

**رفتار تنش-کرنش چرخه ای میلگرد با در نظر گرفتن تأثیر کمانش**

**خلاصه**

انتظار می­رود که طی زلزله­های بزرگ، میلگرد­های طولی المان­های سازه­ای بتن مسلح ممکن است متحمل کرنش کششی و فشاری بزرگی به طور چرخه­ای شود. به دلیل فاصله ناکافی میلگرد عرضی، این بارگذاری چرخه­ای در محدوده غیر­الاستیک ممکن است منجر به کمانش میلگرد­ها شود. با اینکه این مسئله توسط چندین محقق بررسی شده است، بیشتر این مطالعات بر پایه رفتار یک­جهته است. در این مطالعه، میلگرد­ها مطابق با استاندارد ASTM 706 ساخته شدند. این نمونه­ها تحت بارگذاری یک­جهته کنترل شده با کرنش محوری و بارگذاری چرخه­ای محوری آزمایش شدند. آزمایشات تا خرابی نمونه­ها انجام شدند، در همه نمونه­ها گسیختگی تحت بارگذاری فشاری بود. برای مطالعه تأثیر نسبت فاصله تکیه­گاه جانبی (Sh) به قطر میلگرد (D) روی پایداری بتن، آزمایشات با نسبت­های Sh/D 2.5، 4، 6 و 8 انجام شدند. بر اساس مشاهدات صورت گرفته از رفتار کمانشی میلگرد­ها تحت بارگذاری چرخه­ای، یک روشی برای پیش­بینی آغاز کمانش پیشنهاد شد. استفاده از این روش، همراه با یک مدل آنالیزی پیشنهاد شده در ادبیات فنی برای رفتار چرخه­ای میلگرد، نتایجی به دست می­دهد که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از این مطالعه دارد.

**معرفی**

نتایج به دست آمده از آنالیز ممان-انحناء برای ارزیابی عملکرد المان­های بتن مسلح مهم می­باشد. در این نوع آنالیز، دانستن رفتار تنش-کرنش میلگرد با در نظر گرفتن اثر کمانش لازم است.

اگر چه مسأله پایداری میلگرد توسط چندین محقق مطالعه شده است، بیشتر این مطالعات بر اساس رفتار یک­جهته صورت گرفته و تحقیقات محدودی، رفتار چرخه­ای میلگرد را با در نظر گرفتن اثر کمانش آن صورت گرفته است. (Monti and Nuti 1992; Mander et al. 1994; Suda et al. 1996; Pantazopoulou 1998).).همچنین قابل ذکر است که در بیشتر مطالعات پایداری میلگرد، به دو دلیل پراکندگی قابل توجهی در بار آزمایشگاهی با کمانش میلگرد مورد انتظار است: (1) تغییرپذیری تعریف بار کمانشی فقط بر اساس مشاهدات و (2) مشکل بودن اندازه­گیری کرنش­های میلگرد در عضو بتنی بعد از تسلیم. این فاکتورها باید هنگام ارزیابی داده­های موجود مرتبط با پایداری میلگرد یا انجام تحقیق جدید درباره موضوع، در نظر گرفته شوند.

عوامل متعددی در آغاز کمانش میلگرد طولی المان بتن مسلح تأثیر دارد، مثل تأثیر میلگرد محیطی در مهار آرماتور، مقاومت بتن پوشش در برابر خرد­شدگی، یا تورم جانبی بتن هسته در کرنش­های فشاری بالا. ارزیابی تأثیر این عوامل و رابطه آنها از برنامه این مطالعه خارج است. این مقاله بر مطالعه مسئله پایداری میلگرد با در نظر گرفتن فقط رفتار چرخه­ای آرماتور و طول مهار نشده آن، هدف­گذاری شده است. نتایج یک بررسی عددی و آزمایشگاهی انجام یافته در دانشگاه بین­المللی مکزیکو روی پایداری آرماتور در اینجا شرح داده شده است. بر اساس این نتایج، روشی برای ارزیابی رفتار تنش-کرنش چرخه­ای آرماتور با در نظر گرفتن اثر کمانش آن، پیشنهاد شد.

**رفتار یک جهته تنش-کرنش میلگرد**

**نمودار یک جهته کشش**

در شکل 1 نمودار تنش-کرنش معمول میلگرد در حالت کشش یکنواخت نشان داده شده است. mander et al در سال 1984 یک ایده­آل­سازی برای سخت­شدگی کرنشی پیشنهاد کردند که بیانگر یک رابطه بین تنش fs و کرنش Ɛs می­باشد.





که در رابطه بالا fy و fsu به ترتیب تنش تسلیم و تنش نهایی هستند; Ɛsh و Ɛsu به ترتیب کرنش­های متناظر آغاز سخت­شدگی کرنشی و کرنش نهایی می­باشند. قابل ذکر است که کرنش نهایی در اینجا کرنش متناظر مقاومت نهایی می­باشد. پارامتر P به صورت زیر تعریف می­شود:



جایی که Esh شیب شروع سخت­شدگی کرنشی است. به جای استفاده از Esh در محاسبه P، راحت­تر است از یک رابطه جایگزین برای تعریف P استفاده کنیم:



که در آن fsh1 و Ɛsh1 به ترتیب نشانگر بعد عرضی و افقی یک نقطه انتخاب شده روی منحنی سخت­شدگی کرنشی می­باشند.

**نمودار یک­جهته(یکنواخت) فشاری:**

آزمایش میلگرد تحت فشار کمتر از آزمایش در کشش بوده است. این به دلیل مشکلات اضافی ذاتی انجام آزمایش فشاری است. کمبود اطلاعات کافی در آزمایش فشاری میلگرد­های کوتاه ممکن توضیح دهنده این باشد که چرا اغلب آزمایشات روی پاسخ لرزه­ای سازه­های بتن مسلح بر پایه این فرض صورت گرفته است که نمودار تنش-کرنش یکنواخت یک میلگرد کوتاه در فشار برابر و مخالف نمودار متناظر در تنش می­باشد. با این حال نتایج آزمایشگاهی نشان داده­اند که هنگام استفاده از تعریف معمول تنش(با استفاده از سطح مقطع اولیه)، این نمودار­ها متفاوتند. (Mander et al. 1984; Dodd and Restrepo 1995). Dodd and Restrepo (1995) فهمیدند که در سیستم مختصات طبیعی، که برای محاسبه آنی مساحت المان به کار می­رود، نمودار­های کشش و فشار برابر و مخالف هم هستند. بر اساس این یافته­ها، آن­ها تنش فشاری ، fcs، و کرنش فشاری، Ɛcs، را به صورت زیر تعریف کردند:



شکل 2 نشان­دهنده نمودار­های نتش-کرنش آزمایشات یک­جهته روی میلگرد­های معمولی تولید شده در مکزیکو را نشان می­دهد. بعد قائم شکل 2 نشان­دهنده تنش­های بی­بعد می­باشد، که با هدایت تنش­های اندازه­گیری شده به سمت تنش تسلیم متناظر نمونه­ها به دست آورده شده­اند. این منحنی همچنین نشان­دهنده نمودار فشاری پیش­بینی شده می­باشد، که با استفاده از روابط 4 و 5 و داده­های اندازه­گیری شده در آزمایشات کشش به دست اورده شده­اند.



**رفتار چرخه­ای میلگرد­های کوتاه**

چندین نویسنده مدل­های عددی را برای پیشبینی رفتار تنش-کرنش چرخه­ای میلگرد­ها در غیاب کمانش پیشنهاد کرده­اند.

(Mander et al. 1984; Dodd and Res Restrepo1995). مدل پیشنهاد شده توسط Dodd و Restrepo اثر بوشینگر را به وسیله یک نمودار نرم­شده توصیف می­کند که بر پایه­ی داده­های جمع­آوری شده از میلگرد­های تولید­شده در نیوزیلند می­باشد. این مدل از هندسه­ی آنی میلگرد­ها استفاده می­کند. مدل پیشنهاد شده توسط Mander و همکاران اثر بوشینگر را در نظر گرفته و رفتار تنش-کرنش چرخه­ای را با استفاده از چند قانون از نمودار­های اسکلت برای حالت چرخه­ای همراه با موارد کشش و فشار، تعریف می­کند. شکل 3 نشانگر نتایج با استفاده از این مدل و نتایج آزمایشات چرخه­ای روی میلگرد­های تولید شده در مکزیکو در صورت عدم وجود کمانش می­باشد. مقایسه این نمودار­ها نشان می­دهد که تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.



**کمانش آرماتور**

چندین مطالعه عددی و آزمایشگاهی در گذشته روی کمانش آرماتور صورت گرفته شده است. با این­حال، بیشتر این تحقیقات با در نظر گرفتن بارگذاری یک­جهته و هم تئوری مدول کاهش­یافته یا مماسی انجام گرفته­اند.

(Bresler and Gilbert 1961; Mander et al. 1984; Scribner 1986; Papia et al. 1988; Mau 1990; Watson et al. 1994).

تحقیقات محدودی روی پایداری میلگرد تحت بارگذاری چرخه­ای صورت گرفته است. در سال 1992 آقایان مونتی و نوتی یک مدل عددی برای پیشبینی رفتار چرخه­ای میلگرد با در نظر گرفتن کمانش پیشنهاد کردند. این مدل بر اساس نتایج یک سری آزمایش یک­جهته و چرخه­ای روی آرماتور بوده و نیازمند کالیبره کردن چندین پارامتر با استفاده از داده­های به دست آمده از آزمایش چرخه­ای روی میلگرد می­باشد. Pantazopoulou1992 مکانیزم کمانش آرماتور طولی را در المان­های RC مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که نیازمند در نظر گرفتن اندرکنش بین اثربخشی میلگرد عرضی، فاصله آنها، ظرفیت تغییرشکل هسته، و قطر میلگرد می­باشد. با یک آنالیز شواهدات تجربی، این نویسنده قوانین تجربی طراحی برای فاصله خاموت­ها جهت جلوگیری از کمانش آرماتور­های طولی پیشنهاد کرد. با این­حال، چون کرنش کمانشی مشاهده شده فقط در مطالعات اندکی مشاهده شد، پایان سودمندی اعضاء از مشاهدات پاسخ کلی به دست آمد. اینست که، کرنش کمانشی به طور مستقیم در نظر گرفته نشد.

Suda و همکاران فقط مطالعه عددی و آزمایشگاهی شناخته شده توسط نویسندگان در رابطه با پایداری میلگرد در المان­های RC تحت بارگذاری چرخه­ای انجام دادند. آنها آزمایش چرخه­ای روی ستون­های RC را انجام دادند که در آن میلگرد­ها دارای سیستم جدیدی برای اندازه­گیری کرنش­ها بعد از مرحله تسلیم بودند. نتایج این تحقیق نشان دادند که میلگرد­های طولی در المان­های RC در بارگذاری چرخه­ای ممکن است وقتی کمانش کنند که میلگرد تحت تنش فشاری و در محدوده کرنش کششی باشد. بر اساس یافته­های آنها، suda و همکاران یک مدلی برای نمایش رفتار چرخه­ای میلگرد در المان­های RC پیشنهاد کردند.

**برنامه تجربی و روش انجام آزمایش**

یک سری آزمایش یک­جهته و چرخه­ای روی میلگرد در دانشگاه بین­المللی مکزیکو برای مطالعه پایداری میلگرد صورت گرفته است. میلگرد­های استفاده شده در این آزمایش از میلگرد­های تجاری در دسترس در مکزیکو و از همان نوعی بودند که در آزمایش قبلی یک جهته انجام یافته توسط (Rodriguez and Botero 1995) استفاده شده بود. رفتار تنش-کرنش این میلگرد­ها مطابق با بیشتر مشخصات استاندارد ASTM 706 بودند، که یک مقاومت تسلیم حداقل 415 MPA و مقاومت کششی حداقل 550 MPA را مقرر می­کند. کنترل دیگر روی مشخصات مقاومت کششی اینست که مقاومت کششی نمی­تواند از 1.25 برابر مقاومت تسلیم حداقل کمتر باشد.

میلگرد­های با قطر 16mm از میلگرد­های با قطر 31 mm مطابق با استاندارد ASTM (1983) تولید شدند. شکل 4 نشان­دهنده مشخصات هندسی معمول میلگرد­های تست شده در این تحقیق را نشان می­دهد.

یک پارامتر مهم در پایداری میلگرد در المان­های RC نسبت فاصله تکیه­گاه جانبی، Sh، به قطر میلگرد،D ، می­باشد. در نمونه­های آزمایشی، Sh با طول نمونه­ نشان داده شده است (شکل 4). نسبت­های Sh/D انتخاب شده در این آزمایش 2.5، 4، 6، و 8 بودند، که می­تواند حاکی از فاصله رایج خاموت­ها در طراحی المان­های RC مطابق با آیین­نامه­های رایج برای مناطق لرزه­خیز، باشد. تعداد کل نمونه­های تست شده برای آزمایش یک­جهته و چرخه­ای به ترتیب 10 و 26 عدد نمونه می­باشد.

آزمایش­ها با استفاده از یک ماشین آزمایش یک محوری مدل MTS-810 انجام شدند. نمونه­ها در هر دو انتها مطابق شکل 5 گیردار بودند. در شکل 5 همچنین قابل مشاهده است، کرنش­ها در نمونه­های آزمایش توسط کرنش­سنج نصب شده در طرف مخالف نمونه­ها با طول ثابت گیج 30 cm(شکل 4)، اندازه­گیری شدند. این کرنش­سنج دارای دقت کافی برای ارزیابی نقطه آغاز کمانش می­باشد، که، همانطور که بعدا بحث می­شود، با استفاده از اختلاف بین داده­های خوانده شده از کرنش­سنج­های قرار داده شده در دو طرف extensometer ، تعریف شده است. آزمایش یک­جهته در فشار یک مدت زمانی هدف حدود 3 دقیقه داشت. آزمایشات چرخه­ای، از نوع سینوسی با فرکانس 0.005 هرتز، یک آزمایش کنترل تغییر­مکان با دو سیکل برای هر سطح کرنش محوری حداکثر انجام شدند. تعداد سیکل هدف برای این سطوح کرنش قبل از کمانش 3 بود.

دو چرخه تاریخچه کرنش در نظر گرفته شده برای آزمایش چرخه­ای برای نمایش تاریخچه کرنش چرخه­ای در نظر گرفته شد که میلگرد طولی ستونها یا تیرها ممکن است طی زلزله قرار بگیرند. در یک ستون در معرض خمش چرخه­ای، معمولا موقعیت محور طبیعی نزدیک به وسط ارتفاع مقطع است، که برای افزایش جابجایی جانبی منجر به افزایش کرنش در محدوده کشش و فشار می­شود. در یک تیر RC در معرض خمش چرخه­ای، معمولا محور طبیعی نزدیک به تار انتهایی در فشار است، با کرنش­های کم برای فولاد در فشار. بر پایه آنالیز ممان-انحناء مقاطع معمولی تیرها و ستون­ها(Rodriquez 1999)، مقادیر معمول در این مطالعه برای نسبت Ɛm-  Ɛm+/انتخاب شده ، که Ɛm+ و Ɛm- به ترتیب حداکثر کرنش کششی و فشاری یک میلگرد در یک چرخه کرنش می­باشند. برای نمایش یک تاریخچه کرنش لرزه­ای در یک ستون، نسبت مد­نظرتقریبا برابر با 1 در 7 نمونه و 2.3 در 13 نمونه در نظر گرفته شد. یک تاریخچه بارگذاری معمولی برای نوع دوم آزمایش در شکل 6 نمایش داده شده است. برای یک تیر، پارامتر Ɛm- حدودا صفر تنظیم شد; که به این معنی است که نمونه­های این مورد فقط در معرض چرخه کشش قرار گرفته­اند. این نوع تاریخچه کرنش در 5 نمونه اعمال شد.





خلاصه­ای از نمونه­ها و مشخصات اصلی برای آزمایشات یک­جهته و چرخه­ای انجام شده در این مطالعه در جدول 1 نشان داده شده است. یک مستندسازی کامل داده­های آزمایشگاهی می­تواند در جای دیگری پیدا شود . (Rodriguez and Botero 1998)



**آزمایشات یک­جهته در فشار**

**تعریف شروع کمانش**

تغییر پذیری قابل توجه تعریف شروع کمانش در یک آرماتور بر پایه فقط مشاهدات مورد انتظار است، چون مشاهده کنندگان مختلف یک آزمایش ممکن است نشان­دهنده شروع­های مختلف کمانش باشند. برای اجتناب از این تنوع، در این تحقیق تعریف شروع کمانش بر پایه رویکرد تجربی بود. این رویکرد خواهان استفاده از داده­های خوانده شده کرنش در سمت­های مخالف نمونه می­باشد، از جمله Ɛ1 و Ɛ2، که توسط کرنش­سنج­ها گرفته می­شوند. کرنش Ɛ1 در طول یک تاری از مقطع اندازه­گیری شد که در کمانش در معرض یک افزایش در فشار قرار گرفته است (سمت مقعر)، و کرنش Ɛ2 در طول تاری از مقطع اندازه­گیری شد که در معرض یک کاهش فشار قرار گرفته شده است (سمت محدب). با توجه به بحث بالا، شروع کمانش وقتی تعریف شد که Ɛ2-Ɛ1 برابر یا بزرگتر از 20% Ɛ1 بود.

چون قبل از انجام آزمایش دانستن جهت کمانش نمونه ممکن نبود، کرنش­سنج­ها نباید در این جهت قرار بگیرند. با این­حال، خارج از تعداد کل نمونه­های آزمایش، فقط دو نمونه در جهت دور از محل قرار­گیری کرنش­سنج­ها اتفاق افتاد. این موارد در نمونه­های کلی آنالیز در نظر گرفته نشدند، که مشخصات آنها در جدول 1 نشان­داده شده است.

**نتایج تجربی**

بارهای محوری اندازه­گیری شده در آغاز کمانش، همانند بحث قبلی تعریف شدند و در روابط تنش­های بی­بعد بیان شده­اند، در شکل 7 نمایش داده شده است. این نتایج مطابق با چندین نسبت Sh/D برای 10 نمونه در نظر گرفته شده در این آزمایش می­باشند (جدول 1). 3 مورد از این نمونه­ها، با نسبت 2.5، کمانش نمی­کنند. شکل 8 کرنش­های محوری اندازه­گیری شده در آغاز کمانش را نشان می­دهد، Ɛp، برای آزمایشات یک­جهته همان نمونه­ها، به عنوان تابعی از نسبت Sh/D.



داده تنش نشان­داده شده در شکل 7 میتواند با مقادیر پیشبینی شده با استفاده از مدل عددی برای تنش فشاری شروع کمانش، fp، بر پایه تئوری مدول کاهش­یافته مقایسه شود.



که در آن Er مدول کاهش­یافته و K ضریب طول مؤثر می­باشد. برای محاسبه fp از رابطه 6، یک نمودار تنش-کرنش یک­جهته میلگرد در فشار با استفاده از روابط 4 و 5 تعریف شد، که منجر به پارامترهای کنترل تنش-کرنش به صورت زیر شد:

fyc= -457MPA; fsuc= -916MPA; Ɛshc= -0.0081; Ɛsuc= -0.1048; و Pc= 2.092.

حرف c نشان می­دهد که پارامترها مطابق با نمودار تنش-کرنش فشاری یک­جهته بوده، و علامت منفی نشانگر با تنش یا کرنش منفی می­باشد. با استفاده از مقادیر پیشبینی شده برای fp، کرنش متناظر Ɛp نشان داده شده در شکل 8 با نمودار تنش-کرنش یک­جهته یک میلگرد کوتاه در فشار ارزیابی شد.

نتایج به دست آمده با استفاده از روش بالا برای چندید مقدار K در شکل 7 و 8 نشان داده شده است.می­توان مشاهده کرد که استفاده از مقدار 0.75 برای K منجر به هم­پوشانی خوبی بین نتایج به دست آمده با استفاده از تئوری مدول مماسی و نتایج تجربی می­شود. این مقدار K نشان می­دهد که وضعیت انتهایی نمونه­های آزمایش بین وضعیت مفصلی کامل و گیرداری کامل می­باشد.





**آزمایشات چرخه­ای**

**تعریف آغاز کمانش**

 آغاز کمانش در آزمایش چرخه­ای با استفاده از کرنش­های خوانده شده برای Ɛ1 و Ɛ2 و ارتباط دادن این کرنش­ها با کرنش­های حداکثر به دست آمده در چرخه مربوطه، Ɛm+ و Ɛm- تعریف شد. این وضعیت بحرانی وقتی تعریف شد که Ɛ1-Ɛ2 برابر یا بزرگتر از 0.2(Ɛm+-Ɛm-) بود. این رویکرد برای تعریف شروع کمانش در آزمایشات چرخه­ای این مزیت را دارد که تعریف به دست آمده برای آزمایش یک­جهته یک مورد خاص از مورد آزمایش چرخه­ای می­باشد. همانطور که بعدا مشاهده می­شود، تعریف آغاز کمانش همانند بالا در آزمایش چرخه­ای در روش پیشنهاد شده برای پیشبینی کرنش متناظر کمانش میلگرد در معرض کرنش چرخه­ای مورد استفاده قرار می­گیرد.

 شکل 9 نشان دهنده نتایج تجربی تنش-کرنش چرخه­ای در موارد کرنش های Ɛ1 و Ɛ2 برای نمونه­های بیانگر میلگرد­های یک ستون با نسبت Sh/D برابر 6 و نسبت Ɛm+/Ɛm- برابر 2.3 می­باشد. نقطه سیاه در شکل 9 نشان دهنده نقطه نمودار تنش-کرنش در آغاز کمانش می­باشد، که با تعریف قبلی برای آزمایش چرخه­ای به دست امده است. نتایج نشان داده شده در شکل 9 اجازه یک ارزیابی صحت روش ارائه شده برای تعریف آغاز کمانش را به ما می­دهد. بعد از این اتفاق (به چرخه تنش-کرنش بعد از نقطه سیاه در شکل 9 نگاه کنید) اختلاف بین کرنش­های فشاری اندازه­گیری شده در دو سمت نمونه اهمیت پیدا می­کند. به علاوه، برای افزایش سطح کرنش­های محوری میانگین در نمونه­ها، تار انتهایی قسمت محدب نمونه با افزایش کرنش کششی افزایش می­یابد. این نوع نتایج همچنین در بیشتر نمونه­های تست شده تحت بارگذاری چرخه­ای مشاهده شد (Rodriguez and Botero 1998).

 نوع دیگری از نمایش نتایج بحث بالا در شکل 10 نمایش داده شده است، که در آن اختلاف اندازه­گیری شده Ɛ1-Ɛ2 نمونه­های بحث شده در آنجا به صورت تابعی از میانگین Ɛ1 و Ɛ2 نشان داده شده است. نتایج شکل 10 برای دو مقدار آخر کرنش­های محوری حداکثر نشان داده شده است. همانطور که در آنجا مشاهده می­شود، یک افزایش ناگهانی در اختلاف اندازه­گیری شده Ɛ1-Ɛ2 بعد از آغاز کمانش پیشبینی شده اتفاق می­افتد، که صحت آغاز کمانش پیشبینی شده را حمایت می­کند.



**روش پیشنهاد شده برای پیشبینی آغاز کمانش**

 در اینجا روشی برای پیشبینی کرنش محوری در آغاز کمانش میلگرد تحت بارگذاری چرخه­ای معکوس پیشنهاد می­شود. این روش از پارامتر Ɛ0+ استفاده می­کند، که به عنوان کرنش محوری در بارگذاری صفر بعد از چرخه کشش تعریف شده است (شکل 11). به علاوه، پارامتر Ɛp\*، که برای ارزیابی کرنش محوری در کمانش استفاده می­شود، Ɛp، مانند شکل 11 تعریف شده است.



تعریف بالا از فرضی استفاده می­کند که گسترش نمودار تنش-کرنش چرخه­ای فشاری همزمان با نمودار یک­جهته فشاری می­باشد. این فرض بر پایه نتایج آزمایشات یک­جهته و چرخه­ای میلگرد­ها (monti and noti 1992) می­باشند و همچنین به عنوان وسیله­ای در مدل­های عددی برای تخمین رفتار تنش-کرنش چرخه­ای میلگرد در صورت عدم کمانش (mander et al 1984) استفاده می­شود.یک کاربرد این فرض در نمونه بحث شده (Sh/D= 6,Ɛm+/Ɛm-= 2.3) در شکل 12 نشان داده شده است، که اعتبار فرض به کار رفته را حمایت می­کند. نتایج تجربی نشان داده شده در شکل 12 با در نظرگرفتن بارهای محوری اندازه­گیری شده و Ɛ1 و 2Ɛ میانگین متناظر به دست آمده­ است. همان روش استفاده شده برای به دست آوردن این نمودارهای تجربی در نمودارهای تنش-کرنش چرخه­ای تجربی به صورت زیر استفاده شده است.



 مقادیر اندازه­گیری شده Ɛp\* برای نمونه­های در معرض آزمایش چرخه­ای با پارامترهای اندازه­گیری شده Ɛ0+ و Ɛp و رابطه 7 در شکل 13 نمایش داده شده است. نتایج نسبت Sh/D= 2.5 در این شکل موجود نیست، چون این نمونه­ها شواهدی از کمانش نشان ندادند. نتایج نشان داده شده در شکل 13 همچنین می­تواند با مقادیر پیشبینی شده Ɛp\* مقایسه شود، یعنی با کرنش یک­جهته پیشبینی شده در کمانش با فرض K= 0.75، و جاگذاری این مقدار برای Ɛp\*. این مقادیر پیشبینی شده در شکل 13 توسط نمودار­های ادامه­دار متناظر 5% قسمت پایین، میانگین، و 95% مقادیر قسمت بالایی پارامترهای اساسی که در این مطالعه برای تعریف نمودارهای فشاری یک­جهته استفاده شده است. بارهای محوری اندازه­گیری شده در آغاز کمانش، که در عبارات تنش­های بی­بعد بیان­شده است، fp/fy، در شکل 14 نشان داده شده است، که همچنین توسط نمودارها رسم شده با استفاده از مقادیر پیشبینی شدهfp/fy  از روابط پیشنهاد شده پیشبینی رسم شده است.




**روش ارزیابی نمودارهای تنش-کرنش چرخه­ای میلگرد با در نظر گرفتن کمانش**

برای ارزیابی نمودارهای تنش-کرنش چرخه­ای با در نظر گرفتن آغاز کمانش، استفاده از بحث قبلی مدل آنالیزی Mander etal1984 برای تخمین این نمودارها در غیاب کمانش پیشنهاد شده است. در این روش، همچنین استفاده از این نمودارها تا زمانیکه کرنش محوری پیشبینی شده به مقدار بحرانی تعریف شده توسط پارامتر Ɛp\* برسد، پیشنهاد شده است.

نتایج اعمال این روش در شکل 15 برای همان نمونه­ای که نتایج آن در شکل 9 ، 10، 12 (Sh/D= 6,Ɛm+/Ɛm-= 2.3) آمده است، نشان داده شده است. با مقایسه بین نمودارهای عددی و تجربی نشان داده شده در شکل 15، می­توان مشاهده کرد که روش پیشنهادی همپوشانی خوبی با داده­های تجربی دارد. نتایج مشابه برای مقادیر دیگر Sh/D و Ɛm+/Ɛm- به دست آمده است.(Rodriguez and botero 1998).

**نتایج**

با استفاده از آزمایش­های بارگذاری یک­سویه و چرخه­ای محوری روی میلگردهای ساخته شده در دانشگاه ملی Mexico، روشی برای ارزیابی رفتار تنش-کرنش چرخه­ای میلگردهای فولادی با در نظر گرفتن کمانش میلگرد پیشنهاد شد. در اینجا نشان داده شد که آغاز کمانش میلگرد تحت بارگذاری چرخه­ای ممکن است بعد از عوض شدن چرخه از کشش اتفاق بیافتد و این وابسته به مقادیر حداکثر کرنش کششی قبل از عوض شدن چرخه دارد. در این مورد، آغاز کمانش میلگرد ممکن است در ناحیه کششی چرخه هیسترزیس اتفاق بیافتد.

گرچه نمونه­های آزمایش شده در این تحقیق عوامل مختلف مؤثر روی آغاز کمانش میلگرد در المان­های RC تحت زلزله را در نظر نمی­گیرد، این روش یک عامل اساسی ناپایداری میلگرد تحت چرخه­های هیسترزیس را در نظر می­گیرد.

****