

اثر شکل پذیری انحنای بر شکل پذیری تغییر مکانی قاب‌های خمشی بتن مسلح دارای شکل پذیری زیاد و متوسط

عباسعلی تسنیمی^۱؛ ابودر خواجه رضا^۲

چکیده

در این مقاله اثر انحنای مقاطعی از اعضای سازه‌ای را، بر رفتار قاب‌های ساختمانی دو بعدی مطالعه و ارزیابی شده است. قابهای مورد مطالعه از نوع بتن مسلح با شکل پذیری زیاد و متوسط و در دو منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد و متوسط و بر روی خاک نوع ۲ و خاک نوع ۳ انتخاب شده‌اند. تعداد قابها شانزده و تعداد طبقات پنج، هشت، دوازده و پانزده است. مقاطع اصلی آن دسته از اعضا که استعداد تشکیل مفاصل پلاستیک در آنها هست، در مراحل مختلف رفتاری شامل حدترک خوردگی، حدجاری شدن و حدنهایی انتخاب و مطالعه شده اند. مدل سازی قابها بر مبنای رفتار غیر خطی هندسی و مصالح استوار بوده و برای تحلیل غیرخطی از نرم افزار IDARC استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که رابطه بین مجموع انحنای کلیه مقاطع و تغییر مکان تراز بام به صورت خطی بوده که با ارائه تعریفی برای شکل پذیری انحنایی قاب، می‌توان قاب را به صورت سیستم یک درجه آزاد مدل کرد و بین شکل پذیری انحنایی و شکل پذیری تغییر مکانی سیستم رابطه ای به دست آورد.

کلمات کلیدی

قابهای خمشی بتن مسلح - شکل پذیری - تحلیل غیر خطی استاتیکی فزاینده - منحنی رفتار - انحنای در مقاطع

Effect of Curvature Ductility on Overall Ductility of High and Medium Ductile RCMR Frames

A. A. Tasnimi; A. Khajereza

ABSTRACT

This paper investigates the effect of curvature of structural members on nonlinear behavior of two-dimensional building frames. The RC moment resisting frames in two groups of medium (M) and high ductility (H) level, on alluvium (A) and bedrock (R) soil were considered for the analysis respectively. Totally, sixteen frames having 5, 8, 12 and 15 stories, with four bays of each 4m long, were considered. All frames were designed for H and M ductility levels according to Iranian standard 2800 for seismic design, and Iranian concrete code of practice (ABA) and then corresponded to the regulation of ACI-2002.

IDARC computer program is utilized for the nonlinear static analysis to investigate the capability of plastic hinge formation of different members during the various state of behavior (cracking, yielding and ultimate state). Linear relation between the overall curvature ductility and the overall displacement ductility of the multi-degree of freedom system is derived. From the derived relationship, the close relationship between the fundamental period and the relative energy dissipated (ratio of overall curvature ductility to the overall displacement ductility) is clearly obtained.

^۱ دانشیار سازه دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، tasnimi@modares.ac.ir

^۲ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد رشته سازه دانشگاه تربیت مدرس

Curvature ductility, moment resisting frame, displacement ductility, nonlinear static analysis, plastic hinge.

در تبیین رفتار سازه نقش اساسی دارند، ارزیابی شد.

۱- مقدمه

در تحلیل غیرخطی- لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح، به دلیل پیچیدگی رفتار بتن در تمام مراحل رفتاری، به ویژه در قلمرو غیر ارتجاعی، مواردی نظیر ترک خوردگی، سخت کرنشی، نرم کرنشی و گسیختگی در فشار و کشش، موجب به کارگیری برخی فرضیه‌های ساده کننده در اغلب پژوهش‌ها شده است [۲ و ۱]. از طرفی دیگر کاربرد روش تحلیل غیرخطی دینامیکی ضمن به دست دادن نتایج دقیق تر به دلیل پیچیدگی و نیاز به صرف وقت بیشتر، کاربرد عملی آنرا برای سازه‌های ویژه و در موارد تحقیقاتی محدود نموده است [۴، ۳ و ۵]. با این همه، کنترل آسیب یا خسارت در این قبیل سازه‌ها پایه و اساس روش‌های تحلیل و طراحی جدید تشخیص داده شده که تحقق این هدف از طریق اعمال تحلیل‌های غیرخطی و در عین حال ساده امکان پذیر است [۶، ۷ و ۸]. یکی از این روش‌ها که کاربرد زیادی در تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن مسلح نتایج خوب و قابل قبولی را ارائه می‌کند روش استاتیکی غیرخطی است. از آن جا که در این سازه‌ها نقاط انتهایی تیرها و ستونها در تبیین رفتار غیرخطی آن‌ها نقش کلیدی دارند، می‌توان گفت که تغییر مکان کلی هر سازه‌ای ناشی از تغییر شکل عضوهای آن سازه است. در میان تغییر شکل‌های هر عضو، انحناء را می‌توان از مهم ترین تلاش‌های درونی مقاطع قاب‌های خمشی بتن مسلح به شمار آورد. این تحقیق بر روی انحنای مقطعی از هر عضو به عنوان یکی از مهمترین عوامل موثر که در رفتار غیر خطی سازه نقش دارد، متمرکز شده و با بررسی نقش آن به دنبال یافتن ارتباطی بین رفتار موضعی (در یک عضو) با رفتار کلی سازه است. برای دستیابی به عنصری که بیان گر رفتار اعضا باشد، از عواملی مانند مجموع انحناء، میانگین انحناء، مجموع شکل پذیری انحنایی مقاطع، مجموع انحناء در مراحل رفتاری مشابه (مثلا مجموع انحنای ترک نخورده و ترک خورده) و بالاخره، مجموع شکل پذیری انحنایی اعضا در مراحل رفتاری مشابه می‌توان سود جست. پس از بررسی همه موارد، مجموع انحناء مقاطع، که عاملی موثر در استهلاک انرژی بوده، در نظر گرفته شده و به بررسی رابطه آن با تغییر مکان کلی قاب و میزان برش پایه آنها پرداخته شده است. بدین منظور قابهای نمونه که تعداد آنها ۱۶ عدد است، مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون یا Pushover) قرار گرفته‌اند و میزان انحناء در مقاطع و تغییر مکان تراز بام در گام‌هایی خاص از تحلیل که

۲- شکل پذیری

بطور کلی، شکل پذیری عبارت است از توان استهلاک انرژی عضو و یا سازه در محدوده رفتار غیر ارتجاعی به نحوی که بدون کاهش چشمگیر در مقاومت و سختی، بتواند تغییر شکل قابل توجهی را بپذیرد. برای کمی کردن شکل پذیری از ضریب شکل پذیری استفاده می‌شود که عبارت است از نسبت حداکثر تغییر شکل به تغییر شکل نظیر جاری شدن. در این مقاله از این تعریف برای شکل پذیری موضعی اعضا و شکل پذیری کل سیستم سازه‌ای استفاده شده است. بنابراین شکل پذیری تغییر مکانی سیستم سازه‌ای با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (1)$$

که در آن Δ_m حداکثر تغییر شکل سازه و Δ_y تغییر شکل نظیر جاری شدن است. با توجه به اینکه مدل رفتار سازه‌ها یعنی منحنی رفتاری آن‌ها کاملاً دو خطی نیست، تعریف دقیق حد جاری شدن سازه چندان ساده نیست. این حد به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به رفتار غیر خطی مصالح و آغاز تسلیم در بخش‌های مختلف سازه در ترازهای مختلف بار به علت نامعینی سازه و باز توزیع نیروها، اشاره کرد. ولی نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها نشان داد که تقریباً منحنی رفتاری تمام سازه‌ها از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت مربوط به رفتار ارتجاعی به صورت خطی و قسمت مربوط به ناحیه ارتجاعی-خمیری به صورت منحنی و سرانجام ناحیه غیر ارتجاعی به صورت خطی است. از این رو برای ساده سازی رفتار سازه‌ها از مدل دو خطی ماسی که دارای سختی اولیه و سختی ثانویه است استفاده شده، به همین دلیل برای عضوهای سازه‌ای از شکل پذیری انحنایی مندرج در رابطه (۲) استفاده شد.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2)$$

که ϕ_u حداکثر انحناء و ϕ_y انحناء جاری شدن در هر مقطع که استعداد تشکیل لولای خمیری را دارد، بوده و تراز تسلیم در منحنی پاسخ ایده آل به صورت‌های مختلفی تعریف شده است. این تعریف‌ها عبارتند از:

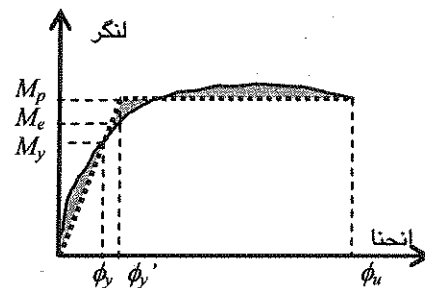
۱- انحنای نظیر اولین تسلیم در سازه.

۲- انحنای تسلیم در سیستم معادل ارتجاعی-خمیری که سختی ارتجاعی و بار نهایی آن مشابه سیستم واقعی است.

۳- انحنای تسلیم در سیستم معادل ارتجاعی-خمیری که جذب انرژی آن مشابه سیستم واقعی است.

۴- انحنای تسلیم در سیستم معادل ارتجاعی-خمیری که در آن سختی کاهش یافته با سختی وتری معادل است.

لازم به توضیح است که سختی وتری از اولین تسلیم یا ۰/۷۵ لنگرنهایی، هر کدام کم‌تر باشد، به دست می‌آید. به منظور محاسبه شکل پذیری هر عضو از منحنی رفتاری $M-\phi$ استفاده شده است. بدین ترتیب پس از انجام تحلیل مقطع و یا آزمایش، نمودار $M-\phi$ به صورت دو خطی تقریب زده می‌شود. شکل (۱) محل تلاقی این دو خط را بر مبنای جذب انرژی مشابه، معادل سطح جاری شدن مقطع (ϕ_y) نشان می‌دهد.



شکل (۱): تقریب دو خطی منحنی واقعی $M-\phi$

لازم به ذکر است که لزوماً تراز جاری شدن مقطع منطبق بر نخستین جاری شدن فولادهای کششی نیست که بسته به نوع تعریف (معمولاً ϕ_y) بعد از جاری شدن اولین فولاد کششی روی می‌دهد.

۳- رابطه بین شکل پذیری تغییر مکانی و شکل پذیری انحنایی

برای سازه یک درجه آزاد مانند یک طره قائم شکل ۲، رابطه بین شکل پذیری انحنایی و شکل پذیری تغییر مکانی بسیار ساده است و با انتگرال گیری انحناء بدست می‌آید [۹]، بنابراین داریم:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} = \frac{\int \phi(x) x dx}{\int \phi_e(x) x dx} \quad (2)$$

مقدار x از بالای طره به طرف پایه در نظر گرفته می‌شود. در این شکل $\phi(l)$ توزیع انحناء متناظر با حداکثر پاسخ و

$\phi_e(l)$ توزیع انحناء در حد جاری شدن است. باید توجه داشت که در عمل بدست آوردن انتگرال رابطه ۳ مشکل و غالباً با تقریب همراه است. در صورتی که انحناء متناظر با حداکثر پاسخ را با ϕ_m و انحناء متناظر با جاری شدن را با ϕ_y نشان دهیم، می‌توان نوشت:

$$\mu_{\Delta} = \frac{k_1 \phi_m}{k_2 \phi_y} = k \mu_{\phi} \quad (4)$$

$$\phi(l) = \frac{\phi_y}{L} l \quad (5)$$

مقدار k_1, k_2 و k ثابت بوده و $\phi(l)$ توزیع انحناء در حداکثر پاسخ است. همچنین با تکیه بر شکل (۱) و با فرض خطی بودن توزیع انحناء تا حد جاری شدن می‌توان به منظور ارتباط شکل پذیری تغییر مکانی و شکل پذیری انحنایی رابطه ۶ را نتیجه گیری کرد [۶]:

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3 \left[\mu_{\phi} - 1 \right] \frac{L_p}{L} \left[1 - 0.5 \frac{L_p}{L} \right] \quad (6)$$

لازم به ذکر است که توزیع واقعی انحناء در مرحله جاری شدن به صورت غیرخطی است و به این دلیل که اولاً رابطه بین لنگر و انحناء غیرخطی است و ثانیاً سخت شدگی بتن کششی بین ترکها نیز غیرخطی است. از طرفی توزیع انحناء واقعی در مرحله حداکثر پاسخ، (که متناظر با حداکثر انحناء در پایه طره قائم بوده) در بخشی از پای طره که به طول لولای خمیری (L_p) مشهور است، به صورت متمرکز خواهد بود. این طول به نحوی اختیار شده است که تغییر مکان خمیری در بالاترین تراز طره (Δ_p) که از توزیع ساده بدست می‌آید، مساوی با مقدار آن در توزیع واقعی انحناء باشد.

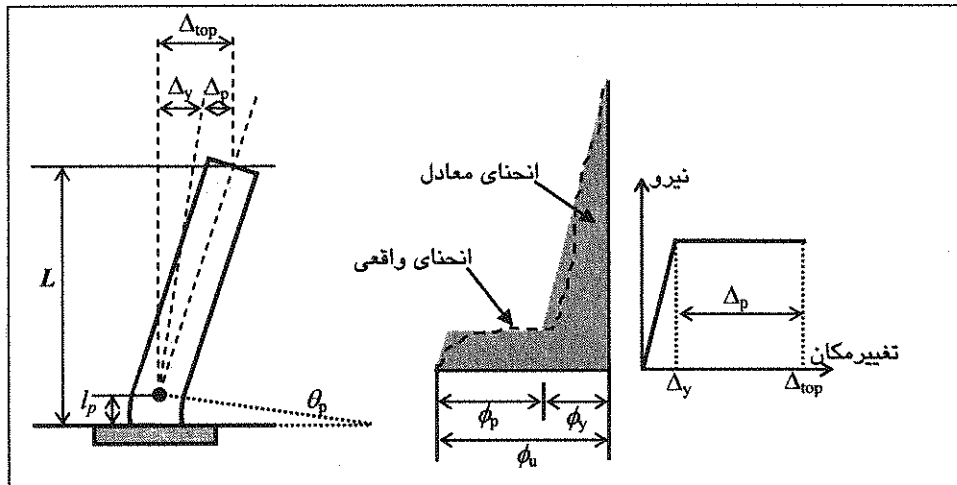
بدین ترتیب رابطه ۶ برحسب شکل پذیری انحنایی چنین می‌شود:

$$\mu_{\phi} = 1 + \frac{(\mu_{\Delta} - 1)}{3 \frac{L_p}{L} \left[1 - 0.5 \frac{L_p}{L} \right]} \quad (7)$$

روابط فوق در واقع رابطه بین شکل پذیری تغییر مکانی و شکل پذیر انحنایی برای یک سیستم یک درجه آزاد است. در مورد رابطه ۷ لازم به ذکر است که چون نسبت $\frac{L_p}{L}$ همواره کوچک تر از یک است (این نسبت به صورت منحنی سهمی در رابطه تاثیر گذار است و برای مقادیر کوچک تر از ۱ همواره صعودی است) هر چه قدر نسبت $\frac{L_p}{L}$ کوچک تر شود مقدار شکل پذیری نیز کم تر خواهد شد. به عبارتی می‌توان گفت افزایش طول مفصل پلاستیک استهلاک انرژی بیشتری به همراه

پلاستیک، راه را برای به دست آوردن چنین رابطه‌ای هموار نموده است که شرح آن در ادامه می‌آید.

خواهد داشت. ولی برای سیستم‌های چند درجه آزاد نمی‌توان از این رابطه استفاده کرد. برای رفع این مشکل تحقیق انجام شده با الهام از اثر تجمیعی انحنای مربوط به هر یک از مفصل‌های



شکل (۲): ظرفیت تغییر مکان محلی طره قائم

گرفته و دارای شکل پذیری زیاد است. مشخصه‌های همه قاب‌های مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات و تفکیک قاب‌های مورد مطالعه

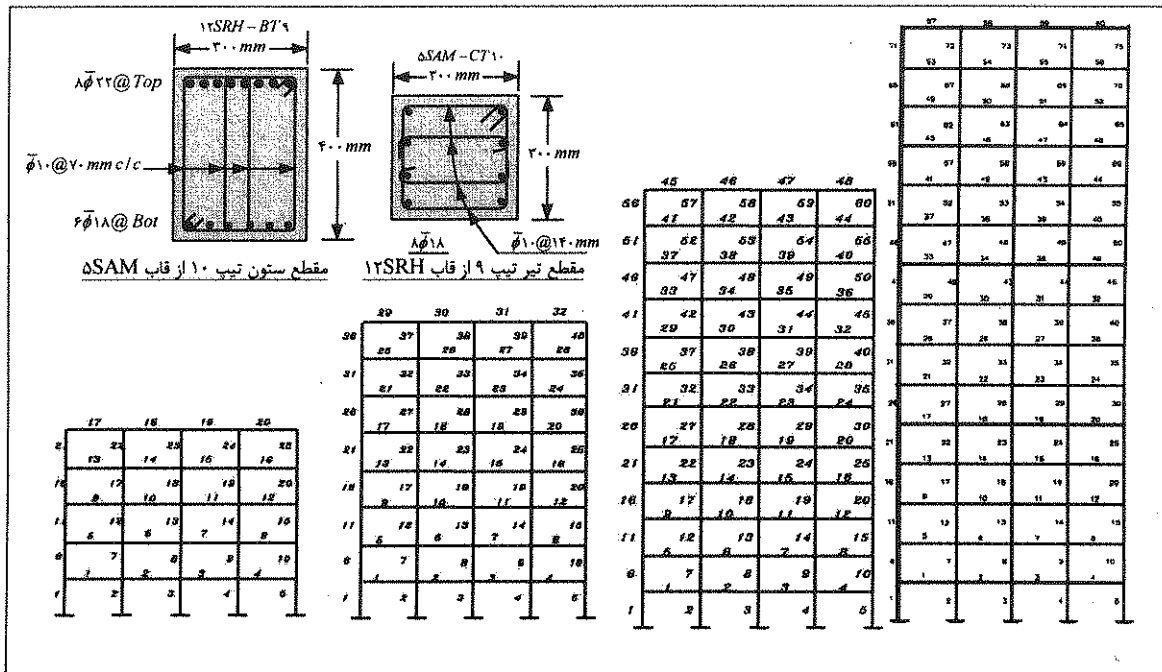
ردیف	نام قاب	تعداد طبقه	نوع زمین	سطح خطر و شکل پذیری
۱	۵SRH	۵		
۲	۸SRH	۸	بستر سنگی	سطح خطر زیاد
۳	۱۲SRH	۱۲	R	
۴	۱۵SRH	۱۵	H	
۵	۵SAH	۵		
۶	۸SAH	۸	بستر آبرفتی	شکل پذیری بالا
۷	۱۲SAH	۱۲	A	
۸	۱۵SAH	۱۵		
۹	۵SRM	۵		
۱۰	۸SRM	۸	بستر سنگی	سطح خطر متوسط
۱۱	۱۲SRM	۱۲	R	
۱۲	۱۵SRM	۱۵	M	
۱۳	۵SAM	۵		
۱۴	۸SAM	۸	بستر آبرفتی	
۱۵	۱۲SAM	۱۲	A	شکل پذیری متوسط
۱۶	۱۵SAM	۱۵		

۵- تحلیل استاتیکی غیر خطی

تحلیل استاتیکی غیرخطی یک روش ساده و مناسب به منظور پیش بینی پاسخ لرزه‌ای سازه قبل از تحلیل دینامیکی بوده و می‌تواند به منظور دستیابی به یک سری اطلاعات سازه‌ای از قبیل جاری شدن اعضا، ظرفیت شکل پذیری، و کفایت سختی جانبی بیانجامد.

ع- انتخاب قاب‌ها

همه قاب‌های منتخب و مورد مطالعه دارای ۴ دهانه ۴ متری و طبقات ۵، ۸، ۱۲ و ۱۵ هستند. ارتفاع همه طبقات ۳/۲۰ متر بوده و عرض باربر قاب‌ها نیز ۴ متر در نظر گرفته شده است. محل استقرار ساختمان این قاب‌ها بر روی دو نوع زمین، یکی سنگی (نوع I) و دیگری آبرفتی (نوع III) فرض شده است. بارهای جانبی که برای طراحی قابها در نظر گرفته شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ [۱۳] محاسبه و تعیین شده و پس از تحلیل خطی، بر مبنای آیین نامه بتن ایران (آبا) [۱۲] و در تطبیق با ACI [۱۱] به صورت دستی طراحی شده لیکن به دلیل رعایت اختصار، جزئیات یک مورد از قاب‌ها به همراه شماره گذاری آنها در شکل (۳) آورده شده است. برای نامگذاری قاب‌ها از حرف R برای بستر سنگی و حرف A برای بستر آبرفتی استفاده شده است. همچنین در نام گذاری و تفکیک قاب‌ها از نظر شکل پذیری، آنها به دو گروه باشکل پذیری بالا با حرف و باشکل پذیری متوسط با حرف M تقسیم شده اند. قاب‌های با شکل پذیری بالا در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد و قاب‌ها با شکل پذیری متوسط در منطقه با خطر نسبی متوسط در نظر گرفته شده‌اند. در این نام گذاری از یک عدد یک یا دورقمی به همراه حرف S برای مشخص کردن تعداد طبقات نیز استفاده شده است. به عنوان مثال نماد ۵SAH معرف قاب پنج طبقه‌ای است که بر روی بستر آبرفتی و در منطقه با خطر پذیری زیاد قرار



شکل ۳- قاب های انتخاب شده

$$\begin{cases}
 k = 1 & \dots T \leq 0.5 \text{ sec} \\
 k = 1 & \dots T \geq 2.0 \text{ sec} \\
 k = 1 + \frac{T - 0.5}{2} & \dots \text{otherwise}
 \end{cases}$$

نرم افزار در مدل کردن اثر $P-\Delta$ این اثر نیز در نظر گرفته شده است. میزان برش پایه طوری در نظر گرفته شده که سازه به تغییر مکان هدف برسد. آنچه در این مقاله به عنوان تغییر مکان هدف فرض شده، تغییر مکانی است که در آن اولین عضو گسیخته شود. بنابراین انتخاب تغییر مکان معادل گسیختگی یک عضو در سازه، می‌تواند نقطه‌ای مناسب برای انتهای تحلیل باشد. برای این منظور برش پایه نهایی به نحوی معرفی می‌شود که در آخرین گام تحلیل، یکی از مقاطع گسیخته شود. با تمرکز بر روی انحنا و سایر مشخصه‌های رفتاری کلیه مقاطع اعضا در گام‌هایی ویژه از تحلیل، رفتار اعضا و کل سازه ارزیابی شد. این گام‌های ویژه که از این پس نقاط شاخص رفتاری نامیده می‌شوند، می‌بایستی به نحوی انتخاب شده که برای تمام قاب‌ها به راحتی قابل کنترل بوده و بتوانند یک روال منطقی از رفتار سیستم را ارائه دهند. نقاط شاخص مزبور به قرار زیر نام گذاری و تشریح شده‌اند:

- ۱- لحظه اولین ترک خوردگی در تیرها
- ۲- لحظه اولین ترک خوردگی در ستون‌ها
- ۳- لحظه اولین جاری شدن در تیرها
- ۴- لحظه تسلیم سیستم سازه‌ای بر مبنای مدل دوخطی
- ۵- لحظه اولین جاری شدن در ستون‌ها

عملیات مدل سازی و تحلیل با استفاده از نرم افزار IDARC انجام شود [۱۰]. این نوع از تحلیل را می‌توان به دو طریق انجام داد، یکی روش کنترل نیرو و دیگری روش کنترل تغییرمکان. در روش اول بار جانبی به صورت گام به گام به سازه اعمال می‌شود و در هر گام پاسخ سازه توسط تحلیل مشخص می‌شود. در روش دوم بر عکس حالت اول یک پروفیل تغییر مکان برای سازه تعریف و سپس پاسخ‌های نیرویی متناظر با آن محاسبه می‌شود. در روش کنترل نیرو، توزیع‌های مختلفی برای اعمال نیرو می‌توان در نظر گرفت. آنچه در این مقاله برای اعمال نیرو در نظر گرفته شده، توزیع توانی تعمیم یافته نامیده می‌شود. این توزیع به منظور در نظر گرفتن تغییرات شتاب با ارتفاع طبقات معرفی شده، تا اثر مودهای بالاتر در پاسخ سازه نیز لحاظ شود. افزایش نیرو در هر گام در طبقه n م از رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$\Delta F_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum_{i=1}^N W_i h_i^k} \Delta V_b \quad (8)$$

که در آن k شکل توزیع نیرو بوده و مقدار آن را می‌توان بر مبنای محدودیت های ذیل تعیین کرد. در هر حال می‌توان از مقادیر دیگری نیز برای k استفاده کرد. باید توجه داشت که به ازای $k=0$ توزیع یکنواخت، $k=1$ توزیع خطی و نیز به ازای $k=2$ توزیع سهمی خواهد بود. با توجه به قابلیت

۶- لحظه اولین گسیختگی در اعضا (نقطه پایان تحلیل)

۷- چهار لحظه اختیاری در حد فاصل لحظه های ۵ و ۶

از آنجا که در حد فاصل اولین جاری شدن ستون تا اولین گسیختگی عضو، رفتار سیستم کاملا وارد قلمرو پلاستیک می شود، برای مشخص تر کردن منحنی رفتار، از چهار نقطه برای این محدوده استفاده شد که به چهار لحظه اختیاری نامیده شدند. در ادامه شرح مشخصه رفتاری سازه ها در لحظه های فوق آورده شده است.

۵-۱- لحظه اولین ترک خوردگی در تیر

در این مرحله از رفتار، مقدار تنش کششی در دورترین تار بتن از مقطع تیر، به تنش ترک خوردگی می رسد. به جز دو مورد از قاب های با شکل پذیری متوسط، در تمامی قاب ها این شاخص رفتاری به عنوان اولین نقطه روی منحنی ثبت و فقط در دو مورد استثنایی به عنوان دومین نقطه بر روی منحنی رفتار ثبت شد. این شاخص از این پس به اختصار F.B.C (First Beam Crack) نامیده می شود. لازم به توضیح است که اثر اولین ترک خوردگی در تیرها از این جهت مورد توجه و استفاده قرار گرفته است که در زمره عواملی است که در استهلاک انرژی سهم هستند.

۵-۲- اولین ترک خوردگی در ستون

در این مرحله از رفتار، مقدار تنش کششی در دورترین تار کششی مقطع ستون به تنش ترک خوردگی می رسد که در اکثر موارد دومین شاخص رفتاری سیستم مطابق با لحظه اولین ترک خوردگی در ستون ها بود و فقط در دو مورد از قاب ها ابتدا ترک خوردگی در ستون و سپس در تیر مشاهده شد. از این پس این شاخص به اختصار F.C.C (First Column Crack) خوانده می شود.

۵-۳- اولین جاری شدن در تیر

نخستین لحظه ای که تنش در فولاد کششی مقطعی از تیر به مقدار تنش جاری شدن (f_y) می رسد به عنوان سومین شاخص رفتاری سیستم تعریف شده است. در این مرحله رفتار سازه در ناحیه ارتجاعی قرار دارد. از این مرحله به بعد رفتار سازه وارد قلمرو ارتجاعی-خمیری می شود. این شاخص رفتاری به اختصار F.B.Y (First Beam Yielding) نامیده می شود.

۵-۴- تسلیم سیستم سازه ای بر مبنای مدل دوخطی

بر اساس مدل دو خطی که شرح مختصر آن گذشت، در لحظه ای که تغییر مکان سیستم متناظر با سطح جاری شدن

باشد، شاخص رفتاری تمامی قاب های مورد مطالعه به عنوان نقطه چهارم بر روی منحنی که پس از اولین جاری شدن در تیر اتفاق می افتد، تعریف شد که از این به بعد با نماد S.Y (System Yielding) مشخص می شود.

۵-۵- اولین جاری شدن در ستون

در این مرحله رفتاری، تنش موجود در میلگردهای اصلی ستون به تراز تنش جاری شدن می رسد. این شاخص رفتاری نیز در تمامی قاب ها بعد از شاخص رفتاری S.Y و به عنوان نقطه پنجم رفتاری سازه نمایان شد که از این به بعد این مقطع رفتاری به اختصار F.C.Y (First Column Yielding) خوانده می شود.

۵-۶- اولین گسیختگی عضو

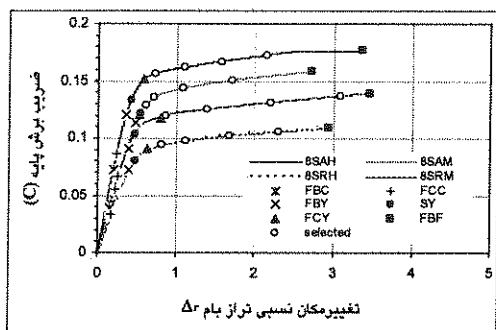
در این مرحله از رفتار دورترین تار فشاری بتن پس از جاری شدن فولاد کششی به حد نهایی خود می رسد که در صورت اعمال نیروی بیشتر مقدار دوران در آن مفصل به دلیل دارا بودن شرایط ویژه طراحی لرزه ای که مطابق با ضوابط آیین نامه بتن ایران (آبا) صورت گرفته، قابلیت افزایش خواهد داشت. این مرحله از رفتار پایان ظرفیت سازه در نظر گرفته شده که انتهای نمودار $M-\phi$ است. در بررسی های انجام شده نشان داده شد که در تمامی قاب ها اولین گسیختگی در مقطع تیر رخ داده است. از این به بعد این شاخص رفتاری به اختصار با نماد F.B.F (First Beam Fail) نامیده می شود. پس از تحلیل کلیه قاب ها، شش شاخص رفتاری فوق بر روی منحنی رفتاری آنها در شکل ۴ نشان داده شد. لازم به ذکر است که در این نمودارها به منظور سهولت در مقایسه، مقدار نیرو و تغییر مکان به صورت نسبی آورده شده است که در آن محور افقی Δ_r ، و محور قائم نسبت برش پایه به وزن قاب را نشان می دهد که با C_r نشان داده شده است.

۶- بررسی انحنا در نقاط شاخص رفتاری

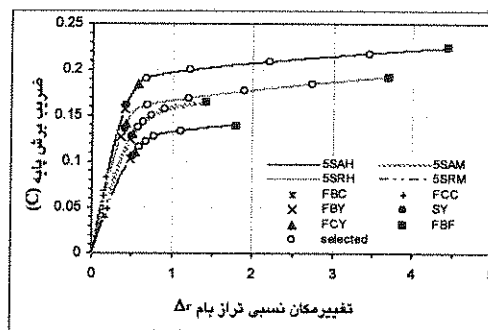
پس از معین شدن نقاط شاخص رفتاری، مقدار انحنا در تمام مقاطع عضوهایی که استعداد تشکیل مفصل پلاستیک را دارند، برای هر یک از نقاط شاخص رفتاری (که در واقع مشخص کننده مرحله ای خاص از رفتار سازه است) محاسبه می شود. مجموع انحنا در همه مقاطع و برای تمام نقاط شاخص رفتاری بیانگر انرژی مستهلک شده سازه است. بنابراین اگر بین مجموع انحنا و تغییر مکان تراز بام که یکی از مشخصه های رفتار سازه است رابطه ای برقرار شود می توان رابطه ساده ای

تغییر مکان نسبی تراز بام (Δ_r) دارد.

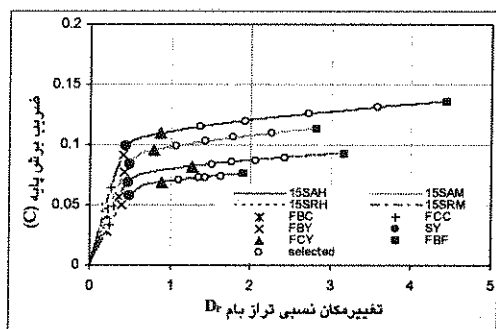
برای سیستم‌های چند درجه آزاد نیز به دست آورد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که در مورد تمامی قابها، مجموع انحنا در نقاط شاخص رفتاری مقاطع، رابطه خطی با



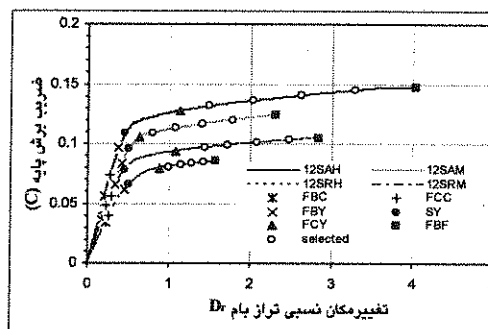
ب- قاب های خمشی ۸ طبقه



الف- قاب های خمشی ۵ طبقه



ب- قاب های خمشی ۱۵ طبقه



ج- قاب های خمشی ۱۲ طبقه

شکل (۴): شاخص رفتاری قاب های خمشی با شکل پذیری زیاد و متوسط بر روی منحنی رفتاری

بام پرهیز کرده فقط دو نمونه از آن‌ها یعنی قاب‌های ۵SAH و ۱۵SRH در شکل (۵) نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود رابطه بین Δ_r و μ_{ϕ_r} به صورت خطی است که ضریب همبستگی برازش خطی برای این قاب‌ها و سایر قاب‌ها بسیار نزدیک به مقدار ۱ بدست آمده است، که حاکی از برازش بسیار خوب آنها می‌باشد.

۷- رابطه بین شکل پذیری انحنایی و شکل پذیری

تغییرمکانی

همان طور که قبلا بیان شد ایجاد رابطه بین شکل پذیری انحنایی یک سیستم چند درجه آزاد که متشکل از چندین عضو است با شکل پذیری تغییرمکانی در تراز بام به سادگی میسر نیست. ولی در این مطالعه با در اختیار داشتن اثر تجمعی شکل پذیری انحنایی کلی سازه با شکل پذیری تغییر مکانی در تراز بام، می‌توان این رابطه را به دست آورد. برای این منظور مقدار Δ_r که عبارت است از تغییر مکان نسبی تراز بام برای هر یک از نقاط شاخص رفتاری و $\Delta_{r,y}$ که تغییر مکان نسبی در تراز بام و متناظر با شاخص رفتاری S.Y است، برای همه قاب‌ها

بدین ترتیب پارامتر $\sum \phi_i$ به عنوان مجموع انحنا در کل سازه تعریف شد. به منظور محاسبه $\sum \phi_i$ در یک نقطه شاخص رفتاری، قدر مطلق انحنا کلیه مقاطع مربوط به هر مرحله از شاخص رفتاری با توجه به تاریخچه رفتار هر عضو استخراج و جمع آوری شد. به منظور فراهم آوردن شرایط مقایسه بین قاب ها، پارامتر جدیدی با نماد μ_{ϕ_r} که عبارت است از نسبت مجموع انحنا تمام مقاطع در هر مرحله رفتاری از نقاط شاخص رفتاری به مجموع انحنا نظیر S.Y تعریف شد. در ادامه نشان داده خواهد شد که این پارامتر می‌تواند تعریف مناسبی برای شکل پذیری انحنایی قاب بدست دهد که از رابطه ۹ بدست می‌آید:

$$\mu_{\phi_r} = \frac{\sum \phi_i}{\sum \phi_{s,y}} \quad (9)$$

برای همه قاب ها مجموع انحنا و در پی آن ضریب شکل پذیری انحنایی (μ_{ϕ_r}) و تغییرمکان نسبی در تراز بام (Δ_r) محاسبه شده که مقدار آنها در جدول (۲) آورده شده است. برای رعایت اختصار در مقاله از آوردن همه شکل‌های مربوط به رابطه ضریب شکل پذیری انحنایی و تغییرمکان نسبی در تراز

دست آورد که شکل (۶) این رابطه را برای همه قاب‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی در تمامی موارد از برآزش بسیار خوب خطی حکایت دارد که این ضریب بین ۰/۹۶ تا ۱/۰

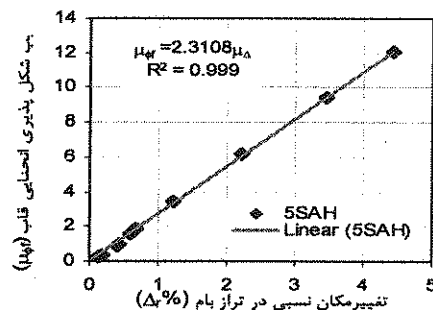
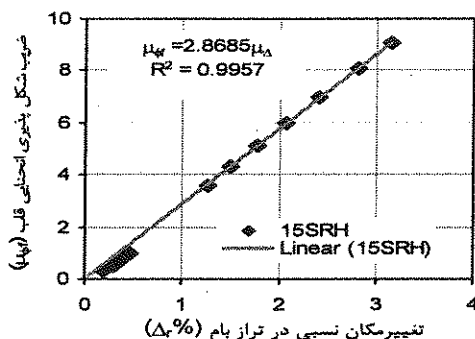
محاسبه شد. با تقسیم Δ_r به $\Delta_{r,y}$ ضریب شکل پذیری تغییرمکانی سازه به کمک رابطه ۱۰ به دست می‌آید:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_r}{\Delta_{r,y}} \quad (10)$$

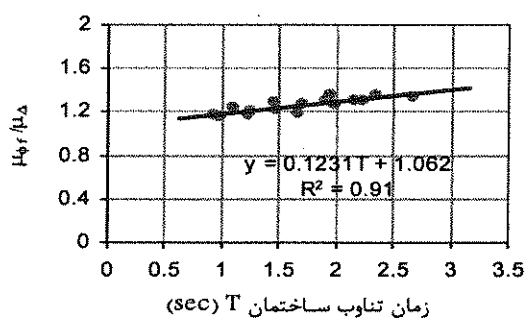
اکنون با داشتن μ_{Δ} و μ_{ϕ_r} می‌توان رابطه بین آن دو را به

جدول (۲): ضریب شکل پذیری انحنایی، تغییرمکان نسبی در تراز بام و نتایج برآزش خطی برای همه قاب‌های مورد مطالعه

نام قاب و نسبت شکل پذیری انحنایی به تغییرمکان نسبی	نقاط شاخص رفتاری						α یا نسبت Δ_r به μ_{ϕ_r}	ضریب همبستگی R^2	
	FBC	FCC	FBY	SY	FCY	FBF			
5SRH	Δ_r	-/۱۴	-/۱۶	-/۲۶	-/۴۱	-/۴۲	۲/۷۰	۱/۰۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۳۰	-/۲۲	-/۸۶	۱/۰۰	۱/۰۹	۱۰/۴۴		
5SAM	Δ_r	-/۱۷	-/۱۹	-/۴۸	-/۵۰	-/۵۲	۱/۴۲	۰/۹۶	
	μ_{ϕ_r}	-/۱۵	-/۳۱	-/۹۴	۱/۰۰	۱/۰۶	۲/۸۲		
5SAH	Δ_r	-/۱۵	-/۱۹	-/۴۱	-/۴۲	-/۵۸	۴/۴۲	۱/۰۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۸	-/۳۲	-/۹۰	۱/۰۰	۱/۵۷	۱۲/۰۴		
5SRM	Δ_r	-/۱۷	-/۲۰	-/۴۹	-/۵۲	-/۵۲	۱/۸۰	۰/۹۸	
	μ_{ϕ_r}	-/۱۴	-/۳۰	-/۹۲	۱/۰۰	۱/۰۶	۴/۲۶		
8SRM	Δ_r	-/۱۶	-/۱۶	-/۴۰	-/۴۶	-/۶۲	۲/۹۵	۱/۰۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۶	-/۲۶	-/۷۹	۱/۰۰	۱/۵۴	۷/۶۲		
8SAH	Δ_r	-/۲۰	-/۲۲	-/۳۵	-/۴۲	-/۵۸	۴/۳۲	۰/۹۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۴	-/۴۲	-/۷۶	۱/۰۰	۱/۶۵	۸/۱۶		
8SAM	Δ_r	-/۱۶	-/۲۵	-/۴۸	-/۵۲	-/۵۲	۲/۷۲	۰/۹۹	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۵	-/۲۶	-/۸۸	۱/۰۰	۱/۰۲	۶/۷۲		
8SRH	Δ_r	-/۱۵	-/۲۲	-/۳۹	-/۴۷	-/۷۹	۲/۴۷	۱/۰۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۷	-/۲۶	-/۷۵	۱/۰۰	۱/۹۹	۹/۰۲		
12SRM	Δ_r	-/۲۲	-/۲۶	-/۴۵	-/۵۱	-/۸۹	۱/۵۹	۱/۹۸	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۵	-/۳۹	-/۸۴	۱/۰۰	۲/۲۲	۴/۱۴		
12SAH	Δ_r	-/۲۱	-/۲۸	-/۲۸	-/۴۶	۱/۱۳	۴/۰۲	۱/۰۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۲	-/۴۷	-/۷۴	۱/۰۰	۲/۰۸	۱۰/۹۵		
12SAM	Δ_r	-/۲۱	-/۲۲	-/۴۲	-/۵۱	-/۶۴	۲/۲۰	۰/۹۱	
	μ_{ϕ_r}	-/۳۲	-/۳۵	-/۷۵	۱/۰۰	۱/۴۷	۶/۰۴		
12SRH	Δ_r	-/۱۸	-/۲۹	-/۳۵	-/۴۶	۱/۰۷	۲/۸۳	۱/۰۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۳۱	-/۵۲	-/۶۷	۱/۰۰	۲/۹۸	۷/۸۵		
15SRM	Δ_r	-/۲۲	-/۲۵	-/۴۰	-/۵۰	-/۸۸	۱/۹۱	۰/۹۹	
	μ_{ϕ_r}	-/۳۴	-/۳۹	-/۷۱	۱/۰۰	۲/۱۹	۵/۲۰		
15SAH	Δ_r	-/۱۹	-/۲۶	-/۴۰	-/۴۵	-/۸۸	۴/۱۲	۱/۰۰	
	μ_{ϕ_r}	-/۲۲	-/۴۶	-/۸۴	۱/۰۰	۲/۴۶	۱۲/۴۰		
15SAM	Δ_r	-/۲۱	-/۲۴	-/۴۲	-/۴۹	-/۷۹	۲/۸۲	۰/۹۹	
	μ_{ϕ_r}	-/۳۲	-/۳۵	-/۸۲	۱/۰۰	۱/۹۰	۷/۶۴		
15SRH	Δ_r	-/۱۸	-/۳۰	-/۳۶	-/۴۷	۱/۲۷	۲/۱۶	۲/۸۷	۱/۰۰



شکل ۵: مقادیر مربوط به μ_{ϕ_f} و Δ_r در نقاط مشخصه قاب 15SRH و 5SAH



شکل ۷: رابطه بین نسبت μ_{ϕ_f} به μ_{Δ} و زمان تناوب قاب ها

۸- نتیجه گیری

- ۱- تعریف و استفاده از نقاط شاخص رفتاری بر روی منحنی ظرفیت سازه که از تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون به دست می آید، نقش مهمی در شناسایی بهتر رفتار سازه داشته و مبنای مناسبی در تخمین تغییر مکان نظیر عملکرد مورد انتظار سازه خواهد بود.
- ۲- شرایط خاک و میزان خطر نسبی بر روی رابطه بین مجموع انحنای مقاطع و تغییر مکان نسبی در تراز بام برای کلیه قابها با شکل پذیری متوسط و بالا، تاثیر زیادی ندارد
- ۳- رابطه بین مجموع انحنای مقاطع و تغییر مکان نسبی در تراز بام برای کلیه قابها با شکل پذیری متوسط و بالا خطی است.
- ۴- با توجه به تعریف ارائه شده برای شکل پذیری انحنایی یک قاب، رابطه بین این پارامتر و شکل پذیری تغییر مکانی قاب به صورت خطی است.

بدست آمده است. بنابراین شکل پذیری انحنایی و شکل پذیری تغییر مکانی سیستم‌های چند درجه آزاد با یکدیگر رابطه خطی دارند. با توجه به اینکه قاب‌های مورد مطالعه دارای اختلاف‌های قابل توجه بوده و در محدوده ساختمان‌های متداول قرار می‌گیرند، می‌توان از نتایج به دست آمده یک رابطه کلی برای کنترل تغییر مکان سازه‌های بتن مسلح به دست آورد. در پی به دست آوردن رابطه خطی بین μ_{ϕ_f} و μ_{Δ} میانگین ضریب این رابطه (a) برای همه قاب ها برابر با ۱/۲۶۰۶ و با انحراف معیار ۰/۰۶۶ به عنوان ضریب کلی رابطه ۱۱ در نظر گرفته شد:

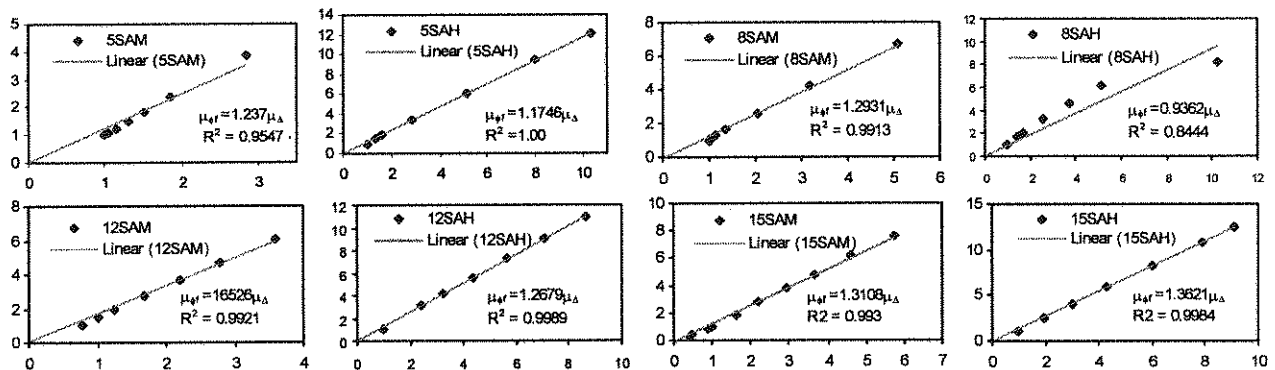
$$\mu_{\phi_f} = a \cdot \mu_{\Delta} = 1/26.06 \mu_{\Delta} \quad (11)$$

به منظور تعمیم رابطه بین ضریب شکل پذیری تغییر مکانی و ضریب شکل پذیری انحنایی قاب ها می‌توان تغییرات a یا به عبارت ساده تر تغییرات نسبت μ_{ϕ_f} به μ_{Δ} را در مقابل زمان تناوب به دست آمده از تحلیل به دست آورد. در شکل (۷) این رابطه برقرار شده است. این تغییرات با برآزش خطی بسیار خوبی تعمیم یافته به نحوی که ضریب همبستگی آن برابر با ۰/۹۱ به دست آمد. بنابراین برای محاسبه ضریب شکل پذیری تغییر مکانی بر حسب ضریب شکل پذیری انحنایی قاب از زمان تناوب و بر اساس رابطه ۱۲ می‌توان استفاده کرد.

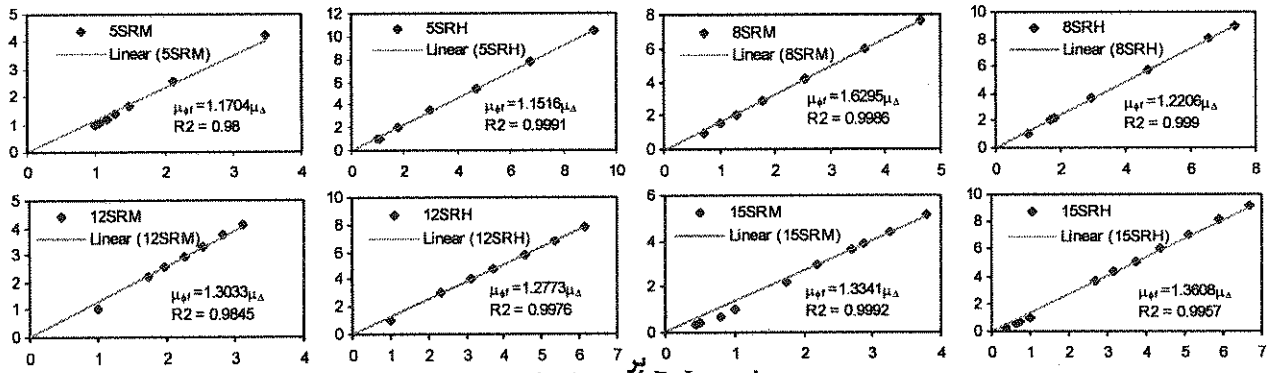
$$\frac{\mu_{\phi_f}}{\mu_{\Delta}} = 0.1231 T + 1.062 \quad (12)$$

۵- در دست آوردن ضریب شکل پذیری تغییرمکانی بر حسب شکل پذیری انحنایی قاب، می‌توان قاب‌های خمشی بتن مسلح را به صورت سیستم‌های یک

درجه آزاد مدل کرد و نتیجه را برای سیستم‌های چند درجه آزاد تعمیم داد.



الف- قاب های واقع بر بستر آبرفتی و نرم



ب- قاب های واقع بر بستر سنگی و سخت

محور X- ضریب شکل پذیری تغییرمکانی (μ_{Δ})

محور Y- ضریب شکل پذیری انحنایی (μ_{ef})

شکل (۶): رابطه بین μ_{ef} و μ_{Δ} برای کلیه قاب ها

REINFORCEMENT CONCRETE FRAMES BASED ON LUMPED DAMAGE MECHANICS", INTERNATIONAL J. SOLIDS AND STRUC., 40, 5109-5123, 2003.

FAJFAR, P. AND KRAWINKLER, H., "SEISMIC DESIGN METHODOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION OF CODES, BALKEMA, ROTTERDAM, 1997.

FAJFAR, P. AND EERI, M., "A NONLINEAR ANALYSIS METHOD FOR PERFORMANCE-BASED SEISMIC DESIGN", EARTHQUAKE SPECTRA, VOL.16, NO.3, AUG. 2000.

HYO-GYOUNG KAWAK, SUN-PIL KIM, "NONLINEAR ANALYSIS OF RC BEAMS BASED ON MOMENT - CURVATURE RELATION, "COMPUTERS AND STRUCTURES, 80, 2002.

HAN-SEON LEE, SUNG-WOO WOO, "SEISMIC PERFORMANCE OF A 3-STORY RC FRAME IN A LOW-SEISMICITY REGION", ENG. STRUC., 24, 719-7314, 2002.

[۵]

[۶]

[۷]

[۸]

TAKEDA, T., SOZEN, M.A. AND NILSON, N., "REINFORCED CONCRETE RESPONSE TO SIMULATED EARTHQUAKE", J. STRUC. ENG., DIV-ASCE, VOL.96 (ST12), PP.2557-2573, 1970.

SPACON, E., FILIPOU, F.C., AND TAUCER, F.F., "FIBER BEAM-COLUMN MODEL FOR NONLINEAR ANALYSIS OF RC FRAMES, I. FORMULATION", EARTHQUAKE ENG. STRUC., DYN., VOL.25(7), PP. 711-725, 1996.

FAJFAR, P., "STRUCTURAL ANALYSIS IN EARTHQUAKE ENGINEERING- A BREAKTHROUGH OF SIMPLIFIED NONLINEAR METHODS, 12ECEC, PAPER NO. 843, 2002.

MARIA EUGENIA MARANTE, JULIO FLOREZ LOPEZ, "THREE DIMENSIONAL ANALYSES OF

۹- منابع

[۱]

[۲]

[۳]

[۴]

- PAULAY, T., PRIESTLY M. J. N., "SEISMIC DESIGN OF REINFORCED CONCRETE AND MASONRY BUILDINGS," JOHN WILEY AND SONS, INC, NEW YORK, ISBN 0-471-54915-0, 1998. [۹]
- VALLES, R. E., REINHORN, A. M., KUNNATH, S. K., LI, C. AND MADAN, A., "IDARC2D VERSION 5.0: A COMPUTER PROGRAM FOR INELASTIC DAMAGE ANALYSIS OF BUILDINGS" TECHNICAL REPORT NCEER-96-0010, STATE UNIVERSITY OF NEW YORK AT BUFFALO, 1999. [۱۰]
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, "BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE," ACI 31899, 1999. [۱۱]
- آیین نامه بتن ایران (آبا)، نشریه شماره ۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۷۲. [۱۲]
- آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مرکز تحقیقات مسکن، آذر ۱۳۷۸. [۱۳]