

# ارائه مدل هیستریزیس ترکیبی جدید نیرو-تغییر مکان در تخمین تقاضای جابجایی پس ماند پل های بتنی تک ستونه

مختار انصاری، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
فرهاد دانشجو (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
مسعود سلطانی محمدی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

E-mail: danesh\_fa@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۲

## چکیده

هنگامی که پلها دچار تغییر شکلهای غیر الاستیک در زلزله های نزدیک گسل می شوند، عمدتاً به راستای قائم اولیه بر نمی گردند و دچار تغییر شکلهای پسماند قابل توجهی می شوند. این تغییر شکل پسماند زیاد باعث می شود که پل ها با وجود عدم فرو ریزش، غیر قابل تعمیر باشند و امکان استفاده از آنها پس از زلزله مقدور نباشد. بنابراین سنجش و تخمین جابجایی پسماند پل ها در زلزله های نزدیک گسل از موضوعات مهم ارزیابی سرویس پذیری پل ها پس از زلزله است. مدل های هیستریزیس اولیه برای تحلیل دینامیکی ستونهای بتنی معمولی توسعه داده شده اند و در اکثر مواقع قادر به تخمین صحیح جابجایی های پسماند قابل ملاحظه حادث شده در تحریک های یک جهته یا متمایل به یک جهت نیستند. هدف از این تحقیق ارائه مدل هیستریزیس از نوع متمایل به بیشینه تغییر مکان است که قادر است در مقایسه با مدل های هیستریزیس متعارف، جابجایی های پسماند مناسبی تولید کند. این مدل چند خطی متمایل به بیشینه تغییر مکان علاوه بر کاهش سختی در سیکلهای باربرداری، توانایی در نظر گرفتن زوال مقاومت در هر نیم سیکل را نیز دارد. نقطه مربوط به مرحله تسلیم در این منحنی هیستریزیس دو جهت متفاوت است و در مقاطع غیر متقارن نیز امکان تعریف سختی الاستیک متفاوت در دو جهت وجود دارد. از خواص دیگر این مدل وجود نقطه شکست در مرحله باربرداری و زوال مقاومت در هر نیم سیکل است. در این تحقیق علاوه بر تخمین جابجایی پسماند با مدل هیستریزیس جدید، عملکرد مدل های هیستریزیس متعارف دیگر در تخمین جابجایی پسماند لرزه ای در تحلیل سیکلی و دینامیکی غیر خطی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان از دقت بهتر مدل هیستریزیس پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل های هیستریزیس دارد.

واژه های کلیدی: مدل هیستریزیس متمایل به بیشینه، تقاضای جابجایی پسماند، زوال مقاومت، کاهش سختی، تحلیل دینامیکی

## ۱. مقدمه

Yazgan and [Ramirez and Miranda, 2012] [es, 2005] [Dazio, 2011]. خسارت‌های مالی ناشی از جابجایی ماندگار در پل‌ها بعد از زلزله‌های شدید، باعث شده تا محققان زیادی در پی راه‌حلی برای کاهش این جابجایی باشند که مهم‌ترین روش در این حوزه استفاده از تاندونهای پیش‌تینده مقاومت بالا در پایه‌های بتنی پل‌ها است [Fahmy et al, 2010] [Jeong et al, 2008] [Hachem et al, 2003]. محققان در تست‌های آزمایشگاهی دریافته‌اند که در صورتی که تاندون پیش‌تینده در مرکز مقطع ستون بکار رود دارای اثر بیشتری نسبت به چیدمان تاندونها در نقاط دورتر از مرکز مقطع ستون پل است [Wang et al, 2011] [Sakai and Mahin, 2004] [Sakai and Mahin, 2006]. اولین و ساده‌ترین مدل‌های هیستریزیس برای تخمین جابجایی پس‌ماند توسط محققین ژاپنی ارائه گردید، در این مدل دوخطی ساده، شیب منحنی بارگذاری و باربرداری مساوی بود و اثرات زوال با توجه به هندسه و مشخصات سازه در آن اعمال نشده بود [Kawashima et al, 1998] [Macrae and Kawashima, 1997]. با توجه به ماهیت پالس گونه و اثرات جهت پیشرو در زلزله‌های نزدیک گسل، همواره برآورد و تخمین صحیح جابجایی پسماند به وسیله مدل‌های هیستریزیس متعارف اعضای بتن مسلح با خطا همراه است، بنابراین توسعه مدل هیستریزیس مناسب به همراه پارامترهای زوال برای تخمین جابجایی‌های پسماند لرزه‌ای از اهمیت خاصی برخوردار است [Sengupate and Bing, 2011] [Bojorquez and Ruiz-Garcia, 2013]. با وجود آنکه امروزه از روش مدلسازی فایبر برای ارزیابی دقیق سازه‌های بتن مسلح به ویژه پل‌ها استفاده می‌شود، اما پیچیدگی‌های مدلسازی روش فایبر و حساسیت نتایج آن به انتخاب درست پارامترهای متعدد از یک سو و سادگی و سرعت بالای تحلیل دینامیکی بر اساس رفتار هیستریزیس نیرو-تغییر مکان، باعث شده تا در تحقیقات متعدد به دقت و محدوده کاربرد این مدل‌های هیستریزیس پرداخته شود [Billington and Lee, 2010] [Saiidi and Seyed Ardaka, 2012] [Lehman et al, 2000] [ni, 2012] [Berry and Eberhand, 2007]. در این تحقیق سعی شده تا اثر مدل‌های هیستریزیس، شکل

یک مدل هیستریزیس مناسب باید قادر باشد پاسخ سیکلی سیستم بتن مسلح را برآورد کند و علاوه بر آن باید اثرات کاهش سختی و مقاومت اجزای مختلف آن را در طول تاریخچه تغییر شکل وارده برآورد نماید [Sengupate and Bing, 2013]. مدل‌های هیستریزیس باید دارای خواصی مانند واقع‌گرایی، دقت، سادگی و پیوستگی باشند. در گذشته مدل‌های هیستریزیس الاستو پلاستیک و دوخطی به سبب سادگی در حل عددی برای تخمین تقاضاهای لرزه‌ای بکار می‌رفتند، اما در هیچ کدام از آنها اثرات پارامترهای زوال در نظر گرفته نمی‌شد. [Gajalakshmi and Helena, 2012] [Clough and Johnston, 1966] اثر کاهش سختی در سیکل‌های مختلف بارگذاری را در نظر گرفتند. بعدها تاکدا و همکاران [Takeda et al, 1970] پس از تست‌های متعدد نمونه‌های آزمایشگاهی نشان دادند که نمونه‌های بتن مسلح در طول بارگذاری جانبی وارده همواره در معرض کاهش سختی، زوال مقاومت و جذب انرژی هیستریزیس هستند. مدل‌های اولیه هیستریزیس اعضای بتن مسلح قادر به در نظر گرفتن اثرات زوال نبودند و یا مدل‌هایی که بعداً توسعه پیدا کردند عمدتاً زوال سختی و مقاومت را با لحاظ تاریخچه محدودی از سیکل‌های قبل در نظر می‌گرفتند [Sivaselvan, 2000] [Kunnath and Reinhorn, 1992] [and Reinhorn, 2000]. برای افزایش دقت در تخمین پاسخ لرزه‌ای اعضای سازه‌ای لازم است تا زوال و افت وابسته به تاریخچه خرابی در مدل هیستریزیس وارد شود. زوال به پارامترهای متعددی وابسته است که عمده آن مربوط به تغییر شکل‌های پلاستیک و استهلاک انرژی هیستریزیس در سیکل‌های متوالی بارگذاری است [Dong et al, 2003] [Novelli, 2008]. اگرچه تأثیر چرخه‌های هیستریزیس و پارامترهای زوال در برآورد تقاضاهای لرزه‌ای بیشینه بررسی شده است، اما با توجه به اهمیت بررسی کارایی پل‌ها پس از زلزله‌های شدید، همواره نیاز به تخمین شاخص‌های عملکردی مهم دیگری نیز مانند جابجایی پسماند در مباحث ارزیابی لرزه‌ای وجود دارد [Hussein, 2010] [Muthukumar and Desroch, 2010].

## ارائه مدل هیستریزیس ترکیبی جدید نیرو-تغییر مکان در تخمین تقاضای ...

NF1 و NF2 هستند که با آئین نامه Caltrans طراحی شده‌اند. مشخصات هندسی پایه های مورد مطالعه شامل ارتفاع پایه، قطر پایه، درصد آرماتورهای طولی، درصد آرماتورهای عرضی و ... در جدول (۱) به ترتیب آورده شده است. برای تست میز لرزه و تحلیل دینامیکی نمونه های اشاره شده از رکورد های جدول (۲) استفاده می شود. رکورد این زلزله ها دارای پالس شدیدی در تاریخچه زمانی سرعت است که جابجایی پسماند زیادی را ایجاد می کند.

### ۳. معرفی مدل پیشنهادی هیستریزیس دو خطی و

#### برنامه تحلیل غیر خطی

مدل های هیستریزیس متعددی برای برآورد تقاضای جابجایی پسماند لرزه ای توسعه داده شده است. عمده مدل ها دارای دقت مناسبی برای برآورد جابجایی و پاسخ های بیشینه است اما در برآورد جابجایی پسماند دقت مناسبی ندارند.

چرخه های هیستریزیس و پارامترهای زوال و کاهنده در برآورد جابجایی پسماند لرزه ای پل های بتنی در زلزله های نزدیک گسل بررسی شود. در انتها با توجه به ماهیت یک جهته تحریک زلزله نزدیک گسل، مدل چند خطی متمایل به بیشینه تغییر مکان ارائه می گردد که قادر است با دقت مناسبی جابجایی پسماند لرزه ای را تخمین بزند. این مدل هیستریزیس دارای خواص منحصر بفردی مانند شکست مسیر باربرداری روی محور افقی ثانوی، تغییر شیب در مسیر باربرداری به بارگذاری مجدد، زوال مقاومت در هر نیم سیکل بارگذاری مجدد و سختی الاستیک متفاوت در دو جهت است، که باعث شده تا برآورد جابجایی پسماند آن دقت قابل قبولی داشته باشد.

### ۲. مشخصات هندسی و مکانیکی پایه پل مورد مطالعه

برای بررسی تأثیر کاهندگی مدل هیستریزیس پیشنهادی، پاسخ دینامیکی این مدل برای تعدادی پایه پل مرجع، با نتایج تست میز لرزه مقایسه می گردد. پایه های پلهای مرجع MN، ETN،

جدول ۱. مشخصات هندسی پایه های پل مرجع در تست میز لرزه [Choi et al. 2010] و [Jeong et al. 2008]

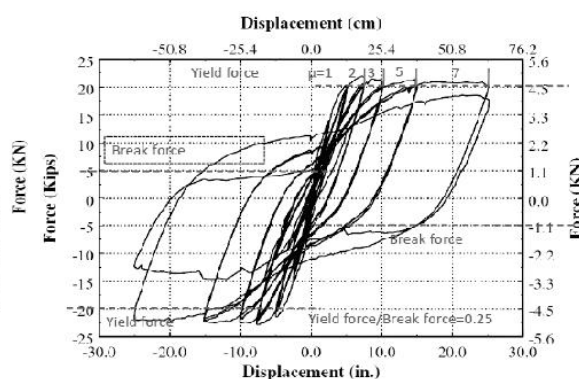
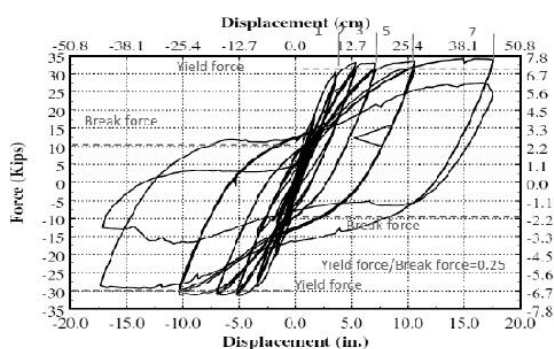
نمونه	MN	ETN	NF-1	NF-2	RC
ارتفاع (میلی متر)	۱۶۰۰	۲۷۵۶	۱۸۲۸	۱۸۲۸	۲۰۳۲
قطر (میلی متر)	۳۵۶	۳۵۶	۴۰۶/۴	۴۰۶/۴	۳۵۶
درصد آرماتورهای طولی (%)	۲/۹	۲/۹	۲	۲/۲	۱/۲
درصد آرماتورهای عرضی (%)	۱/۳۷	۱/۵۴	۰/۹۲	۱/۱	۰/۷۶
نسبت وجهی	۴/۵	۷/۷۵	۴/۵	۴/۵	۴/۵
آئین نامه طراحی	Caltrans Near-Fault	Caltrans Near-Fault	Caltrans SDC 2004	AASHTO 2002	Caltrans SDC 2004
زمان تناوب نمونه (ثانیه)	۰/۶۶	۱/۵۰	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۰
شتاب طیفی (g)	۱/۳۹۷	۰/۷۵	۱/۲۷۵	۱/۲۷۵	۱/۲
مقیاس نمونه کوچک شده					
آزمایشگاهی نسبت به پایه اصلی (درصد)	۳۰	۳۰	۳۳	۳۳	۳۰

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های انتخابی برای تحلیل دینامیکی [Choi et al, 2010] و [Jeong et al, 2008]

زلزله (Mw)	ایستگاه	فاصله از گسل (km)	پیشینه شتاب زمین (g)	پیشینه سرعت زمین in/s(cm/s)	پیشینه جابجایی زمین in(cm)	نمونه	مقیاس
Northridge(6.7)	Rinaldi	۴/۴ (۷/۱)	۰/۸۳۸	۶۵/۴ (۱۶۶)	۱۱/۳ (۲۸/۹)	MN,ETN	۰/۶
Northridge(6.7)	Rinaldi	۴/۴ (۷/۱)	۰/۸۳۸	۶۵/۴ (۱۶۶)	۱۱/۳ (۲۸/۹)	NF1,NF2	۰/۴۵-۰/۶۰
Loma prieta	Los Gatos	۲/۲ (۳/۵)	۰/۷۱	۷۰ (۱۷۳)	۲۵ (۶۵)	RC	۰/۷

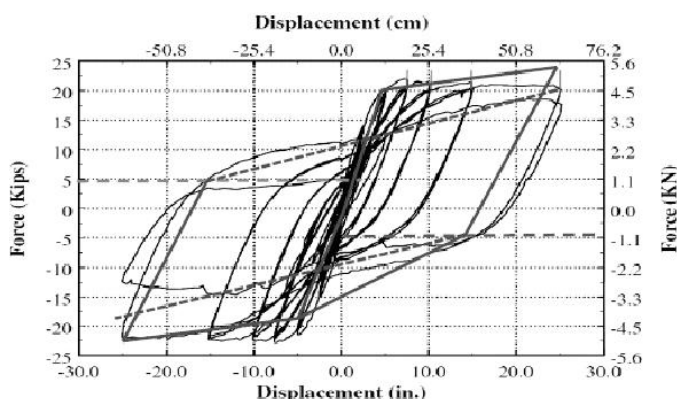
دارد و این شکستگی روی محور افقی ثانوی اتفاق می‌افتد محل این تغییر شیب در شکل (۱) با خط افقی Break force نشان داده شده است. در مدل جدید در محدوده مشخصی از باربرداری به بارگذاری مجدد، روند کاهش سختی سازه کندتر انجام می‌شود و این پدیده و افزایش سختی در مدل به دلیل محبوس شدن مصالح خرد شده دانه‌ای و خمیر سفت شده سیمان است در ترک‌های کششی ایجاد شده در مراحل قبلی بارگذاری است. پاسخ سیکلی دو پایه پل محصور شده با دورپیچ با عملکرد خمشی در شکل (۱) نشان داده شده است. مدل هیستریزس پیشنهادی با خواص شرح داده شده، به صورت خط چین روی نتایج تست سیکلی نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل خط افقی محل شکست مسیر هیستریزس نیز مشخص شده است.

مدل هیستریزس معرفی شده در واقع اصلاح شده مدل‌های هیستریزس مدل q و تا کدا است که برای تخمین مناسب جابجایی‌های پسماند ناشی از تحریک‌های یک جهته در آن تغییراتی ایجاد شده است. در این مدل ۲ خاصیت مهم به مدل هیستریزس تا کدا اضافه شده است: اول اینکه متناسب با تعداد و دامنه سیکل‌های وارده زوال مقاومت به مدل متمایل به پیشینه تغییر مکان اضافه شده است و دوم اینکه در مسیر باربرداری و بارگذاری مجدد شکستی در مسیر منحنی هیستریزس اضافه شده است. در پایه‌های پل که با ضوابط جدید لرزه‌ای طراحی شده‌اند، پاسخ سیکلی به دلیل محصورشدگی مناسب بتن هسته با خاموت دورپیچ با سایر اعضای محوری بتن مسلح قدری متفاوت است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است در مرحله باربرداری این مدل چه در فاز مثبت یا منفی، شکستگی وجود



شکل ۱. پاسخ سیکلی پایه‌های پل با ضوابط طراحی لرزه‌ای جدید

ارائه مدل هیستریزس ترکیبی جدید نیرو-تغییر مکان در تخمین تقاضای ...



شکل ۲. مشخصات مسیر مدل هیستریزس چند خطی پیشنهادی

مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شود. در این روش‌ها، مقاومت سازه در هر مرحله نسبت به مرحله قبل (به شرط ورود به ناحیه غیر ارتجاعی) کاهش پیدا می‌یابد. مطابق رابطه (۱) مقاومت هر مرحله  $F_i$  (مرحله  $i$ ) با استفاده از مقاومت مرحله قبل  $F_{i-1}$  (مرحله  $i-1$ ) تعیین می‌گردد.

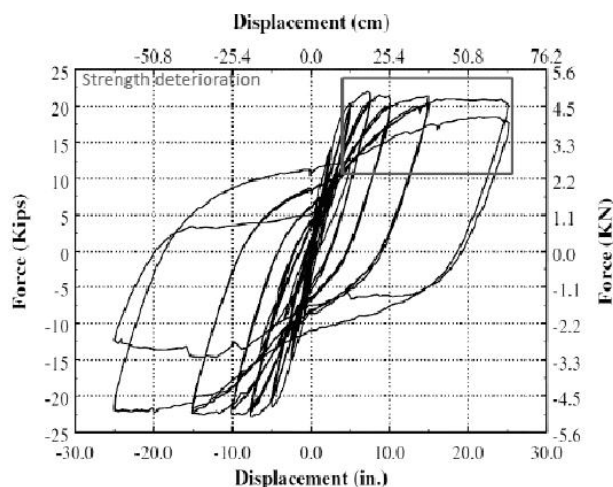
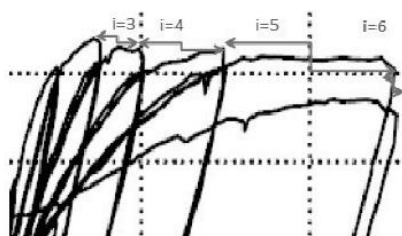
$$F_i = (1 - D_i) F_{i-1} = D_s F_{i-1} \quad (1)$$

$$F_i = (1 - D_i)(1 - D_{i-1}) F_{i-2} \quad (2)$$

$$F_i = F_j \Gamma_{j=1}^i (1 - D_j) \quad (3)$$

در این روش‌های غیر مستقیم پارامتر کاهش مقاومت  $D_i$  بر اساس نسبت انرژی هیسترتیک جذب شده در هر سیکل به ظرفیت جذب انرژی هیسترتیک یا نسبت حداکثر تغییر مکان در هر سیکل به ظرفیت تغییر شکل جانبی متناظر با خرابی محاسبه می‌شود. بر

مقاومت سازه یکی از مشخصات سازه‌های بتنی است که تحت تأثیر خرابی‌های تجمعی کاهش می‌یابد و مقدار آن در هر مرحله نسبت به مرحله قبل کاسته می‌شود. زوال مقاومت اعضای بتنی تا حد زیادی به جزئیات اجرایی آنها بسته است در صورتی که جزئیات اجرایی مناسب و کافی باشد میزان این زوال کم است و در صورتی که جزئیات اجرایی مناسب و کافی نباشد، زوال مقاومت تا حد زیادی افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به جزئیات اجرایی پایه پل‌ها و نحوه دورپیچ گذاری آن، تعیین مقدار زوال مقاومت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاهش مقاومت پایه‌های بتنی با ضوابط خاموت گذاری جدید آئین‌نامه‌های طرح لرزه‌ای در شکل (۳) نشان داده شده است. به طور کلی روش‌های کاهش مقاومت در هر سیکل به دو روش



شکل ۳. زوال مقاومت در پاسخ سیکلی پایه پل طراحی شده با ضوابط لرزه‌ای [Lehman, D.E. and Moehle, 2000]

همان‌طور که از روابط پیداست، برای تحلیل سازه با استفاده از مدل‌های بالا، می‌بایست از قبل، از ظرفیت مقاومت اعضا (ظرفیت تحمل انرژی و یا ظرفیت تحمل تغییر مکان) اطلاعات کافی داشت. این موضوع یکی از مشکلات استفاده از روش غیرمستقیم برای تنزل مقاومت است. در مدل هیستریزیس جدید کاهش مقاومت به صورت مستقیم اعمال می‌گردد، به طوری که با توجه به مشخصات مکانیکی مصالح و آرما تورهای طولی و دورپیچ‌ها، بر اساس تجربیات قبل میزان افت مقاومت در هر سیکل محاسبه می‌شود. شکل (۴) میزان افت مقاومت در سیکل‌های متعدد را بصورت مستقیم نشان می‌دهد. رابطه (۸) کاهش مقاومت را محاسبه می‌کند.

$$F_A = F_B + dF \quad (8)$$

در رابطه بالا  $F_B$  نیروی جدید برای گراگرفتن،  $F_A$  نیروی بیشینه قبلی،  $dF$  مقدار کاهش مقاومت در هر سیکل است. کاهش مقاومت با استفاده از انرژی مستهلک شده مرحله قبل محاسبه می‌شود.

$$dF = \beta \frac{dE}{\Delta_y} \quad (9)$$

در رابطه بالا  $dE$  انرژی جذب شده در آخرین مرحله بارگذاری

اساس روش انرژی، پارامتر کاهش مقاومت با رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\beta_i = \left( \frac{E_i}{E_t - \sum_{j=1}^i E_j} \right)^c \quad (4)$$

$$E_i = \gamma F_y \Delta_y \quad (5)$$

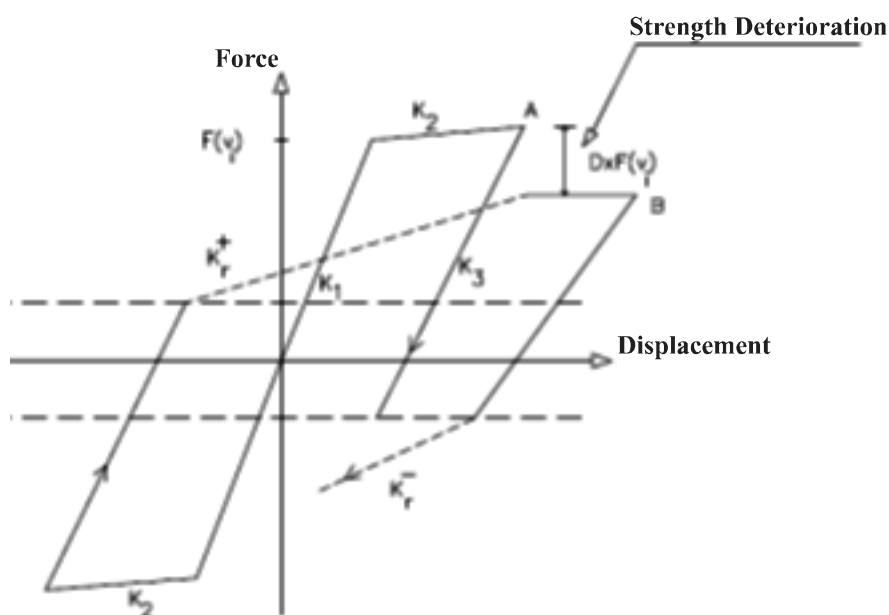
در رابطه (۴) و (۵)  $E_i$  انرژی هیسترتیک جذب شده تا مرحله  $i$ ،  $E_t$  ظرفیت جذب انرژی هیسترتیک،  $\gamma$  ثابت ظرفیت انرژی که عددی بین ۲۵ تا ۱۰۰ است،  $F_y$  مقاومت تسلیم،  $\Delta_y$  تغییر مکان تسلیم اولیه،  $\sum_{j=1}^i E_j$  مجموع انرژی هیسترتیک جذب شده تا مرحله  $i$  و  $c$  پارامتر نرخ تنزل مقاومت است. در پاره‌ای از موارد پارامتر کاهش مقاومت بر اساس تغییر مکان محاسبه می‌شود.

رابطه (۶) و (۷) نحوه محاسبه را نشان می‌دهد.

$$\beta_i = \frac{e^{\lambda_i - 1}}{e - 1} \quad (6)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_i}{\Delta_f} \quad (7)$$

در این رابطه  $\Delta_i$  حداکثر تغییر مکان در دور  $i$  و  $\Delta_f$  تغییر مکان متناظر با خرابی تحت بارگذاری تدریجی است.



شکل ۴. اعمال زوال مقاومت به صورت مستقیم در منحنی هیستریزیس پیشنهادی

پارامترهای زوال روی آن از مدل ترکیبی جدیدی استفاده شده است. در این مدل برای مدلسازی رفتار هیستریزیس مدل دو خطی استفاده شده است که به لحاظ ساختاری دارای تفاوت‌های عمده‌ای با مدل‌های هیستریزیس متعارف است. این مدل دو خطی شامل ۷ مرحله مختلف بارگذاری است که به تناسب تاریخیچه شتاب زلزله وارده جابجایی اعمالی و نیروی حادث شده محاسبه و با مقایسه با مقادیر حدی در هر مرحله، شماره مرحله بارگذاری تعیین و تغییر شکل‌های واقعی با مراحل سعی و خطا محاسبه می‌گردد. برای انجام این تحلیل برنامه‌ای در محیط MATLAB تهیه شده است که بر اساس روش نیومارک-بتا (Newmark-Beta) با شتاب خطی کار می‌کند که در آن مقادیر  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب ۰/۵ و ۰/۱۶۷ در نظر گرفته شده است. در برنامه تهیه شده میزان خطای مجاز در گام‌های مختلف میزان شتاب محاسبه شده از فرمول نیومارک-بتا و شتاب کنترلی از معادله تعادل ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. منحنی هیستریزیس معرفی شده در شکل (۵) شامل ۷ مرحله است که مراحل ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ به ترتیب مربوط به حالت الاستیک با شیب مثبت و منفی، حالت پلاستیک مثبت، حالت پلاستیک منفی، باربرداری مثبت، باربرداری منفی، بارگذاری مجدد منفی و بارگذاری مجدد مثبت است. هر یک از مراحل بارگذاری با اعداد ۱ تا ۷ مشخص شده است و با توجه به شتاب وارده و نیروی ایجاد شده در سیستم دینامیکی، مشخص می‌شود سیستم در چه مرحله‌ای از مسیر منحنی قرار دارد. شکل (۶) نمودار شاخه‌ای از وضعیت‌های محتمل هر یک از حالت‌های ۷ گانه بارگذاری را به مرحله بعدی نشان می‌دهد که در برنامه تحلیل غیرخطی گنجانده شده است.

مدل هیستریزیس ارائه شده توسط این محققین در شکل (۷)، در واقع اصلاح شده مدل هیستریزیس q است. در این مدل بر خلاف مدل دو خطی ساده و همانند مدل q سختی باربرداری  $K_3$  در مراحل مثبت و منفی (مراحل ۴ و ۵) شکل (۷) کسری از سختی الاستیک اولیه است. سختی باربرداری در مراحل مثبت و منفی مطابق رابطه ۱۶ و ۱۷ قابل محاسبه است. در این روابط  $d_{p_{ii}}$  max و  $d_{ii}$  max به ترتیب جابجایی بیشینه در مراحل بارگذاری

و باربرداری،  $\Delta_y$  جابه‌جایی جاری شدن در بارگذاری تدریجی است. پارامتر تقریبی  $\beta$  با تکیه بر نتایج تست آزمایشگاهی به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\beta = \left[ (0.37n_0 + 0.36(K_p - 0.2)^2) \right] 0.9^{\rho_w} \quad (10)$$

$$n_0 = \frac{N}{bdf'_c} \quad (11)$$

$$K_p = \frac{\rho_t}{0.85f'_c} \quad (12)$$

در روابط بالا  $\rho_t$  درصد فولاد کششی،  $f'_c$  مقاومت مشخصه بتن مصرفی، N نیروی محوری فشاری و  $\rho_w$  نسبت فولاد محصور کننده است. در روابط بالا اثر  $\rho_t$  ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. مهمترین عامل، درصد فولاد عرضی محصور کننده بتن است که با افزایش آن نرخ کاهش مقاومت، کاهش می‌یابد. اگر برای کاهش مقاومت در هر مرحله از تغییر مکان مرحله قبل استفاده گردد روش ساده‌تر و عملی‌تر خواهد بود.

$$dF = \beta F_A \quad (13)$$

در رابطه بالا  $\beta$  ضریب کاهش مقاومت،  $F_A$  مقاومت نقطه قبلی و dF میزان کاهش مقاومت است. هرچه مقدار  $\beta$  بزرگ‌تر باشد کاهش مقاومت سریع‌تر انجام می‌شود. یکی از مزایای استفاده از این روش اعمال زوال مقاومت در منحنی هیستریزیس پیشنهادی، عدم نیاز به برآورد ظرفیت نهایی انرژی و یا تغییر مکان پایه بتنی است.

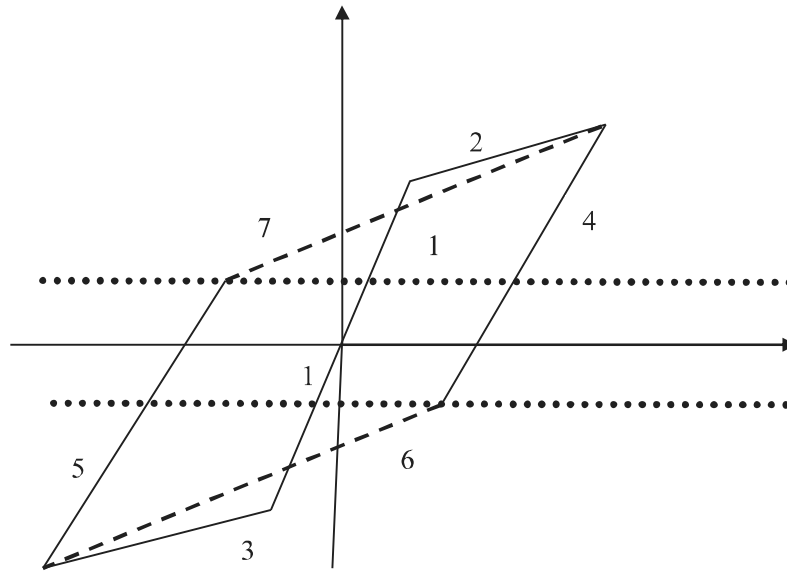
برای برآورد جابجایی پسماند تحت تحریک رکوردهای زلزله و منحنی هیستریزیس پیشنهادی برنامه توسعه داده شده معادله تعادل دینامیکی زیر را حل می‌نماید.

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = -m\ddot{v}_g(t) \quad (14)$$

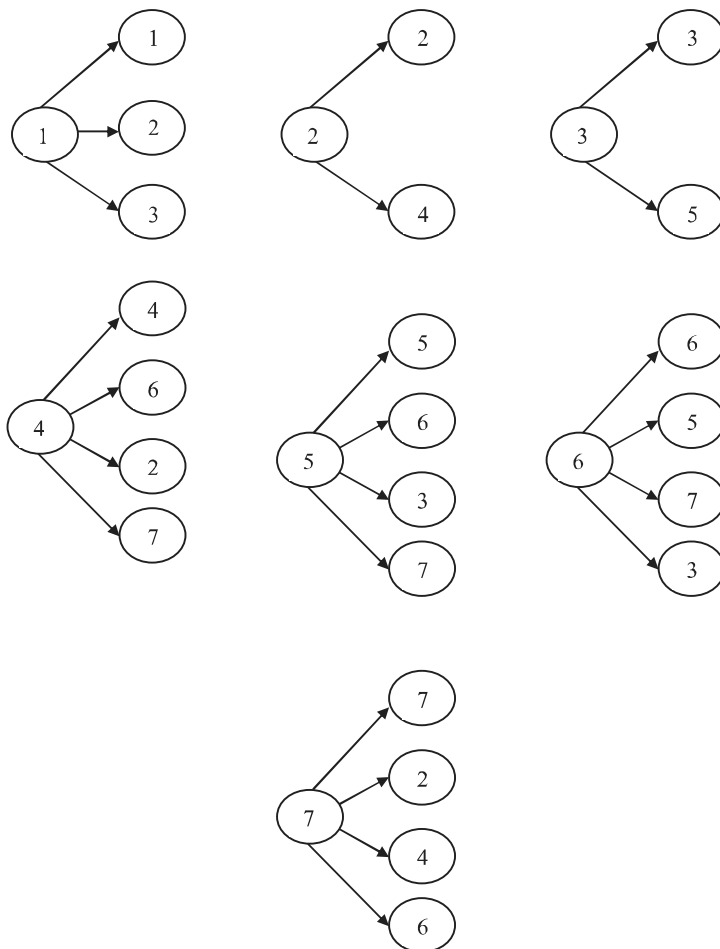
$$\ddot{v}(t) + 2\omega\xi\dot{v}(t) + \omega^2v(t) = -\ddot{v}_g(t) \quad (15)$$

در روابط (۱۴) و (۱۵)  $v(t)$  و  $\dot{v}(t)$  به ترتیب جابجایی و سرعت نسبی جرم با توجه به حرکت زمین است. m، k و c سختی، جرم و ضریب میرایی سیستم است و  $\ddot{v}_g(t)$  شتاب زمین است.  $\xi$  و  $\omega$  نیز به ترتیب نسبت میرایی و فرکانس طبیعی سیستم است.

در این تحقیق برای برآورد صحیح جابه‌جایی پسماند و اعمال اثر



شکل ۵. مراحل ۷ گانه مختلف مدل هیستریزیس چند خطی جدید



شکل ۶. نمودار شاخه‌ای انتقال وضعیت بارگذاری در مراحل ۷ گانه به مرحله بعدی در مدل هیستریزیس جدید



ارائه مدل هیستریزیس ترکیبی جدید نیرو-تغییر مکان در تخمین تقاضای ...

$$K_3^+ = K_1 \left( \frac{d_{pi} \max}{d_y} \right)^{-\beta} \quad (16)$$

(F<sub>ni</sub>max و F<sub>pi</sub>max) حرکت می کند.

$$K_3^- = K_1 \left( \frac{d_{ni} \max}{d_y} \right)^{-\beta} \quad (17)$$

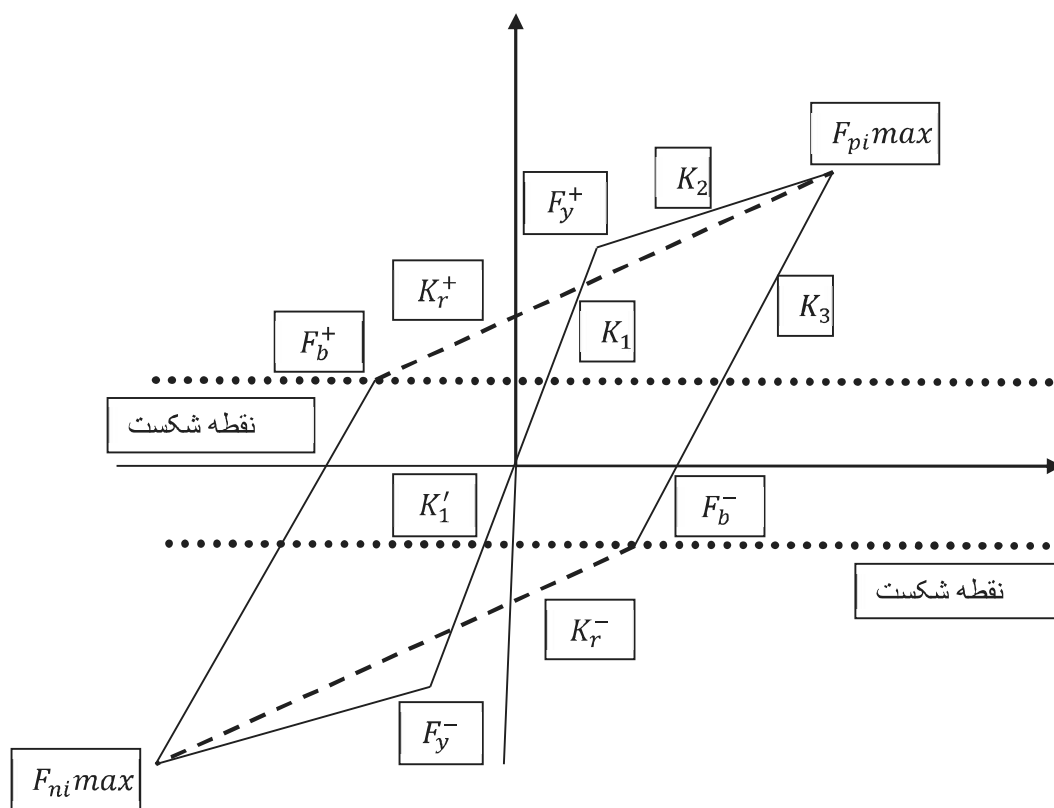
سختی بارگذاری مجدد در مراحل ۷ و ۸ (شکل ۵) با روابط (۱۸) و (۱۹) قابل محاسبه است.

$$K_r^+ = \frac{F_{pi} \max - F_b^+}{d_{pi} \max - d_b^+} \quad (18)$$

$$K_r^- = \frac{F_{ni} \max - F_b^-}{d_{ni} \max - d_b^-} \quad (19)$$

در روابط ۱۸ و ۱۹  $K_r^+$  و  $K_r^-$  به ترتیب شیب بارگذاری مجدد در نواحی مثبت و منفی است. (F<sub>pi</sub>max, d<sub>pi</sub>max) و (F<sub>ni</sub>max, d<sub>ni</sub>max) به ترتیب نیرو و جابجایی معادل مثبت و منفی در هر سیکل بارگذاری است. (F<sub>b</sub><sup>+</sup>, d<sub>b</sub><sup>+</sup>) و (F<sub>b</sub><sup>-</sup>, d<sub>b</sub><sup>-</sup>) به ترتیب

پلاستیک در هر سیکل است. پارامتر  $\beta$  نشانگر فاکتور باربرداری است که مطابق مطالعات آزمایشگاهی ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برخلاف سایر روش ها در این روش باربرداری مطابق شیب محاسبه شده تا نقاط شکست محور افقی ثانوی ادامه می یابد. این نقاط شکست در شکل (۷) با نیروهای F<sub>b</sub><sup>+</sup> و F<sub>b</sub><sup>-</sup> متناظر است. براساس مطالعات آزمایشگاهی، در سعی اولیه نیروی متناظر با این نقاط شکست معادل ۲۰ درصد نیروی معادل تسلیم در نظر گرفته شده است. از سایر خواص مدل هیستریزیس جدید، تفاوت سختی الاستیک یا نیروی معادل تسلیم در دو جهت مختلف است. این خاصیت این امکان را می دهد تا این مدل را برای مقاطع نامتقارن که در دو جهت خواص متفاوت دارند نیز استفاده گردد. مراحل ۶ و ۷ در این مدل مربوط به بارگذاری مجدد در دو سمت مثبت و منفی است. با توجه به اینکه این مدل بر اساس مدل های متمایل به پیشینه تغییر مکان<sup>۱</sup> نوشته شده است، در این مدل در مراحل ۶ و ۷، بردار بارگذاری مجدد به سمت پیشینه تغییر شکل سیکل قبلی

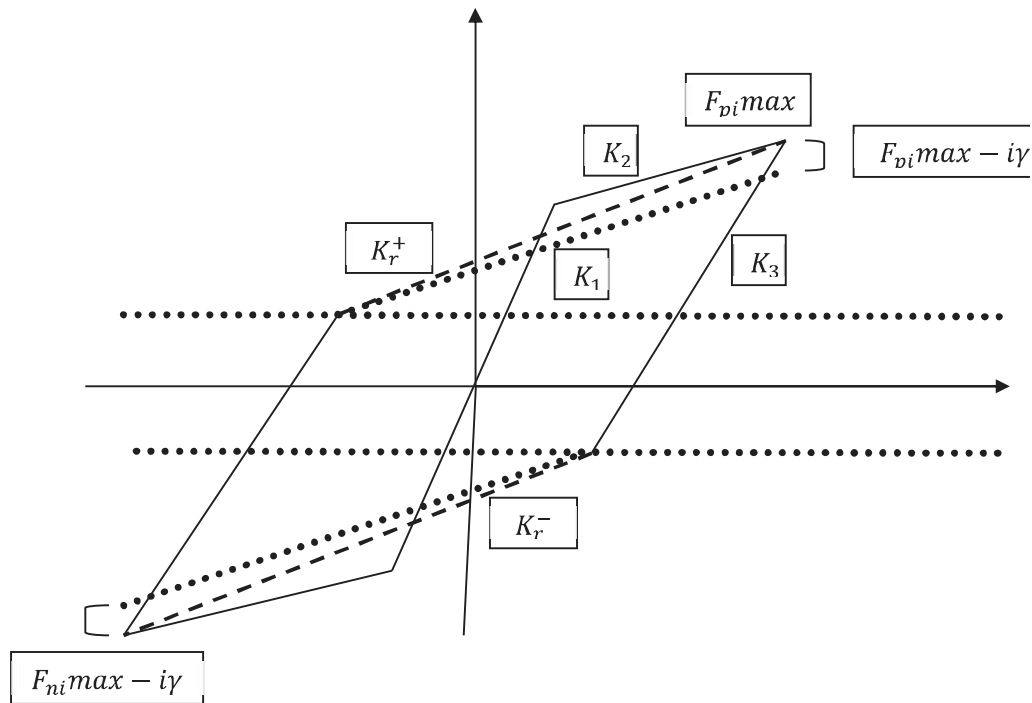


شکل ۷. مشخصات مسیر مدل هیستریزیس چند خطی پیشنهادی

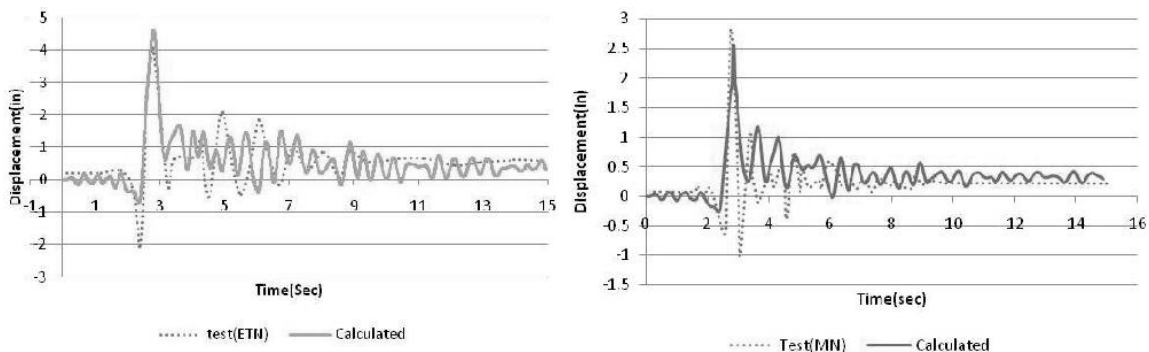
می‌شود. این مدل قادر است تا این فاکتور را به عنوان ورودی در نظر بگیرد. در سعی اولیه مقدار ۳ درصد برای  $\gamma$  نتایج مناسبی نشان داد.

پس از مدلسازی پایه های بتنی با ابعاد و مشخصات بخش (۲) و انجام تحلیل دینامیکی غیر خطی با برنامه تهیه شده با رفتار هیستریزیس جدید، نتایج خروجی تاریخچه جابجایی جانبی در شکل های (۹)، (۱۰) و (۱۱) نشان داده می‌شود. در انتها جدول (۳) جابجایی بیشینه و پسماند نمونه‌های مختلف را با نتایج تست میز لرزه در هر حالت نشان می‌دهد.

مختصات نقاط شکست در نواحی مثبت و منفی است. از سایر خواص مدل هیستریزیس اضافه شدن زوال مقاومت<sup>۲</sup> به این مدل متمایل به بیشینه تغییر مکان است. در این مدل در هر نیم سیکل در مرحله بارگذاری مجدد در جهت مثبت و منفی مقاومت بیشینه در هر سمت  $F_{pi}max$  و  $F_{ni}max$  با روند مشخصی کاهش می‌یابد. در این مدل در هر نیم سیکل مقاومت مثبت و منفی به مقدار  $F_{pi}max - i\gamma$  و  $F_{ni}max - i\gamma$  کاهش می‌یابد (شکل ۸). در این مدل  $i$  شماره هر نیم سیکل و میزان زوال سختی است که با توجه به نتایج آزمایشگاهی بین ۱ تا ۱۰ درصد تخمین زده

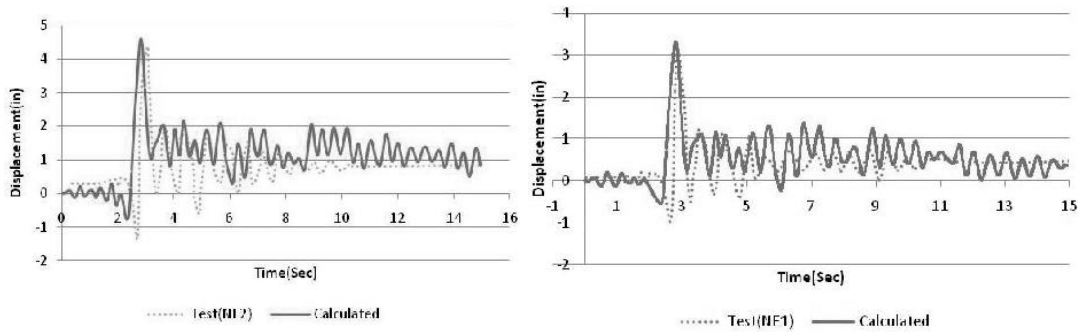


شکل ۸. زوال مقاومت در سیکلهای متوالی در مدل هیستریزیس پیشنهادی جدید

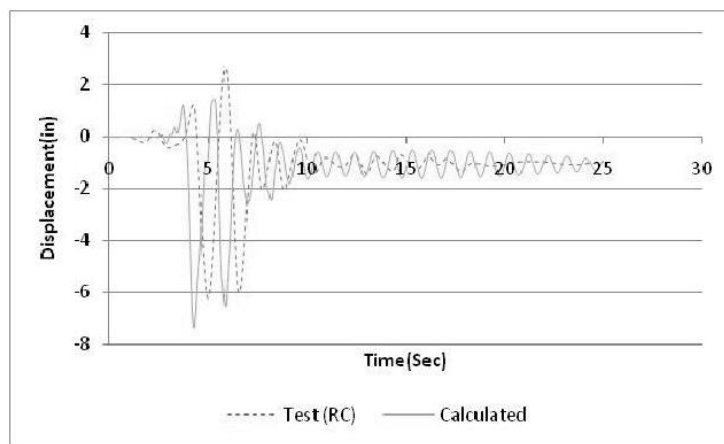


شکل ۹. پاسخ مدل دو خطی پیشنهادی در مقایسه با نتایج تست برای نمونه‌های ETN و MN

ارائه مدل هیستریزس ترکیبی جدید نیرو-تغییر مکان در تخمین تقاضای ...



شکل ۱۰. پاسخ مدل دو خطی پیشنهادی در مقایسه با نتایج تست برای نمونه‌های NF1 و NF2



شکل ۱۱. پاسخ مدل دو خطی پیشنهادی در مقایسه با نتایج تست برای نمونه‌های RC

جدول ۳. مقایسه جابه‌جایی بیشینه و پسماند مدل ترکیبی پیشنهادی با نتایج تست میز لرزه برای نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه مرجع	پارامتر	نتایج آزمایش	نتایج مدل	اختلاف (درصد)
MN	جابجایی بیشینه	۲/۶۲	۲/۷۹	۶
	جابجایی پسماند	۰/۲۲	۰/۲۶	۱۸
ETN	جابجایی بیشینه	۰/۵۸	۰/۵۸	۰
	جابجایی پسماند	۰/۵۸	۰/۴۹	۱۸
NF1	جابجایی بیشینه	۳/۱۲	۳/۳۲	۶
	جابجایی پسماند	۰/۴۷	۰/۴۱	۱۴
NF2	جابجایی بیشینه	۴/۳۷	۵/۰۱	۱۴
	جابجایی پسماند	۰/۸۳	۰/۹۸	۱۸
RC	جابجایی بیشینه	۷	۶/۱	۱۴
	جابجایی پسماند	۱/۱	۰/۹۵	۱۵

هیستریزیس متعارف، مسیر بارگذاری مجدد به سوی جابجایی بیشینه سیکل قبلی زوال مقاومت بر اساس روش مستقیم و مبتنی بر مشخصات هندسی و مکانیکی سازه اعمال شده است. خلاصه نتایج کمی و کیفی تحقیق انجام شده به تفکیک در زیر آورده شده است:

- مدل‌های هیستریزیس سه خطی مانند تاکدا، مندر و... اگر چه با در نظر گرفتن ترک خوردگی قبل از تسلیم برای تخمین مقادیر بیشینه پاسخ‌های لرزه‌ای مناسب هستند، ولی برای تخمین جابجایی پسماند لرزه‌ای دقت بسیار کمی دارند.

- مدل‌های هیستریزیس دو خطی دارای ورتکس (دارای شکستگی بین باربرداری و بارگذاری مجدد) و منحنی‌های هیستریزیس صاف مانند کلاف و بوک-ون با کاهش سختی به صورت نمایی و زوال مقاومت، برای تخمین مقادیر بیشینه پاسخ‌های لرزه‌ای مناسب هستند، ولی برای تخمین جابجایی پسماند لرزه‌ای دقت بسیار کمی دارند.

- مدل هیستریزیس دوخطی صاف (دارای شیب ثابت بین باربرداری و بارگذاری مجدد) با همراه شدن اثر باریک شدگی دقت مناسبی در برآورد تقاضای لرزه‌ای جابجایی پسماند دارند.

- منحنی هیستریزیس پیشنهادی از نوع منحنی های متمایل به بیشینه تغییر مکان است که با در نظر گرفتن افت مقاومت در هر نیم سیکل و کاهش سختی به صورت نمایی دقت مناسبی در تخمین و برآورد جابجایی پسماند دارد.

- منحنی هیستریزیس پیشنهادی دارای شکستی روی محور افقی ثانوی است که قادر است تغییر شیب بین باربرداری و بارگذاری مجدد را در نظر بگیرد. مقدار این شکست به صورت نسبتی از مقاومت تسلیم اولیه در برنامه در نظر گرفته شده است که انتخاب صحیح این پارامتر تأثیر مناسبی در تخمین جابه‌جایی پسماند دارد.

- استفاده از مدل‌های هیستریزیس نیرو- تغییر مکان ترکیبی پیشنهادی با توجه به سادگی و قابلیت توسعه آن در کاربردهای مهندسی مناسب است و می‌تواند در تحلیلهای تقریبی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج نشان می‌دهند (شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و جدول ۳)، مدل پیشنهادی که به دنبال نقطه‌ای برای شکست منحنی باربرداری خارج از محور افقی اولیه است، دارای نتایج بهتری است در حالی که نتایج مدل‌های متعارف نشان داد این مدل‌ها در تخمین پسماند دارای خطای قابل ملاحظه است [Sakai and Billington, 2010, Jeong, Sakai and Mahin, 2008]. در ضمن نتایج سایر محققین برای تخمین پارامتر جابه‌جایی پسماند دارای خطای بیشتری است [Sakai and Mahin, 2008, Jeong, Sakai and Mahin, 2010]. در حالی که مدل معرفی شده مطابق نتایج این بخش خطای کمتری دارد. در مدل پیشنهادی به خواص مدل هیستریزیس q، زوال مقاومت در هر نیم سیکل و شکست مسیر باربرداری روی محور افقی ثانوی (شروع بارگذاری مجدد) اضافه شده و تأثیر مناسبی در تخمین مناسب جابجایی پسماند داشته است.

#### ۴. جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق در مرحله اول به ذکر عدم توانایی مدل‌های هیستریزیس متعارف در تخمین تقاضای لرزه‌ای جابجایی پسماند پرداخته شد. این مدل‌های هیستریزیس علی‌رغم تخمین مناسب جابجایی بیشینه در تخمین جابجایی پسماند دارای خطای قابل توجهی هستند. در مرحله بعدی مدل هیستریزیس جدیدی ارائه شد که بر خلاف مدل‌های هیستریزیس متعارف در مسیر باربرداری به بارگذاری مجدد در فاز مثبت و منفی، روی محوری غیر از محور افقی (محور نیرو صفر) دچار شکست می‌شود. این اختلاف شیب و اختلاف سختی در مسیر باربرداری ناشی از وجود پدیده‌ای است، ناشی از محبوس شدن ذرات خرد شده سنگدانه و خمیر سیمان سفت شده در ترک‌های کششی ایجاد شده از مراحل قبلی بارگذاری. این پدیده باعث شده تا سختی سازه در مرحله باربرداری بیشتر از آن چیزی باشد که در سایر منحنی‌های هیستریزیس متعارف وجود دارد که این اثر افزایش سختی در مرحله باربرداری به بارگذاری مجدد در مدل جدید وارد شده است. به علاوه در مدل جدید بر خلاف سایر مدل‌های

- Hussein, A.T. (2010) "Hysteretic models for mode of system under earthquake effect", American Journal of Scientific Research, Vol. 133, No.12, pp. 45-54.
- Jeong, H. I. Sakai, J. and Mahin, S. A. (2008) "Shaking table tests and numerical investigation of self-centering reinforced concrete bridge columns", PEER-2008/06, Pacific Earthq. Engrg. Res. Center, Univ. of California at Berkeley, California.
- Kawashima, K. MacRae, G. A. Hoshikuma, J. and Nagaya, K. (1998) "Residual displacement response spectrum", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 124, No. 5, pp. 523-530
- Kunnath, S.K., Reinhorn, A. M. and Lobo, R. F. (1992) "IDARC: A program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures", National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Report No. NCEER-92-0022
- Lee, W. K. and Billigton, S. (2010) "Modeling residual displacement of concrete bridge column under earthquake loads using fiber elements", ASCE Journal of Bridge Engineering, vol.15, No.3, pp. 240-249.
- Lehman, D. E. and Moehle, J. P. (2000) "Seismic performance of well-confined concrete bridge columns", PEER-1998/01, Pacific Earthq. Engrg. Res. Center, Univ. of California at Berkeley, California.
- Macrae, G. A. and Kawashima, K. (1997) "Post earthquake residual displacements of bilinear oscillators." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, No.7, pp.701-716
- Mahin, S. A. and Sakai, J. (2006) "Use of partially prestressed reinforced concrete columns to reduce post-earthquake residual displacements of bridges", Fifth National Seismic Conference on Bridges & Highways, San Francisco, CA, September 18-20
- Muthukumar, S. and DesRoches, R. (2005) "Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns", Journal of Earthquake Spectra, Vol. 21, No.4, pp. 1113-1135.
- Novelli, V. I. (2008) "The unloading stiffness of
- Beery, P. M. and Eberhand, O. M. (2007) "Performance modeling strategies for modern reinforced concrete bridge column." PEER-2007/07, Pacific Earthq. Engrg. Res. Center, Univ. of California at Berkeley, California.
- Bojorquez, E. and Ruiz-Garcia, J. (2013) "Residual drift demands in moment-resisting steel frames subjected to narrow-band earthquake ground motions", Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol.42, No.11, pp. 1583-1598.
- Choi, H., Saiidi, S., Somerville, P. and El-Azizy, S. (2010) "Experimental study of reinforced concrete bridge columns subjected to near-fault ground motions", ACI Structural Journal, Vol.107, No.1, January, pp.3-12.
- Clough, R. W. (1966) "Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements." Structural and Materials Research, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, CA, Report 66-16.
- Dong, P., Moss, P. J. and Carr, A. J. (2003) "Seismic structural damage assessment of reinforced concrete ductile framed structures", Proc. of International Conference on Earthquake Engineering.
- Fahmy, M., Wu, Z., Wu, G. and Sun, Z. (2010) "Post-yield stiffness and residual deformations of RC bridge columns reinforced with ordinary rebars and steel fiber composite bars", Engineering Structures Journal, vol.32, No.9, pp. 2969-2983.
- Gajalakshmi, P. and Helena, H. J. (2012) "Behavior of concrete-filled steel columns subjected to lateral cyclic loading". Journal of Constructional Steel Research, vol.75, August, pp. 55-63
- Hachem, M. M., Mahin, S. A. and Moehle, J. P. (2003) "Performance of circular reinforced concrete bridge columns under bidirectional earthquake loading", PEER-2003/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, California

- of Engineering Structures, vol.27, January, pp. 392–406.
- Sivaselvan, M. V. and Reinhorn, A. M. (2000) “Hysteretic models for deteriorating inelastic structures”, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 133, No.7, pp. 982-989.
- Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielson, N. N. (1970) “Reinforced concrete response to simulated earthquakes”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.96, No.12, pp. 2257–2273.
- Wang, Z., Song, W., Wang, Y. and Wei, H. (2011) “Numerical analytical model for seismic behavior of prestressing concrete bridge column systems.” Journal of Procedia Engineering, Vol. 14, No.7, pp. 2333-2340.
- Wang, M. L and Shah, S. P. (1987) “Reinforced concrete hysteresis model based on damage concept”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.15, No.8, pp. 993–1003.
- Yazgan, U. and Dazio, A. (2011) “Simulating maximum and residual displacement of rc structures: I. Accuracy”, Journal of Earthquake Spectra, vol.27, No.4, November, pp. 1187–1202.
- Yazgan, U. and Dazio, A. (2011) “Simulating maximum and residual displacement of RC structures: I. Sensitivity”, Journal of Earthquake Spectra, vol.27, No.4, November, pp. 1203–1218.
- reinforced concrete members”, Ph,D dissertation, University of Pavia at Pavia
- Phan, V. T. and Anderson, J. (2005) “Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns”, Rep. No. CCEER-05-7, Center of Civil Engineering earthquake Research, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Nevada, Reno, Nevada.
- Ramirez, C. M. and Miranda, E. (2012) “Significance of residual drifts in building earthquake loss estimation”, Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol.41, No.11, pp. 1477–1493.
- Saiidi, M. S .and Seyed Ardakani, S. M. (2012) “An analytical study of residual displacements in RC bridge columns subjected to near-fault earthquakes”, ASCE Journal of Bridge Engineering, vol.8, No.1, May, pp. 35–45.
- Sakai, J. and Mahin, S. A. (2004b) “Mitigation of residual displacements of reinforced concrete bridge columns” , Proc. of 20th US-Japan Bridge Engineering Workshop, pp. 87-102, Washington D.C., USA.
- Sengupte, P. and Bing, L. (2011) “Hysteresis behavior of reinforced concrete non-ductile beam-column joints”, Proc. of Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society.
- Sengupte, P. and Bing, L. (2013) “Modified bouc-wen model for hysteresis behavior of rc beam-column joints with limited transverse reinforcement”, Journal