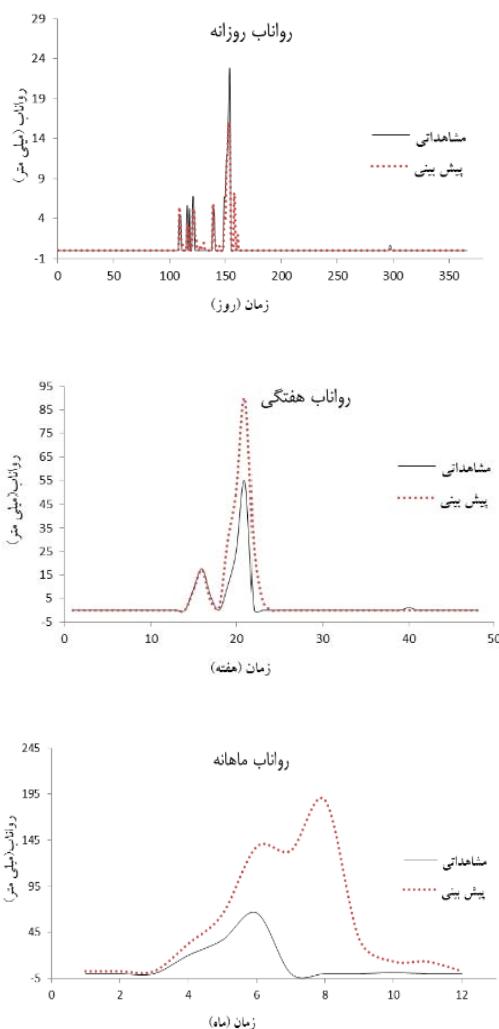
شکل ۸ نمودار مربوط به ماکزیمم نمای لیاپانوف سری زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه

در صورت مثبت بودن بزرگترین نمای لیاپانوف در سری زمانی مورد بررسی، آشوبناکی آن سری زمانی محتمل می‌باشد. افرون بر این از ماکزیمم نمای لیاپانوف برای برآورده افق پیش‌بینی سری‌های زمانی استفاده می‌شود. مقادیر افق پیش‌بینی ( $\Delta t$ ) برای سری‌های زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی مختلف با توجه به رابطه  $\Delta t = \frac{1}{\lambda}$ ، محاسبه شده و نتایج آن در جداول (۳) ارائه گردیده است.

نتایج به دست آمده از شکل (۷) در تعیین بعد همبستگی ۲ برای رواناب روزانه و ۴ برای رواناب هفتگی و ماهانه، همسو با مطالعات پیشین می‌باشد [۸,۹,۱۱,۱۹]. در ادامه بررسی آشوبناکی سری زمانی با استفاده از بزرگترین نمای لیاپانوف صورت پذیرفت. شکل (۸) منحنی‌های پارامتر فاکتور کشش (S) در مقابل تعداد نقاط (N) را نشان می‌دهد، مقدار بزرگترین نمای لیاپانوف ( $\lambda$ ) از برآش خط بر روی این منحنی‌ها براساس روش حداقل مربعات و تعیین شب آن صورت می‌پذیرد.

جدول ۴ مؤلفه‌های آماری مربوط به پیش‌بینی موضعی سری زمانی رواناب با ابعاد محاط مختلف در مقیاس‌های زمانی مختلف

مقیاس زمانی	بعد محاط	$r$	RMSD(m <sup>3</sup> /s)
روزانه	۹	۰/۹۳۴	۰/۷۷۰
	۱۰	۰/۹۴۰	۰/۷۲۹
	۱۱	۰/۹۳۸	۰/۷۴۴
هفتگی	۴	۰/۲۱۲	۲۴/۲۵۱
	۵	۰/۹۴۸	۶/۸۶۲
	۶	۰/۸۷۴	۱۷/۰۳۹
ماهانه	۵	۰/۱۴۲	۷۱/۹۸۷
	۶	۰/۳۷۸	۷۱/۳۸۰
	۷	۰/۳۲۰	۸۰/۱۰۱



شکل ۹ نمودار مقادیر مشاهداتی در مقابل بهترین مقادیر پیش‌بینی شده با روش موضعی در سری زمانی رواناب در ایستگاه پل کنه، مربوط به داده سال آبی ۱۳۷۸ - ۱۳۷۷

جدول ۳ مقادیر افق پیش‌بینی در مقیاس‌های زمانی مختلف سری زمانی رواناب

مقیاس	پل کنه	افق پیش‌بینی	بزرگ‌ترین نمای لیپانوف
روزانه	۰/۰۰۶۳	۱۵۸	
هفتگی	۰/۰۱۲۵	۸۰	
ماهانه	۰/۰۲۵۲	۳۹	

همان‌گونه که از نتایج جدول (۳) برミ آید، مقدار مثبت بزرگ‌ترین نمای لیپانوف در هر سه مقیاس تأییدی بر احتمال وجود رفتار آشوبناک در سری زمانی رواناب می‌باشد.

پس از بررسی‌های صورت گرفته و مشاهده رفتار آشوبناک در سری زمانی رواناب حال می‌توان به بررسی روش‌های پیش‌بینی موجود به‌منظور دست‌یابی به روشی مناسب برای پیش‌بینی این سری زمانی پرداخت که در تحقیق حاضر روش پیش‌بینی موضعی بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته است.

کلیه مراحل محاسبات پیش‌بینی برای سال آخر از سری داده‌های ۱۲ ساله، به عنوان دوره آزمون انجام گرفته است. به‌منظور فرآیند پیش‌بینی از مقادیر بعد محاط مختلف استفاده گردیده است، تا بهترین پیش‌بینی در بعد محاط مناسب به‌دست آید. در جدول (۴) مقادیر ضریب همبستگی ( $r$ ) و جذر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMSE) و بعد محاطی که بهترین پیش‌بینی به‌ازای آن صورت گرفته برای سری زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه ارائه شده است. همچنین نمودارهای مقایسه مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده نیز در شکل (۹) نشان داده شده است.

شد. در ادامه ضریب همبستگی ( $r$ ) و جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) در جدول (۵) و نمودارهای مقایسه مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده نیز در شکل (۱۰) ارائه گردیده است.

در انتها نتایج حاصل از پیش‌بینی با دو روش موضعی و شبکه عصبی در جدول (۶) مورد مقایسه قرار گرفته است.

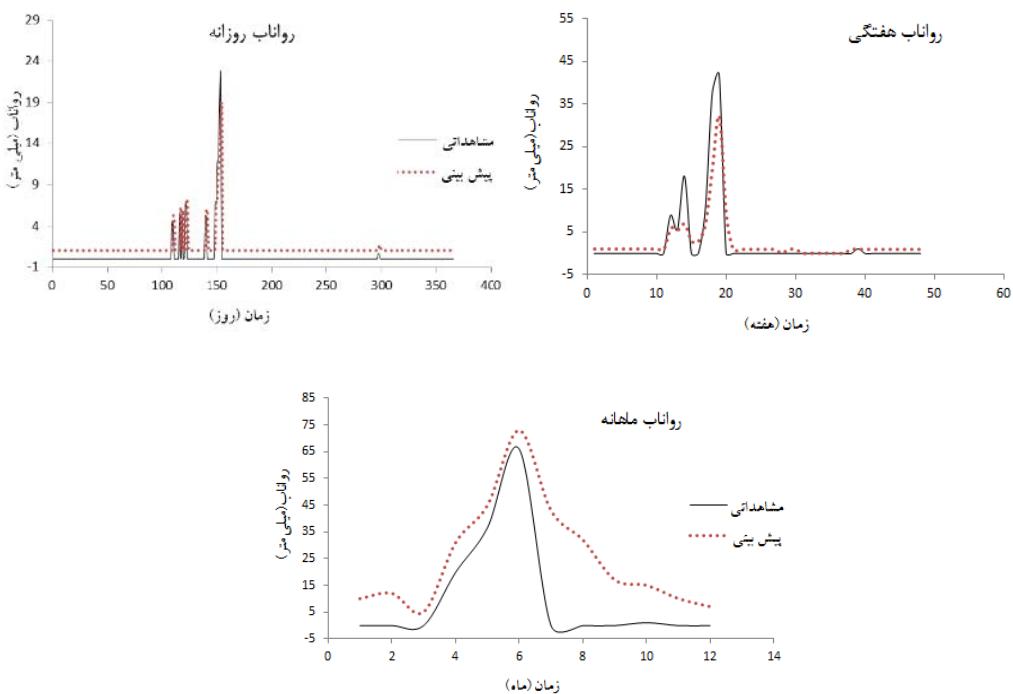
به‌منظور پیش‌بینی با شبکه عصبی مصنوعی، شبکه عصبی پیش‌خور چند لایه با یک لایه مخفی با الگوریتم آموزش لونبرگ-مارکوارد مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور مدل‌سازی، سال آخر به عنوان داده آزمون و مابقی سال‌ها به عنوان داده آموزش سیستم انتخاب گردید. به‌منظور تعیین بهترین معماری شبکه، محاسبات در چندین حالت متفاوت با توجه به روند افزایشی تعداد نرون‌های لایه میانی صورت پذیرفت و با بررسی میانگین مربعات خطای، بهترین ساختار شبکه تعیین

جدول ۵ پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی سری زمانی رواناب در مقیاس روزانه، هفتگی و ماهانه

مقیاس زمانی	الگوهای ورودی	تعداد نرون لایه مخفی	$r$	RMSE ( $m^3/s$ )
روزانه	$Q(t-1)$	۳	۰/۹۱۳	۰/۷۶
	$Q(t-1), Q(t-2)$	۴	۰/۹۲۱	۰/۷۹
	$Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)$	۵	۰/۹۱۵	۰/۷۷
هفتگی	$Q(t-1)$	۳	۰/۹۳۲	۸/۱۲
	$Q(t-1), Q(t-2)$	۴	۰/۹۴۱	۸/۰۳
	$Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)$	۵	۰/۹۱۷	۸/۸۹
ماهانه	$Q(t-1)$	۳	۰/۷۲۳	۳۲/۲۳
	$Q(t-1), Q(t-2)$	۵	۰/۷۵۸	۳۰/۴۸
	$Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)$	۶	۰/۷۴۳	۳۱/۹۶

جدول ۶ پارامترهای آماری مربوط به بهترین پیش‌بینی با استفاده از روش موضعی و شبکه عصبی مصنوعی، سری زمانی رواناب در مقیاس‌های زمانی مختلف

مقیاس	روش شبکه عصبی		روش موضعی		سری زمانی
	RMSE( $m^3/s$ )	$r$	RMSE( $m^3/s$ )	$r$	
روزانه	۰/۷۹	۰/۹۲۱	۰/۷۳	۰/۹۴۰	روزانه
	۸/۰۳	۰/۹۴۱	۷/۸۷	۰/۹۴۸	هفتگی
	۳۰/۴۸	۰/۷۵۸	۷۱/۳۸	۰/۳۷۸	ماهانه
رواناب					



شکل ۱۰ نمودار مقادیر مشاهداتی در مقابل بهترین مقادیر پیش‌بینی به دست آمده از روش شبکه عصبی در سری زمانی رواناب. در ایستگاه پل کهنه، مربوط به داده سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۷

پیشر و وجود بعد همبستگی و توان مثبت لیپاونوف نوید احتمال آشوبناک بودن سری زمانی را داده بودند. علت این تناقض را می‌توان در عدم قطعیت روش‌های تعیین خصوصیات دینامیکی یک سیستم قلمداد نمود که به این مسئله در بسیاری از مراجع اشاره شده است [۵, ۱۱]. به همین دلیل حصول اطمینان از وضعیت آشوبناکی یک سری زمانی نیازمند بررسی و کنکاش در شیوه‌های متفاوت بررسی دینامیک‌های یک سیستم است، به طوری که عدم احراز مثبت بودن آشوبی بودن یک سری زمانی در هر یک از روش‌های متداول، آشوبناک بودن آن سری را زیر سوال می‌برد. افزون بر دلایل فوق، یکی دیگر از علل بالقوه عدم احراز شرایط آشوبناکی رواناب در مقیاس ماهانه را باستفاده از روش پیش‌بینی موضعی می‌توان کمتر بودن تعداد داده‌های این سری نسبت به مقیاس روزانه و هفتگی برشمرد (جدول ۲)، چرا که یکی از مهم‌ترین شرایط بررسی وضعیت آشوبناکی یک سیستم دینامیک، تعداد داده‌های زیاد آن

باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول (۶) مشخص می‌شود که روش پیش‌بینی موضعی توانایی بیشتری در پیش‌بینی سری زمانی رواناب در مقیاس‌های روزانه و هفتگی ( $r=0/94$  و  $RMSE=0/73$  برای روزانه و  $r=0/95$  و  $RMSE=0/77$  برای هفتگی) نسبت به شبکه عصبی مصنوعی ( $r=0/92$  و  $RMSE=0/79$  برای هفتگی) داشته است. این در حالی است که شبکه عصبی مصنوعی ( $r=0/76$  و  $RMSE=0/48$ ) عملکرد بهتری نسبت به پیش‌بینی در مقیاس ماهانه نسبت به روش پیش‌بینی موضعی ( $r=0/38$  و  $RMSE=0/38$ ) نشان می‌دهد. علت این امر را می‌توان در عدم آشوبناک بودن سری زمانی رواناب در مقیاس ماهانه دانست چرا که عملکرد این روش در مقیاس بزرگ‌تر نسبت به مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر به شدت افت پیدا کرده است. اهتمام به بحث عدم آشوبناکی مقیاس ماهانه بااستفاده از روش پیش‌بینی موضعی از این بابت ضروری است که

عصبی مصنوعی انجام شد. به منظور پیش‌بینی با به کارگیری مفاهیم تئوری آشوب، از روش پیش‌بینی موضعی که متکی بر بازسازی فضای فاز سیستم دینامیک است بهره‌گیری شد. به منظور بازسازی فضای فاز سری زمانی روش تاکنز مبتنی بر محاسبه زمان تأخیر مناسب و بعد محاط مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته برتری روش پیش‌بینی موضعی را نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی در مقیاس‌های روزانه و هفتگی بیان می‌دارد که این امر مؤید وجود آشوب در مقیاس‌های فوق الذکر می‌باشد. شایان ذکر است که مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی رواناب ماهانه نسبت به روش پیش‌بینی موضعی توافق داشته است که این امر به علت ماهیت متفاوت این دو مدل غیرخطی در شیوه‌سازی سری زمانی می‌باشد، هم‌چنین این مسئله نشانه‌هایی را از عدم آشوبناکی رواناب در مقیاس ماهانه بیان می‌دهد.

می‌باشد. علاوه بر این لازم به ذکر است که مدل شبکه عصبی ساختاری متفاوت (جعبه سیاه) را برای فرآیند پیش‌بینی به کار می‌گیرد، لذا این مدل متأثر از وضعیت آشوبناکی داده‌ها نیست و عملکرد مناسب‌تری را در پیش‌بینی با مقیاس ماهانه از خود نشان داده است.

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به مدل‌سازی و پیش‌بینی سری زمانی رواناب در ایستگاه پل کنه حوضه آبریز قره‌سو با استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری آشوب و شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون پرداخته شد. در ابتدا آشوبناکی سری زمانی رواناب مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به نتایج حاصل، امکان وجود آشوب با استفاده از هر دو روش بعد همبستگی (ما بین ۲ تا ۴) و نمای لیپانف (وجود نمای مثبت) در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه مشاهده شد. هم‌چنین مدل سازی رواناب با استفاده از نظریه آشوب و شبکه‌های

### منابع

1. قبادیان، ر.، قربانی، م.ع.، خلچ، م.، "بررسی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در روندیابی سیالاب رودخانه زنگمار در مقایسه با روش موج دینامیکی"، نشریه آب و خاک، ۳(۲۷)، صص. ۵۹۲-۶۰۲. (۱۳۹۲).
2. ذونعمت کرمانی، م.، بای، ی.م.، "کارایی کارایی روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندمتغیره در پیش‌بینی کشند"، اقیانوس‌شناسی، ش. ۱۳، صص. ۱-۱۰. (۱۳۹۲).
3. Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Rajaee, T. "Performance of radial basis and LM-feed forward artificial neural networks for predicting daily watershed runoff", *Applied Soft Computing*, No. 13(12), pp. 4633-4644, (2013).
4. قربانی، م.ع.، اعلمی، م.ت.، یوسفی، پ.، اسدی، ح.، زینالی، ص.، "کارایی نظریه آشوب در پیش‌بینی میزان رسوبات معلق رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه لیقوان)", نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ش. ۴۱(۱)، صص. ۵۹-۶۶. (۱۳۹۰).
5. Ng, W.W., Panu, U.S., Lennox, W.C., "Chaos based Analytical techniques for daily extreme hydrological observations", *Journal of Hydrology* 342, pp. 17– 41, (2007).
6. Jayawardena A.W. "Runoff forecasting using a local approximation method", *Destructive Water*. No. 239, pp. 167-171, (1997).
7. Sivakumar, B., Berndtsson, R., Olsson, J., Jinno, K., Kawamura, A., "Dynamics of monthly rainfall-runoff process at the Gota basin: A search for chaos", *Hydrology & Earth System Sciences*, No. 4(3),

- pp. 407-417, (2000).
8. Sivakumar, B., Berndtsson, R., Persson, M., "Monthly runoff prediction using phase space reconstruction", *Hydrological Sciences Journal*, No. 46, pp. 377-387, (2001).
  9. Islam, M.N., Sivakumar, B., "Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view", *Advances in Water Resources*, No. 25, pp. 179–190, (2002).
  10. Kocak, K., Bali, A., Bektasoglu, B., "Prediction of Monthly Flows by Using Chaotic Approach", International congress on river basin management, Turkey, No. 4 (117), pp. 553-559, (2007).
  11. Hu, H., Huang, H., "Analysis of Chaotic Characters for the Monthly Runoff Series at Fudedian Station in Liaohe Bain", *Energy and Power Engineering*, No. 5, pp. 46-50, (2013).
  ۱۲. فرزین، س.، شیخ‌الاسلامی، س.، حسن‌زاده، ی.، "تحلیل آشوب پذیری سری زمانی با استفاده از ترسیم فضای فاز و روش بعد همبستگی (مطالعه موردی: رواناب ماهانه در دریاچه ارومیه)", چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، (۱۳۹۰).
  ۱۳. حسن‌زاده، ی.، لطف‌اللهی، مع.، شاهوردی، س.، فرزین، س.، فرزین، ن.، "نویززدایی و پیش‌بینی سری زمانی بر پایه الگوریتم موجک و نظریه آشوب (مطالعه موردی: شاخص پایش خشکسالی SPI شهر تبریز)", مجله تحقیقات منابع آب ایران, (۳)۸، ۱۳-۱، (۱۳۹۱).
  ۱۴. مرادی‌زاده، ف.، قربانی، م.، دین‌پژوه، ی.، فرسادی‌زاده، د.، "مدل تخمين جريان رودخانه بر اساس بازسازی فضای حالت آشوبی"، نشریه دانش آب و خاک, (۴)، ۱۶-۱، (۱۳۹۱).
  ۱۵. ائیس‌حسینی م.، ذاکرمشقق م.، "کاربرد نظریه آشوب در تحلیل فرآیند بارش-رواناب"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. زاهدان، (۱۳۹۲).
  16. Ghorbani, M.A., Jabbari, K. H., Asadi, H., Yousefi, P., "Application of Chaos Theory and Genetic Programming in Runoff Time Series", *International Journal of Structural and civil Engineering* 2, pp. 26-34, (2012).
  17. Jani, R., Ghorbani, M.A., Saghafian, B., Shamsaei, A., zahabion, B., "Dynamic Characteristics of Monthly Rainfall in Tabriz under Climate Change", *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, No. 3(4), pp. 225-233, (2013).
  ۱۸. شرکت آب منطقه‌ای غرب، گزارش زمین‌شناسی مطالعات ساماندهی رودخانه قره‌سو، (۱۳۸۵).
  19. Sivakumar, B., "Rainfall Dynamics at Different Temporal Scales: A Chaotic Perspective", *Hydrology and Earth System Sciences*, No. 5(4), pp. 645-651, (2001).
  20. Dhanya, C.T., Kumar, D.N., "Nonlinear ensemble prediction of chaotic daily rainfall". *Advances in Water Resources*, No. 33, pp. 327–347, (2010).
  21. Rodriguez-Iturbe, I., Dc Power, B.F., Sharifi, M.B., Georgakakos, K.P., "Chaos in Rainfall", *Water Resources Research*, No. 25(7), pp. 1667-1675, (1989).
  22. Wolff, R.C.L., "Local Lyapunov exponents: looking closely at chaos", *J. Royal Stat.* No. 54(2), pp. 353 371, (1992).
  23. Jayawardena, A.W., Lai, F., "Analysis and prediction of chaos in rainfall and stream flow time

- series", *Journal of Hydrology*. No. 153, pp. 23–52.
24. Rosenstein, M.T., Collins, J.J., De Luca, C.J., "A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets", *Physica D*, No. 65, pp. 117-134, (1993).
25. Shang, P., Li, X., Kamae, S., "Chaotic analysis of traffic time series", *Chaos, Solitons and Fractals* No. 25, pp. 121–128, (2005).
26. Kocak, K., Saylan, L., Eitzinger, J., "Nonlinear prediction of near-surface temperature via univariate and multivariate time series embedding", *Ecological Modelling*, No. 173, pp. 1–7, (2004).



**\* پیش‌بینی مقاومت نهایی تیورق‌های تحت اثر بار موضعی به کمک ماشین بودار پشتیبان (SVM)**  
**«یادداشت پژوهشی»**

علیرضا کردجزی<sup>(۱)</sup> فریدون پویا نژاد<sup>(۲)</sup> فرزاد شهابیان<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در سال‌های اخیر روش‌های یادگیری ماشین به طور گسترشده در مدل‌سازی مسائل علوم مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش ماشین بودار پشتیبان نیز یکی از روش‌های نسبتاً جدید یادگیری ماشینی است که در مدل‌سازی مسائل مهندسی به طور موقعيت‌آمیز مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از روش ماشین بودار پشتیبان برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیورق‌های تحت اثر بارهای موضعی استفاده شده است. بارهای موضعی یکی از انواع بارگذاری‌ها است که می‌تواند سبب بروز ناپایداری و گسیختگی تیورق‌ها شود. عوامل مهم و مؤثر در ناپایداری تیورق‌ها، از قبیل کمانش جان و بیال و ایجاد لهیادگی در محل اتصال بال به جان، باعث پیچیده شدن رفتار تیورق‌ها می‌شود. به همین دلیل نتایج روش‌های نیمه‌تجربی موجود و یا نتایج تحلیل این مسئله با روش اجزای محدود همواره با خطاها قابل توجهی همراه بوده است و نیاز به روش‌های کارآتر همچنان وجود دارد. در این مقاله از یک مجموعه داده شامل ۱۲۶ نمونه از نتایج آزمایش‌های موجود برای گسترش مدل ماشین بودار پشتیبان استفاده شده است. این داده‌ها از مقالات منتشرشده استخراج شده‌اند و هر نمونه شامل مشخصات هندسی تیورق، مشخصات بارگذاری و مشخصات مکانیکی مصالح تیورق می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های ارائه شده در این مقاله با مقادیر اندازه‌گیری شده، خطای متوسط کمتر از ۷٪ را بر روی نمونه‌های آزمایش نشان می‌دهد و درنهایت مقایسه نتایج مدل‌های ارائه شده در این مقاله با یک روش سنتی متأول، برتری مدل SVM را تأیید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی** تیورق‌ها، بارهای موضعی، ماشین بودار پشتیبان.

## Modeling the Patch Load Resistance of Plate Girders Using a Support Vector Machine

A. Kordjazi

F. Pooya Nejad

F. Shahabian

**Abstract** The support vector machine (SVM) is a relatively new machine learning method which is increasingly being applied to engineering problems and have yielded encouraging results. Because of complex behavior of elastoplastic of web panels of plate girders under patch loading, almost none of the proposed methods provides consistent and accurate predictions of patch load capacity. Consequently, alternative solutions are required to overcome these limitations. In this paper SVM models are developed for predicting the ultimate resistance of plate girders subjected to patch loading. The training and testing patterns of the proposed SVM models are based on well established experimental results taken from literature. Finally a comparison is made between predictions obtained from the SVM models and a traditional method for determining patch loading resistance. The comparison confirms that the SVM models developed in this paper, outperform the traditional method.

**Key Words** Plate Girders; Patch Loading; Support Vector Machine.

---

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۲/۵ تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۰/۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) نویسنده مسئول: استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

طراحی آنها بر کارایی مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و (۳) مقایسه نتایج مدل‌های ارائه شده در این مقاله با یک روش سنتی متداول در پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌ها.

### ماشین بردار پشتیبان

روش ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است. این روش دهه ۹۰ میلادی توسط واپنیک و همکارانش ارائه گردید [6]. برای کمینه کردن خطای مدل در این روش از اصولی که با عنوان کمینه‌سازی (Structural Risk Minimization) (SRM) شناخته می‌شوند، استفاده شده است. در حالی که سایر روش‌ها (مانند روش شبکه‌های عصبی مصنوعی) از اصول کمینه‌سازی ریسک تجربی (Empirical Risk Minimization (ERM)) بهره می‌برند [3,7].

به‌طور کلی ماشین بردار پشتیبان در مسائل طبقه‌بندی دو یا چند گروهه و رگرسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. مانند بسیاری از روش‌های یادگیری ماشینی، در این روش نیز فرآیند ساخت مدل شامل دو مرحله آموزش و آزمایش می‌باشد. در انتهای فاز آموزش قابلیت تعیین‌یابی مدل آموزش داده شده با استفاده از داده‌های آزمایش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در واقع ماشین بردار پشتیبان،تابع رگرسیون را با به‌کارگیری یک دسته تابع خطی تخمین می‌زند. در این تابع، انحراف مقادیر پیش‌بینی شده از مقدار واقعی به‌میزان  $\epsilon$  مجاز است (تابع تلفات (loss function)). در نهایت بهترین جواب به‌کمک اصول کمینه‌سازی ریسک ساختاری برروی ریسک اندازه‌گیری شده توسط تابع تلفات مورد استفاده، ارائه می‌شود [5].

حل مسئله رگرسیون در SVM برروی یک مجموعه از داده‌های  $\{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\} \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}$  به‌شکل رابطه (۱) می‌باشد که بتواند مقادیر خروجی را بر مبنای ورودی‌ها تخمین بزند.

### مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائلی که مهندسان سازه در طراحی تیرورق‌ها با آن روبه‌رو هستند، ناپایداری جان تیرورق تحت اثر آن بارهای موضعی است که در یک محدوده کوچک در بین سخت‌کننده‌های عرضی بر تیر اثر می‌کنند. رفتار پیچیده تیرورق‌ها تحت اثر بار موضعی باعث شده است استخراج یک رابطه کاملاً نظری برای تعیین بار نهایی تقریباً غیرممکن گردد. روش‌های نیمه تجربی و نتایج تحلیل به روش اجزای محدود برای این مسأله نیز با خطاهای قابل توجهی همراه بوده است. بدین ترتیب اختلاف نتایج حاصل از روابط تجربی-نظری و همچنین نتایج حاصل از تحلیل به روش اجزای محدود با نتایج آزمایش‌های موجود، نیاز به روش‌های دقیق‌تر را ایجاد می‌کند.

در دهه‌های اخیر روش‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی بسیاری از مسائل علوم به کار گرفته شده‌اند و نتایج حاصل از این روش‌ها سازگاری قابل توجهی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مقیاس واقعی پذیره موردنظر داشته است [1] و [2]. روش ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine (SVM)) نیز یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که در دهه ۹۰ میلادی ارائه گردید. باوجود این‌که روش ماشین بردار پشتیبان روشی نسبتاً جدید است، اما به‌طور گسترده در مدل‌سازی پذیره مهندسی به‌ویژه مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج رضایت‌بخشی به‌همراه داشته است [3,4,5].

در این پژوهش از روش ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌ها تحت اثر بارهای موضعی بر مبنای نتایج حاصل از آزمایش تیرورق‌های تحت اثر بار موضعی استفاده شده است. اهداف اصلی این مقاله عبارتند از: ۱) ارائه و گسترش مدلی قابل اطمینان برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌های تحت اثر بار موضعی با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان، ۲) ارزیابی اثر توابع کرنل مختلف و مقادیر پارامترهای

$$L(\alpha^*, \alpha) = -\varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* + \alpha_i) + \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) (x_i \cdot x_j) \quad (3)$$

با بیشینه شدنتابع فوق تحت قیدهای زیر، مقادیر ضرایب  $\alpha^*, \alpha$  به دست می آیند. این ضرایب، ضرایب لاغرانژ نامیده می شوند.

$$\begin{cases} \sum \alpha_i^* = \sum \alpha_i \\ 0 \leq \alpha_i^* \leq C \\ 0 \leq \alpha_i \leq C \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

در این روابط،  $L$  = تابع لاغرانژ،  $C$  = پارامتر جریمه یا پارامتر تنظیم می باشد.  
نکته قابل توجه آن است که مسئله بهینه سازی فوق قابل حل به کمک روش های Quadratic Programming (QP) می باشد، در نتیجه رسیدن به بیشینه (یا کمینه) مطلق نیز قطعی خواهد بود و خطر به دام افتادن در بیشینه (یا کمینه) محلی وجود ندارد [7].  
بدین ترتیب پاسخ نهایی به صورت زیر خواهد بود  
[3]

$$w_0 = \sum_{\text{support vectors}} (\alpha_i^* - \alpha_i) x_i \quad (5)$$

$$b_0 = -\left(\frac{1}{2}\right) w_0 \cdot [x_r + x_s] \quad (6)$$

$$f(x) = \sum_{\text{support vectors}} (\alpha_i^* - \alpha_i) (x_i - x) + b_0 \quad (7)$$

در این روابط،  $x$  بردار ورودی که مدل با آن آموخت داده می شود،  $x_r$  بردار ورودی،  $x_s$  دو بردار پشتیبان،  $w_0$  بردار وزن بهینه،  $b_0$  مقدار بهینه بایاس می باشد.  
داده هایی که ضرایب لاغرانژ متناظر با آنها غیر صفر باشد، به عنوان بردار پشتیبان شناخته می شوند. از نظر

$$f(x) = \langle w \cdot x \rangle + b \quad (1)$$

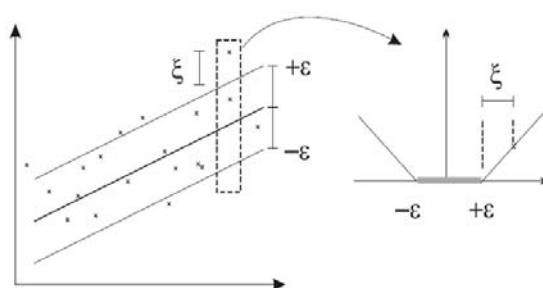
در مجموعه داده ها و رابطه (1)،  $l$  = تعداد نمونه،  $x \in R^m$  بردار ورودی ( $x \in R^m$ ،  $y \in R$ )،  $w \in R^m$  بردار وزن ( $w \in R^m$ ،  $b \in R$ ) می باشد.

با استفاده از تابع تلفات، پارامترهای کنترل کننده تابع پاسخ بهینه در SVM؛ یعنی تابع وزن و بایاس، با حل مسئله بهینه سازی زیر حاصل می شوند [7]

$$\text{Minimize } \Phi(w, \zeta^*, \zeta) = \frac{\|w\|^2}{2} + C \left( \sum \zeta_i^* + \sum \zeta_i \right) \quad (2-\text{الف})$$

$$\begin{aligned} & y_i - (\langle w \cdot x_i \rangle + b) \leq \zeta_i \\ \text{Subject to} \quad & (\langle w \cdot x_i \rangle + b) - y_i \leq \zeta_i^* \\ & \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0 \\ & i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (2-\text{ب})$$

در این رابطه،  $\varepsilon$  خطای مورد قبول در تابع تلفات (شکل 1)،  $\|w\|^2$  نرم بردار وزن (مقدار آن می باشد)،  $\zeta$ ،  $\zeta^*$  = متغیرهای slack هستند که به همراه تابع تلفات در شکل (1) نشان داده شده اند.



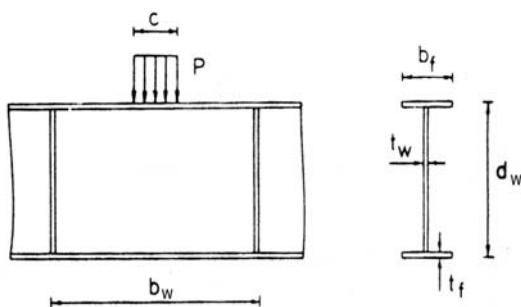
شکل ۱ تابع تلفات و متغیرهای آن [7]

براساس تئوری لاغرانژ، مسئله بهینه سازی رابطه (2) قابل تبدیل به تابع لاغرانژ می باشد:

آن فضا امکان استفاده از رگرسیون خطی وجود داشته باشد. تاکنون توابع کرنل گوناگونی معرفی شده‌اند که در این میان می‌توان به کرنل‌های چندجمله‌ای (function Radial Basis) و پایه شعاعی (Polynomial) اشاره کرد [7].

### تیرورق‌ها

تیرورق‌ها از سطوح بزرگی از ورق با ضخامت کم به عنوان جان تیرورق تشکیل شده‌اند. این سطوح از یکسو بین بالهای بالا و پایین و از سوی دیگر بین سخت‌کنده‌های عرضی (قائم) محصور می‌باشند (شکل ۲).



شکل ۲ نمایش تیرورق.  $b_w$  عرض جان تیرورق،  $d_w$  ارتفاع جان تیرورق،  $t_w$  ضخامت جان،  $b_f$  عرض بال،  $t_f$  ضخامت بال،  $c$  عرض بارگذاری

پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌ها برای جلوگیری از ناپایداری ورق جان تحت اثر بارهایی که در یک محدوده کوچک در بین سخت‌کنده‌های عرضی بر تیس اثر می‌کنند (بارهای موضعی)، یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که مهندسان با آن روبرو هستند. عوامل مهم مؤثر در ناپایداری تیرورق‌ها از قبیل کمانش جان و بال و ایجاد لهیدگی در محل اتصال بال به جان باعث پیچیده شدن رفتار تیرورق‌های تحت اثر بارهای موضعی می‌شود. این پدیده باعث شده است که به دست آوردن

هندرسی این داده‌ها دارای خطای پیش‌بینی بزرگ‌تر از  $\pm$  هستند، بنابراین بردارهای پشتیبان درون بازه  $C$  قرار نمی‌گیرند و مقدار  $C$  تعداد بردارهای پشتیبان را کنترل می‌کند [5]. با توجه به رابطه (۵) مشاهده می‌شود که داده‌هایی که ضریب لاگرانژ آنها صفر هستند، نقشی در پاسخ نهایی ندارند، به سخن دیگر بردارهای پشتیبان هستند که تابع رگرسیون نهایی با پاسخ بهینه را تعیین می‌کنند.

برای ساخت مدل ماشین بردار پشتیبان، پارامترهای  $C$  و  $\gamma$  توسط کاربر تعریف می‌شوند. پارامتر  $C$  یک پارامتر تنظیمی است و می‌تواند مقادیر صفر تا بی‌نهایت را پیذیرد. وقتی به این پارامتر مقادیر بزرگی اختصاص داده شود، SVM اجازه وقوع خطای در داده‌های آموزش نمی‌دهد و نتیجه حاصل یک مدل پیچیده خواهد بود، لذا قابلیت تعمیم‌یابی مدل کاهش می‌یابد. از طرف دیگر وقتی که  $C$  به سمت صفر میل کند، مدل می‌تواند خطای زیادی را پیذیرد، درنتیجه پیچیدگی مدل کمتر خواهد بود [5,8].

پارامتر  $\gamma$  نیز می‌تواند مقادیر صفر تا بی‌نهایت را پیذیرد. مقدار این پارامتر در وضعیت بردارهای پشتیبان و درنتیجه کارایی مدل بسیار مؤثر است. هر چند که انتخاب مقادیر بسیار بزرگ  $\gamma$  سبب کاهش تعداد بردارهای پشتیبان می‌شود و مطلوب نیز چنین است- اما رسیدن به این هدف با عریض کردن بازه  $C$  نادرست است. از طرف دیگر مقادیر بسیار کوچک این پارامتر، موجب می‌شود تا تعداد زیادی بردار پشتیبان انتخاب شود و احتمال خطر بیش‌آموزش (Overfitting) شدن افزایش می‌یابد [5].

مسئله رگرسیون خطی در SVM به‌آسانی قابل گسترش به رگرسیون غیرخطی است. بدین منظور از توابع کرنل استفاده می‌شود. توابع کرنل، داده‌ها را به یک فضای ویژگی (Feature Space) نگاشت می‌کنند که در

آزمایشگاهی در زمینه رفتار تیرورق‌های تحت اثر بار موضعی [10,12,13]، مشاهده می‌شود که هندسه تیرورق، عرض بارگذاری و مشخصات مکانیکی مصالح تیرورق (شامل مدول یانگ و تنش تسیلیم مصالح) مهم‌ترین پارامترها در تعیین مقاومت نهایی تیرورق‌های تحت اثر بار موضعی هستند.

از این‌رو، پارامترهای ورودی مدل SVM به‌شکل زیر در نظر گرفته شده‌اند:

(۱) عرض جان تیرورق ( $b_w$ )

(۲) ارتفاع جان تیرورق ( $d_w$ )

(۳) ضخامت جان ( $t_w$ )

(۴) عرض بال ( $b_f$ )

(۵) ضخامت بال ( $t_f$ )

(۶) عرض بارگذاری ( $c$ )

(۷) حد جاری شدن جان ( $\sigma_w$ )

(۸) حد جاری شدن بال ( $\sigma_f$ )

تنها خروجی این مدل نیز مقاومت نهایی تیرورق ( $P_u$ ) است.

**آماده‌سازی داده‌ها.** برای گسترش یک مدل ماشین بردار پشتیبان، داده‌ها به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم‌بندی می‌شوند. در این مقاله تعداد ۱۰۰ نمونه از کل داده‌ها (حدود ۸۰٪) برای آموزش و بقیه داده‌ها شامل ۲۶ نمونه برای ارزیابی کارایی مدل مورد استفاده قرار گرفته شده است. سعی شده است تا مشخصات آماری هر یک از پارامترهای ورودی مجموعه آموزش و مجموعه آزمایش نظیر میانگین و انحراف معیار به یکدیگر نزدیک باشند. در جدول (۱) مشخصات آماری داده‌ها شامل میانگین، انحراف استاندارد، کمینه و بیشینه و دامنه داده‌ها، ارائه شده است.

یک رابطه کاملاً نظری برای تعیین بار نهایی غیرممکن گردد. محققانی که در این زمینه فعالیت داشته‌اند، کم و بیش از نتایج و مشاهدات تجربی خود استفاده کرده و رابطه‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند که در بهترین حالات خطای حداکثری بیش از ۲۰ درصد داشته است. تحلیل به‌روش اجزای محدود نیز به‌علت عدم امکان صحیح اعمال تغییر شکل‌ها و تنش‌های اولیه ناشی از ساخت تیرورق بسیار مشکل و با خطا همراه بوده است [۱] و [۲].

کچام و درافین در سال ۱۹۳۲ و همچنین لیز و گودفری در سال ۱۹۳۵ جزء اولین کسانی بودند که آزمایش‌هایی را به منظور بررسی مقاومت تیرورق‌ها تحت اثر بارهای موضعی انجام دادند [۷]. از سال ۱۹۶۰ به بعد افراد زیادی نظیر گرانهلم، برگفلت، اسکالود، راکی و رابرتس در این زمینه تحقیق و بررسی‌هایی را انجام داده‌اند. مجموعه کاملی از روش‌های پیشنهادی و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط این محققان جمع‌آوری و گزارش گردیده است [۹,10,11].

## طراحی مدل

**داده‌های مورد استفاده.** در این مقاله برای گسترش مدل ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌های تحت اثر بارهای موضعی از یک مجموعه داده شامل ۱۲۶ نمونه استفاده شده است. هر نمونه در برگیرنده مشخصات هندسی و مکانیکی تیرورق و نتایج آزمایشگاهی تیرورق‌های تحت اثر بارهای موضعی می‌باشد. داده‌های مورد استفاده در این مقاله از پژوهش‌های منتشر شده استخراج شده‌اند [۱0,12,13].

دست‌یابی به یک مدل کارآمد برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌های تحت اثر بارهای موضعی نیازمند شناسایی پارامترهای مؤثر در مقاومت نهایی این عناصر می‌باشد. با بررسی نتایج مطالعات تئوری و

جدول ۱ مشخصات آماری مجموعه داده‌های مورد استفاده در گسترش مدل SVM

متغیرهای مدل و مجموعه داده‌ها	شاخص‌های آماری				
	میانگین	انحراف استاندارد	کمینه	بیشینه	دامنه
$b_w$ (mm)					
مجموعه آموزش	1253.24	1460.66	300	9800	9500
مجموعه آزمایش	1237.69	838.79	400	3000	2600
$d_w$ (mm)					
مجموعه آموزش	585.25	225.66	250	1000	750
مجموعه آزمایش	650.38	221.48	250	1000	750
$t_w$ (mm)					
مجموعه آموزش	2.89	1.42	0.99	9.95	8.96
مجموعه آزمایش	2.79	1.58	0.99	9.95	8.96
$b_f$ (mm)					
مجموعه آموزش	142.51	70.37	45	300	255
مجموعه آزمایش	160.96	68.40	50	300	250
$t_f$ (mm)					
مجموعه آموزش	10.72	5.69	3.05	30.5	27.45
مجموعه آزمایش	10.83	5.03	3.05	24.6	21.55
$c$ (mm)					
مجموعه آموزش	70.20	43.46	30	200	170
مجموعه آزمایش	68.46	49.69	40	200	160
$\sigma_w$ (N/mm <sup>2</sup> )					
مجموعه آموزش	255.70	41.93	178	354	176
مجموعه آزمایش	255.88	46.44	192	354	162
$\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> )					
مجموعه آموزش	273.42	25.42	221	347	126
مجموعه آزمایش	271.15	24.16	221	305	84
$P_{ex}$ (kN)					
مجموعه آموزش	106.20	114.19	8.45	787	778.55
مجموعه آزمایش	104.79	134.85	10.8	738	727.2

کرنل پایه شعاعی (یا RBF)، چندجمله‌ای و تابع کرنل پیرسون (Pearson VII kernel function) استفاده می‌شود. این کرنل‌ها در روابط زیر تعریف شده‌اند [3].

$$K(x, x_i) = \exp(-|x - x_i|^2 / 2\sigma^2) \quad (8)$$

$$K(x, x_i) = 1 / \left[ 1 + \left( 2 \sqrt{\|x_i - x_j\|^2} \sqrt{2^{(\beta_0)} - 1} / \sigma' \right)^2 \right]^\omega \quad (9)$$

پیش از شروع آموزش مدل، داده‌ها به بزرگترین مقدار متناظر شان تقسیم شده‌اند تا به مقدارهای بین صفر و یک مقیاس شوند. به این ترتیب اثر مقیاس واقعی (Absolute Scale) کمینه شده و همه ورودی‌ها تقریباً در یک دامنه قرار گرفته‌اند [14].

آموزش مدل و انتخاب معیارهای ارزیابی مدل. به منظور گسترش مدل‌های غیرخطی SVM از توابع

در این رابطه‌ها،  $y_j = \text{مقدار خروجی اندازه‌گیری شده (مطلوب)}_j$ ،  $d_j = \text{مقدار خروجی مدل (پیش‌بینی شده)}_j$ ،  $C_{y_j d_j} = \text{کواریانس میان خروجی مدل و خروجی اندازه‌گیری شده}_j$ ،  $\sigma_y = \text{انحراف استاندارد خروجی اندازه‌گیری شده}_j$ ،  $\sigma_d = \text{انحراف استاندارد خروجی مدل}_d$ ،  $\bar{y} = \text{میانگین خروجی‌های اندازه‌گیری شده}_d$ ،  $\bar{d} = \text{میانگین خروجی‌های مدل}_d$ ،  $n = \text{تعداد داده‌ها}$  می‌باشد.

در صورتی که مقدار قدر مطلق ضریب همبستگی بزرگ‌تر از  $1/8$  باشد، بنا بر اسمیت [16]، همبستگی قوی میان دو مجموعه داده وجود دارد. از آنجا که در محاسبه RMSE، خطاهای بزرگ‌تر اهمیت بیشتری نسبت به خطاهای کوچک می‌باشد، به متداول‌ترین معیار برای اندازه‌گیری خطا تبدیل شده‌اند [15, 17].

## نتایج

در این پژوهش سه مدل ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیزورق‌های تحت اثر بارهای موضعی ارائه شده است. مدل اول با استفاده از یک تابع کرنل پایه شعاعی (RBF) و مدل‌های دیگر به کمک توابع کرنل پیرسون و چندجمله‌ای گسترش داده می‌شود. برای رسیدن به مدل بهینه، با ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای  $C$ ،  $\sigma$  و  $\sigma_d$  در تابع پیرسون و  $d$  در کرنل چندجمله‌ای)، مدل ماشین بردار پشتیبان بر روی داده‌های آموزش گسترش داده شده است. برای ارزیابی کارایی این مدل‌ها، از مجموعه داده‌های آزمایش، استفاده شده است.

نتایج ارزیابی هر یک از مدل‌ها به‌ازای تغییرات مقادیر  $\sigma$  در حالی که سایر پارامترها ثابت هستند در جدول (۲) ارائه شده است. این جدول در برگیرنده تعداد بردارهای پشتیبان بر روی مجموعه آموزش و مقادیر ضریب همبستگی و ریشه دوم میانگین مربعات خطاهای بر روی مجموعه داده‌های آزمایش می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش  $C$ ، تعداد بردار پشتیبان کاهش می‌باید، اما همان‌طور که گفته شده است، در

$$K(x, x_i) = (\langle x, x_i \rangle + 1)^d \quad (10)$$

در روابط بالا،  $\sigma = \text{عرض کرنل با پایه شعاعی}$ ،  $\sigma' = \text{عرض کرنل پیرسون}$ ،  $\sigma_d = \text{فاکتور دنباله در تابع کرنل پیرسون}$ ،  $d = \text{توان چند جمله‌ای می‌باشد}$ . مقادیر پارامترهای کرنل‌های فوق توسط کاربر تعیین می‌شوند.

در این پژوهش برای آموزش مدل و ارزیابی آن بر روی داده‌های آزمایش از جعبه‌ابزار SVM در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. پس از اتمام فرآیند آموزش مدل، عملکرد آن توسط داده‌هایی که در فرآیند آموزش استفاده نشده‌اند (داده‌های آموزش) ارزیابی می‌شوند. نتایج ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل SVM به کمک شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی (Coefficient of Correlation) و ریشه میانگین (Root Mean Square Error) (RMSE) ارائه شده است. ضریب همبستگی معیاری است برای اندازه‌گیری همبستگی نسبی میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده و از رابطه زیر بدست می‌آید [15].

$$R = \frac{C_{y_j d_j}}{\sigma_{y_j} \sigma_{d_j}} \quad (10)$$

که در آن

$$\begin{aligned} C_{y_j d_j} &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})(d_j - \bar{d}) \\ &= \frac{1}{n-1} \left( \sum_{j=1}^n y_j d_j - \frac{\sum_{j=1}^n y_j \sum_{j=1}^n d_j}{n} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sigma_{y_j} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$\sigma_{d_j} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (13)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{n} \quad (14)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{n} \quad (15)$$

با بررسی مدل‌های گسترش‌یافته با تابع کرnel پایه شعاعی، مشاهده می‌شود مدلی که در آن عرض تابع کرnel (۱) برابر با  $1/5$  است و سایر پارامترهای مدل (یعنی  $\epsilon$  و  $C$ ) به ترتیب  $0.007$  و  $150$  انتخاب شده‌اند، با داشتن کمترین مقدار خطا ( $RMSE=5.86 \text{ kN}$ ) و بیشترین مقدار ضریب همبستگی ( $R=0.999$ ) بر روی داده‌های آزمایش، بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. در نهایت در مدل‌هایی که با استفاده از تابع کرnel چندجمله‌ای گسترش داده شده است، مقدار بهینه درجه تابع کرnel چندجمله‌ای  $1/9$  تعیین می‌شود و کاراترین مدل بهازای مقادیر  $0.005$  و  $C=20$  بر روی داده‌های آزمایش، ضریب همبستگی  $R=0.999$  و  $RMSE=6.21 \text{ kN}$  را ارائه می‌دهد.

فرآیند رسیدن به پاسخ بهینه، کاهش تعداد بردار پشتیبان با افزایش مقدار  $\epsilon$  تا حد معینی مؤثر است و رسیدن به کمترین خطأ در پیش‌بینی و بیشترین همبستگی با مقادیر واقعی الزاماً با افزایش  $\epsilon$  برآورده نمی‌گردد. به طور مشابه با جدول (۲)، نتایج ارزیابی مدل‌های گوناگون بهازای تغییرات پارامتر جریمه ( $C$ ) در جدول (۳) خلاصه شده است.

با توجه به جدول‌های (۲) و (۳)، در میان مدل‌هایی که با تابع کرnel پیرسون گسترش داده شده‌اند، مدل با  $C=500$ ،  $\epsilon=0.006$  و پارامترهای کرnel  $\sigma'=5$  و  $\omega=3$  کمترین مقدار ( $5.79 \text{ kN}$ )  $RMSE$  را بهازای داده‌های آزمایش نشان می‌دهد و درنتیجه در میان مدل‌های گسترش داده با این کرnel، مدل بهینه می‌باشد.

جدول ۲ ارزیابی مدل به ازای مقادیر گوناگون پارامتر  $\epsilon$

تابع کرnel پایه شعاعی $C=150$ & $\sigma=1.5$				تابع کرnel پیرسون $C=500$ ; $\omega=3$ & $\sigma'=5$				تابع کرnel چندجمله‌ای $C=20$ & $d=2.5$			
$\epsilon$	Nsv	R	RMSE	$\epsilon$	Nsv	R	RMSE	$\epsilon$	Nsv	R	RMSE
0.001	93	0.999	7.59	0.001	98	0.999	7.09	0.001	95	0.998	8.04
0.002	90	0.999	7.33	0.002	92	0.999	6.74	0.002	91	0.998	7.81
0.003	86	0.999	6.80	0.003	87	0.999	6.44	0.003	87	0.999	7.59
0.004	78	0.999	6.17	0.004	76	0.999	6.10	0.004	80	0.999	6.98
0.005	73	0.999	6.26	0.005	74	0.999	6.10	0.005	75	0.999	6.21
0.006	69	0.999	6.17	0.006	74	0.999	5.79	0.006	74	0.999	6.47
0.007	64	0.999	5.86	0.007	68	0.999	5.92	0.007	69	0.999	6.97
0.008	66	0.999	6.10	0.008	66	0.999	6.47	0.008	67	0.999	7.53
0.009	61	0.999	6.90	0.009	62	0.999	7.02	0.009	67	0.998	8.29
0.01	59	0.998	7.58	0.01	59	0.998	7.64	0.01	64	0.998	9.72
0.02	36	0.997	11.90	0.02	37	0.997	10.92	0.02	39	0.997	13.17
0.03	25	0.993	17.36	0.03	26	0.993	16.94	0.03	29	0.993	19.10
0.04	17	0.989	19.73	0.04	15	0.990	18.73	0.04	17	0.991	18.39
0.05	15	0.982	25.11	0.05	13	0.984	23.92	0.05	12	0.989	20.32
0.06	11	0.975	29.41	0.06	10	0.977	28.53	0.06	9	0.989	24.42
0.07	5	0.974	30.44	0.07	5	0.973	31.78	0.07	9	0.989	30.23
0.08	6	0.974	32.93	0.08	5	0.973	34.47	0.08	9	0.988	37.60
0.09	6	0.975	37.43	0.09	5	0.974	39.21	0.09	7	0.988	45.29
0.1	8	0.975	43.41	0.1	5	0.974	45.36	0.1	8	0.988	53.27

نرم‌افزار RMSE و R به ترتیب تعداد بردارهای پشتیبان، ضریب همبستگی و ریشه دوم میانگین مربعات خطاهای می‌باشند.

جدول ۳ ارزیابی مدل بهازی مقادیر گوناگون پارامتر C

تابع کرنل پایه‌شعاعی $\epsilon=0.007 \text{ & } \sigma=1.5$				تابع کرنل پیرسون $\epsilon=0.006 ; \omega=3 \text{ & } \sigma'=5$				تابع کرنل چندجمله‌ای $\epsilon=0.005 \text{ & } d=2.5$			
C	Nsv	R	RMSE	C	Nsv	R	RMSE	C	Nsv	R	RMSE
0.001	94	-0.393	146.77	0.001	95	-0.379	146.51	0.001	99	0.707	120.34
0.01	98	0.550	134.37	0.01	98	0.530	135.25	0.01	81	0.983	62.92
0.1	84	0.902	99.24	0.1	92	0.834	111.25	0.1	76	0.998	10.38
0.5	67	0.976	66.66	0.5	77	0.965	76.12	0.5	74	0.998	8.33
1	65	0.983	52.52	1	70	0.979	62.78	1	74	0.998	8.75
5	73	0.998	12.12	5	73	0.994	27.68	5	80	0.998	9.05
10	67	0.999	8.58	10	75	0.998	11.85	10	78	0.998	8.10
15	67	0.999	8.00	15	73	0.998	9.55	15	74	0.999	6.83
20	67	0.999	7.65	20	72	0.999	8.64	20	75	0.999	6.21
25	64	0.999	7.41	25	69	0.999	8.22	25	77	0.999	6.61
50	65	0.999	6.97	50	71	0.999	7.55	50	78	0.998	7.50
80	65	0.999	6.58	80	71	0.999	7.56	80	74	0.998	9.36
100	64	0.999	6.51	100	70	0.999	7.32	100	73	0.997	10.55
125	63	0.999	6.05	125	68	0.999	7.02	125	74	0.996	11.72
150	64	0.999	5.86	150	69	0.999	6.60	150	77	0.996	11.87
175	68	0.999	5.88	175	68	0.999	6.31	175	76	0.996	12.13
200	68	0.999	5.91	200	67	0.999	6.24	200	77	0.996	12.41
300	68	0.999	6.25	300	69	0.999	6.14	300	75	0.994	14.86
400	66	0.999	6.50	400	70	0.999	5.84	400	74	0.993	16.08
500	69	0.999	6.95	500	74	0.999	5.79	500	78	0.992	17.27
600	68	0.998	7.43	600	74	0.999	5.95	600	77	0.992	18.25
700	66	0.998	7.99	700	71	0.999	6.07	700	79	0.991	19.55
1000	65	0.997	10.25	1000	73	0.999	6.35	1000	81	0.987	22.86

جدول ۴ مقادیر پارامترهای مدل‌های بهینه و تعداد بردارهای پشتیبان

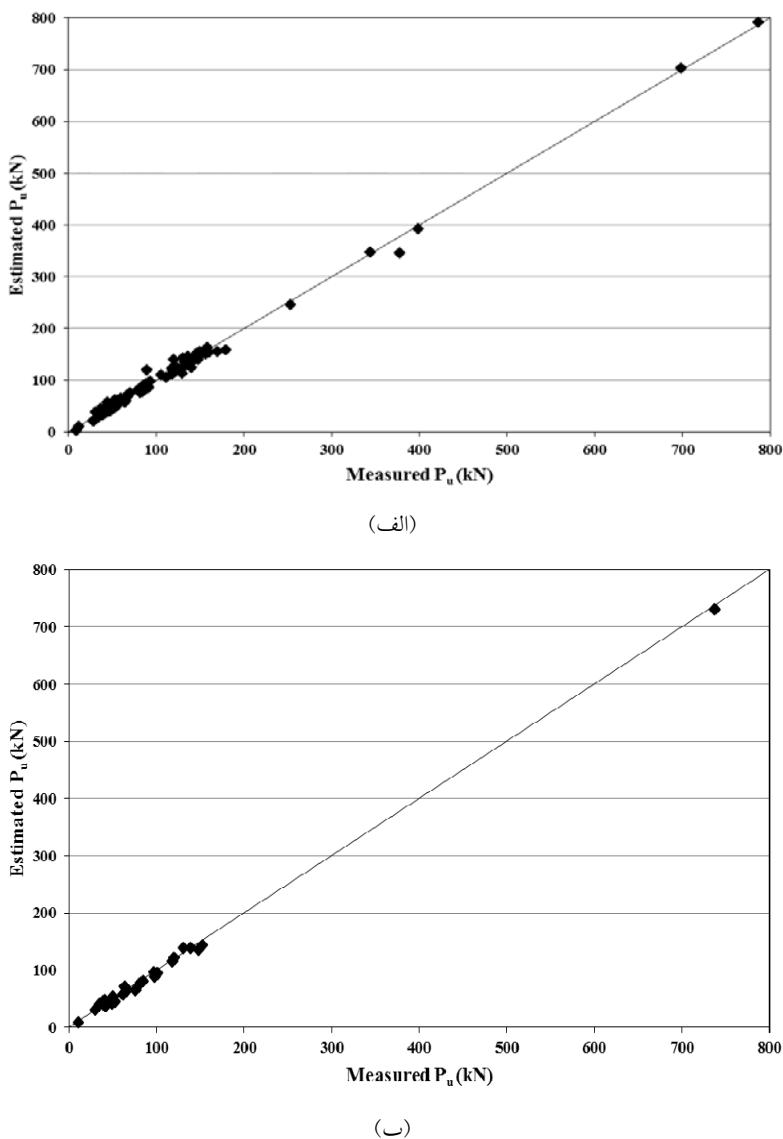
مدل (توجه به کرنل مورد استفاده با)	کرنل پارامتر	مقدار بهینه C	مقدار بهینه ε	بردارهای پشتیبان تعداد
تابع کرنل پایه‌شعاعی	$\sigma = 1.5$	150	0.007	64
تابع کرنل پیرسون	$\sigma' = 5 ; \omega = 3$	500	0.006	74
تابع کرنل چندجمله‌ای	$d = 2.5$	20	0.005	75

جدول ۵ نتایج عملکرد مدل‌های بهینه بر مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش در قالب ضریب همبستگی و RMSE

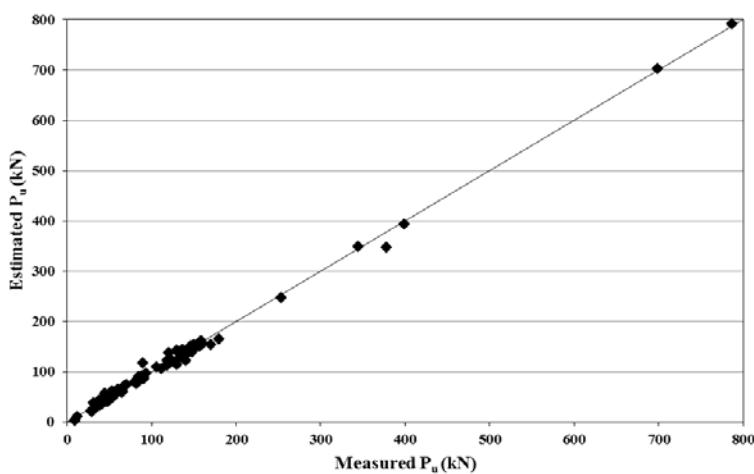
مدل (توجه به کرنل مورد استفاده)	مجموعه آموزش		مجموعه آزمایش	
	R	RMSE (kN)	R	RMSE (kN)
تابع کرنل پایه‌شعاعی	0.998	7.73	0.999	5.86
تابع کرنل پیرسون	0.998	7.14	0.999	5.79
تابع کرنل چندجمله‌ای	0.998	7.75	0.999	6.21

نتایج مشاهده می‌شود که مدل‌های گسترش یافته به روش ماشین بردار پشتیبان با دقت بسیار خوبی مقادیر مقاومت نهایی تیزورق‌ها را در محدوده داده‌های مورد استفاده تخمین می‌زنند. هرچند اختلاف میان کارایی مدل‌های مختلف ارائه شده در این پژوهش بسیار ناچیز است، اما نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های گسترش داده شده با کرنل‌های پیرسون و RBF کارایی بهتری نسبت به مدل ارائه شده با کرنل چندجمله‌ای ارائه می‌دهند.

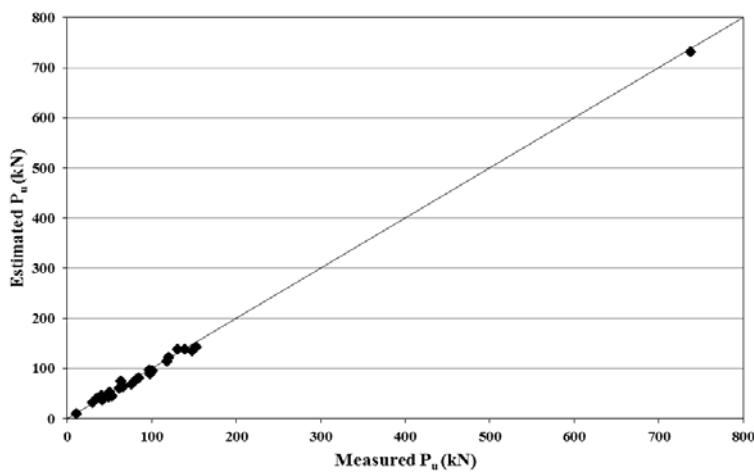
نتایج فوق شامل مقادیر پارامترهای طراحی مدل‌های بهینه برای هر تابع کرنل و تعداد بردارهای پشتیبان متناظر با آنها در جدول (۴) خلاصه شده است. هم‌چنین نتایج عملکرد مدل‌های بهینه بر مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش در جدول (۵) نشان داده شده است. هم‌چنین نمودار مقادیر مقاومت نهایی اندازه‌گیری شده در برابر مقدار پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل‌های گسترش یافته با هر یک از توابع کرنل، در شکل‌های (۳) تا (۵) نشان داده شده است. با بررسی



شکل ۳ مقاومت نهایی اندازه‌گیری شده دربرابر پیش‌بینی شده توسط مدل SVM گسترش داده شده به کمک تابع کرنل پایه شعاعی:  
الف) بر روی داده‌های مجموعه آموزش، ب) بر روی مجموعه داده‌های آزمایش

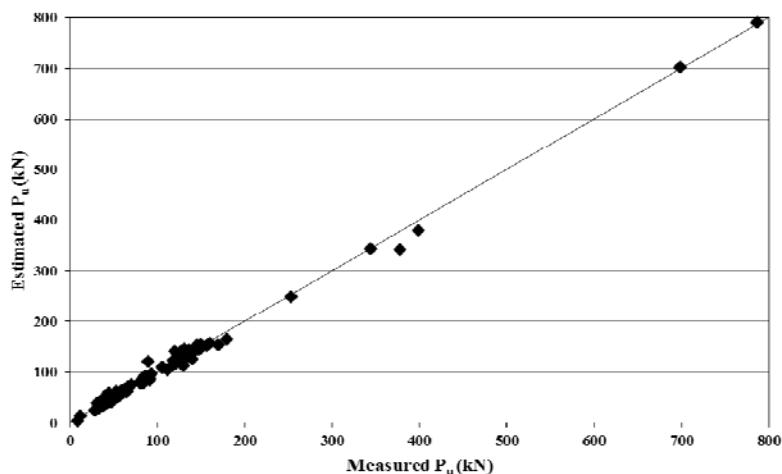


(الف)

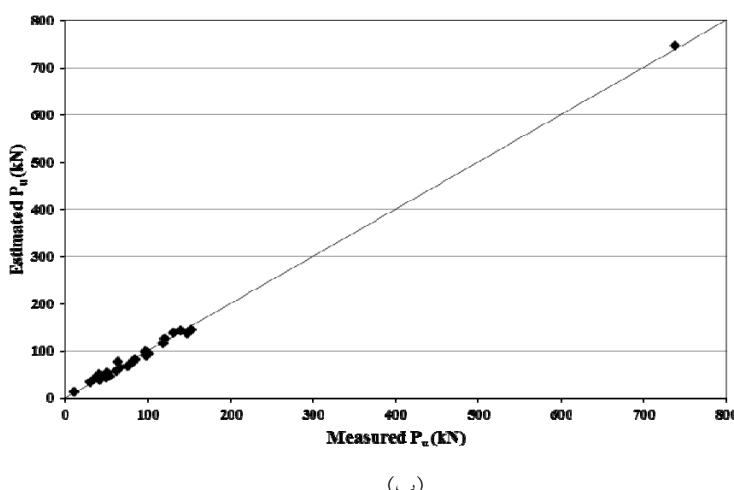


(ب)

شکل ۴ مقاومت نهایی اندازه‌گیری شده دربرابر پیش‌بینی شده توسط مدل SVM گسترش داده شده به‌کمکتابع کرنل پیرسون:  
 (الف) برروی داده‌های مجموعه آموزش، (ب) برروی مجموعه داده‌های آزمایش



(الف)



(ب)

شکل ۵ مقاومت نهایی اندازه‌گیری شده در برابر پیش‌بینی شده توسط مدل SVM گسترش داده شده به کمک تابع کرنل چندجمله‌ای:  
 الف) بر روی داده‌های مجموعه آموختش، ب) بر روی مجموعه داده‌های آزمایش

جدول ۶ مشخصات نمونه‌های آزمایش و مقادیر مقاومت نهایی پیش‌بینی شده توسط مدل SVM و روش رابرتر و نیوآرک [10]

Sample No.	$b_w$ (mm)	$d_w$ (mm)	$t_w$ (mm)	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$c$ (mm)	$\sigma_w$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	$P_{ex}$ (kN)	$P_{up}$ (kN)	
										SVM PVII kernel RMSE=5.79	Roberts and Newark (1997) RMSE=30.25
1	2400	700	3.26	250	11.9	100	326	232	139.3	139.12	138.50
2	2400	500	2	100	12	180	294	294	61.8	60.60	57.10
3	1000	1000	2.5	200	10.09	100	299	253	63.76	75.05	78.56
4	2000	1000	3	200	10	100	297	253	98.1	89.22	108.14
5	2000	1000	3	200	10	200	297	253	117.72	114.91	111.27
6	500	500	2	50	24.6	50	243	225	76.03	68.57	59.10
7	600	600	3.63	50	10.1	60	282	279	148	135.38	149.17
8	800	800	2.05	300	15.5	40	210	285	66	64.72	50.89
9	600	800	3	250	12	40	245	285	96.8	97.58	101.21
10	1020	680	2	120	5	40	354	292	50.17	53.05	48.52
11	800	300	2	120	5	40	285	286	49	42.86	45.11
12	400	400	2	120	5	40	285	286	53	44.86	44.40
13	800	600	3	250	12	40	328	286	120	121.94	117.87
14	600	250	3.05	149	6.75	50	221	279	100.7	95.25	93.65
15	600	500	0.99	149	6.75	50	192	279	10.8	9.90	11.13
16	600	500	3.05	149	20.06	50	221	305	130.6	137.91	113.32
17	600	750	2.12	149	3.05	50	224	221	30	32.45	38.60
18	600	750	3.05	149	11.75	50	221	305	99.55	95.84	98.95
19	760	380	2.99	80	6.25	50	245	298	84.1	80.91	90.39
20	500	500	9.95	150	10.05	50	247	250	738	731.20	884.71
21	2400	600	2	100	6	40	206	280	35	39.86	38.72
22	3000	400	2	100	12	40	205	278	40.7	41.84	45.83
23	1100	800	2	100	12	40	205	277	40.5	46.02	45.24
24	2000	1000	3	200	19.78	200	300	231	152.05	142.86	128.93
25	3000	800	3	250	12	40	215	268	81.5	78.30	94.81
26	1100	800	2	250	12	40	206	270	41.4	37.86	45.35

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی تیرورق‌های تحت اثر بار موضعی استفاده شده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل ماشین بردار پشتیبان دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی بار نهایی تیرورق‌ها در محدوده داده‌های مورد استفاده می‌باشد، به طوری که در نتایج ارزیابی مدل بهینه گسترش داده‌شده بر مبنایتابع کرنل پیرسون برروی داده‌های آزمایش مقادیر  $R=0.999$  و  $RMSE=5/79\text{ kN}$  به دست آمده‌اند. علاوه بر این حساسیت مدل‌های مختلف به تغییرات پارامترهای طراحی مدل نیز بررسی گردیده است. علاوه بر همبستگی بسیار خوب نتایج مدل‌های SVM با مقادیر واقعی، مقایسه عملکرد این مدل‌ها، با نتایج یک مدل سنتی [10]، برتری مدل‌های ارائه شده در این پژوهش را تأیید می‌کند.

### نشانه‌ها

ضخامت جان تیرورق	$t_w$
بردار وزن	$w$
بردار وزن بهینه	$w_0$
بردار مقادیر ورودی	$X$
دو بردار پشتیبان	$x_r, x_s$
مقدار خروجی	$y$
میانگین خروجی‌های	$\bar{y}$
اندازه‌گیری شده	
ضرایب لاگرانژ	$\alpha, \alpha^*$
عرض کرنل پایه‌شعاعی	$\sigma$
عرض تابع کرنل پیرسون	$\sigma'$
حد جاری شدن بال	$\sigma_f$
حد جاری شدن جان	$\sigma_w$
انحراف استاندارد خروجی	$\sigma_{y_j}$
اندازه‌گیری شده	
انحراف استاندارد خروجی مدل	$\sigma_d$
فاکتور دنباله در تابع کرنل پیرسون	$\omega$
عملگر ضرب داخلی	$(,)$

برای مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با سایر مدل‌ها، از راه حل پیشنهادی توسط رابرتس و نیوآرک برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌های تحت اثر بار موضعی استفاده می‌شود [10]. براساس نظریه مذکور مقاومت نهایی تیرورق‌ها در برابر بارهای موضعی برابر است با:

$$Pu_9 = 1.1 t_w^2 \sqrt{E \sigma_w} \left( \frac{t_f}{t_w} \right)^{0.25} \left( 1 + \frac{(c + 2t_f)t_w}{d_w t_f} \right) \quad (16)$$

در این رابطه  $t_w$  ضخامت جان،  $d_w$  ارتفاع جان،  $b_w$  عرض جان،  $E$  ضریب کشسان،  $\sigma_w$  حد جاری شدن جان،  $t_f$  ضخامت بال،  $b_f$  عرض بال،  $c$  عرض بارگذاری و  $P_u$  مقاومت نهایی تیرورق می‌باشد.

رابطه بالا برروی نمونه‌هایی که برای ارزیابی کارایی مدل‌های SVM (نمونه‌های مجموعه آزمایش) اعمال شده است و مقدار مقاومت نهایی پیش‌بینی شده است. مشخصات نمونه‌های آزمایش و نتایج حاصل از این روش به همراه نتایج بهترین مدل ماشین بردار پشتیبان در جدول (۶) خلاصه شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از این روش با مقادیر آزمایشگاهی ضریب همبستگی  $R=0.996$  و  $RMSE=30/25\text{ kN}$  حاصل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار متوسط خطاهای حاصل شده از مدل‌های گسترش داده شده در این پژوهش بسیار کمتر از روش رابرتس و نیوآرک [10] می‌باشد. بدین ترتیب این مقایسه برتری مدل ماشین بردار پشتیبان را تأیید می‌کند.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت روش ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی مقاومت نهایی تیرورق‌های تحت اثر بار موضعی مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این پژوهش از توابع کرنل پایه‌شعاعی، تابع کرنل پیرسون و چندجمله‌ای برای گسترش مدل‌های غیرخطی بر روی یک مجموعه شامل ۱۲۶ نمونه از اطلاعات

میانگین خروجی‌های مدل	$\bar{d}$	عملگر نرم بردار	$\ \cdot\ ^2$
تابع لاغرانژ	L	خطای مجاز در تابع تلفات	$\epsilon$
تعداد نمونه‌ها	l	متغیرهای slack	$\zeta_i^*$
بعد بردار $x$	m	باپاس	b
تعداد نمونه‌ها (در محاسبه ضریب همبستگی)	n	مقدار بهینه باپاس	$b_0$
مقاومت نهایی اندازه‌گیری شده	$P_{ex}$	عرض بال تیرورق	$b_f$
تیرورق		عرض جان تیرورق	$b_w$
مقاومت نهایی تیرورق	$P_u$	عرض بارگذاری	C
مقاومت نهایی پیش‌بینی شده	$P_{up}$	پارامتر جریمه یا پارامتر تنظیمی	C
تیرورق		کواریانس میان خروجی مدل و	$C_{y,d}$
مجموعه اعداد حقیقی	R	خروچی اندازه‌گیری شده	d
ضخامت بال تیرورق	$t_f$	توان کرnel چندجمله‌ای	$d_j$
		مقدار خروجی مدل	
		ارتفاع جان	$d_w$

## مراجع

1. Fonseca, E. T., Vellasco, C. G., Andrade, A.L., and Vellasco, B. R. "A Patch Load Parametric Analysis Using Neural Networks", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, pp. 251-267, (2003).
2. شهرابیان، فرزاد و رجبی مشهدی، حبیب، "تخمین مقاومت نهایی تیرورق‌های تحت اثر بارهای موضعی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۱، فروردین ۱۳۹۰، صفحه ۱۷ تا ۲۲ (۱۳۹۰).
3. Dibike,Y.B.,Velikov,S., Solomatine, D., and Abbot, M.B. "Model induction with support vector machines-introduction and applications", *J. Comput. Civ. Eng.*, ASCE, No. 3, Vol. 15, pp. 208-216, (2001).
4. Li, C., and, Liu,Q., "Support vector machine based semi-active control of structures: a new control strategy". *Struct. Design Tall Spec. Build.*, Published online in Wiley Interscience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)). DOI: 10.1002/tal, pp. 557, (2009).
5. Samui, P., "Support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils", *Computers and Geotechnics*, No. 3, Vol. 35, pp. 419 - 427, (2008).
6. Smola, A. J., and Scolkopf, B., "Tutorial on support vector regression, NeuroCOLT2 technical report series", NC2-TR-1998-03, (1998).
7. Cristianini, N., and Shaw-Taylor, J., "An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods", Cambridge: Cambridge University Press, (2000).
8. Samui, P., Sitharam, T. G., and Kurup, P. U., "OCR prediction using support vector machine based on

- piezocone data", *J. Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, No. 6, Vol. 134, pp. 894-898, (2008).
9. Granath, P., "Serviceability Limit State of I-Shaped Steel Girders Subjected to Patch Loading", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 54, pp. 387-408, (2000).
  10. Roberts, T.M, and Newark, A. C. B. "Strength of webs subjected to compressive edge loading", *Journal of Structural Engineering*, No.2, Vol. 123, pp. 176-183, (1997).
  11. Markovic, N., and Hajdin, N., "A contribution to the analysis of the behavior of plate girders subjected to patch loading", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 21, pp. 163-173, (1992).
  12. Kutmanova, I., and Skaloud, M., "Ultimate limit state of slender steel webs subject to (i) constant an (ii) repeated partial edge loading", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 21, pp. 147-162, (1992).
  13. Roberts, T.M., and Rockey, K.C. "A mechanism solution for predicting the collapse loads of slender plate girders when subjected to in-plane loading", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part 2, No. 1, Vol. 67, pp. 155-175, (1979).
  14. Goh, A. T. C., and Goh, S. H., "Support vector machines: their use in geotechnical engineering as illustrated using seismic liquefaction data", *Computers and Geotechnics*, No. 5, Vol. 34, pp. 410–421, (2007).
  15. Pooya Nejad, F., Jaksa, M. B., Kakhi, M. and McCabe, B. A., "Prediction of pile settlement using artificial neural networks based on standard penetration test data", *Computers and Geotechnics*, No. 7, Vol. 36, pp. 1125–1133, (2009).
  16. Smith, M., "Neural network for statistical modeling", New York; Van Nostrand-Reinhold, (1993).
  17. Hecht-Nielson, R., Neurocomputing. Addison-Wesley, Publishing Company, Reading, MA, (1990).



## پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی میکروسیلیس و پلیمر استایرن بوتادین به‌وسیله مدل ریاضی\*

(یادداشت پژوهشی)

عباس حق‌اللهی<sup>(۱)</sup> محمد شفیعی زاده<sup>(۲)</sup> امیر طریقت<sup>(۳)</sup>

**چکیده** این مقاله، تأثیرات متقابل میکروسیلیس و پلیمر استایرن بوتادین (SBR) را بر مقاومت فشاری بتن بررسی می‌نماید. تحلیل نتایج مقاومت فشاری ۳۲ مخلوط بتنی با ۲ نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۴۵ و ۰/۳۵) و چهار درصد جایگزینی میکروسیلیس (۰/۱۰، ۰/۰۷۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۳) و چهار درصد پلیمر استایرن بوتادین (۰/۱۵، ۰/۱۰، ۰/۰۵، ۰/۰٪) بررسی شده است. یک مدل ریاضی براساس قانون آبرامز، به منظور پیش‌بینی مقاومت بتن‌های حاوی SBR و میکروسیلیس پیشنهاد شده است. این مدل ساده، ممکن است به عنوان راهنمایی مناسب برای اختلاط مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس و پلیمراستایرن بوتادین به کار رود.

**واژه‌های کلیدی** بتن، میکروسیلیس، پلیمراستایرن بوتادین، مقاومت فشاری، مدل ریاضی.

## Prediction Compressive Strength of Concretes Containing Silica Fume and Styrene-butadiene Rubber (SBR) with a Mathematical Model

A.Haghollahi      A.Tarighat      M. Shafieyzadeh

**Abstract** This paper deals with the interfacial effects of silica fume (sf) and styrene-butadiene polymer (SBR) on compressive strength of concrete. Analyzing the compressive strength results of 32 concrete mixes performed over two water-binder ratios (0.35, 0.45), four percentages replacement of silica fume (0%, 5%, 7.5%, 10%) and four percentages of SBR (0%, 5%, 10%, 15%) were investigated. A mathematical model base on Abrams' law has been proposed for evaluation strength of silica fume-SBR concretes. This simplified model might serve as useful guides for commixture concrete admixtures containing of silica fume and SBR. The accuracy of the proposed model is investigated.

**Key Words** Concrete, Silica Fume, SBR, Compressive Strength, Mathematical Modeling.

---

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۸/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۱/۱ می‌باشد.

haghollahi@srttu.edu

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۲) استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۳) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

افزایش مقاومت سایشی بتن به ویژه در کف‌های بتنی به مخلوط بتن اضافه می‌شود) و هم‌چنین میکروسیلیس (silica fume) یک نوع پوزولان مصنوعی که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن استفاده می‌شود و موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن می‌شود) بر روانی و مقاومت فشاری بتن بررسی شده است و یک رابطه بین مقاومت فشاری با نسبت پلیمر، میکروسیلیس، آب به مواد سیمانی و زمان نگهداری در آب، پیشنهاد شده است.

### برنامه و روند آزمایش

در این تحقیق، دو سری نمونه با نسبت‌های آب به مواد سیمانی  $0/45$  و  $0/35$  تدارک دیده شده‌اند. به منظور بررسی تأثیرات متقابل میکروسیلیس و SBR بر مقاومت فشاری، آزمایش‌ها براساس چهار سطح جایگزینی میکروسیلیس ( $0/10$ ،  $0/7/5$ ،  $0/5$ ،  $0/0$ ) و چهار سطح SBR ( $0/10$ ،  $0/7/5$ ،  $0/5$ ،  $0/0$ ) انجام پذیرفتند.

نمونه‌های مکعبی  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری قالب‌بریزی شده‌اند. قبل از قالب‌بریزی، درشت‌دانه، ماسه و دوغاب میکروسیلیس مخلوط شدند. سپس سیمان، لاتکس SBR و بقیه آب به همراه فوق روان‌کننده درون میکسر ریخته شدند و با ارتعاش مکانیکی متراکم شدند. نمونه‌ها تحت سه روش عمل‌آوری زیر قرار داده شده‌اند.

- ۱) روز عمل‌آوری در آب  $20^\circ\text{C}$  و  $53$  روز عمل‌آوری خشک در دمای  $20^\circ\text{C}$ .
- ۲)  $14$  روز عمل‌آوری در آب  $20^\circ\text{C}$  درجه و  $46$  روز عمل‌آوری خشک در دمای  $20^\circ\text{C}$ .
- ۳)  $28$  روز عمل‌آوری در آب  $20^\circ\text{C}$  درجه و  $32$  روز عمل‌آوری خشک در دمای  $20^\circ\text{C}$ .

لاتکس SBR به عنوان یک محلول پخش‌کننده پلیمری، هیدراتاسیون و استحکام مجدد را تحت شرایط عمل‌آوری خشک، ترجیح می‌دهد [7]. هیدراتاسیون

### مقدمه

مقاومت بتن تحت تأثیر عوامل زیادی از قبیل ترکیب و عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، سنگدانه، سن و دمای عمل‌آوری قرار می‌گیرد. به علت زیاد بودن تعداد متغیرها هیچ رابطه‌ای (مدل ریاضی) وجود ندارد که بتواند تأثیرات تمام این فاکتورها را به صورت کمی، درنظر بگیرد [1].

قانون نسبت آب به سیمان آبرامز در سال ۱۹۱۸ هنوز به عنوان یک رابطه اصلی در تاریخ تکنولوژی بتن مطرح می‌باشد. ساده‌ترین عاملی که بیشترین تأثیر را در مقاومت بتن می‌گذارد، نسبت آب به سیمان می‌باشد. در ابتدا بتن با مخلوط نمودن سیمان، سنگدانه و آب ساخته می‌شد و استفاده از مواد مضاف ناشناخته بود. تنها ماده چسبنده، سیمان بود. امروزه، بتن‌های جدید حاوی مواد مضاف معدنی و لاتکس‌ها به دلایل زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد، مقاومت سایشی و دوام را افزایش و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند، [2-5] لذا لازم است رابطه آبرامز اصلاح شود.

در گذشته تحقیقات زیادی در رابطه با مخلوط‌های بتن و بتن‌های حاوی مواد مضاف انجام شده و بعضی روابط ریاضی بین مقاومت بتن و نسبت‌های ترکیب مواد تشکیل‌دهنده ارائه شده است، لیکن روابطی که شامل چند پارامتر باشند بسیار کم هستند که در این تحقیق تلاش بر انجام آن و ارائه رابطه براساس چند پارامتر می‌باشد.

هم‌چنین به منظور افزودن پلیمرها به مخلوط‌های سیمانی دو روش مختلف پیشنهاد شده است [6]:  
 ۱) ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان (W/C) به منظور حصول به هیدراتاسیون مشابه خمیر سیمان.  
 ۲) ثابت نگه داشتن تراکم مخلوط، با تنظیم نسبت آب به سیمان.

در این تحقیق، نسبت آب به مواد سیمانی، ثابت  $0/45$  و  $0/35$  در نظر گرفته شده است و تأثیرات امولسیون styrene-butadiene polymer (SBR) که برای

ب - آ- اس - اف، برای تنظیم روانی مخلوطهای بتن استفاده شده است. پایه و اساس این فوق‌روان‌کننده یک پلیمر کربوکسیلیک اتر با زنجیرهای جانبی طویل می‌باشد.

لاتکس پلیمری استفاده شده، پلیمر استایرن بوتادین (SBR) با نام تجاری Rheomix 141p از شرکت ب - آ- اس - اف می‌باشد که مشخصات آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

سیمان و فیلم پلیمری در بتن‌های اصلاح شده با افزایش سُن عمل‌آوری گسترش می‌یابد که منجر به افزایش مقاومت می‌شود. به عبارت دیگر، ترکیب مناسب عمل‌آوری مرطوب و عمل‌آوری خشک برای گسترش مقاومت بتن‌های اصلاح شده با پلیمر مناسب می‌باشد. یک ماتریس دوگانه برای هر دو فرآیند تشکیل می‌شود [۴,8-10]. نمونه‌ها براساس استاندارد BS آزمایش شده‌اند.

جدول ۲ مشخصات SBR

Density (gr/cm <sup>3</sup> )	Mean particle Size (micron)	Butadiene Content	PH
1.01	0.17	40%	10.5

هم‌چنین براساس طرح اختلاط انجام شده نسبت‌های مواد و مصالح مصرفی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ درصد اختلاط بتن

درصد ماشه	درصد شن	درصد درصد	نسبت آب به سیمان	مواد سیمانی در امتركعب بتن (kg)	
۰/۴۳	۰/۳۵	۰/۳۵		۴۰۰	ترکیب ۱
۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۴۵		۴۰۰	ترکیب ۲

### نتایج آزمایش و بحث راجع به آن تأثیرات میکروسیلیس و SBR بر روانی بتن

میکروسیلیس روانی بتن را کاهش می‌دهد اما SBR روانی بتن را افزایش می‌دهد. افودن ۱۵ درصد SBR به نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵، بتن خود متراکم ایجاد می‌نماید. تأثیر SBR در افزایش روانی بتن، بیشتر از تأثیر کاهنده میکروسیلیس در روانی می‌باشد.

### تأثیرات SBR بر مقاومت فشاری

در نسبت پلیمر به سیمان (۰/۵)، مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده برابر و حتی اندکی بالاتر از

### مواد

مواد استفاده شده در این تحقیق عبارتند از: سیمان پرتلند (تیپ یک) تولید کارخانه تهران و میکروسیلیس تولید کارخانه دلیجان می‌باشد که مشخصات میکروسیلیس و سیمان در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول ۱ مشخصات سیمان و میکروسیلیس

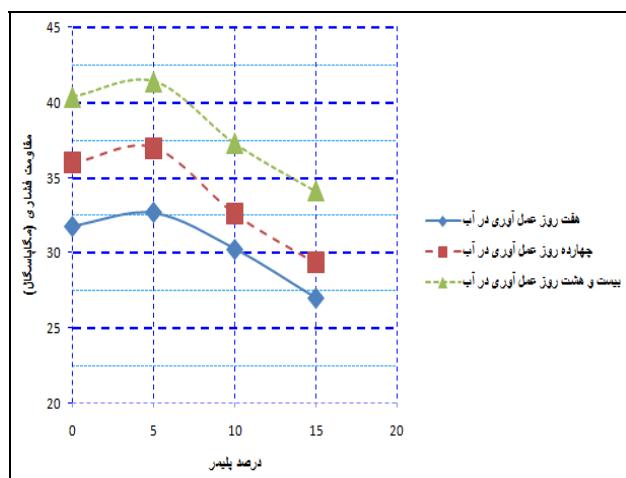
Composition (%)	Cement	Silica fum
Sio <sub>2</sub>	21.46	91.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.55	1.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.46	1.0
Mgo	1.86	1.8
Cao	63.95	0.9
So <sub>3</sub>	1.42	0.87
K <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.54	---
Na <sub>2</sub> O	0.26	---
C <sub>3</sub> S	50.96	---
C <sub>2</sub> S	23.1	---
C <sub>3</sub> A	8.85	---
C <sub>4</sub> AF	10.53	---

درشتدانه با حداکثر اندازه اسمی ۱۷ میلی‌متر و ریزدانه با مدلول نرمی ۳/۰۱ در این آزمایش استفاده شده‌اند. وزن مخصوص و جذب آب درشتدانه و ریزدانه به ترتیب ۲/۵۵ و ۲/۲۵٪ و ۲/۴٪ می‌باشند. از یک کاهنده آب با نام تجاری گلینیوم ۱۱۰P از شرکت

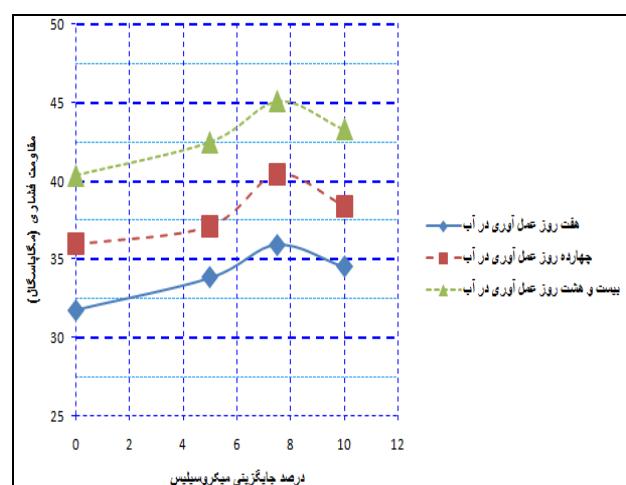
ناشی از ظرفیت پایین‌تر لاتکس نسبت به خمیر سیمان می‌باشد.

**تأثیرات میکروسیلیس بر مقاومت**  
بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت بتن به علت فعالیت بالای پوزولانی میکروسیلیس و توانایی پرکنندگی آن مشاهده می‌شود [14-16]. مقاومت فشاری بتن میکروسیلیسی به طور پیوسته نسبت به بتن مرجع افزایش می‌یابد و در سطح  $7/5$  درصد جایگزینی میکروسیلیس به حدکثر مقدار خود می‌رسد (شکل ۲). تأثیر میکروسیلیس در نسبت آب به مواد سیمانی  $0/35$ ، کمتر از نسبت آب به سیمان  $0/45$  می‌باشد.

نمونه‌های فاقد پلیمر می‌باشد (شکل ۱). تأثیر پرکنندگی پلیمر، باعث افزایش اندک مقاومت فشاری می‌شود. مقاومت فشاری عمدتاً با استفاده از نیروهای پیوستگی ایجاد شده توسط هیدراتاسیون سیمان ایجاد می‌شود [11-13]. به نظر می‌رسد که در نسبت پلیمر به سیمان  $0/05$ ، پیوستگی فیلم پلیمری فقط از طریق پل‌های کوچک روی تعداد محدودی از حفرات انجام می‌پذیرد. اگرچه ساختار بین فیلم پلیمری و سیمان هیدراته شده در نسبت پلیمر به سیمان  $(0/10)$ ، گسترش می‌یابد ولی مقاومت فشاری بتن در مقایسه با بتن فاقد پلیمر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزودن لاتکس SBR به بتن، یک کاهش در مقاومت فشاری ایجاد نموده است که



شکل ۱ تأثیر نسبت پلیمر به سیمان بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی  $0/35$  و حاوی صفر درصد میکروسیلیس



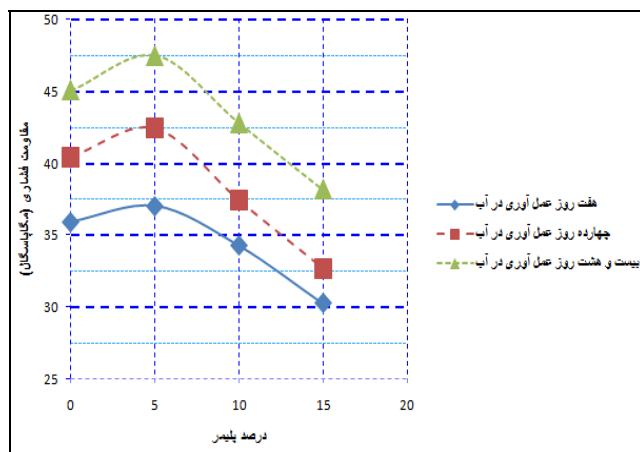
شکل ۲ تأثیر نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی  $0/35$  و حاوی صفر درصد پلیمر

مقاومت فشاری مشاهده می‌شود (شکل ۴). هوازابی فوق روان‌کننده، موجب کاهش در مقاومت فشاری شده است. (در ساخت این نمونه‌ها، نسبت فوق روان‌کننده ثابت حفظ شده بود). در ۱۵٪ پلیمر، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۵ به ۰/۳۵، مقاومت فشاری با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی ناشی از تأثیر روان‌کنندگی SBR جبران شده است. هر دو پدیده باهم، مقاومت فشاری را ثابت نگه می‌دارد.

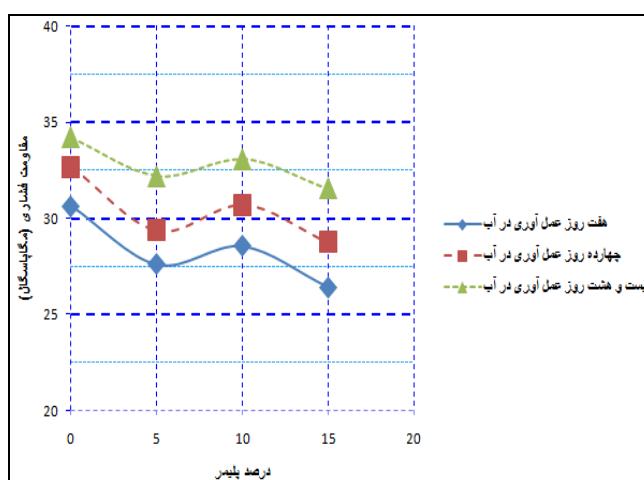
### تأثیرات متقابل میکروسیلیس و SBR در مقاومت فشاری بتن

مقاومت بتن تحت تأثیر نسبت پلیمر و میکروسیلیس به مواد سیمانی قرار می‌گیرد. هنگامی که نسبت پلیمر به مواد سیمانی ثابت و معین می‌باشد، میکروسیلیس مقاومت بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. درصدی از میکروسیلیس که مقاومت فشاری را بهینه می‌نماید ۷/۵ درصد ثابت می‌ماند (شکل ۳).

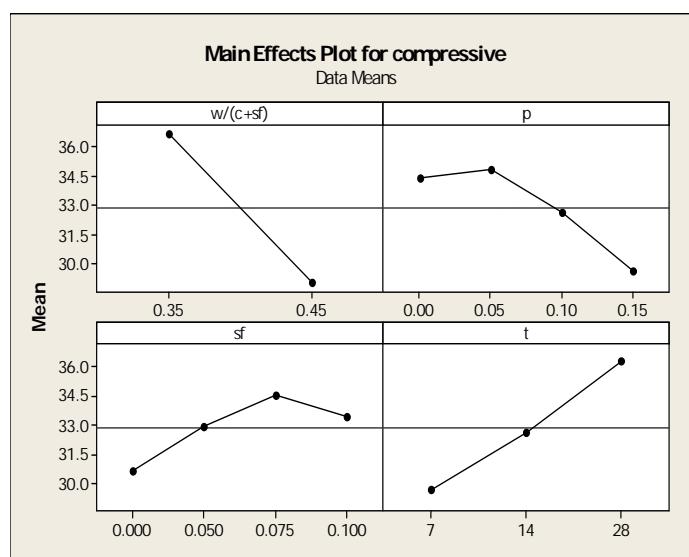
در نمونه‌های با ۵٪ پلیمر و ۷/۵٪ یا ۱۰٪ میکروسیلیس (آب به مواد سیمانی ۰/۴۵)، کاهش در



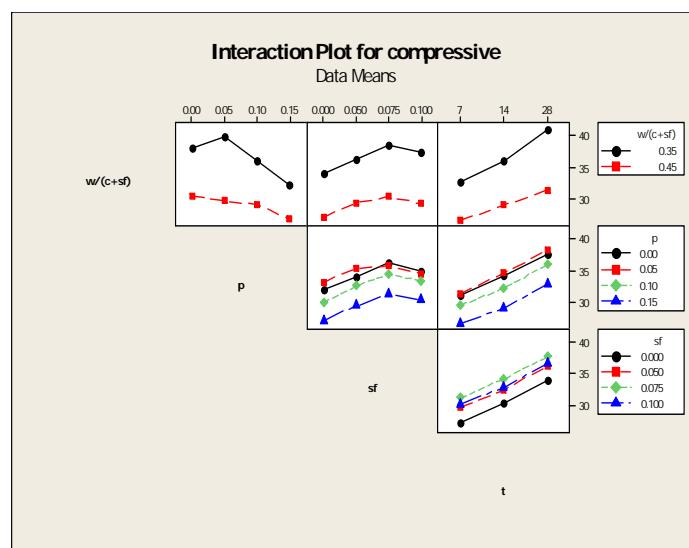
شکل ۳ تأثیر نسبت پلیمر به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و حاوی هفت و نیم درصد میکروسیلیس



شکل ۴ تأثیر نسبت پلیمر به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ و حاوی هفت و نیم درصد میکروسیلیس



شکل ۵ نمودار تأثیرات اصلی برای مقاومت فشاری



شکل ۶ تأثیرات متقابل فاکتورها در مقاومت فشاری

به طور متوسط، ۷/۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس مقاومت فشاری را در حدود ۱۳٪ افزایش می‌دهد. همچنین افزودن ۱۵٪ پلیمر SBR، مقاومت فشاری را در حدود ۱۴٪ کاهش می‌دهد.

یک نمودار ساده از تأثیرات متقابل فاکتورها در مقاومت فشاری در شکل شماره (۶) نشان داده شده است. خطوط موازی در یک نمودار تأثیر متقابل نشان

### ارزیابی تأثیر پارامترها و تأثیرات متقابل آنها در مقاومت فشاری

تأثیرات اصلی هر فاکتور در شکل شماره (۵) نشان داده شده است. این نمودار، میانگین مقاومت فشاری را در سطوح مختلف هر فاکتور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۵ به ۰/۳۵ مقاومت فشاری را در حدود ۲۶٪ افزایش می‌دهد.

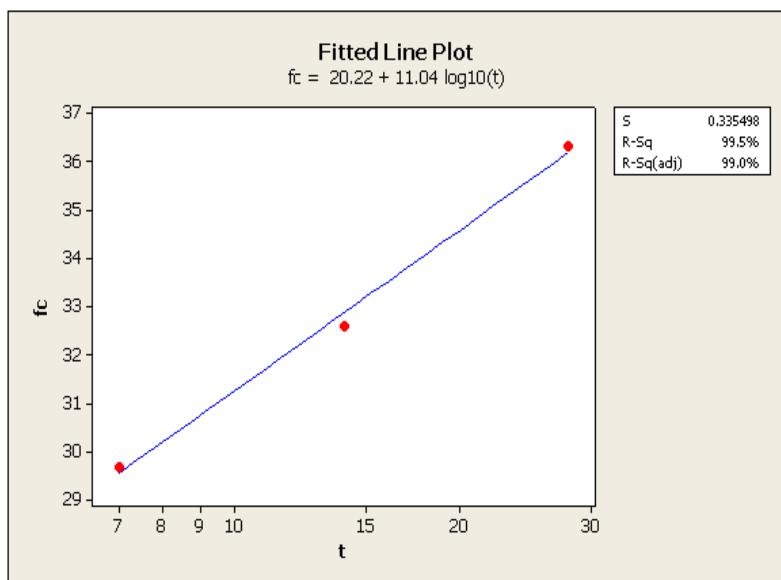
از محققان معادلات توانی برای تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری پیشنهاد نموده‌اند [۱۹,۲۰] اما ارتباط بین مقاومت فشاری با تمام فاکتورها به خوبی شناخته شده نمی‌باشد. در چنین وضعیتی که هیچ رابطه اصلی شناخته شده‌ای بین مقاومت فشاری با تمام متغیرها وجود ندارد. نمودارهای پراکنده تهیه شده‌اند و میانگین‌های مقادیر در نمودارها نشان داده می‌شوند. نمودارهای پراکنده برای تمام نمونه‌ها، یک رابطه

غیرخطی بین مقاومت فشاری با نسبت‌های میکروسیلیس و پلیمر به مواد سیمانی را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای پراکنده، می‌توان مشاهده نمود که یک سهمی درجه دو ممکن است برای نشان دادن تأثیر میکروسیلیس یا SBR بر مقاومت فشاری بتن مناسب باشد. ارتباط مقاومت فشاری با هر متغیر در اشکال ۷-۹ نشان داده شده‌اند. ارتباط مقاومت فشاری با هر متغیر براساس رگرسیون تعیین می‌شود.

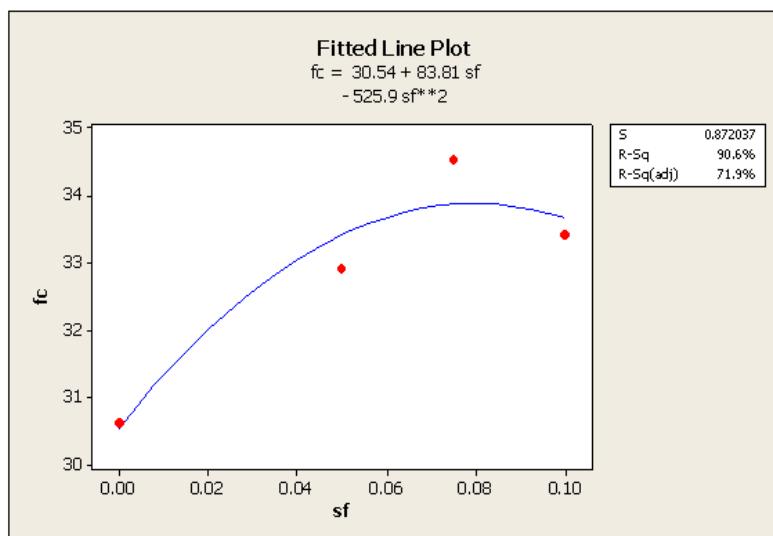
می‌دهد که تأثیر متقابلی بین فاکتورها وجود ندارد. انحراف بیشتر خطوط از وضعیت موازی، درجه بالاتری از تأثیر متقابل را نشان می‌دهد. در چنین وضعیتی، پاسخ در یک سطح فاکتور بستگی به سطوح دیگر فاکتورها دارد. برای مثال، بین SBR و میکروسیلیس در سطح ۱۰٪ SBR با سایر سطوح یک تأثیر متقابل مشاهده شده است. (یک کاهش در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵٪ SBR و ۷٪ میکروسیلیس اتفاق افتاده است).

### مدل ریاضی

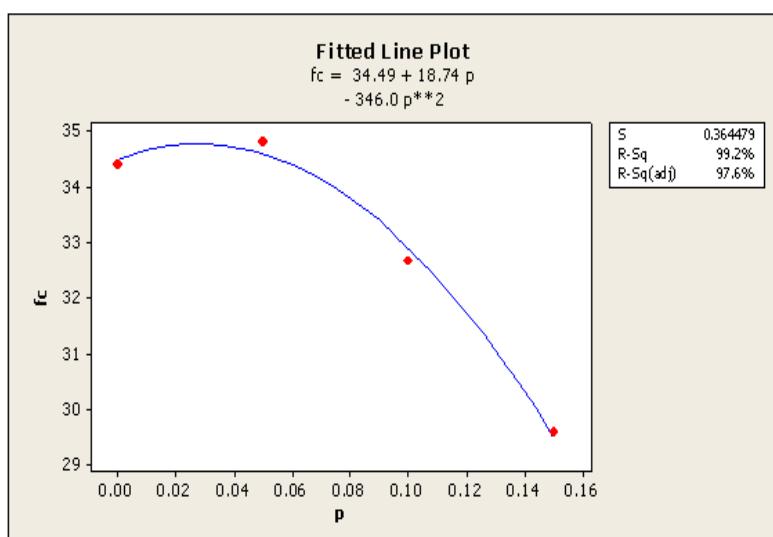
فاکتورهای اصلی که مقاومت فشاری بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند، نسبت‌های آب، پلیمر، میکروسیلیس به مواد سیمانی و زمان نگهداری نمونه در آب می‌باشند. براساس رابطه کلاسیک آبرامز، رابطه معکوسی بین مقاومت فشاری و نسبت آب به سیمان وجود دارد [۱۷,۱۸] تعداد زیادی از محققان رابطه مقاومت فشاری و زمان را با یک رابطه لگاریتمی نشان داده‌اند. تعدادی



شکل ۷ ارتباط بین مقاومت فشاری و زمان نگهداری نمونه در آب



شکل ۸ ارتباط بین مقاومت فشاری با نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی



شکل ۹ ارتباط بین مقاومت فشاری با نسبت پلیمر به مواد سیمانی

w/b،  $fc$ ، مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسگال، آب به مواد سیمانی،  $t$  زمان نگهداری نمونه در آب بر حسب روز،  $s$  نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی،  $p$  نسبت پلیمر SBR به مواد سیمانی می‌باشد.

(۱)  $a_1, a_2, a_3, a_4$  و  $a_5$  ضرایب ثابت می‌باشند. معادله

را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\log(F_c) = \log(a_1) - \log(a_2) \times \frac{w}{b} +$$

ارتباط بین مقاومت فشاری با متغیرهای درنظر

گرفته شده را شاید بتوان به صورت زیر نمایش داد.

$$F_c = \frac{a_1}{\left(\frac{w}{b}\right)^{a_2}} \times (11.04 \times \log(t) + 20.22)^{a_3} \times (-525.9S^2 + 83.81S + 30.54)^{a_4} \times (-346P^2 + 18.72P + 34.49)^{a_5}$$

(۱)

$$F_c = \frac{49.2}{10^{\left(\frac{w}{b}\right)}} \times (0.546 \times \log(t) + 1) \\ \times (-17.22S^2 + 2.74S + 1)(-10P^2 + 0.54P + 1) \quad (3)$$

از معادله بالا می‌توان مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس و SBR را تعیین نمود. به منظور ارزیابی دقت معادله بالا، دیاگرام باقیمانده‌ها (اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر برآزش شده) برای مقاومت فشاری ترسیم شده‌اند. دیاگرام باقیمانده‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. دیاگرام باقیمانده‌ها نشان می‌دهد که حداقل درصد خطأ برای مقاومت فشاری ۱۰٪ می‌باشد.

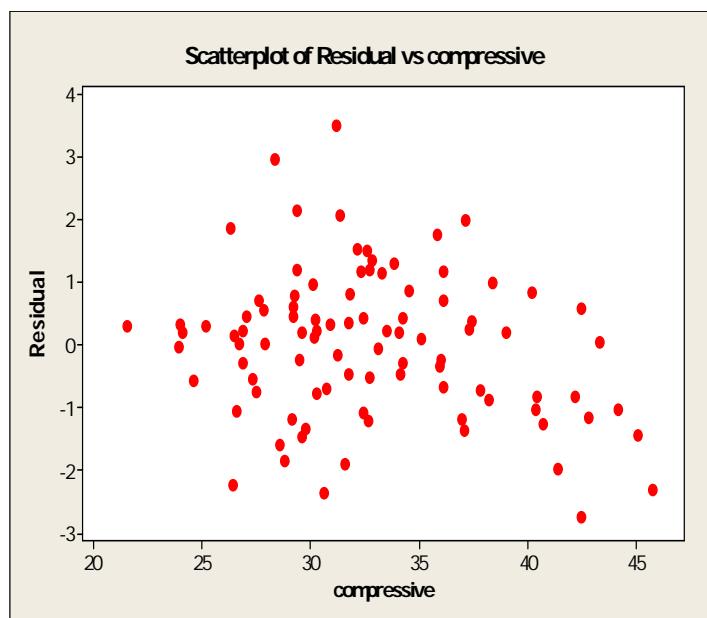
هیستوگرام باقیمانده‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. اگرچه توزیع باقیمانده‌ها به‌طور کامل از توزیع نرمال پیروی نمی‌نماید اما مقدار ماکزیمم و میانگین داده‌ها نزدیک صفر می‌باشند.

$$+ a_3 \times \log(11.04 \times \log(t) + 20.22) + a_4 \\ \times \log(-525.9S^2 + 83.81S + 30.54) + \\ a_5 \times \log(-346P^2 + 18.72P + 34.49) \quad (2)$$

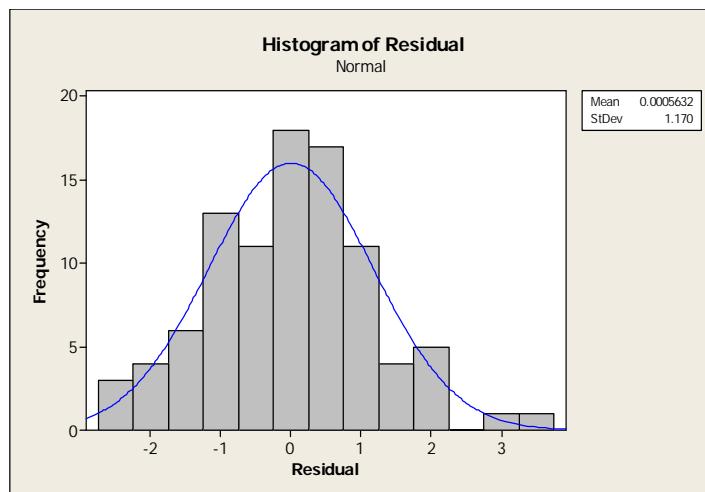
که  $a_1, a_2, a_3, a_4$  و  $a_5$  را می‌توان با استفاده از رگرسیون چندگانه خطی تعیین نمود. مقادیر این ضرایب در جدول زیر نشان داده شده‌اند. مقدار ضریب همبستگی چندگانه برابر ۹۵٪ حاصل شده است.

$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$
0.977	1.005	0.98	0.999	2.637

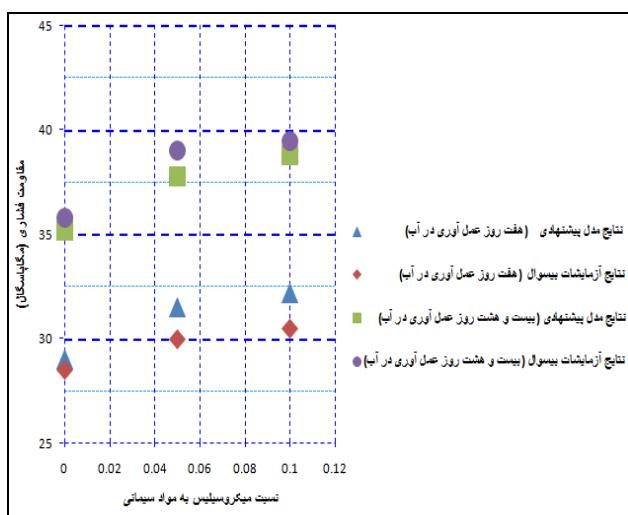
با جای‌گزینی یک به جای ضرایبی که نزدیک یک هستند و ساده‌سازی معادله بالا، معادله زیر حاصل می‌شود.



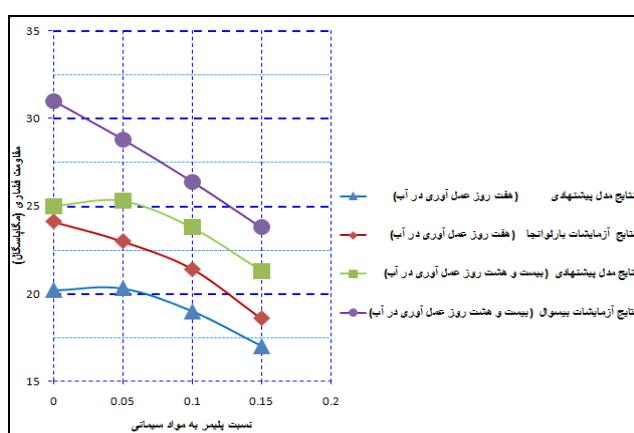
شکل ۱۰ نمودار باقیمانده‌ها برای مقاومت فشاری



شکل ۱۱ هیستوگرام باقی‌ماندها برای مقاومت فشاری



شکل ۱۲ مقایسه بین نتایج مقاومت فشاری بیسول(حاوی میکروسیلیس) و مدل پیشنهادی [21]



شکل ۱۳ مقایسه بین نتایج مقاومت فشاری بارلوانجا (SBR) با مدل پیشنهادی [22]

- می‌شود. هر دو پدیده باهم موجب می‌شود که مقاومت فشاری تقریباً ثابت باقی بماند.
- ۵) درصدی از میکروسیلیس که مقاومت فشاری را بهینه می‌کند، با افزودن پلیمر تغییر نمی‌نماید.
- ۶) از قانون آبرامز با قدری اصلاحات، می‌توان جهت تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و پلیمر استفاده نمود و براساس نمودار اثرات اصلی رابطه زیر پیشنهاد می‌گردد:
- $$F_c = \frac{49.2}{10 \left( \frac{w}{b} \right)} \times 1$$
- $$(0.546 \times \log(t) + 1)(-17.22S^2 + 2.74S + 1)(-10P^2 + 0.54P + 1)$$
- مدل پیشنهادی امکان پیش‌بینی مقاومت فشاری براساس زمان نگهداری در آب (t) و نسبت‌های آب، میکروسیلیس و SBR به مواد سیمانی را فراهم می‌نماید که به‌طور خلاصه با  $(\frac{w}{b})$ , (s) و (p) نمایش داده شده‌اند.
- ۷- مدل ریاضی پیشنهادی براساس تعداد آزمایش‌های محدود و در سطح تحقیقاتی ارائه شده است و برای ارائه روابط کاربردی و فراگیر نیاز به انجام آزمایش‌های گستردتر می‌باشد.

**مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج دیگر محققان**  
مقایسه بین نتایج آزمایش‌های دیگر محققان که کار آنها مشابه با این تحقیق است، با مدل پیشنهادی انجام شد و دو مورد از آنها در نمودارهای شکل‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تطبیق نسبتاً خوبی بین نتایج مدل پیشنهادی و مطالعات این دو محقق وجود دارد.

### نتیجه‌گیری

- ۱) تأثیر SBR در افزایش روانی بتن بیشتر از تأثیر میکروسیلیس در کاهش روانی بتن می‌باشد.
- ۲) در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و روش عمل آوری ترکیبی، مقاومت فشاری بتن در ۰.۵٪ پلیمر اندکی افزایش می‌یابد اما زمانی که نسبت پلیمر به مواد سیمانی افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد.
- ۳) جایگزینی میکروسیلیس تا ۷/۵ درصد، منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شود.
- ۴) کاهش مقاومت فشاری، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی ناشی از تأثیر روان‌کنندگی پلیمر جرمان

### مراجع

1. J. Zelic & D. Rusic & R. Krstulovic., "A mathematical model for prediction of compressive strength in cement–silica fume blends", *Cement and Concrete Research*, No. 34, pp. 2319–2328, (2004).
2. V. Bhikshma & K. Nitturkar & Y. Venkatesham., "Investigations on mechanical properties of high strength silica fume concrete", *Asian journal of civil engineering building and housing*, No. 10(3), pp. 335-346, (2009).
3. O.Rozenbaum & R.J.-M.Pellenq & H.Van Damme., "An experimental and mesoscopic lattice simulation study of styrene-butadiene latex-cement composites properties", *Materials and structures*, pp. 467-478, (2005).
4. Ru Wang & Pei-Ming Wang & Xin-Gui Li., "physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars", *Cement and Concrete Research* 35, pp. 900-906, (2005).
5. S. Bhanjaa & B. Sengupta., "Modified water–cement ratio law for silica fume concretes", *Cement and*

- Concrete Research 33, p. 447- 450, (2003).
6. G. Barluenga & F. Hernández-Olivares., "SBR latex modified mortar rheology and mechanical behavior", *Cement and Concrete Research* 34, pp. 527–535, (2004).
  7. Bing Chen & Juanyu Liu., "Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads", *Construction and Building Materials* 21, pp. 7–11, (2007).
  8. A. Beeldens & D. Van Gemert, H. Schorn, Y. Ohama & L. Czarnecki., "From microstructure to macrostructure: an integrated model of structure formation in polymer-modified concrete", *Materials and Structures* 38, pp. 601-607, (2005).
  9. LIU jun & XU Chang-wei, ZHU Xiao-yan & WANG Ling-ling., "Modification of high performances of polymer cement concrete", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater.*, No. 18(1), pp. 61-68, (2003).
  10. João Adriano Rossignol., "Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex", *Construction and Building Materials* 23, pp. 817–821, (2009).
  11. Eui-Hwan Hwang, Young Soo Ko., "Comparison of mechanical and physical properties of SBR-polymer modified mortars using recycled waste materials".
  12. Ke-Ru Wu, Dong Zhang, Jun-Mei Song, "Properties of polymer-modified cement mortar using pre-enveloping method", *Cement and Concrete Research* 32, pp. 425-429, (2002).
  13. Eui-Hwan Hwang & Young Soo Ko & Jong-Ki Jeon., "Effect of polymer cement modifiers on mechanical and physical properties of polymer-modified mortar using recycled artificial marble waste fine aggregate", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 14, pp. 265-271, (2008).
  14. S. Bhanja & B. Sengupta., "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete", *Cement and Concrete Research* 35, pp. 743–747, (2005).
  15. H. Katkhuda & B. Hanayneh & N. Shatarat., "Influence of silica fume on high strength of light weight concrete", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 58, (2009).
  16. K.C. Biswal & Suresh Chandra Sadangi., "Effect of superplasticizer and Silica Fume on Properties of Concrete", *Proc. of Int. Conf. on Advances in Civil Engineering*, (2010).
  17. Sandor Popovics., "Strength and related properties of concrete a quantitative approach", John Wiley and sons, (1998).
  18. Mehta & P. Kumar., "Concrete: Micro structure", properties and materials, (2006).
  19. S. Bhanja & B. Sengupta., "Investigations on the compressive strength of silica fume concrete using statistical methods", *Cement and Concrete Research* 32, pp. 1391–1394, (2002).
  20. Mohammad Iqbal Khan., "Analytical model for strength prediction of HPC consisting of cementitious", *Architecture civil engineering environmental*, (2009).
  21. ACI Committee 548., "State of the Art Report on polymer modified concrete", ACI 548.3R-95

- American concrete Institute, Detroit, (1995).
22. LIU Jun XU Chang & wei ZHU Xiao, yan WANG Ling & ling., "Modification of High Performances of Polymer Cement Concrete". *Journal of wuhan university of Technology – Mater*, No. 18(1), (2003).



LPM) and ANN are tabulated in Table 1.

**Table 1. Performance of the NLA method and ARIMA for short term and mid-term temporal scales**

Scale	LPM		ANN	
	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	r	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	r
Daily	0.73	0.940	0.79	0.921
Weekly	7.87	0.948	8.03	0.941
Monthly	71.38	0.378	30.48	0.758

Based on the results of this study shown in Table 1, it can be concluded that the LPM method had better performance in predicting daily and monthly scales, while ANN showed superiority on the monthly scale.

#### **4-Conclusions**

Based on the outcomes of this study, the following conclusions are drawn:

- 1- According to the correlation analysis, chaoticity was observed in daily ( $cd=2$ ), weekly ( $cd=4$ ) and monthly ( $cd=4$ ).
- 2- Test of the maximal Lyapunov exponent showed that there is more chaotic behavior in mid-term flow rate rather than short-term flow.
- 3- ANN had superiority in predicting monthly flow while LPM method outperformed the ANN method in daily and weekly scales.

# **Efficiency Assessment of Local Prediction Method Considering Reconstruction of Phase Space and Artificial Neural Network Model for Prediction of Runoff (Case Study: Pole-Kohneh Station, Kermanshah)**

M. Zounemat-Kermani<sup>1\*</sup> Kh. Amirkhani<sup>2</sup>

## **1-Introduction**

It is very substantial to forecast streamflow hours, days, months, or possibly longer in advance for the effective operation of a water resources system. Water authorities can administer water reserves optimally for such water users as hydropower generation, agricultural, domestic, and for the maintenance of environmental flows through a reliable streamflow forecast. Forecasting stream-flow is exceedingly important in the case of multipurpose reservoirs since they are essential to the operation of flood mitigation reservoir systems. Forecasting flow is also imperative in predicting the sediment amount carried by the river to the reservoirs. Forecasting stream-flow is exceedingly important in the case of multipurpose reservoirs; they are essential to the operation of flood mitigation reservoir systems. Forecasting flow is also imperative in predicting the sediment amount carried by the river to the reservoirs.

## **2-Study area and methodology**

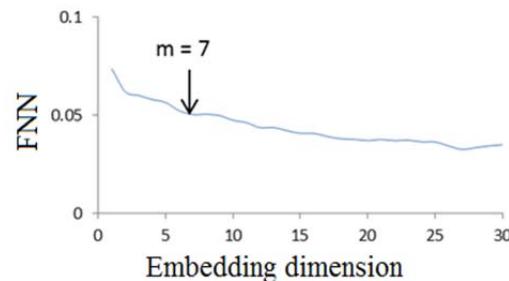
In the present study, daily, weekly and monthly flow series (1988–1999) observed in the Qareh-Soo River in Kermanshah province are considered. As for the methodology, the methods based on nearest trajectory strategy, including reconstructing of the system state and local prediction method (LPM) and method of surrogate as well as artificial neural network approach are used for investigating chaos in river flow at Pole-Kohneh located in the Qareh-Soo River.

## **3-Application and results**

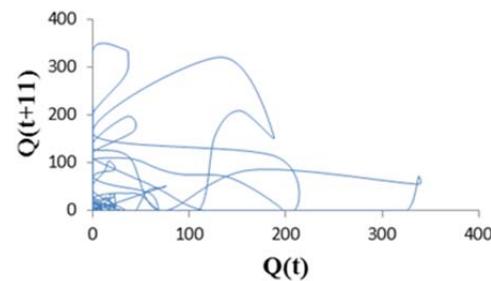
### **3.1-Phase Space reconstruction**

After determining 1) the proper delay times using the

variation of the fraction of FNNs for different embedding dimensions for daily, weekly and monthly river flow (see Figure 1), and 2) embedding dimension based on the Takens theorem, the phase space can be reconstructed. Figure 2 depicts the 2D plot of the constructed phase space of daily river flow.



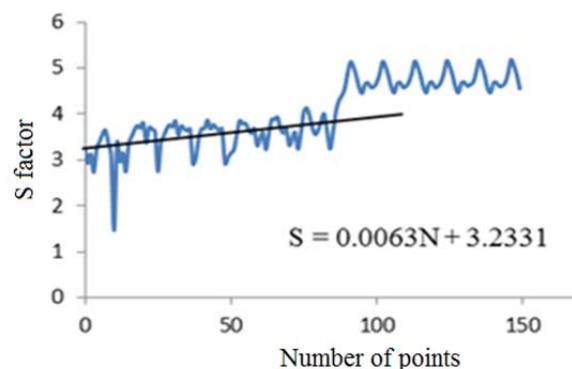
**Fig. 1 Variation of average mutual information with lag time in daily river flow**



**Fig.2 2D constructed phase space of daily flow rate**

### **3.2-Determination of the Maximal Lyapunov Exponent**

The maximal Lyapunov exponents were calculated (Figure 3). The analyses found weaker chaos characteristics at short term daily scale ( $\lambda_{\max}=0.0063$ ) and stronger chaos characteristics ( $\lambda_{\max}=0.0252$ ) at mid-term monthly scale.



**Fig. 3 plot of maximal Lyapunov exponent for daily river flow**

### **3.3-Prediction process**

In brief, the results of predicting process using the nonlinear chaos theory (local prediction method,

<sup>1</sup> Corresponding Author, Associate Professor, Water Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

E-Mail: zounemat@uk.ac.ir

<sup>2</sup> MSc Graduate, Water Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran,

in which  $0.5 \leq \eta < 1$ . The proposed step size can be adapted based on the results of the performance function at each iterations, while the step size in the STM is considered a constant smaller value at each iteration. Thus, the proposed ISTM may be converged faster than the STM for convex problems and it is more robust than the AMV for highly nonlinear problems.

### 3- Comparative results

The robustness and efficiency of the proposed ISTM algorithm are investigated through several nonlinear performance functions. The results of ISTM with parameters of  $\delta = 0.5$  and  $\eta = 0.95$  are compared with PMA and STM with the parameter of  $\lambda = 0.1$ . For this purpose, the numbers of computations gradient vector (Iteration) and performance values are used to illustrate efficiency and robustness of the FORM-based inverse reliability methods.

#### Example 1: nonlinear performance function

The nonlinear performance function is considered as follows:

$$g_1 = x_1^3 + x_2^3 - 18 \quad (8)$$

where  $x_1 \sim N(10,5)$ ,  $x_2 \sim N(9.9,5)$  and  $\beta_t = 3.0$  in which  $N(\mu, \sigma)$  is the normal distribution with the mean of  $\mu$  and standard deviation of  $\sigma$ . The converged results of this performance function based on the proposed ISTM are obtained after 42 iterations as  $g(X_k) = -31.066473$  and  $X_k = [-2.89058, 2.22974]$ .

Figure 1 illustrates the convergence histories of the performance values for different reliability methods such as AMV, STM and ISTM. It can be seen that the AMV has resulted in unstable results as chaotic solutions while the STM and ISTM are more robust than the AMV for this example. The STM has converged after 126 iterations but the proposed ISTM has converged to stable results after only 42 iterations. The results from Fig. 1 show that the proposed ISTM is slightly more efficient than the STM and the ISTM has converged about three-times faster than STM.

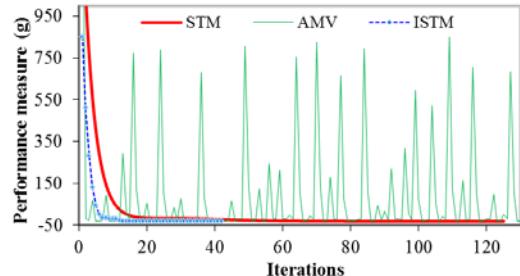


Fig. 1 Convergence histories of the performance function Example 1 for different reliability methods

### Example 2: nonlinear multi-dimensional performance function

$$\begin{aligned} g_2 = & -0.75 + 0.489 x_1 x_4 + 0.843 x_2 x_3 - 0.0432 x_5 x_6 \\ & + 0.0556 x_5 x_7 + 0.000786 x_7^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Where  $x_1 - x_4 \sim N(1,0.05)$ ,  $x_5 \sim N(0.3,0.006)$ ,  $x_6, x_7 \sim N(0,10)$  and  $\beta_t = 3.0$ .

The results from the CC method are extracted as performance value at MPTP of 0.07535 and MPTP of [0.97643, 0.96006, 0.96006, 0.97643, 0.301, 25.67798, -8.05467]. Based on the results of the ISTM using the dynamical step size, the performance value of Eq. (9) at MPTP and the MPTP are obtained after 12 iterations as  $g(X_i)=0.07529$  and  $X_t= [0.97645, 0.96008, 0.96008, 0.97645, 0.3011, 25.66047, -8.14201]$ . As seen, the results obtained from the proposed ISTM are in close agreement with the reliability results extracted from the CC method.

The performance histories of different reliability methods for Example 2 are shown in Fig. 2. The results of Fig. 2 illustrated that the AMV method yields unstable results as periodic-2 solutions i.e.  $g(X_k)=0.5665$  and  $g(X_{k-1})=1.3955$ . However, the STM and the proposed ISTM have more robustly converged after 86 and 12 iterations, respectively. The ISTM is as robust as the STM but it is slightly more efficient than the STM for this example. The ISTM produces stable results faster than the STM with convergence rate about seven-times larger than STM.

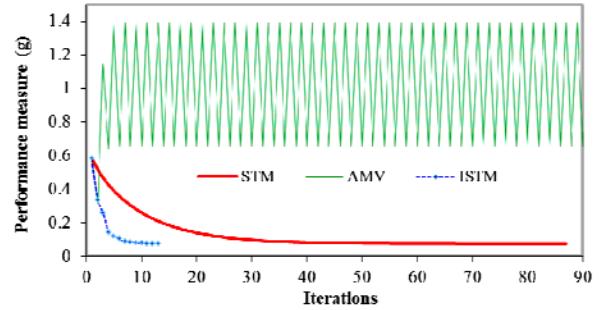


Fig.2 Convergence histories of the performance function Example 2 for different reliability methods

### 4- Conclusions

The stability transformation method is improved using an adaptive step size. The adaptive step size is proposed to improve the efficiency of STM using sufficient descent condition. The results indicated that the AMV provides unstable results and the STM is an inefficient method for highly nonlinear performance functions. However, the ISTM is as robust as STM but it is more efficient.

The dynamic step size can be adapted using the performance information and it is adjusted using sufficient descent condition. Therefore, this step size can be used to improve the robustness of FORM compared to AMV and can enhance the efficiency of STM for highly nonlinear problems.

## Improved Stability Transformation Method to Control Convergence of Structural Performance Measure Approach

B. Keshtegar

### 1-Introduction

Generally, there are several uncertainties in physical quantities of engineering systems. Consequently, probabilistic models should be implemented to consider these uncertainties. Design optimization methods under uncertainties have been developed to evaluate reliable performance of probabilistic constraints. Existing reliability-based design optimization (RBDO) approaches can be classified as double loop approaches (DLA), single loop approaches (SLA), and decoupled approaches. A suitable reliability method is required for evaluating the reliability level of probabilistic constraints in RBDO methods.

Commonly, the first-order reliability method (FORM) is used to estimate the reliable levels. Generally, the reliability index approach (RIA) and the performance measure approach (PMA) can be utilized for evaluating the probabilistic constraints in RBDO. The results of evaluating the performance measure illustrate that PMA provides higher efficiency and robustness in comparison with RIA. In RIA, the most probable failure point (MPFP i.e.  $U^*$ ) on the limit state surface ( $g(U)$ ) is needed to approximate the reliability index for evaluating the probabilistic constraints as follows:

$$\text{find } U^*, \min \beta = \|U\| \quad (1)$$

Subjected to  $g(U) = 0$

In PMA, the probabilistic constraint is evaluated by searching the minimum performance target point (MPTP) on the target reliability index ( $\beta_t$ ) using the following model:

$$\text{find } U_t, \min g(U) \quad (2)$$

Subjected to  $\|U\| = \beta_t$

The robustness and efficiency of iterative formula-based PMA are the important keys to implement a reliability analysis method in RBDO problems.

The advanced mean value (AMV) is commonly applied for inverse reliability analysis-based PMA due to its simplicity and efficiency. In general, the AMV scheme could converge to unstable solutions for highly nonlinear concave performance functions. The conjugate mean value (CMV), stability transformation method of chaos control (STM),

modified chaos control (MCC), adaptive chaos control (ACC), self-adjusted chaos control (SACC), adjusted mean value (AMV) and conjugate gradient analysis (CGA) have been developed to enhance the robustness of MPTP search method. The CMV and AMV are adaptively combined to improve the efficiency and robustness of the FORM-based inverse reliability method in hybrid mean value (HMV). The HMV is robust for convex performance functions, but may result in unstable results for highly concave performance functions. The CC method is computationally inefficient for either convex or concave problems. The robustness and efficiency are two major challenges in reliability analysis.

In this paper, the stability transformation method-based chaos control is improved using a dynamic step size. The proposed dynamic step size is established using the performance values at the new and previous points. The sufficient descent condition is applied to adjust the proposed step size in the improved stability transformation method (ISTM). The robustness and efficiency of STM, AMV and the proposed ISTM methods are compared through several highly nonlinear mathematical and structural performance functions. The numerical study shows that the proposed ISTM algorithm is an efficient and robust FORM-based inverse reliability analysis.

### 2- Improve stability transformation method

In order to improve the efficiency of the STM-based CC, the iterative inverse FORM formula is given as follows:

$$U_{k+1} = U_k + \lambda_k C[f(u_k) - U_k] \quad (3)$$

where  $C$  is an  $n \times n$  involutory matrix. Actually, the unit matrix is considered for  $C$ .  $\lambda_k$  is the dynamical step size which is suggested as follows:

$$\lambda_k = \min\left\{1, \left|\frac{1}{\delta \|D_k\|^2} \left[1 - \frac{g(d, U_{k+1})}{g(d, U_k)}\right]\right|\right\} \quad (4)$$

Where,  $0 < \delta < 1$ ,  $g(d, U_{k+1})$  and  $g(d, U_k)$  are the performance values at the new and previous points, respectively.  $D_k$  is the search direction vector which is computed as

$$D_k = f(u_k) - U_k \quad (5)$$

In which  $f(u_k)$  is a discrete nonlinear map which is given as follows:

$$f(u_k) = -\beta_t \frac{\nabla_u g(d, U_k)}{\|\nabla_u g(d, U_k)\|} \quad (6)$$

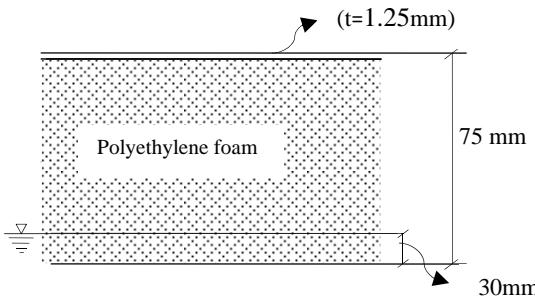
where  $\nabla_u g(d, U_k)$  is the gradient vector of the performance function at point  $U_k$ . In order to control instabilities of the FORM formula-based the dynamic search direction, the sufficient descent condition i.e.  $D_k < D_{k-1}$  is applied to adjust the dynamic search direction by the following relation:

$$\lambda_k = \eta \lambda_k \text{ for } D_k \geq D_{k-1} \quad (7)$$

<sup>1</sup> Assistant professor, Department of Civil Engineering, University of Zabol.

Email: Bkeshtegar@uoz.ac.ir

Eq. (1), the rigidity of the model must be  $6.28 \text{ Nm}^2$ . In order to provide such rigidity, an aluminum plate of 1.25 millimeters in thickness and  $2 \times 0.50\text{m}$  was selected. As shown in Fig. 2, polyethylene was used beneath the aluminum plate in order to provide floating.



**Fig. 2. Cross section of physical model made of aluminum and polyethylene**

For stimulating the gill cells, cubic cells were made at the two ends of the model in dimension of  $6 \times 6 \text{ cm}$  and cell depth is almost 7.5 cm. During the experiments, a specific amount of the cells must be full of water and the rest must be empty.

#### 4. Experiment Method

The experiments were carried out in two parts: statically and dynamical loading. During the first part, stress and displacement under gravitational loadings were examined. At the second part of experiments, the model was tested by waves. In each of the mentioned parts, the experiments were performed on the model without gill cells. Moreover, four different states were considered in order to investigate the effect of gill cells number and arrangement on the structure. It should be noted that water depth was 70 cm in the laboratory.

##### 4.1. Gill Cells Arrangement in Models

According to the number of cells and their arrangement in the structure, some slits were made at the bottom of each cell so that water may enter each cell separately. In the first state, six gill cells were made at each side of the model. In the second state, the number of cells was increased to 12 cells and they were in rectangular shape located at the corners of the model. In the third state, gill cells were located in the two outer rows of the mesh network. And in the fourth state, cell arrangement was triangular but their number was increased to 18 cells at each side.

##### 4.2. Gravitational Loading Experiment (Statically Loading)

In statically loading experiments, 5 steps of loading were performed. In each step, 53 N loads were added to the previous state at the central part. Thus, these experiments were performed for models without gill cell and four gill cell layout to five loads of 53, 106, 159, 212 and 256 N. When oscillations of the model were fixed and the amount of strain became constant,

tests were started and variations of displacement and strains were measured. At this experiment, vertical displacement and strains were measured at the two ends and midpoint of the model.

#### 4.3. Experiment with Application of Waves (Dynamical Loading)

Five waves with different period and 2 cm height were made at the laboratory and their direction was perpendicular to the width of the model. Each wave was applied to all layouts of the gill cells in the model; and vertical displacement was measured at 5 points of the model in a distance of 50 cm from each other. Strains were measured at the two ends and the midpoint of the model. The generated waves in the laboratory were sinusoidal and regular. Table 1 represents the features of the waves.

**Table 1. Characteristics of the waves imposed to the model in laboratory**

Wave Characteristics	Wave 1	Wave 2	Wave 3	Wave 4	Wave 5
Wave length/length of the structure (-)	0.35	0.50	0.65	0.80	0.95
Wave length $\lambda$ (m)	0.7	1.00	1.30	1.60	1.90
Wave period $T$ (s)	0.67	0.80	0.91	1.01	1.10
Wave height $h$ (cm)	2				
Wave angle (deg)	90°				

#### 5. Conclusion

The results of these experiments represent that the gill cells efficiency was more prominent in higher loadings. Regarding differential deflection reduction, the third state had better performance. It can be perceived that when gill cells have farther distance from the center of the structure (loading region), they will have a better performance. Also, the highest amount of bending reduction at the head and center of the model occurs at the first state, which is up to 5% consisting of gill cells. According to the importance of deflection and bending moment parameters, one may elect either the first or the third state. Moreover, one may present a model by combining both of them which would cause less bending and displacement in the structure. The results of gill cell experiments which were tested by waves reflect that gill cells under the influence of waves did not have any significant effect on displacement reduction. In the fourth state which had the highest amount of gill cell area, the bending moment was less. Moreover, it may not have a considerable effect on the reduction of hydroelastic behavior singly. In order to reduce hydroelastic behavior it is better to combine the gill cells approach with other methods such as hinge connections.

## An Experimental Study on the Effect of Gill Cells on Very Large Floating Structures

A. Parizadeh<sup>1</sup> M. J. Khanjani<sup>2</sup>

### 1. Introduction

Very large floating structures (VLFSs) have attracted the attention of many researchers and engineers working in the offshore and marine industry. They have proposed VLFSs for various applications such as floating airports, bridges, breakwaters, piers and docks, fuel storage facilities, emergency bases, entertainment facilities, recreation parks, mobile offshore military bases, and even for habitation. There are various approaches to decrease differential deflection in VLFS. Increasing structure stiffness in all floating parts by means of increasing the height or the thickness of upper and lower plates is one the possible solutions. Considering the fact that this solution will have an effect on the size and shape of floating structure; it may boost the costs of production. Another solution is stepped floating structures. In this method, the depth of the loaded regions will be increased and that of the parts without loading will be decreased.

Wang et al. 2006 suggested an innovative model for decreasing differential deflection. They made some holes and slits on the floating bottom surface so that water may come into and out of some parts of the structure. Since the flow of water in these slits looks like fish gills, they are called *gill cells*. At gill cells, buoyancy forces are eliminated and with a proper installation of these cells differential deflection is reduced. They modeled a floating container terminal by means of the ABAQUS software, which was 520×470×10m, by using the finite element method. Applying gill cells would decrease stress and differential deflection significantly. Wang et al. investigated a circular structure with 200 m diameters and 2 m heights based on the classic thin plates' theory by using structure deflection analytically. They considered the effect of gill cells numbers by changing diameter and loading amounts. Phame and Wang 2010 investigated a numerical method for optimizing the location and number of cells in desired shapes. They modeled the floating structure based on the Mindlin theory supposing specific size and a uniform loading at the center. Then, they estimated

the optimal number and location for gill cells. They presented triangular arrangements of gill cells at the corners of polygonal structures as the optimum arrangement.

Likewise, Gao et al., (2013) combined gill cells and joint connection in order to investigate gill cells performance. In this paper, gill cells were simulated in the laboratory. Gill cells will be introduced more specifically in the following section.

### 2. Gill Cells Introduction

Very large floating structures are made of waterproof components that provide buoyancy forces. On the other side, gill cells consist of components such that buoyancy forces are eliminated under their surface. Since there are holes and slits at the bottom of these cells, water may come in freely up to the sea level and go out. Fig. 1 represents a floating structure consisting of gill cells. When gill cells are located properly at the structures, bending curvature can be changed and the structure may become flatter.

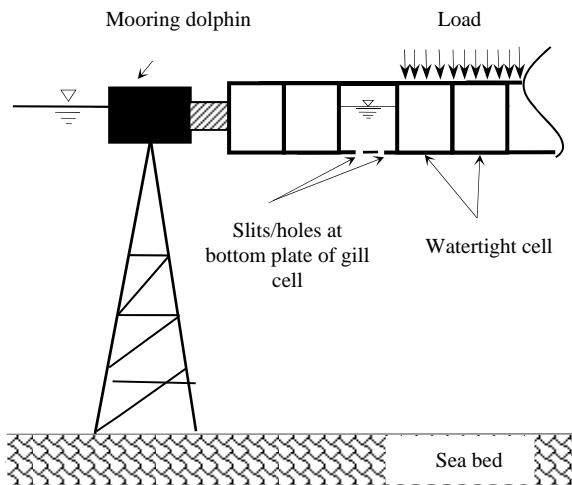


Fig. 1. Gill cell in very large floating structure

### 3. Description of experiments

The most significant feature of a very large floating structure is its hydroelastic behavior. One of the most influential parameters on a very large floating structure behavior is its bending rigidity that helps the model to be elastic. In order to simulate the behaviors of floating structures, the applied floating structure was chosen to be 300 meters in length, 60 meters in width and its bending rigidity was equal to  $4.77 \times 10^{11}$  Nm<sup>2</sup>. The bending rigidity ratio of the model to the prototype was calculated as follows [1]:

$$EI_p = \alpha^5 EI_m \quad (1)$$

Where  $EI_p$  is the bending rigidity of the prototype,  $EI_m$  the bending rigidity of the model and  $\alpha$  is the scale ratio.

The scale of 1/150 was utilized for making the model in the research laboratory. According to the

<sup>1</sup> Corresponding Author, Ph. D, Student, Civil Engineering Department, Tarbiat Modares University.

Email Address: Ali.parizadeh22@yahoo.com.

<sup>2</sup> Professor, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman.

Mostaghel subsequently expanded his model to consider stiffness degradation and load deterioration as well, employing two coefficients,  $\phi_k$  and  $\phi_1$ , which are respectively defined as:

$$\Phi_k = \frac{1}{1 + \lambda_k h(t)} \quad (8)$$

$$\Phi_1 = \frac{1}{1 + \lambda_k h(t)} \quad (9)$$

where  $h(t)$  represents the total non-dimensional hysteretic energy absorbed by the friction force of the slider.

$$\begin{aligned} h = & \Phi_1(1 - \alpha)|\dot{y}|[N(\dot{y})N(y - \gamma_p) + \bar{M}(\dot{y})M(y + \gamma_p)] \\ & + \lambda_p \bar{N}(\dot{y})M(y) + \lambda_p M(\dot{y})N(y)] \\ & \times [1 - \{N(\dot{y})[\bar{M}(z - \lambda_p \Phi_1)\bar{M}(y) + \bar{M}(z - \Phi_1)\bar{N}(y)] + \\ & M(\dot{y})[N(z + \lambda_p \Phi_1)N(y) + N(z + \Phi_1)M(y)]\}] \end{aligned} \quad (10)$$

As mentioned earlier, Zeynalian et al. proved that Eq. (10) does not satisfy some of the system's boundary conditions. Therefore, the equation was modified. In addition, they expanded the equation in order to take into account the sliding phenomenon. The final non-dimensionalized equilibrium equation, including pinching, stiffness degradation, load deterioration, and sliding phenomena, is expressed as follows.  $\delta'_0$  is a proposed sliding function.

$$\begin{aligned} \dot{z}_i = & \dot{y}\Phi_{ki}\{N(\dot{y})[M(z_i - \lambda_{pi}\gamma_i\Phi_{li})\bar{M}(y - \delta_0) \\ & + M(z_i - \gamma_i\Phi_{li})\bar{N}(y - \delta_0)] \\ & + M(\dot{y})[N(z_i + \lambda_{pi}\gamma_i\Phi_{li})N(y - \delta_0) \\ & + \bar{N}(z_i + \gamma_i\Phi_{li})M(y - \delta_0)\bar{M}(y + \delta_0)]\} \end{aligned} \quad (11)$$

To avoid complexity, no further detailed formulations are presented here. The next steps are to expand the system of equations for an MDOF multi-linear system, and then, to modify the equations based on a displacement-control cyclic loading regime. For this purpose, Method B of ASTM standard, which was originally developed for ISO (International Organization for Standardization) standard 16670 is applied. Therefore, instead of applying the external load function of  $P(t)$  in Eq. (1), the ASTM cycling loading regime is dictated to the system as an additional equation, as shown Fig. 2.

### 3- Multi-degree-of-freedom Multi-linear Systems

Fig. 3 illustrates the schematic  $n$  degree of freedom of a multi-linear MDOF system.

For the sake of brevity, only the response of the third story from a three-story building is shown in Fig. 4 using the hysteresis loading based on Method B of ASTM E2126-07 standard. It shows the applicability of the final proposed differential equations illustrating all degrading phenomena, including stiffness-degradation, load-deterioration, pinching, stiffness-hardening, and sliding.

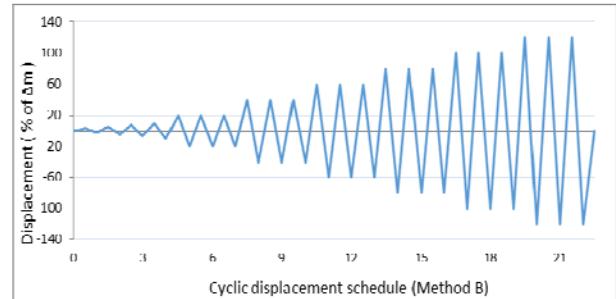


Fig. 2 Cyclic loading regime, Method B - ASTM E2126-07

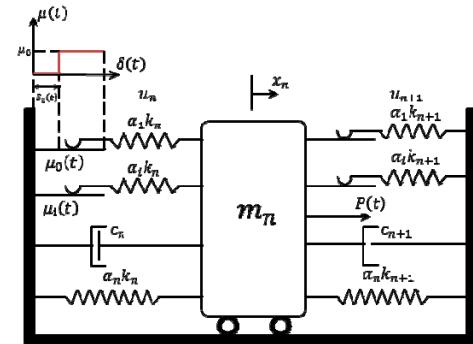


Fig. 3 Multi-linear, MDOF hysteresis mechanical system

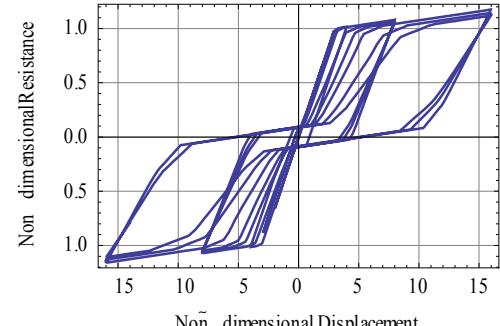


Fig. 4 Response of all degrading phenomena story 3

### 4- Conclusions

Based on the results, the following conclusions are drawn:

1. This paper presents an analytical differential model for the behavior of a general hysteretic MDOF system which includes all potential structural phenomena, such as pinching, stiffness degradation, load deterioration, and sliding.
2. The model is developed in order to take into account a displacement-control loading regime, i.e. Method B of standard ASTM E2126-07, which is usually implemented on experimental tests.
3. The results show that the proposed analytical model can provide a realistic description of the force-displacement performance of general hysteretic systems considering all degrading phenomena.

## Displacement Control Based Analytical Description of Pinching, Sliding and Degrading Hysteretic System

M. Zeynalian<sup>1</sup> M. Mokhtari<sup>2</sup>

### 1-Introduction

Non-linear hysteresis behavior is one of the most important inherited properties of any structural system. The shape of structural hysteretic behavior is a result of either changing material properties beyond their elastic range, or changes in structural geometry (e.g. buckling, cracks) due to subjected loads. The hysteretic response of a structure depends not only on the immediate deformation of elements, but also on the history of deformations, since this represents the energy dissipated by the structure. Increasing the displacement under strong dynamic forces, such as earthquakes, causes the hysteresis cycles to move from an elastic phase into a plastic phase. Hence, by ignoring the non-linearity in hysteresis behavior and neglecting the degradation effects, a great deal of lost energy (by dissipated energy mechanisms) is also ignored. Consequently, the designs would be uneconomical. In contrast, improper inclusion of non-linear hysteretic performance, such as neglecting sliding and strength deterioration causes non-conservative structural design.

Mostaghel [8] proposed an analytical description of the structural hysteretic model, based on a single-degree-of-freedom (SDOF) mechanical system, which consists of a combination of mass and springs. That model takes into account different structural characteristics, including pinching, stiffness degradation and load deterioration. It should be noted that Mostaghel did not address the sliding issue in his model, although it is generally considered important as it affects the rate of energy dissipation and performance of structures when seismic loads are applied. Later on, Zeynalian [13] developed the bilinear Mostaghel's model in order to consider the sliding effect. They also concluded that Mostaghel [8] equations do not satisfy some of the boundary conditions pertaining to the first cycle. Therefore, they applied some necessary corrections on the formulations proposed by Mostaghel.

It is also necessary to mention that Mostaghel[8] model is based on a force-control loading regime, which means that the response of the structural system is examined based on an applied force on the system.

<sup>1</sup> Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Isfahan, Iran  
Email Address : m.zeynalian@eng.ui.ac.ir

<sup>2</sup> Master Student, Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Isfahan, Iran

Therefore, since most experiments on real structures are performed based on a displacement-control loading regime, the model should be developed in order to be better fitted to the experimental results. Hence, in this study, the modified Mostaghel model is improved in order to generate MDOF multi-linear analytical results which can express the structural system's responses in terms of displacement-control. The cyclic loading regime which is implemented in this study is based on Method B of ASTM Standard.

### 2- Review of the Model

Mostaghel used an analytical model for formulating the hysteretic systems based on an SDOF mechanical system, which is comprised of a mass,  $m$ , two springs with stiffnesses of  $\alpha k$  and  $(1-\alpha)k$ , and deformations of  $x$  and  $u$  respectively, and a viscous damper with a damping coefficient of  $c$ . While the spring that is directly connected to the mass has the stiffness of  $\alpha k$ , the stiffness of the other spring (which is connected to the mass through a slider, with a friction coefficient of  $\mu$ ) is  $(1-\alpha)k$ . The total stiffness of the system is  $k$  and  $0 < \alpha < 1$ .  $P(t)$  is also the external applied load to the system. Pinching, such as that occurring because of strain hardening, can also be added to the system by assuming two extra springs with a stiffness of  $k_s$  and an initial gap,  $\delta_s$ , as shown in Fig.1.

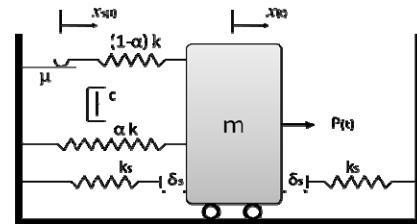


Fig. 1. Bilinear hysteretic system encountering additional stiffness

The modified non-dimensionalized dynamic equation, and the equilibrium equations for the system, which include pinching via both the inequality of strengths and stiffness hardening, can then be presented through Eqs. (1) and (2).

$$f = \alpha y + \alpha_s (|y| - \gamma_s) \text{sgn}(y) \bar{N}(|y| - \gamma_s) + (1 - \alpha)z \quad (1)$$

$$\dot{z} = \dot{y} \{\bar{N}(\dot{y}) [\bar{M}(z - \lambda_p) \bar{M}(y) + \bar{M}(z - 1) \bar{N}(y)] + M(\dot{y}) [N(z + \lambda_p) N(y) + N(z + 1) M(y)]\} \quad (2)$$

where  $N(x)$ ,  $M(x)$ ,  $\bar{N}(x)$ , and  $\bar{M}(x)$  are derived from Signum function (Sgn) as illustrated below:

$$\text{Sgn} = \begin{cases} -1 & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ 1 & \text{if } x > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$N(x) = 0.5[1 + \text{Sgn}(x)]\{1 + 1 - [\text{Sgn}(x)]\} \quad (4)$$

$$M(x) = 0.5[1 - \text{Sgn}(x)]\{1 - 1 + [\text{Sgn}(x)]\} \quad (5)$$

$$\bar{N}(x) = 0.5[1 + \text{Sgn}(x)]\{1 - 1 - [\text{Sgn}(x)]\} \quad (6)$$

$$\bar{M}(x) = 0.5[1 - \text{Sgn}(x)]\{1 + 1 + [\text{Sgn}(x)]\} \quad (7)$$

### 3- Reduced Singularity of the Matrix Algorithm

The main idea of this paper is presented based on the reduced singularity of the matrix  $R^T$ , which uses principles of linear algebra. In the proposed method, we identify numerical dependent column vectors in the matrix  $R^T$ , and remove them from it. In fact, in the process of optimization of the problem (Equation 2) each of the column vectors, is an equation that is embedded in the rows of the matrix  $R$ . In the process of solving the resulting equation, the number of equations is too many and we aim to reduce the number of equations in a similar fashion by utilizing linear algebraic techniques. This has two advantages, first, it can make less rotation by the affected preconditioner in equation (5) in the coefficient matrix. Therefore there will be less errors in the resulting unknowns problem ( $\mathbf{Q}$ ). This arises from the idea that parallel or Pseudo parallel vectors in the coefficient matrix have been removed. Second, with reducing the degree of ill-conditioning of the problem, stability of the results will be enhanced.

*ALGORITHM: let  $A$  be an  $n \times n$  (square) matrix, and matrix  $B$  is the result of upper triangularization by following method on the matrix  $A$ , then  $i$ 'th row of  $A$  ( $1 \leq i \leq n$ ) is linear dependent if  $i$ 'th column to end'th column of  $i$ 'th row of  $B$  are zero.*

*Method of upper triangularization:*

1. *from The three elementary row operations (1.  $e_{(p,q)}$ , 2.  $e_{\lambda(p)}$ , 3.  $e_{(p)+\lambda(q)}$ ), The second and third are used (dont interchange of two rows of  $A$ ).*
2. *Be used  $A_{i,i}$  as a pivot element and before pivoting, if possible the  $A_{i,i}$  to be non-zero ( $1 \leq i \leq n$ ).*
3. *In the process, if the  $A_{i,i}$  was zero, be used  $A_{i+1,i+1}$  as a pivot element.*

In order to use this algorithm to solve the equation (5), we must be careful about two things. First, the matrix  $R$  must be an  $m \times n$  ( $m \gg n$ ), thus initially it should be partitioned into several  $n \times n$  sub matrices. Second, in the case of  $\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \dots + \lambda_t A_t + A_i = 0$  the matrix  $A$  is rank deficient because one or more rows and columns of  $A$  are linear combinations of some or all of the remaining rows and columns. Here, the matrix  $A$  having a cluster of small singular values and there is well-determined gap between large and small singular values of  $A$  and it causes one type of system of equations with an ill-conditioned coefficient matrix ( $A$ ). Another type of ill-conditioning of matrix  $A$  exists in ill-posed problems. In this case, rank and numerical rank are full, but the ratio between the largest and the smallest singular values is large and we have numerical instability in the solution of the system of equations. This implies that one or more rows and columns of  $A$  are numerically dependent on other rows and columns. Thus, they can be written as  $\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \dots + \lambda_t A_t + A_i = \varepsilon$ . In the sub matrices of  $R$ , we encounter with this situation and finding a suitable estimate for  $\varepsilon$  is very important.

### 4- Numerical Example

The applicability of the proposed method on the identification of a general 8-story non-shear planar frame with non-proportional damping matrix as shown in Figure 1 is presented. Considering the rigid diaphragm effect, horizontal displacements are constrained at the story levels. To constrain the number of DOF's of the model to eight, the system masses are lumped at the story levels. The exact stiffness matrix of the model is defined using the FE model. Harmonic sweep (whose frequency sweeps from 1 to 10 Hz) input forces are applied at the first story level and the corresponding acceleration responses were obtained. Considering that the measured responses are noisy, Gaussian random white noise has been added to the calculated responses. The level of the noise is defined as the root mean square (RMS) of noise with respect to the RMS of the structure response and input forces. In each case, the amount of error of the system properties is calculated based on the mean error of the diagonal elements of property matrices. In each case, the amount of error of the system properties is calculated based on the mean error of the diagonal elements of property matrices. The method allows the complete identification of the structural mass, damping and stiffness matrices by direct solution of differential equations of motion. The structural system identification sensitivity is presented in the Figure shown below in two cases using and not using the reduced matrix singularity method when data is disturbed with noise (0~10%), regularization and the reduced error in the results is observed.

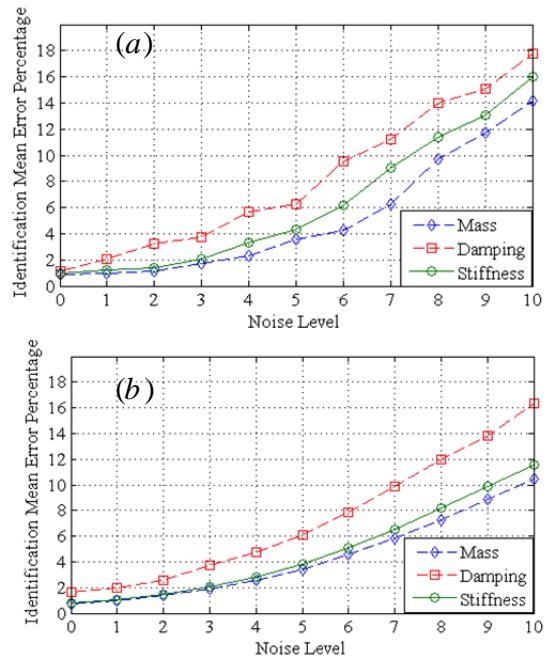


Fig. 1. Mean error percentage in system physical parameters identification for the case of 1~10% noises level: (a) not using reduce matrix singularity, (b) using reduce matrix singularity

## Efficiency Improvement of the Structural System Identification by Reducing Singularity of the Response Matrixes in Inverse Solution of Equations of Motion

M. Ghasemi<sup>1</sup> B. Taqavi<sup>2</sup> S. Abbasbandy<sup>3</sup>

### 1- Introduction

Structural system identification is known as a prelude of damage detection and structural health monitoring in which identification is operated on the base of inputs and outputs data, and occasionally is needed to find the inverse solution of system transfer function. Generally in the system identification process, the inverse problem is often an ill conditioned problem from a mathematical point of view. This paper presents a method for identification of linear system physical parameters (structural mass, damping and stiffness matrices) using the inverse solution of the equation of motion in the frequency domain, by focusing on the reduction of the ill conditioning effect. The method utilizes the measured responses from the forced vibration test of the structure in order to identify system properties and detect the probable damages.

Input and output data is gathered in an augmented matrix  $[A|b]$  and the large amount of this data causes the ill conditioned problem. Moreover, as an inevitable problem, there is a noise in the measurement that causes some discrepancies in the results of identification. Ill conditioning causes instability in the results of identification, the instability and noisy result reduces the validity of the results and accordingly it will be a worthless statistical method in system identification (SI). An algorithm is presented in this paper to improve the ill conditioning problem that is a special upper triangularization matrix method. The proposed algorithm can identify parallel and pseudo parallel vectors in the coefficient matrix of linear equations. By removing these linearly dependent vectors and thus reducing the degree of singularity of the matrix, stabilization results which is a key objective in numerical linear algebra. In order to perform an optimal estimation of identification results, least-squares and penalty function methods are used. The validity and efficiency of the reduced singularity of the matrix method is tested on a non-shear eight frame structure by using the direct model updating method. The aforementioned structures have a non-proportional damped matrix and are subjected to sweep harmonic forces. The results show that the

proposed algorithm improves the stability of the estimation and the answer is quite useful.

### 2- Direct System Identification Method

The direct identification method can be used to estimate full system properties including mass, M, damping, C, and stiffness, K, matrices of the system, based on the inverse solution of the equation of motion with the following formulations will be used. The equations of motion for a viscously damped linear system with "n" number of degrees-of-freedom and "m" time step of input and response can be written as:

$$M_{n \times n} \ddot{X}_{n \times m} + C_{n \times n} \dot{X}_{n \times m} + K_{n \times n} X_{n \times m} = F_{n \times m} \quad (1)$$

By using the properties of blocked matrices, and defining  $R_{m \times 3n} = [\ddot{X}_{m \times n}^T \quad \dot{X}_{m \times n}^T \quad X_{m \times n}^T]^T$  and  $Q_{3n \times n} = [M_{n \times n} \quad C_{n \times n} \quad K_{n \times n}]^T$ , Equation (1) yields:

$$R_{m \times 3n} Q_{3n \times n} = F_{m \times n} \quad (2)$$

$R$  is generally an ill-conditioned matrix and a small change in  $R$  can cause a large change in  $R^{-1}$ . Therefore, the accuracy and precision of Equation (2) is very sensitive to noise in the  $R$ . The residual force in the equation of motion in the frequency domain and as regards Ghafori Ashtiani and Ghasemi [1] showed that to obtain the best estimation for the linear system properties, minimization of the real or imaginary part of residual forces approximately lead to identical results of the physical parameters. Thus, it can be expressed as follows:

$$E_{R_{m \times n}} = R_{R_{m \times 3n}} Q_{3n \times n} - F_{R_{m \times n}} \quad (3)$$

The optimization objective function after minimization of the residual force and with regard to the condition of the unknown matrix (symmetrical system property matrices and diagonal mass matrix), is constrained by optimization as a penalty function and it is expressed as follows:

$$f = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n E_{kj}^2 + R_p \left( \sum_{i \neq j=1}^{2n} Q_{ij}^2 + \sum_{i=n+1}^{3n} (Q_{ij} - Q_{j-n,i+n})^2 + \sum_{i=2n+1}^{3n} (Q_{ij} - Q_{j-2n,i+2n})^2 \right) \quad (4)$$

where  $R_p$  is the coefficient of the penalty function and it refers to the value of the objective function. Consequently, the Optimum solution, is available with a process of differentiation ( $\frac{\partial f}{\partial Q_{ij}} = 0$ ) and it can be written as follows:

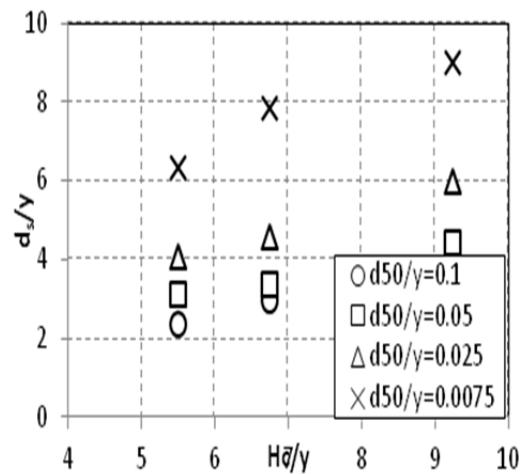
$$\frac{\partial f^2}{\partial Q_{ij}} = 0 \Rightarrow p R_R Q = p F_R^T \quad (5)$$

where  $p$  is a preconditioner such as the penalty function.

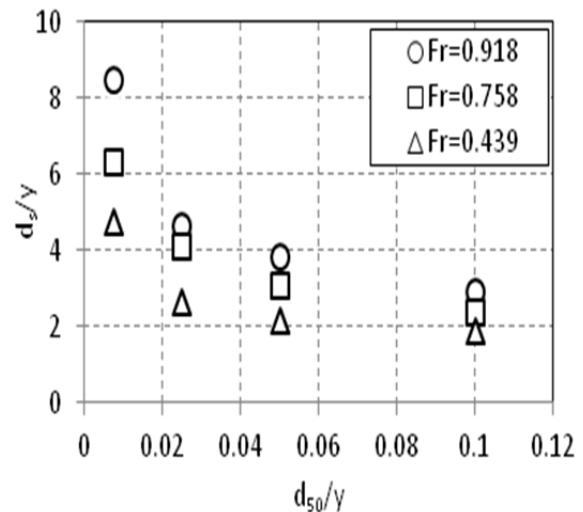
<sup>1</sup> Associate Prof., Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University of Qazvin.

<sup>2\*</sup> Corresponding Author, M.Sc. Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University of Qazvin  
Email Address: b.taqavi@gmail.com.

<sup>3</sup> Associate Prof., Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin.



**Fig. 2.** The effect of the relative spillway height and the relative of sediment size on the relative depth of score hole for  $Fr= 0.758$



**Fig. 3.** The effect of the relative of sediment size and different Froude number on the relative depth of score hole for the constant relative spillway height  $H_c/\gamma=5.5$

## Numerical Study of Scouring Downstream of a Free Jet

Kh. Hosseini<sup>1</sup> H. Novkhaste<sup>2</sup>

H. Karami<sup>3</sup> S. Amin Salamatian<sup>4</sup>

### 1- Introduction

The energy available in the terminal of dam structures causes erosion of the river bed. Different parameters such as discharge, difference between upstream and downstream, radius of jet, mean diameter of bed materials, velocity of the jet and the tail water are recognized on the score hole and its geometry. The cognizance of these parameters aids the designers to provide a suitable layout for the scoring pool. Abida, H. and Townsend, [2] showed that the length and depth of the score hole decrease by increasing the tail water. Westrich,[3] Kobus, H. investigated the height of overflow spillway on scoring. Wanyun [9]. modeled the score hole of a submerged jet using 2D models. In their study, the k-ε turbulence model is considered. The shear resistance between the grains, the seepage force, void ratio and the gravitational force are taken into account as the resistant forces and the local shear stress induced by flow as the tractive force.

As the majority of studies on scoring are based on experimental data, in this research, the experimental conditions for scoring are simulated numerically using SSIIM software. After the calibration tests in the numerical model, the effects of flow conditions and sediment characteristics on the depth of the score hole are evaluated as a function of the height of spillway, Froude number and the densimetric Froude number.

### 2- Governing equations and calibration of numerical model

The governing equations utilized to simulate the flow and sediment are: the continuum equation and momentum equations (Navier Stocks' equations) for flow, **k-ε** model for simulating the turbulence, advection-diffusion equation for suspended load and Englund Hansen equation for bed load.

Calibration tests are performed to provide the appropriate value for the roughness and mesh sizes,

the turbulence model and bed load equation. In the calibration tests, the numerical results for the maximum depth of score holes are compared with their values obtained from the experimental tests. The mean sizes of sediment as the roughness height, the mesh cells in 35\*5\*301 numbers, k-ε for the turbulence model and Englund Hansen formula for bed load present more correlation factors between the numerical and experimental data.

### 3- Analysis of the numerical model

The effect of different parameters such as height of spillway, the densimetric Froude number and relative diameter of sediment are investigated on the maximum score hole depth. All data are presented in the dimensionless form.

Figure 1 presents the effect of the densimetric Froude number on the score hole for a constant Froude number. As shown in this Figure, the relative score hole is a linear function of the densimetric Froude number of bed materials with a positive slope. This linear attitude is the same for all spillway heights.

Figure 2 represents the effect of the relative height and relative diameter of sediment size on the relative score hole. As shown, the relative score hole increases with increasing the height of the spillway and decreasing the relative sediment sizes. Also, we could deduce that the score hole is more sensitive for small sized sediments.

In Figure 3 the relative score depth is shown versus the relative sediment size and Froude number. The relation between the different parameters has a logarithmic form. As shown in this Figure, for small sediment sizes the relative depth of the score hole is enormous, but for the bigger sediment sizes the relative depth of the score hole is small.

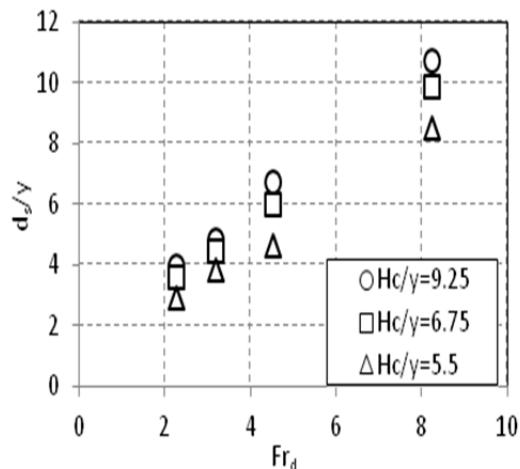


Fig. 1. The effect of densimetric Froude number and the relative spillway height on the relative depth of score hole for  $Fr= 0.918$

<sup>1</sup> Correspondent Author, Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University.

Email: khhosseyni@yahoo.com

<sup>2</sup> M.Sc. Student, Civil Engineering Faculty, Semnan University.

<sup>3</sup> Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University.

<sup>4</sup> Assistant professor, Civil Engineering Faculty, All-e Taha University.

Fig. 3. As shown, the least values of energy consumption, i.e. COD equal to 350mg/L, are related to the stirrer and the lamp. This is considered as the optimum concentration in this research.

### 3.2- Determination of Radiation Power of Optimum UV

The effect of radiation power on COD removal is indicated in Fig. 4. By increasing the radiation power and the numbers of photons emitted, the efficiency remained almost constant after a long time as shown in Fig. 4.

To determine the optimum power, the variations of energy consumption per COD at different UV powers are shown in Fig. 5. According to the Figure, radiation power of 80W with energy consumption of 0.24kWh/mg/L was considered as optimum amount because of insignificant difference with the results of

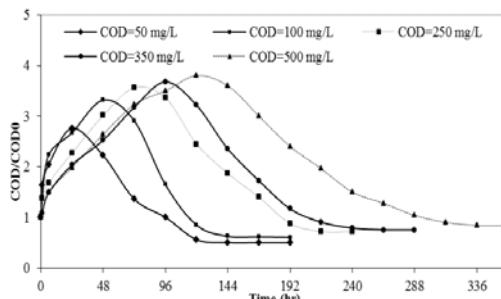


Fig. 2. Variation of COD removal in photolysis system ( $COD_0 = 50, 100, 250, 350$  and  $500 \text{ mg/L}$ ;  $P_{UV} = 60 \text{ W}$ )

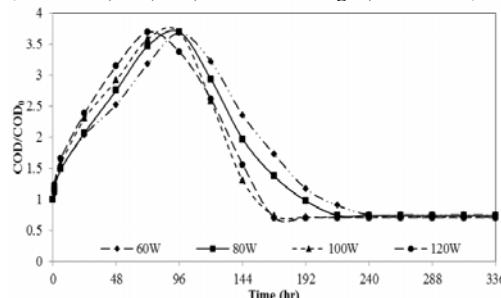


Fig. 4. The effect of different UV radiation powers at COD of 350 mg/L ( $COD_0 = 350 \text{ mg/L}$ ;  $P_{UV} = 60, 80, 100$  and  $120 \text{ W}$ )

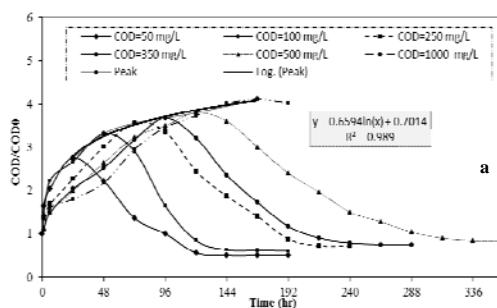


Fig. 6. Variations of COD removal and logarithmic regression  $COD_{\max}/COD_0$  amounts according to a) Time and b)  $COD_0$  ( $P_{UV}=60\text{W}$ )

100W.

### 3.3- Time Modeling of $COD_{\max}$

Modeling the system by examining performance in different CODs under light intensity of 60 watts and also best-fit values of  $COD_{\max}/COD_0$  for each concentration in terms of time are shown in Fig. 6.

As shown in Fig. 6-a, variations in  $COD/COD_0$  over time in different CODs follow a similar trend. Connecting maximum points of these trends concludes an appropriate linear relation (Fig. 6-b). This relation is a logarithmic regression (Eq. 1 and Eq. 2) with correlation coefficients of 0.99 and 0.96, respectively.

$$COD_{\max}/COD_0 = 0.6594 \ln(t) + 0.7014 \quad (1)$$

$$COD_{\max}/COD_0 = 0.4164 \ln(COD_0) + 1.2458 \quad (2)$$

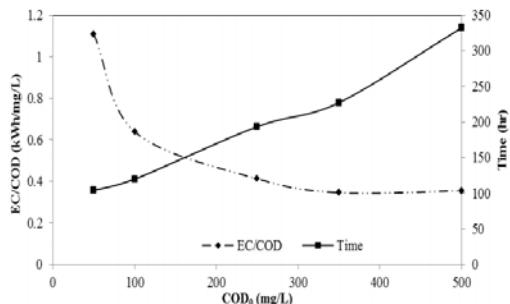


Fig. 3. Energy consumption at different initial CODs ( $COD_0 = 50, 100, 250, 350$  and  $500 \text{ mg/L}$ ;  $P_{UV} = 60 \text{ W}$ )

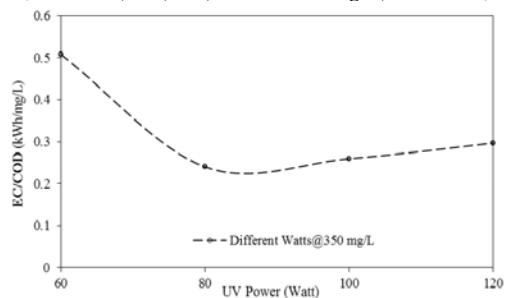


Fig. 5. Energy consumption level against different powers ( $COD_0 = 350 \text{ mg/L}$ ;  $P_{UV} = 60, 80, 100$  and  $120 \text{ W}$ )

## Photolysis System Performance in Petroleum Hydrocarbons Removal from Wastewater and its Modeling

M. Gh. Rahimi<sup>1</sup> A. Khodadadi<sup>2</sup> B. Ayati<sup>3</sup>

### 1-Introduction

Due to high amounts of toxic multi-cyclic aromatics, wastewaters contaminated with petroleum compounds are generally considered to be harmful. They may cause significant damages to water resources and human health and should be treated before discharging them to the environment. So far, different methods have been employed for treatment of wastewater contaminated by petroleum compounds. In this study, the photolysis process is investigated.

During recent years, use of UV technology for water and wastewater treatment processes has noticeably increased. UV photolysis and photo-initiated oxidant ions have a potential for inactivation of microorganisms and destruction of a wide variety of contaminants in aqueous medium. Current research works confirm this claim. In this research, the capability of photolysis system, its optimum conditions, its use as pretreatment in destruction of hard-degradable petroleum hydrocarbons, and preparation of its effluent for the main treatment unit are investigated. Also, the time required for maximum COD removal is modeled.

### 2- Experimental Program

In this study, a plastic rectangular cube pilot (L: 24 cm, W: 17 cm, H: 9 cm) was applied as the photolysis system (Fig. 1).

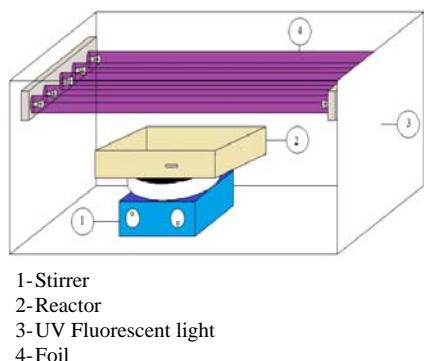


Fig. 1: Pilot and Schematic: Photolysis system

<sup>1</sup> M.Sc. Student of Civil and Environmental Eng. Dept., Tarbiat Modares University.

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associate Prof. of Eng. Dept., Tarbiat Modares University  
Email: akdarban@modares.ac.ir

<sup>3</sup> Associate Prof. of Civil and Environmental Eng. Dept., Tarbiat Modares University

To have a composition similar to that of the Tehran Refinery's effluent, a mixture of gasoline ( $C_{16}$ - $C_{20}$ ) and crude oil ( $C_8$ - $C_{37}$ ) with a ratio of 1 to 2 was prepared and aerated for 48 hours. So, the lighter compounds with water vapors were stripped and removed from the medium and the heavier hydrocarbons (heavier than  $C_{35}$ ) remained on the reactor walls.

In the photolysis system the same wastewater that has been prepared earlier was directly exposed to UV-C ray. Concentration parameters (50, 100, 250, 350 and 500 mg/L), radiation power (60, 80, 100 and 120 W) were also examined. First, optimum concentration was determined given radiation power of 60 W and later optimum radiation power was determined given the optimum concentration. The parameters of radiation power and concentration were optimized based on the minimum energy consumption as determined by the industry earlier. Reactor temperature was monitored as a controlling parameter. Some insignificant vaporization from the surface of the sample was observed and it was compensated by adding distilled water prior to sampling.

### 3- Conclusions

In this study, contact surface of radiation and the distance of the sample from lamps were assumed to be constant and the effect of UV radiation alone and the effect of concentration on the efficiency of contaminant removal in Photolysis process have been examined.

#### 3.1- Determination of Optimum Concentration

The results obtained during investigation of the effect of UV light at different CODs and radiation power of 60 W are given in Fig. 2. Initially, an increasing trend of COD level was observed which can be attributed to the nature of hydrocarbon-rich contaminant. Then in about a couple of days for each COD concentration the chart reached a maximum value of COD corresponding to the input concentration.

As shown in the chart, the radiation period of UV rays to meet constant removal efficiency is increased by increasing the concentration of the contaminant. So, given the CODs of 50, 100, 250, 350 and 500mg/L, the radiation period of UVs are 5, 6, 9, 11 and 14 days, respectively. Furthermore, the removal efficiency under steady state declined upon increasing the concentration of the contaminant. Maximum values of removal efficiency of the contaminant due to 60W radiation of UV for the above-mentioned CODs are 50, 37, 28, 25 and 16%, respectively. Increasing the COD value as shown in the chart may be attributed to degradation of hard degradable petroleum compounds into other petroleum compounds.

For the purpose of determination of optimum concentration, the period of tests and consumed energy should be cost-effective. Energy consumption against removal of each unit of COD are presented in



## CONTENTS

<b>Photolysis System Performance in Petroleum Hydrocarbons Removal from Wastewater and its Modeling</b>	M. Gh. Rahimi - A. Khodadadi B. Ayati	1
<b>Free Impinging Jets Scouring, Using Numerical Model</b>	K. Hosseini - H. Nokhasteh H. Karami - S. A. Salamatian	9
<b>Efficiency Improvement of the Structural System Identification by Reducing Singularity of the Response Matrixes in Inverse Solution of Equations of Motion</b>	M. Ghasemi - B. Taghavi S. Abbasbandy	23
<b>Displacement Control Based Analytical Description of Pinching, Sliding, Degrading Hysteretic System</b>	M. Zeynalian - M. Mokhtari	39
<b>Gill Cells Experimental Modeling in Very Large Floating Structures</b>	A. Parizadeh Qushkhaneh M. J. Khanjani	57
<b>Improved Stability Transformation Method to Control Convergence of Structural Performance Measure Approach</b>	B. Keshtegar	77
<b>Efficiency Assessment of Local Prediction Method Considering Reconstruction of Phase Space and Artificial Neural Network Model for Prediction of Runoff (Case Study: Pole-Kohneh Station, Kermanshah)</b>	M. Zounemat Kermani Kh. Amirkhani	91
<b>Modeling the Patch Load Resistance of Plate Girders Using a Support Vector Machine</b>	A. Kordjazi - F. Pooya Nejad F. Shahabian	109
<b>Prediction Compressive Strength of Concretes Containing Silica Fume and Styrene-butadiene Rubber (SBR) with a Mathematical Model</b>	A. Haghollahi - A. Tarighat M. Shafieyzadeh	125



**JOURNAL OF  
CIVIL ENGINEERING  
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD**

Ferdowsi University of Mashhad

ISSN 2008-7454

**General Director:** F. Irani

**Editor-Chief:** M. R. Esfahani

**Published:** Ferdowsi University of Mashhad

**Editorial Board:**

<b>M. Azhari</b>	Professor	Isfahan University of Technology
<b>J. Bolouri Bazaz</b>	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad
<b>M. Reza Esfahani</b>	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
<b>F. Irani</b>	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
<b>S. M. Hosseini</b>	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
<b>A. A. Kheirodin</b>	Professor	Semnan University
<b>A. Soroush</b>	Associate Professor	AmirKabir University of Technology
<b>F. Shahabian Moghadam</b>	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
<b>R. Attarnejad</b>	Professor	University of Tehran
<b>M. Ghafoori</b>	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
<b>M. Faghfour Maghrebi</b>	Professor	Ferdowsi University of Mashhad
<b>Gh. R. Ghodrati Amiri</b>	Professor	Iran University of Science & Technology
<b>D. Mostofinejad</b>	Professor	Isfahan University of Technology
<b>E. Seyed Hosseini</b>	Associate Professor	Ferdowsi University of Mashhad

**Text Editor:** A. Dehghn

**Administrative Director:** T. Hooshmand

**Typist:** A. Noie – T. Hooshmand

Journal of Civil Engineering

Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

P. O. Box. 91775-1111, Mashhad, I.R.IRAN

Tel: +98 51 38806024; Fax: +98 51 38807384; Email: ejour@um.ac.ir

Web site: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



# Journal of Ferdowsi Civil Engineering

(Journal of School of Engineering)

Serial No. 16

<b>Photolysis System Performance in Petroleum Hydrocarbons Removal from Wastewater and its Modeling</b>	1
M. Gh. Rahimi - A. Khodadadi - B. Ayati	
<b>Free Impinging Jets Scouring, Using Numerical Model</b>	9
K. Hosseini - H. Nokhasteh - H. Karami S. A. Salamatian	
<b>Efficiency Improvement of the Structural System Identification by Reducing Singularity of the Response Matrixes in Inverse Solution of Equations of Motion</b>	23
M. Ghasemi - B. Taghavi - S. Abbasbandy	
<b>Displacement Control Based Analytical Description of Pinching, Sliding, Degrading Hysteretic System</b>	39
M. Zeynalian - M. Mokhtari	
<b>Gill Cells Experimental Modeling in Very Large Floating Structures</b>	57
A. Parizadeh Qushkhaneh - M. J. Khanjani	
<b>Improved Stability Transformation Method to Control Convergence of Structural Performance Measure Approach</b>	77
B. Keshtegar	
<b>Efficiency Assessment of Local Prediction Method Considering Reconstruction of Phase Space and Artificial Neural Network Model for Prediction of Runoff (Case Study: Pole-Kohneh Station, Kermanshah)</b>	91
M. Zounemat Kermani - Kh. Amirkhani	
<b>Modeling the Patch Load Resistance of Plate Girders Using a Support Vector Machine</b>	109
A. Kordjazi - F. Pooya Nejad - F. Shahabian	
<b>Prediction Compressive Strength of Concretes Containing Silica Fume and Styrene-butadiene Rubber (SBR) with a Mathematical Model</b>	125
A.Haghollahi - A.Tarighat - M. Shafieyzadeh	