

مطالعه و بررسی اثر باز توزیع لنگر در سازه های بتن مسلح

سید علی موسوی داودی

فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی عمران - دانشکده فنی ساری (امام محمد باقر(ع))

Email: Ali_mousavii@yahoo.com

چکیده:

آزمایشات نشان می دهد که یک سازه نامعین یا یک تیر سراسری بتن آرمه، با رسیدن لنگر در مقطع بحرانی به حد نهایی، دچار خرابی نمی شود؛ بلکه اگر سازه از شکل پذیری کافی برخوردار باشد، باز توزیع لنگر و تنش در اعضای خمشی، با توسعه مفصل پلاستیک در مقاطع بحرانی آنها ایجاد می گردد. این امر سبب می شود که سایر نقاط تیر به مقاومت و ظرفیت نهایی خود برسند. به علاوه، باز توزیع لنگر به طراحان اجازه می دهد که نمودار لنگر به دست آمده از تحلیل الاستیک را اصلاح نمایند. این کار به طور معمول با کاهش لنگر منفی در وجه تکیه گاه و افزایش لنگر مثبت در وسط دهانه تیر همراه است. در این مقاله سعی شده که مساله باز توزیع لنگر تحت اثر بار ثقلی و بار زلزله در سازه های بتنی بررسی شود. برای تعیین میزان چرخش پلاستیک مورد نیاز از مبانی نظری ساده کار مجازی استفاده شده، و اثر تشکیل دو مفصل در طرفین تکیه گاه و نیز اثر وجود ستون در گره در نظر گرفته شده است، با استفاده از روش های نظری، روابط تجربی و نتایج آزمایشگاهی ظرفیت چرخش پلاستیک تعیین شده و اثر عوامل مختلفی از جمله نسبت سختی اعضا، ترک خوردگی، نوع بار، نوع سازه، مقاومت بتن، نسبت لاغری، نسبت آرماتورهای طولی و عرضی بر باز توزیع مجاز مطالعه شده است. در این تحقیق نشان داده می شود که میزان مجاز تحت اثر بار های لرزه ای حداقل به اندازه مجاز برای بار ثقلی معتبر می باشد.

واژگان کلیدی: مفصل پلاستیک، باز توزیع لنگر، چرخش پلاستیک، طراحی لرزه ای، سازه های بتن مسلح

Study the effects of moment redistribution in reinforced concrete structures (code 94A)

Seyed Ali Mousavi Davoudi

Graduate of Civil Engineering - Technical University of Sari

Abstract:

Experiments show that an indeterminate or a continuous beam structure of reinforced concrete, with anchor reach the final critical sections, will not fail, but if a structure is adequate ductility, redistribution of bending moment and tension members, with development of plastic hinge in them, is a critical period. This causes the other parts of the beam to reach their final strength and capacity. In addition, the redistribution of design allows the anchor to the anchor graph obtained from elastic analysis correct. This will typically reduce the negative anchor at anchorage and increase positive anchor in the middle of the beam span along. In this paper is to anchor the issue of redistribution under the effect of gravity loads and seismic load in concrete structures is investigated. plastic rotation capacity determined by different factors, including the difficulty Members, cracking, load, type of structure, strength, weight ratio, the ratio of longitudinal and transverse reinforcement of redistribution is allowed to study. In this study it is shown that the amount authorized under seismic loads are allowed to load at least as much gravity is valid.

Keywords: plastic hinge, redistribution anchor, plastic rotation, seismic design, reinforced concrete structures

۱- مقدمه

بازتوزیع لنگرهای خمشی یکی از مسائل مهم در طراحی تیرهای بتن آرمه سراسری می باشد و همواره مورد توجه بسیاری از محققین و مهندسين طراح قرار داشته است. بازتوزیع لنگر در حین ترک خوردگی و تسلیم میلگردها در سازه های بتن آرمه اتفاق می افتد. بازتوزیع لنگر می تواند لنگر طراحی سازه های بتن آرمه نامعین را کاهش دهد. امروزه تمرکز طراحان، فقط طراحی و ساخت سازه های جدید نیست، بلکه ارزیابی و استفاده مجدد از سازه های موجود نیز می باشد. رفتار واقعی بتن آرمه غیر خطی می باشد. بنابراین یک تحلیل الاستیک نمی تواند رفتار نهایی سازه های بتن آرمه را پیش بینی نماید همچنین روش های تحلیل غیرخطی موجود جهت تحلیل سازه های بتن آرمه به علت فرآیند تحلیلی پیچیده مورد استفاده قرار نمی گیرند. بازتوزیع لنگر می تواند مقاومت های کنار گذاشته شده ی سازه هایی که با روش های تحلیلی الاستیک طراحی و ساخته شده اند را بهره برداری کرده و امکان استفاده مجدد از این سازه ها را فراهم نماید.

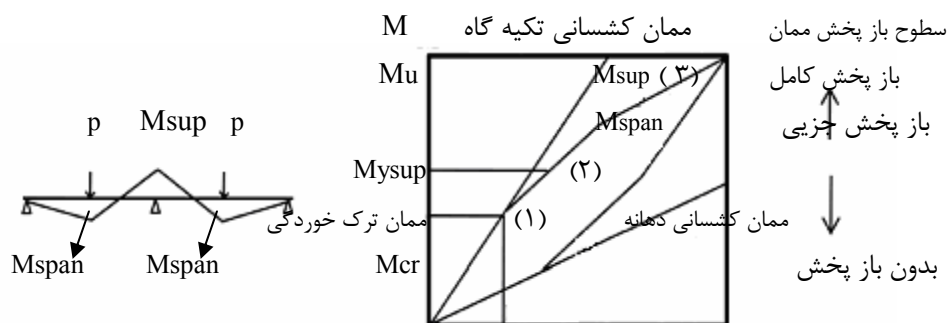
بازتوزیع لنگر به طراح اجازه می دهد که منحنی لنگر خمشی بدست آمده از تحلیل الاستیک را اصلاح نماید. فلسفه کلی این کار، کاهش لنگر در مقاطع بحرانی (ناحیه تشکیل اولین مفصل پلاستیک)، به شرط افزایش لنگر در مقاطع دیگر، با توجه به شرایط تعادل بارها می باشد. همچنین بازتوزیع لنگر موجب می شود که از تراکم میلگردها در نواحی لنگر حداکثر کاسته شود.

۲- بازتوزیع لنگر

در اعضای خمشی بتن آرمه نامعین، وقتی که لنگر خمشی در یک نقطه از تیر به حد ظرفیت خمشی مقطع می رسد، میلگردهای خمشی در آن نقطه به تسلیم می رسند. از این به بعد این نقطه با عملکردی مشابه یک مفصل پلاستیک ناشی از ترک خوردن بتن و تسلیم آرماتور، می تواند با چرخش بیشتر، تنش های حاصل از بارهای بیشتر را به نقاطی که تحت بار کمتری هستند انتقال دهد، تا آن نقاط نیز رفته رفته به حد ظرفیت خمشی خود برسند. به این رفتار، بازتوزیع لنگر گفته می شود. بازتوزیع تنش و لنگر در یک دهانه از تیر تا آنجا ادامه می یابد، که سه نقطه از آن (احتمالاً دو نقطه تکیه گاهی و یک نقطه در طول دهانه) به مفصل پلاستیک تبدیل شوند. آیین نامه های مختلف به طراحان امکان استفاده از شکل پذیری تیرهای بتن آرمه را در تغییر منحنی لنگر حاصل از آنالیز الاستیک خطی (با اعمال محدودیتهای خاص) می دهند. معمولاً این تغییر و اصلاح لنگرها موجب کاهش حداکثر لنگر منفی و در نتیجه آن افزایش لنگر مثبت با شرط برقراری تعادل استاتیکی به همراه بارهای وارده می باشد. طبق تعریف میزان درصد بازتوزیع لنگر به صورت زیر بیان می شود:

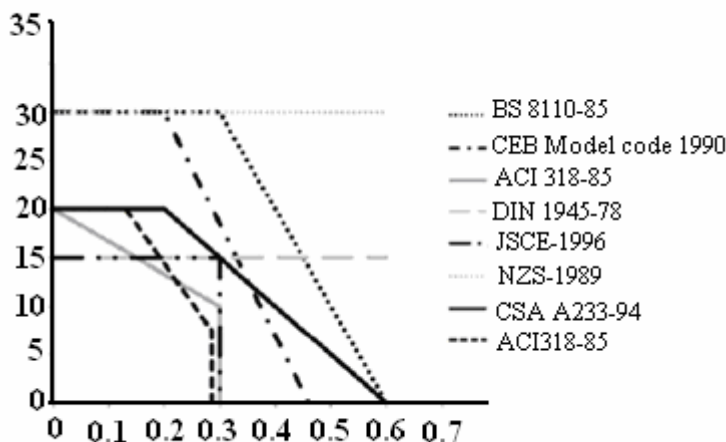
$$\beta = \left(\frac{M_{el} - M_{red}}{M_{el}} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در رابطه فوق β درصد بازتوزیع لنگر M_{el} ، لنگر حاصل از آنالیز الاستیک و M_{red} لنگر بعد از بازتوزیع می باشند.



شکل ۱: نمونه ایی از نحوه ی بازپخش لنگر در یک عضو سراسری

آیین نامه های طراحی نظیر CEB, JSCE 1986, DIN1045-78, DS411-1986, CSA A23.3-94, ACI 318-05, NZS-1989 و ACI 318-95, BS8110-85, code 1990 model روابط متفاوتی را برای میزان مجاز باز توزیع لنگر پیشنهاد داده اند شکل (۲) نمایش گرافیکی این تمام این روابط میزان مجاز باز توزیع (β) را تنها تابعی از نسبت عمق منطقه فشاری در لحظه گسیختگی (c/d) یا شاخص آرماتور گذاری ($\omega = A_s f_y / b d f_c'$) و یا کرنش فولاد کششی (ϵ_t) مورد ملاحظه قرار می دهند، که به کمک روابط همسازی و تعادل قابل تبدیل به یکدیگر می باشند از مقایسه آنها تفاوت های مشخصی روی میزان (β) ملاحظه می شود. در این میان آیین نامه های ژاپن و آلمان محافظه کارترین می باشند. آیین نامه کشور دانمارک بیشترین میزان مجاز باز توزیع یعنی 60% را مجاز می داند تنها محدودیت شاخص آرماتورگذاری کمتر از مقدار بالانس را لحاظ میکنند، که در شکل نشان داده نشده است.



شکل ۲: بازتوزیع مجاز لنگر در آیین نامه های مختلف

۳- بازتوزیع لنگر در آیین نامه بتن ایران (آبا)

آبا در گذشته بازتوزیع لنگر را به نسبت میلگردهای کششی و فشاری مرتبط نموده است. آیین نامه آبا درصد مجاز لنگر بازتوزیع شده خمشی را از رابطه زیر محاسبه می نمود.

$$\beta = 20 \times \left[1 - 0.7 \rho - \frac{\rho'}{\rho_b} \right] \quad (2)$$

به طوریکه، ρ_b $< 0.7 \rho$ ، $\rho - \rho' < 0.7 \rho_b$ (ACI)، $\beta \rho_b$ (ABA) = 0.714 ρ_b (ACI)، ρ نسبت میلگرد کششی = A_s/bd ، ρ_b نسبت میلگردها در حالت توازن می باشد رابطه آیین نامه ACI 318-71 و آیین نامه ACI 318-95 در بازتوزیع لنگر به صورت زیر میباشد:

$$\beta = 20 \times \left[1 - \left(\rho - \frac{\rho'}{\rho_b} \right) \right] \quad (3)$$

یک نگاه دقیق تر در این رابطه می توان دید که رابطه ای که آیین نامه ایران در بازتوزیع لنگر مجاز معرفی نموده است یک برداشت کاملاً منطبق بر آیین نامه ACI 318-95 و آیین نامه ACI 318-71 می باشد. آیین نامه آبا در سال 1392 همانند آیین نامه بتن آمریکا در سال 2008 رابطه خود را در بازتوزیع لنگر خمشی به رابطه زیر تغییر داده است.

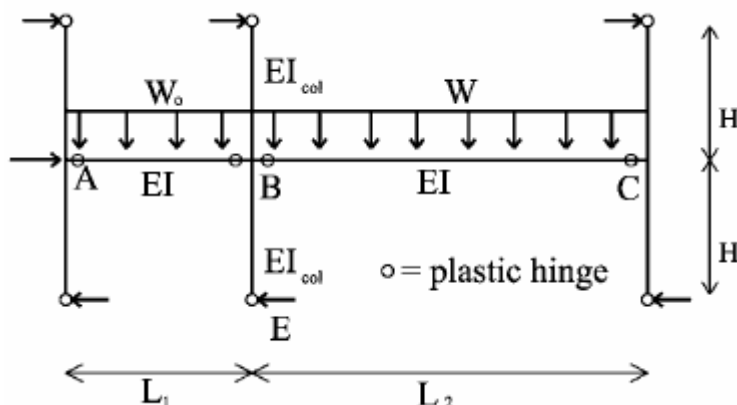
$$7.5\% \leq \beta = 1000 \varepsilon_t \leq 20\% \quad (4)$$

که در آن ε_t کرنش فولاد (کرنش کشش خالص در پایین ترین ردیف فولادهای کششی) می باشد. همانطور که در رابطه (۴) می بینیم بازتوزیع لنگر مجاز به کرنش فولادهای کششی مرتبط است. از نسبت دادن مقدار بازتوزیع لنگر به کرنش فولادهای کششی می توان به اهمیت نقش عوامل دیگر علاوه بر نسبت عمق محور خنثی به عمق موثر مقطع و شاخص میلگردگذاری مکانیکی (ω) در مقدار بازتوزیع لنگر مجاز پی برد. نمایان است که آیین نامه ACI 318-08 یک رویکرد جدید در معرفی مقدار بازتوزیع لنگر مجاز آغاز کرده که به تاثیر عوامل مهم دیگر که در مقدار بازتوزیع لنگر مجاز نقش تعیین کننده داشته ولی تاکنون نادیده گرفته شده اند، پرداخته است. بنابراین نیاز به یک مدل جدید که در آن بتوان از تاثیر همه ی عوامل موثر در مقدار بازتوزیع لنگر مجاز بهره برد ایجاد می شود. رابطه (۴) نسبت به رابطه (۳) توصیف بهتری از رفتار تیرهای بتن آرمه در بازتوزیع لنگر مجاز دارد. بازتوزیع لنگر زمانی اتفاق می افتد که کرنش فولادهای کششی بزرگتر مساوی کرنش تسلیم شدگی فولادها شوند، بنابراین ارتباط بازتوزیع لنگر به کرنش فولادهای کششی مناسب تر از ارتباط آن به اختلاف نسبت میلگردهای کششی و فشاری می باشد. این رابطه علاوه بر محدود نمودن حداکثر بازتوزیع لنگر مجاز، مقدار حداقل آن را نیز محدود نموده است. این مقدار حداقل می تواند این نکته را بیان نماید که تیرهای بتن آرمه طراحی شده تحت هر شرایطی می توانند به میزان حداقل ۷.۵٪ بازتوزیع لنگر داشته باشند یا به بیان دیگر می توانند وارد مرحله پلاستیک شوند که تا حد زیادی با واقعیت تطابق دارد. البته در رابطه جدید مقدار حداکثر لنگر مجاز همچنان به ۲۰٪ محدود شده است.

۴- باز توزیع لنگر بر اساس چرخش پلاستیک مورد نیاز

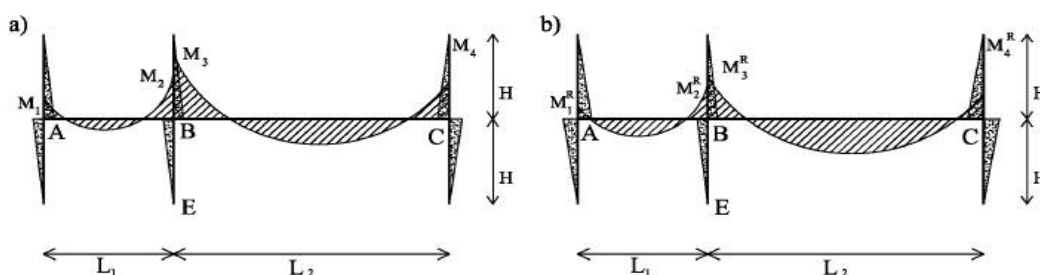
چرخش پلاستیک مورد نیاز تحت بارگذاری ثقیلی

برای تعیین چرخش پلاستیک مورد نیاز یک قاب نامتقارن در حالت کلی شکل (۳) را مورد بررسی قرار می دهیم.



شکل ۳: آرایش قاب نامتقارن تحت اثر بارگذاری ثقیلی و جانبی

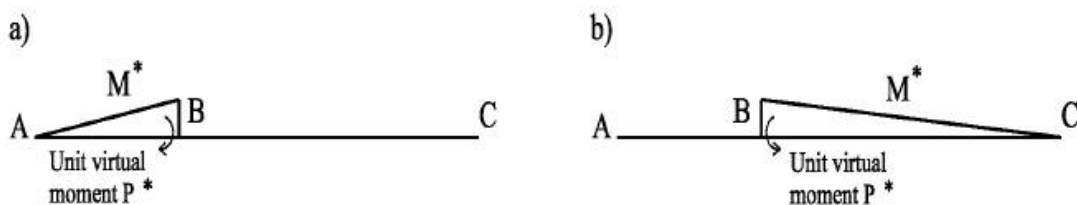
رفتار تیر به صورت دوخطی الاستیک، پلاستیک کامل فرض می شود. برای تعیین تقاضای چرخش پلاستیک در محل گره تیر سراسری در حالت بارگذاری ثقیلی، نیروی جانبی ناشی از زلزله در شکل فوق را در نظر نمی گیریم. براساس آنالیز الاستیک منحنی توزیع لنگر (Mi) در تیر سراسری قبل از باز توزیع در شکل (a) نشان داده می شود. با توجه به ضوابط باز توزیع لنگر در حالت ثقیلی و تعادل نیروها و شرایط همسازی، محل تشکیل مفصل در محل های نشان داده شده می تواند صورت گیرد. در نتیجه منحنی توزیع لنگر (MiR) بعد از باز توزیع بصورت شکل (b) در می آید. هر کدام از لنگرهای (MiR) نسبت به Mi می تواند کاهش یا افزایش یابد. اگر در حالت اول فرض شود در تکیه گاه میانی B ظرفیت مقطع در دو طرف ستون M2R و M3R هر دو کاهش یابند، دو مفصل نشان داده شده در دو طرف ستون میانی در شکل ۳ تشکیل یافته، پس دو مفصل مجزا خواهیم داشت. در این صورت با استفاده از اصل کار مجازی می توان تقاضای چرخش مفاصل θ_{TBA} و θ_{TBC} را بر اساس تغییر در چرخش هریک از مقاطع مذکور از رابطه زیر بدست آورد:



شکل ۴: منحنی توزیع لنگر قاب نامتقارن تحت اثر بار ثقیلی (a) قبل از باز توزیع (b) بعد از باز توزیع

$$P * \theta_r = \theta_r = \int M * \delta dx \quad (5)$$

همانطور که در شکل (۵) ملاحظه می شود $P*$ لنگر مجازی واحد در جهت شیب عضو در محل مفصل پلاستیک می باشد $M*$ منحنی توزیع لنگر مجازی فوق و δ توزیع الاستیک انحنای مربوط به بارگذاری وارد بر سازه می باشد در این رابطه $*$ نشان دهنده سیستم نیروی مجازی می باشد و انتگرال $M*\delta$ بر روی سراسر طول هر عضو انجام می گیرد و مجموع آنها بر روی اعضای از سازه که در آن $M* \neq 0$ می باشد محاسبه می شود.



شکل ۵: منحنی توزیع لنگرهای مجازی (a) برای چرخش θ_{ba} (b) برای چرخش θ_{bc}

اکنون چرخش هریک از مقاطع قبل از بازتوزیع بوسیله انتگرال گیری از حاصلضرب لنگرهای مجازی شکل (۵) و توزیع الاستیک انحنای مربوط به بارگذاری و منحنی لنگر شکل (a) ۴ بصورت رابطه زیر خواهد بود:

$$\theta_{BE}^E = [(2M_2 + M_1) / 6EI_{eff}] . L_1 \quad (۶)$$

و چرخش هر کدام از مقاطع بعد از بازتوزیع بوسیله انتگرال گیری از حاصل ضرب لنگرهای مجازی شکل ۵ و توزیع الاستیک انحنای مربوط به بارگذاری و منحنی لنگر شکل (b) ۴ به صورت رابطه زیر تعیین می شود:

$$\theta_{BA} = [(2M_2^R + M_1^R) / 6EI_{eff}^R] . L_1 \quad (۷)$$

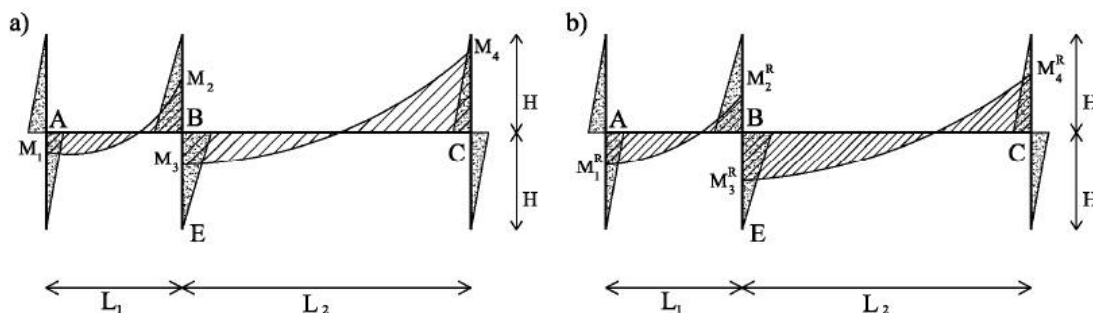
با محاسبه تفاوت این دو چرخش در هر مقطع می توان به مقدار تقاضای چرخش پلاستیک آن مقطع دست یافت:

$$\theta_{Rba} = (\theta_{BA}^E - M_{BA}^R) \quad (۸)$$

که در روابط فوق θ_{GBA} چرخش مقطع قبل و θ_{EBA} از بازتوزیع چرخش مقطع بعد از بازتوزیع EI_{eff} سختی موثر تیر θ_{GBA} چرخش مورد نیاز تیر در اثر بازتوزیع مورد نظر در محل مفصل معین می باشد. به همین ترتیب می توان چرخش مورد نیاز مفصل سمت راست تکیه گاه B، θ_{GBC} را محاسبه کرد. در روابط فوق تنها لنگرهای انتهایی تیر در محاسبات وارد شده اند و چرخش انتهای عضو دو سر مفصل تحت اثر بار وارده به دلیل ثابت بودن آن در دو حالت قبل و بعد از بازتوزیع در محاسبات وارد نشده است. همچنین مقادیر M_{IR} بصورت جبری با هم جمع می شوند، به طوری که در صورت هم علامت بودن با M^* مثبت و در غیر این صورت منفی می باشند. در حالت دوم فرض می شود امکان تشکیل دو مفصل مجزا در دو طرف اتصال میانی تیر سراسری وجود ندارد، لذا تنها ظرفیت مقطع در یک سمت تکیه گاه B کاهش می یابد در اینصورت تنها یک مفصل متمرکز در گره خواهیم داشت. تقاضای چرخش در این حالت از مجموع تغییر دو قسمت، یعنی تغییر در چرخش مقطعی که کاهش ظرفیت داشته (مقطع پلاستیک) و تغییر در چرخش مقطعی که کاهش ظرفیت نداشته (مقطع الاستیک) حاصل میشود. مقادیر θ_{GBC} و θ_{GBA} این دو مقطع از روی روابط (۷، ۸، ۹) قابل محاسبه می باشند. اگر θ_{GBC} مقطعی که بصورت الاستیک رفتار کرده مثبت باشد با علامت + و اگر منفی باشد با علامت - برای محاسبه تقاضای چرخش مفصل متمرکز در گره جمع جبری می شود.

۵- چرخش پلاستیک مورد نیاز تحت بارگذاری ثقلی و لرزه ای

در این حالت یک قاب نامتقارن تحت اثر بارگذاری ثقلی و لرزه ای شکل ۶ مورد ملاحظه قرار می گیرد با توجه به آنالیز الاستیک و توزیع نیروی برشی حاصل از نیروی جانبی در محل نقطه عطف ستون (با فرض تشکیل نقاط عطف در وسط ستون ها) توزیع لنگر مربوطه در طول اعضای پیوسته به صورت شکل (a) ۶ درمی آید. براساس ضوابط بازتوزیع تحت بار جانبی و برقراری شرایط همسازی و تعادل، منحنی توزیع لنگر بعد از بازتوزیع مطابق شکل (b) ۶ به دست می آید.



شکل ۶: منحنی توزیع لنگر قاب نامتقارن تحت اثر بار ثقلی و لرزه ای (a) قبل از بازتوزیع (b) بعد از باز توزیع

در این حالت همانند بارگذاری ثقلی امکان تشکیل مفصل در محل های نشان داده شده شکل ۲ وجود دارد ولی چون یکی از شرایط بازتوزیع تحت بار جانبی ثابت بودن مجموع لنگرهای تکیه گاهی بدون در نظر گرفتن علامت آنها می باشد و به دلیل استفاده از حداکثر ظرفیت دیکته شده توسط آیین نامه معمولاً "در تکیه گاه ها طرف گره کاهش لنگر حداکثر منفی به همراه افزایش لنگر مثبت تکیه گاهی می باشد در نتیجه مقطع یک سمت تکیه گاه، بسته به جهت زلزله، پلاستیک شده و طرف دیگر الاستیک می ماند که در این شرایط یک مفصل متمرکز در محل گره تشکیل می شود. در عین حال اگر نسبت به آنالیز الاستیک شود، دو مفصل مجزا در دو طرف B طراحی عضو به گونه ای باشد که موجب کاهش ظرفیت لنگر مقطع در هر دو گره خواهیم داشت. برای محاسبه چرخش پلاستیک مورد نیاز از روابط کلی بخش بارگذاری ثقلی استفاده می شود.

۶- اثر ستون بر تقاضای چرخش پلاستیک در تیر

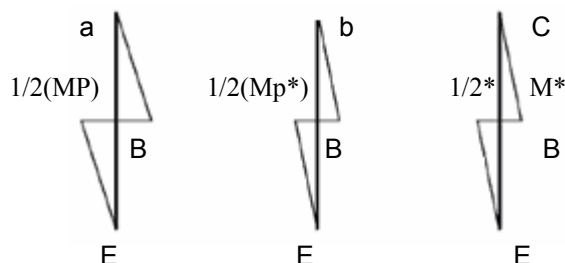
اگر در تیر سراسری تحت اثر بارگذاری ثقلی یا زلزله، دو مفصل مجزا در دو طرف ستون تشکیل شوند، تغییر در چرخش ستون قبل و بعد از بازتوزیع موجب کاهش یا افزایش چرخش پلاستیک مورد نیاز در محل مفصل تیر سراسری می شود. به دلیل تغییر در توزیع لنگر ستون در دو حالت قبل و بعد از بازتوزیع، مقدار چرخش اتصال در محل مفصل تغییر می کند. با استفاده از رابطه (۲) و از روی شکل (۶) مقدار چرخش ستون یا ستونها (وجود ستون در پایین و یا بالای تیر در گره B) θ_{BE} ، مربوط به لنگر نامتعادل وارد به آنها (تفاضل لنگرهای تیر در دو طرف ستون در حالت ثقلی یا مجموع لنگرهای تیر در دو طرف ستون در حالت لرزه ای) قبل از بازتوزیع $(M_B)_{col}$ و بعد از بازتوزیع $(M_{RB})_{col}$ را به دست آورده، سپس با بدست آوردن تفاوت بین این دو مقدار θ_{BE} در مفصل یک سمت ستون موجب افزایش و در مفصل سمت دیگر آن موجب کاهش (علامت + یا -) تقاضای چرخش پلاستیک تیر، می شود:

$$M_{R2} = \frac{\phi \cdot Mn}{(1-\beta)} \quad (9)$$

$$(M_{BR})_{col} = M_{3R} \pm M_{2R} \quad (10)$$

$$\pm \theta_{rbe} = \frac{[(M_B)_{col} - (M_{RB})_{col}]}{(EI_{eff})_{col}} \times H \quad (11)$$

اگر به جای تشکیل دو مفصل مجزا، یک مفصل متمرکز در محل گره تشکیل شود، آنگاه چرخش ستون تاثیری بر تقاضای چرخش ندارد.



شکل ۷: منحنی توزیع لنگر ستون در گره B (a) قبل از بازتوزیع (b) بعد از باز توزیع (c) لنگر مجازی واحد

۷- اثر سختی موثر تیر و ستون بر تقاضای چرخش پلاستیک تیر

یکی از پارامترهای موثر بر تقاضای چرخش پلاستیک، سختی موثر اعضا می باشد. از آنجا که سختی موثر بصورت یک ضریب با مقدار تقاضای چرخش رابطه معکوس دارد، در روابط تعیین مقدار تقاضای چرخش پلاستیک منعکس می شود و اثر آن بطور مستقیم قابل محاسبه می باشد. مقادیر متفاوتی در آیین نامه های مختلف برای نسبت سختی موثر مقطع ترک خورده اعضا نسبت به مقطع ترک نخورده پیشنهاد شده است. آیین نامه های ACI به ترتیب مقدار ۰,۳۵ و ۰,۷ را برای تیر و ستون B.S. مقدار ۱ را برای هم تیر و هم ستون پیشنهاد میکنند. همچنین بعضی از محققین مانند مرجع مقدار ۰,۲ را برای کلیه اعضا و مرجع رابطه زیر را برای ستونهای بتن مسلح مستطیل شکل بر اساس بار محوری وارده پیشنهاد می کنند:

$$\frac{EI_{eff}}{EI_{gross}} = 0.2 \longrightarrow \frac{P}{Ag.Fc'} \leq 0.2 \quad (12)$$

$$0.2 \leq \frac{P}{Ag.Fc'} \leq 0.5 \longrightarrow \left(\frac{5}{3}\right) \cdot \left(\frac{P}{Ag.f'c}\right) - \left(\frac{4}{30}\right) \quad (13)$$

$$0.5 \leq \frac{P}{\left(\frac{P}{Ag.f'c}\right)} \longrightarrow = 0.7 \quad (14)$$

که در رابطه فوق اگر بارمحوری ستون کوچک باشد به دلیل نزدیک بودن رفتار ستون به تیر نسبت سختی موثر تیر معادل ۰,۲ به دست می آید.

۸- بازتوزیع لنگر بر اساس ظرفیت چرخش پلاستیک

برای انجام بازتوزیع لنگر، تیر بتن مسلح بایستی در محل تشکیل مفصل پلاستیک، ظرفیت چرخش پلاستیک کافی داشته باشد. مطالعات نشان داده است که ظرفیت چرخش پلاستیک به عوامل متعددی همچون خصوصیات مصالح، خصوصیات هندسی، خصوصیات سازه ای، خصوصیات بارگذاری و نوع مفصل پلاستیک بستگی دارد. برای تعیین ظرفیت چرخش پلاستیک روابط نظری، نتایج آزمایش و روابط تجربی به کار می رود. بعضی از این روابط در ذیل به اختصار بررسی می شوند. طبق اصول مقاومت مصالح، مقدار چرخش پلاستیک در طول مفصل از رابطه زیر تعیین می شود.

$$\theta_{PL} = \int PL[(\epsilon_s - \epsilon_{sy})] dx \quad (15)$$

که در آن θ_{PL} چرخش پلاستیک، L_{PL} طول مفصل پلاستیک، x عمق تار خنثی، d عمق موثر مقطع عرضی، ϵ_s کرنش فولاد، ϵ_{sy} کرنش فولاد در لحظه تسلیم آرماتور می باشند. از آنجا که تعیین مقدار دقیق تمام پارامترهای فوق در طول مفصل پلاستیک، امکان پذیر نمی باشد، از روابط تئوریک تقریبی استفاده می شود.

$$\theta_{PL} = (\phi_u - \phi_y) L_{PL} \quad (16)$$

$$\phi_y = \frac{fy}{E_s} (1 - ky) d, \phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{c}, ky = \sqrt{(n^2 A^2 + 2nB)} - Na, A = \rho + \rho', B = \rho + \rho' \delta' \quad (17)$$

$$n = \frac{Es}{Ec}, \delta = d' / d \quad (18)$$

که در روابط فوق ϕ_u و ϕ_y به ترتیب انحنا در مقاطع بحرانی در لحظه تسلیم و نهایی Ky عمق منطقه فشاری در لحظه تسلیم نسبت به ρ و ρ' به ترتیب نسبت آرماتور کششی و فشاری ϵ_{cu} ، حداکثر کرنش فشاری بتن در لحظه نهایی، c عمق تار خنثی می باشد. روابط مختلفی برای طول مفصل پلاستیک ارائه شده اند. در اینجا از رابطه ارائه شده توسط آقای PAULAY استفاده می شود:

$$L_{PL} = 0.08L + 0.022d \quad b.fy \quad (MPa) \quad (19)$$

که در آن L فاصله لنگر ماکزیمم از نقطه عطف؛ db قطر آرماتور، و fy تنش تسلیم آرماتور میباشد. در آیین نامه های EC-8 و GRECO از روی روابط نیمه تجربی که توسط Fardis و Panagiotakos پیشنهاد شده اند، رابطه تجربی زیر برای تعیین ظرفیت چرخش پلاستیک نهایی در تیرها و ستون ها با مقطع عرضی مستطیل ارائه شده است.

$$\theta_{PL}^u = 0.0145(0.25) \left[\frac{MAX(0.01, \omega')}{MAX(0.01, \omega)} \right]^{0.3} f_c \cdot \left[\frac{Ls}{h} \right]^{0.35} 25^{(\alpha_{ps} \cdot fyw / fc)} 1.275^{100pd} \quad (20)$$

$$V = \frac{N}{b \cdot h \cdot f_c}, \omega = \rho \cdot (fy / f_c), \omega' = \rho' \cdot \left(\frac{fy}{f_c} \right), \rho_s = \frac{A_{sx}}{b_w \cdot S_h}, \alpha = \left(\frac{1-s_h}{2b_c} \right) \left(\frac{1-s_h}{2h_c} \right) \left[\frac{1 - (\sum b^2 i)}{(6b_c h_c)} \right] \quad (21)$$

که در آن bc عرض هسته محصور شده، hc ارتفاع هسته محصور شده، bi فاصله آرماتورهای طولی موثر که به صورت جانبی توسط گوشه خاموت ها یا حلقه های 135° مهار شده اند. ρ_s نسبت آرماتور عرضی موازی با امتداد بارگذاری، fyw تنش تسلیم آرماتور عرضی، pd نسبت آرماتور قطری در هریک از امتدادهای قطری، Ls طول دهانه برشی (فاصله نقطه عطف تا محل لنگر حداکثر)، bw عرض مقطع می باشند. آیین نامه های فوق به منظور رعایت عدم قطعیت های موجود در نمونه ها ضریب اطمینان $\gamma Rd = 3.6$ را برای ظرفیت چرخش پلاستیک در سطح عملکردی (L.S. Life safety) پیشنهاد می کنند از آنجایی که رابطه تجربی عموماً برای اعضای واقع در برابر بارهای رفت و برگشتی معتبر بوده، برای ملاحظات لرزه ای قابل استفاده می باشد.

۹- میزان مجاز بازتوزیع لنگر در حالت حدی نهایی

برای تعیین میزان مجاز بازتوزیع لنگر در شکل ۵ فرض می شود لنگرهای خارجی تیر سراسری (M1 و M4) بعد از بازتوزیع ثابت می مانند. اگر لنگر سمت چپ تکیه گاه B (M2) به میزان β درصد کاهش پیدا کند. برای برقراری شرایط بازتوزیع در تراز طبقه (ثابت ماندن مجموع لنگرهای انتهایی تیر سراسری قبل و بعد از بازتوزیع در تراز طبقه بدون در نظر گرفتن علامت لنگر) لنگر سمت راست تکیه گاه B (M3) به همان اندازه افزایش می یابد، در نتیجه تقاضای چرخش در گره B حالت تشکیل یک مفصل متمرکز در گره (توسط روابط 3، 4 و 5 بصورت زیر محاسبه می شود):

$$\theta_{r,B} = \left(\frac{\beta \cdot M_2}{3EI_{eff}} \right) (L_1 + L_2) \quad (22)$$

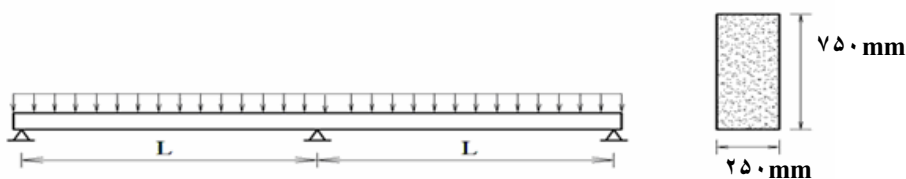
از روی روابط موجود برای ظرفیت خمشی مقطع، رابطه بین لنگر مقطع مورد نظر بعد از بازتوزیع و ظرفیت خمشی آن بصورت زیر می باشد:

$$M_{R2} = \frac{\phi \cdot Mn}{(1-\beta)} \quad (24)$$

که Mn ظرفیت اسمی مقطع، ϕ ضریب کاهش ظرفیت 0.9 می باشند. در صورتیکه ظرفیت چرخش موجود در مقطع تشکیل مفصل مقدار تقاضای چرخش آن مقطع را برآورده کند بازتوزیع انجام شده، مجاز می باشد. در نتیجه برای تعیین β ظرفیت چرخش و تقاضای چرخش پلاستیک در گره B را با هم برابر قرار می دهیم، و از روی این تساوی مقدار مجاز β محاسبه می شود.

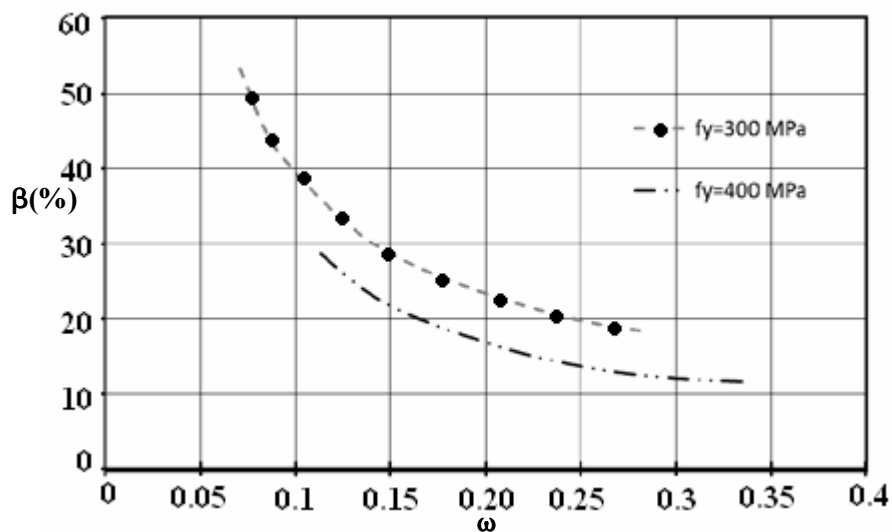
۱۰- مطالعه پارامتری:

اساس روابط ارائه شده برای تقاضا و ظرفیت چرخش می توان میزان مجاز بازتوزیع را در محل مفصل مفروض شکل ۲ محاسبه کرد. در این مطالعه پارامترهای ثابت عبارتند از: مقطع عرضی 750×250 mm مقاومت تسلیم فولاد های طولی و عرضی به ترتیب 400 و 300 مگا پاسکال $E_{Ieff} = 0.35 E_{Igross}$ ، $E_s = 200000$ ، $\epsilon_{cu} = 0.0035$ ، $\epsilon_{su} = 0.14$ ، مگاپاسکال، خاموت گذاری $\Phi 8 @ 110$ c/c



۱۱- بررسی تاثیر تنش تسلیم فولاد

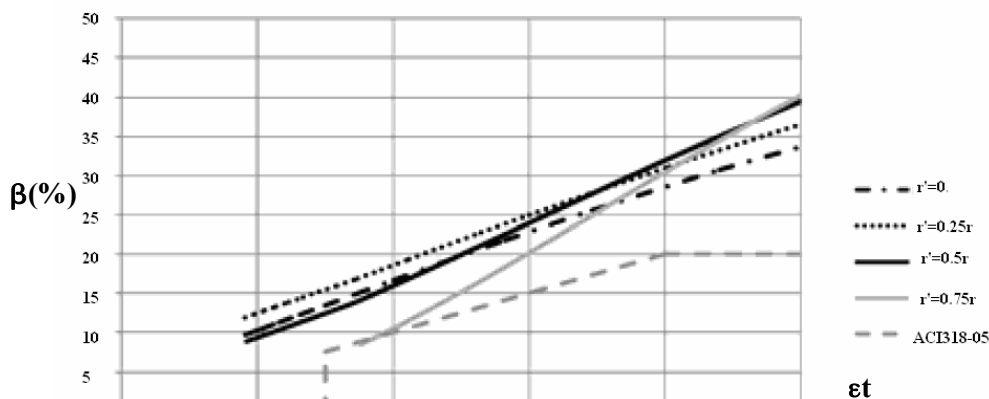
شکل ۸ نشان می دهد که مقادیر β درصد بازتوزیع لنگر برای $(f_y = 400 \text{ Mpa})$ نسبت به $(f_y = 300 \text{ Mpa})$ به صورت قابل ملاحظه ای کمتر می باشد



شکل ۸: درصد بازتوزیع لنگر برای فولاد با تنش

۱۲- اثر نسبت فولادگذاری طولی

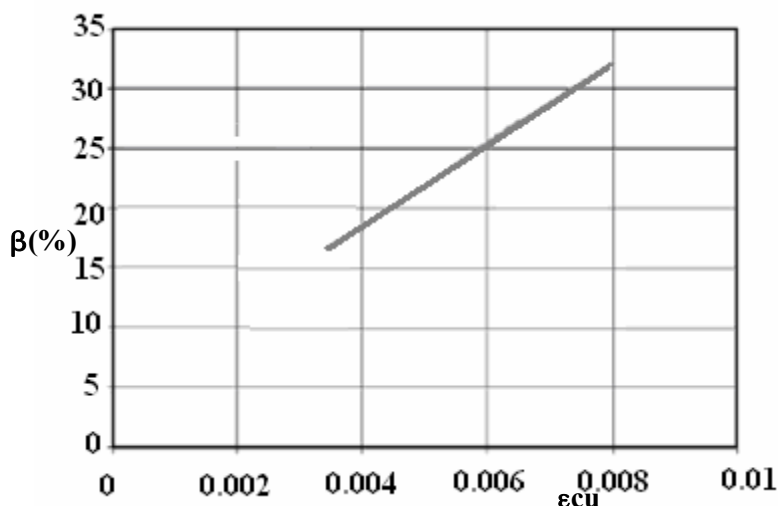
در شکل ۹ اثر نسبت فولاد کششی و فشاری بر بازتوزیع مجاز نشان داده شده است. به طوری که می دانیم، افزایش نسبت فولاد کششی موجب ρ افزایش عمق تار خنثی و کاهش ظرفیت چرخشی می شود نمودار ۲ نشان می دهد در نسبت ثابت فولاد فشاری به کششی (ρ'/ρ) افزایش ρ موجب کاهش β می شود همچنین، ملاحظه می شود که هرچقدر ρ'/ρ بزرگتر می شود β ، افزایش می یابد یعنی افزایش نسبت فولاد فشاری (ρ'/ρ) میزان بازتوزیع β مجاز را بزرگ می کند.



شکل ۹: اثر نسبت (ρ'/ρ) بر میزان مجاز بازتوزیع لنگر

۱۳- بررسی تاثیر کرنش نهائی بتن

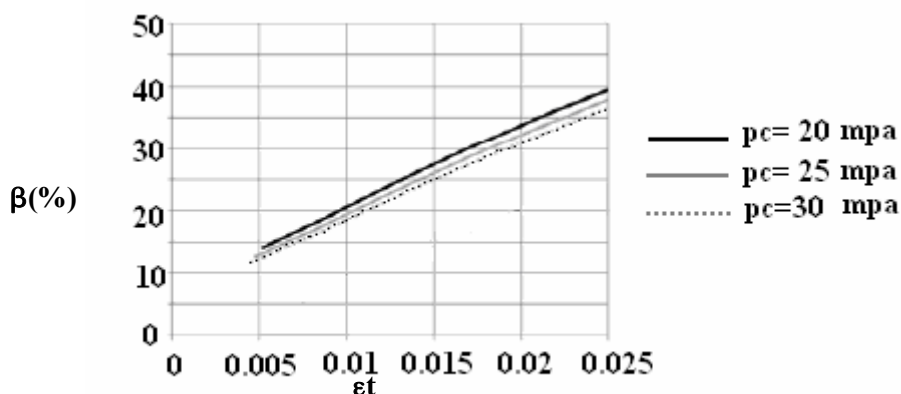
تاثیر چشمگیر ϵ_{cu} بر ظرفیت چرخشی پلاستیک و درصد بازتوزیع لنگر مجاز به این دلیل است که افزایش در ϵ_{cu} باعث افزایش کرنش فولادهای کششی شده که منجر به افزایش ظرفیت چرخشی پلاستیک می شود. افزایش درصد بازتوزیع لنگر نسبت به افزایش کرنش نهائی بتن برای $f_y = 400 \text{ Mpa}$ در شکل ۱۰ قابل مشاهده می باشد. همچنین شکل ۱۰ نشان می دهد که با افزایش شاخص میلگردگذاری درصد بازتوزیع لنگر نیز کاهش می یابد. افزایش θ_p نسبت به افزایش کرنش نهائی بتن در نمودار ۳ مشاهده میشود. این نمودار بیانگر رفتار بهتر و مناسب تری از مقطع بحرانی تیرهای سراسری در هنگام افزایش کرنش نهائی بتن میباشد. کاهش ظرفیت چرخشی پلاستیک نسبت به افزایش شاخص میلگردگذاری (ω) در نمودار نمایان می باشد.



شکل ۱۰: اثر کرنش نهایی بتن بر میزان مجاز بازتوزیع لنگر

۱۴- اثر مقاومت فشاری بتن

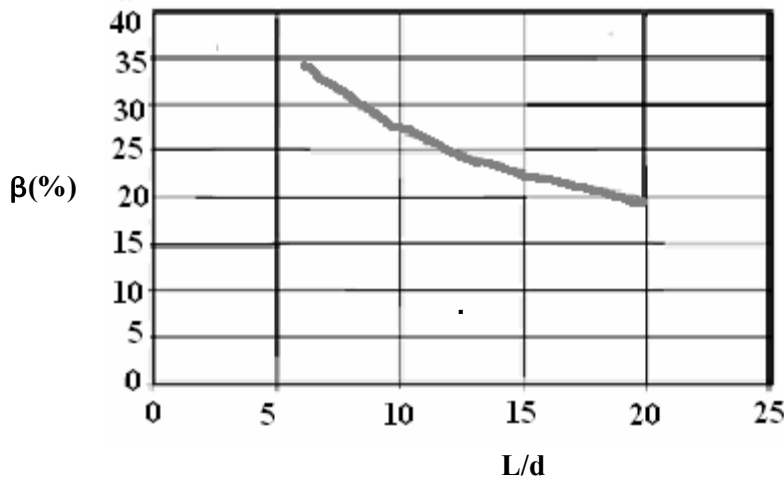
اثر مقاومت بتن بر بازتوزیع مجاز لنگر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۱ مشاهده می شود که با افزایش مقاومت فشاری بتن در محدوده رده بتنی مقاومت معمولی β کاهش می یابد. مطالعات محققان دیگر نشان داده است که افزایش مقاومت فشاری بتن برای مقاطع با x/d موجب کاهش ظرفیت چرخش پلاستیک می شود. زیرا افزایش مقاومت بتن موجب کاهش ϵ_{cu} و در نتیجه کاهش نسبت ظرفیت لنگر نهایی نسبت به لنگر تسلیم می شود. بر اساس تحلیل روابط تعیین تقاضای چرخش، برای نسبت فولادگذاری کششی ثابت، افزایش مقاومت فشاری بتن موجب کاهش عمق محور خنثی می شود. این واقعیت نشان می دهد مقدار تقاضای چرخش در مقدار ثابت c/d افزایش می یابد. این افزایش به دلیل زیاد شدن مقدار لنگر ترک خوردگی در بتن مقاومت بالاتر می باشد. به عبارت دیگر در مقطع مشخص از تیر، سختی مقطع با بتن مقاومت بالاتر بیشتر از تیر ساخته شده از مقاومت کمتر می باشد. شکل ۱۱ نشان می دهد که اثر مقاومت فشاری بتن بر مقدار مجاز بازتوزیع قابل توجه نمی باشد.



شکل ۱۱: اثر مقاومت فشاری بتن بر میزان مجاز بازتوزیع لنگر

۱۵- بررسی تاثیر طول دهانه به عمق موثر مقطع بحرانی (L/d)

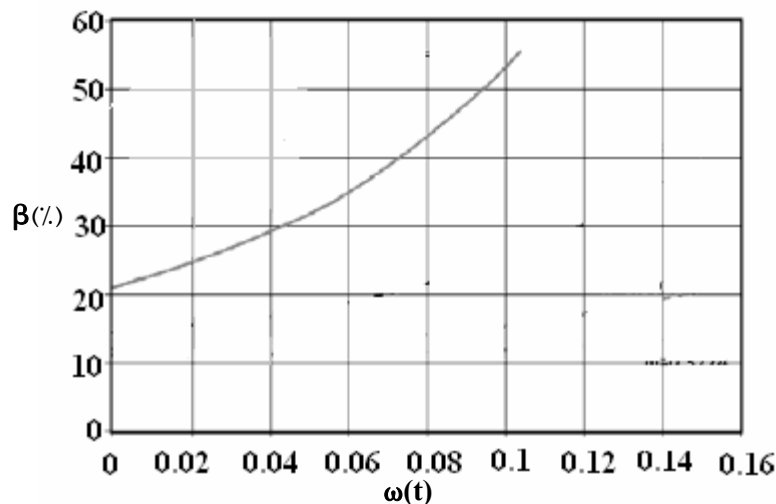
بافرض این که طول دهانه از ۴ متر تا ۱۵ متر تغییر می کند نمودارهای تغییرات درصد بازتوزیع لنگر ترسیم شده است نمودار ۵ گویای این مطلب می باشد که با افزایش نسبت مقدار درصد بازتوزیع لنگر کاهش می یابد. بنابراین اعضای سخت، لنگر بازتوزیع شده مجاز بیشتری دارند.



شکل ۱۲: بررسی تاثیر طول دهانه به عمق موثر مقطع بحرانی بر میزان مجاز باز توزیع لنگر

۱۶- بررسی تاثیر میلگردهای فشاری

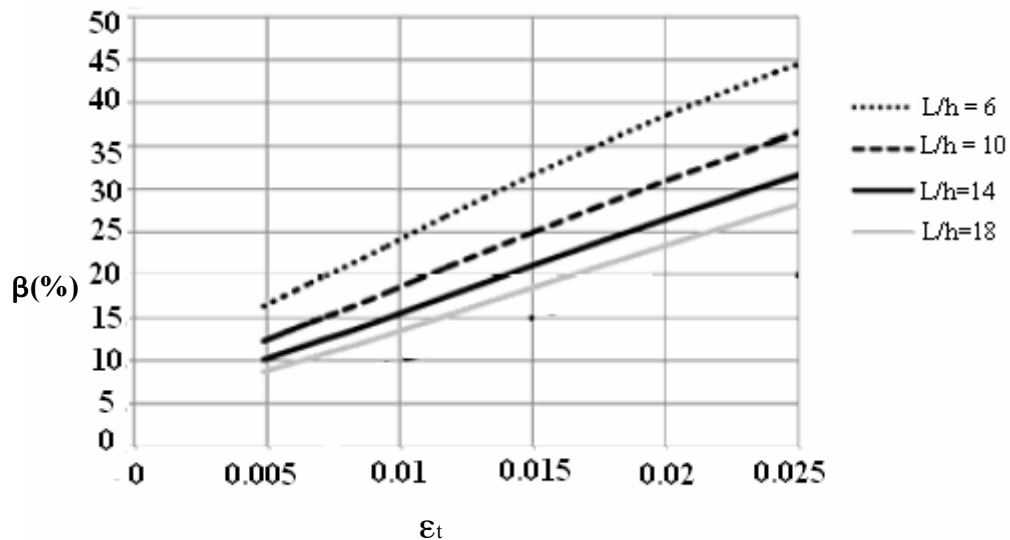
تاثیر میلگردگذاری فشاری در درصد لنگر باز توزیع شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. افزایش در مقدار میلگردگذاری فشاری، نسبت عمق محور خنثی به عمق موثر مقطع را کاهش می دهد و کرنش های بزرگتری در فولاد کششی ایجاد می شود، به طوریکه منجر به تغییر شکل های بزرگتر تارکششی و افزایش ظرفیت چرخشی پلاستیک و درصد باز توزیع لنگر می شود که با افزایش شاخص میلگردگذاری فشاری، درصد لنگر باز توزیع شده افزایش می یابد.



شکل ۱۳: بررسی تاثیر میلگردهای فشاری بر میزان مجاز باز توزیع لنگر

۱۷- اثر لاغری عضو

در شکل ۱۴ میزان باز توزیع مجاز برای تیرهایی با نسبت دهانه مختلف ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، با (افزایش لاغری تیر L/h) مقدار β کاهش می یابد روابط تعیین تقاضای چرخش پلاستیک نشان می دهند مقدار تقاضا با رابطه مستقیم دارد، یعنی افزایش طول دهانه موجب افزایش تقاضا و در نتیجه کاهش β می شود.



شکل ۱۴: اثر لاغری عضو بر میزان مجاز باز توزیع لنگر

۱۸- نتیجه گیری :

از آنجایی که مفصل پلاستیک و رفتار غیر خطی تحت اثر زلزله های قوی بوجود می آید ، دلیلی برای محدود ساختن ضابطه باز توزیع تنها به بارگذاری ثقلی وجود ندارد و تعیین مقدار چرخش تحت بار زلزله ضروری می باشد. در مطالعات موجود در منابع مختلف محدودیتها و مشکلاتی وجود دارد. بررسی تیرهای سراسری اکثراً تحت اثر بارگذاری ثقلی و در شرایط تقارن هندسی سازه و بار صورت گرفته است. همچنین در این مطالعات مفصل پلاستیک بصورت متمرکز و در محل مرکز گره در نظر گرفته شده است، در حالی که در این مطالعه نشان داده شده است که امکان تشکیل دو مفصل مجزا در دو طرف گره و در بر ستون وجود دارد و شرط تقارن ممکن است تحقق نیابد. در این تحقیق علاوه بر بارگذاری ثقلی، بارگذاری لرزه ای در شرایط عدم تقارن هندسی بررسی شده است و روابط ساده ای برای محاسبه چرخش پلاستیک مورد نیاز ارائه شده است. بر اساس مطالعه حاضر اثر مقاومت فشاری بتن بر میزان مجاز باز توزیع کم می باشد، در صورتی که اثر نسبت فولادهای طولی قابل ملاحظه است. علاوه بر این با رعایت حداقل میزان مجاز نسبت فولاد فشاری آیین نامه در طرح لرزه ای (افزایش نسبت فولاد فشاری به کششی) می توان به مقادیر بالاتر برای β دست پیدا کرد. تحلیل منحنی های مجاز نشان می دهد پیشنهاد مراجعی نظیر ACI- 05 برای باز توزیع مجاز محافظه کارانه است. و این پیشنهادها بدون محدودیت قابل اعمال به بار لرزه ای نیز می باشد.

• مراجع:

- 19- Marefat, M. S.; Khanmohammadi, M.; Bahrani, M. K.; Goli, A.; Experimental Assessment of Reinforced Concrete Columns with Deficient Seismic Details under Cyclic Load, Advances in Structural Engineering 2006, Vol. 9, No. 3.
- 20- Elwood, K. J.; Eberhard, M. O.; Effective Stiffness of Reinforced Concrete Columns, PEER Research Digest, No. 2006-1, March 2006.
- 21- Ahner, C.; Kliver, J.; Development of a New Concept for the Rotation Capacity in DIN 1045, part 1, LACER No. 3, 1998.
- 22- Carmo, R.N.F.; Lopez, S.M.R.; Ductility and Linear Analysis with Moment Redistribution in Reinforced Highstrength Concrete Beams, Can. J. Civ. Eng., 2005, 32, 194-203.
- 23- Park, R.; Paulay, T.; Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New York, 1975.
- 24- Paulay, T.; Priestley, M.J.N.; Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, New York, 1992.
- 25- Panagiotakos, T; Fardis, M.N.; Deformation of RC Members at Yielding and Ultimate, ACI struc. J., 2001, 98, No.2, 135-148.
- 26- Bardakis, V.G.; Dritsos, S.E.; Evaluating Assumptions for Seismic Assessment of Existing Buildings, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27, 223-233.
- 27- Shakir, A.; Rogowsky, D.M.; Evaluation of ductility and allowable moment redistribution in reinforced concrete structure, Can. J. Civ. Eng., 2000, 27, 1286-1299).
- 28- Lopez, S.M.R.; Carmo, R.N.F.; Deformable Strut and Tie Model for the Calculation of the Plastic Rotation Capacity, Computers & Structures, 2006, V. 84, Issues 31-32