

علیرضا مرتضایی^{۱*} و سیدمهدی زهرانی^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان

۲. قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختهای عمرانی، دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۸/۱۴)

چکیده-

P-Δ

واژگان کلیدی:

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.mortezaei@semnaniau.ac.ir

A Proposed Equation for the Estimation of Plastic Hinge Length of RC Columns subjected to Ground Motions

A. Mortezaei¹ and S.M. Zahrai²

1. Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.
2. Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering of the University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract: In a strong earthquake, a standard reinforced concrete column may develop plastic deformations in regions often termed as plastic hinge regions. A plastic hinge is basically a damping device that dissipates energy through the plastic rotation of a rigid column connection, thus triggering the redistribution of bending moments. The formation of a plastic hinge in an RC column in the regions that experience inelastic actions depends on the characteristics of the earthquakes as well as the column details. In this paper, 462 inelastic time-history analyses have been performed to predict the nonlinear behavior of RC columns under the ground motions. The effects of axial load, height-to-depth ratio and amount of longitudinal reinforcement, as well as different characteristics of earthquakes are evaluated analytically by finite element methods and the results are compared with the corresponding experimental data. Analytical models for the columns analysed under high axial loads exhibit longer plastic hinges than those analysed under low axial loads. Based on the results, a simple expression is proposed to estimate plastic hinge length of RC columns subjected to earthquakes.

Keywords: Plastic hinge length; nonlinear behavior; dynamic analysis; RC columns.

بارگذاری، (نقطه B) فولاد کششی شروع به تسلیم نموده (ϕ_y) و (M_y)، که به دنبال آن بتن نیز خرد می شود (ϕ_u و M_u در نقطه C). دوران عضو را می توان از توزیع انحنا در راستای طول عضو تعیین کرد. بر اساس نظریه گشتاور اول سطح، دوران (تغییر شیب) بین هر دو نقطه از تیر برابر سطح زیر نمودار انحنا بین این دو نقطه بوده، که به صورت معادله زیر نمایش داده می شود:

$$\theta_{AB} = \int_A^B \phi dx \quad (1)$$

در این معادله x فاصله جزء dx از نقطه A (حد تحتانی انتگرال) است. این معادله را می توان برای انحناهای الاستیک یا غیرالاستیک به کار برد.

در شکل (۲) یک ستون طره تحت بارگذاری تناوبی در مرحله بار نهایی نمایش داده می شود. برای مقادیر بارهای کوچکتر از گشتاور تسلیم، M_y ، انحنا به طور تدریجی از انتهای آزاد ستون طره (نقطه A) به سمت ستون (نقطه B) افزایش می یابد. در مرحله بار نهایی، مقدار انحنا در تکیه گاه به طور ناگهانی افزایش یافته، به گونه ای که این امر سبب یک تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ می شود. از آنجایی که بتن موجود بین ترکها

۱- مقدمه

در طراحی حالت حدی سازه های بتنی سه الزام اولیه وجود داشته که مختص این سازه ها هستند: الف) تعادل حدی، ب) سازگاری دورانی و ج) قابلیت بهره برداری. هر روش طراحی حدی مستلزم داشتن اطلاعاتی در خصوص طول مفصل پلاستیک، L_p ، و دوران مفصل پلاستیک برای نیل به بازتوزیع کامل لنگرهای خمشی است. لذا در اینجا الزام ثانویه روش طراحی حدی یعنی سازگاری دورانی مورد بررسی قرار می گیرد.

مشخصه های لنگر-انحنای یک سطح مقطع مشخص، نماینده خصوصیات تغییر شکل یک مقطع بتن آرمه است. همان طور که در شکل (۱) دیده می شود، منحنی نمایشی لنگر-انحنای برای یک عضو بتن آرمه شامل سه مرحله است: نقطه A، نشان دهنده نقطه ترک خوردگی بوده که در آن بتن شروع به ترک خوردن می کند (ϕ_{cr} و M_{cr}). در مراحل اولیه ($M < M_{cr}$)، پاسخ سازه الاستیک و خطی است. با افزایش گشتاور وارده، ترک خوردگی بتن سبب کاهش صلیبیت خمشی مقطع شده که این کاهش بستگی به مقدار فولاد دارد. در سطوح بالاتر

دست آورد و یا با حاصلضرب ارتفاع $(\varphi_u - \varphi_y)$ و عرض، I_p ، یک مستطیل معادل. با استفاده از معادله ۲، طول مفصل پلاستیک معادل، I_p ، را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$I_p = \frac{1}{(\varphi_u - \varphi_y)} \int_0^{l_y} [\varphi(x) - \varphi_y] dx \quad (3)$$

بنابراین مقدار دوران مفصل پلاستیک، θ_p ، در مرحله نهایی را می‌توان به راحتی با استفاده از معادله زیر به دست آورد [۲]:

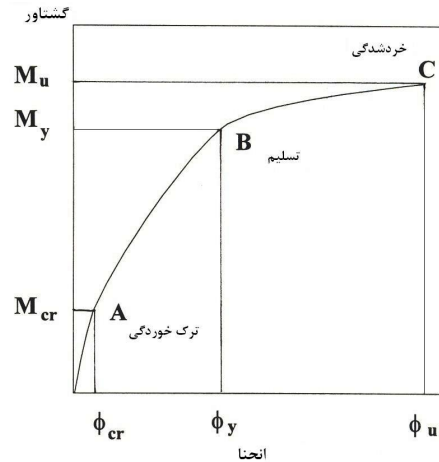
$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y) I_p = \varphi_p \cdot I_p = \beta' \varphi_p l_y \quad (4)$$

که φ_u و φ_y به ترتیب انحنای در بار نهایی و تسلیم بوده و I_p طول معادل مفصل پلاستیک در فاصله‌ای بوده که فرض می‌شود. انحنای پلاستیک $(\varphi_p = \varphi_u - \varphi_y)$ ثابت باشد. معادله (۴) منجر به مساحتی مشابه با توزیع انحنای پلاستیک واقعی، ناحیه هاشورخورده در شکل (۲-ج)، می‌شود. پارامتر بدون بعد، β' ، ضریب شکل^۲ یا ضریب توزیع انحنای برای نمودار انحنای نزدیک تکیه‌گاه بوده و کمتر از یک است. همچنین این ضریب را می‌توان بنام ضریب کاهش طول تسلیم در طولی نامید که فولاد جاری می‌شود، بنابراین $\beta' l_y = I_p$.

۲- تاریخچه پژوهش

در زلزله‌های قوی، اعضای بتن‌آرمه دچار تغییرشکل‌های پلاستیک در نواحی معروف به نواحی مفصل پلاستیک می‌شوند. طول یک مفصل پلاستیک به پارامترهای زیادی بستگی دارد. سطح بار محوری، گرادیان گشتاور، سطح تنش برشی در ناحیه مفصل پلاستیک، خصوصیات مکانیکی آرماتورهای طولی و عرضی، مقاومت بتن و میزان محصورشدگی از جمله پارامترهای مهمی هستند که طول مفصل پلاستیک را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

در حال حاضر، برای تخمین طول مفصل پلاستیک، l_p ، تعدادی روابط تجربی در دسترس است. از آنجایی که طول مفصل پلاستیک به پارامترهای متعددی وابسته است لذا تعیین این طول در بیشتر حالات مشکل است. رابطه کلی برای طول مفصل پلاستیک، l_p ، در بارهای بیشتر از بارهای تسلیم

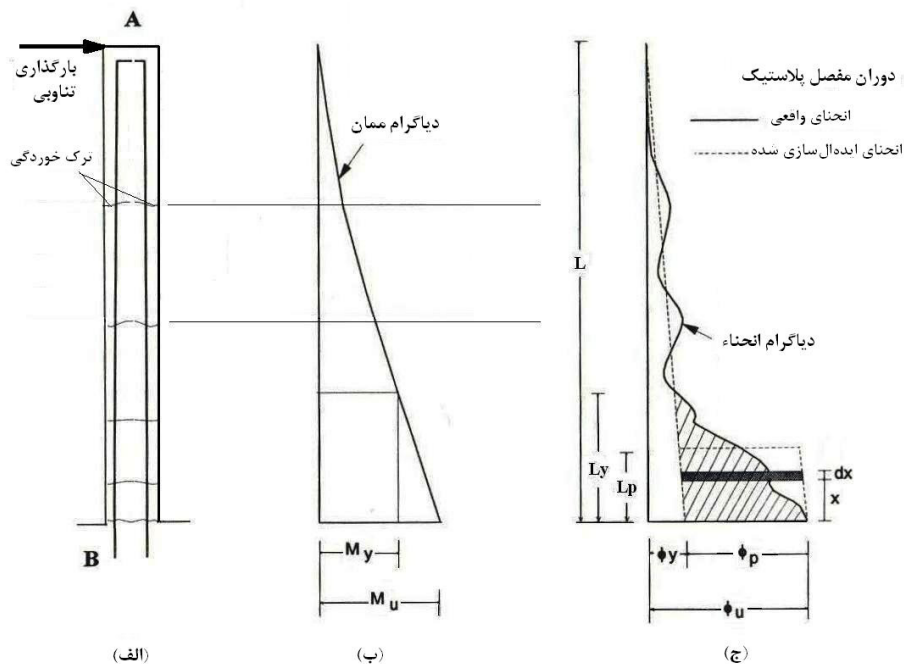


شکل ۱- منحنی نمایشی گشتاور-انحنا

می‌تواند مقداری کشش تحمل کند (پدیده سخت‌شدگی - کششی^۱) مقدار انحنای در راستای ستون دارای تغییراتی است. هر نقطه حداکثر از نمودار انحنای متناظر با موقعیت یک ترک است. توزیع واقعی انحنای در مرحله بار نهایی را می‌توان به صورت نواحی الاستیک و غیرالاستیک ایدئال‌سازی کرد، (شکل ۲-ج). بنابراین دوران کل، θ_p ، در راستای ستون را می‌توان به دورانه‌های الاستیک، θ_e ، و پلاستیک، θ_p ، تقسیم کرد. دوران الاستیک، θ_e ، (تا زمان تسلیم فولاد) را می‌توان با استفاده از مقدار انحنای در هنگام تسلیم به دست آورد، معادله (۱). طبق معادله ۱، دوران پلاستیک در هر طرف از مقطع بحرانی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۱]:

$$\theta_p = \int_0^{l_y} [\varphi(x) - \varphi_y] dx \quad (2)$$

در این معادله، $\varphi(x)$ مقدار انحنای در فاصله x از مقطع بحرانی در مرحله بار نهایی است. طول تسلیم، l_y ، طولی از ستون است که در آن گشتاور حداکثر از گشتاور تسلیم، M_y ، تجاوز کرده و یا فاصله بین مقطع بحرانی و موقعیتی است که اولین فولاد کششی جاری می‌شود شکل (۲). ناحیه هاشورخورده در شکل (۲-ج)، دوران پلاستیک، θ_p ، بوده که علاوه بر دوران الاستیک در ناحیه مفصل پلاستیک و در مرحله بار نهایی رخ می‌دهد. دوران مفصل پلاستیک را می‌توان یا با محاسبه ناحیه هاشورخورده به



شکل ۲- توزیع نمایشی انحنای در راستای ستون در مرحله بار نهایی؛ (الف) ستون؛ (ب) نمودار گشتاور خمشی؛ (ج) نمودار انحنای

برای I_p می‌شود.

برای اعضای محصور توسط فولاد عرضی، بیکر و آماراکن [۴] معادله‌ای را برای تعیین I_p پیشنهاد دادند.

$$I_p = 0.8 k_1 k_3 \left(\frac{z}{d}\right) c \quad (6)$$

که c عمق تار خنثی در گشتاور نهایی است.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش ۳۷ نمونه تیر با تکیه‌گاه‌های ساده، متوک [۵] یک معادله تجربی برای تخمین ظرفیت دورانی نواحی مفصلی ارائه داد. در این معادله، برای تیرهای با تکیه‌گاه‌های ساده تحت یک بار متمرکز وسط دهانه، طول مفصل پلاستیک برابر نصف عمق موثر تیر یعنی $d/2$ فرض شد. دوران نهایی مفصل پلاستیک، θ_{tu} ، در یک مقطع بحرانی به کمک معادله (۴) و با استفاده از یک انحنای متوسط در طولی برابر $0.5d$ به دست آمد. فرض شد کل دوران غیرالاستیک در بار نهایی، θ_{tu} ، در طولی برابر z ، در نقطه گشتاور حداکثر متمرکز باشد که از تغییر شکل پلاستیک اندازه‌گیری شده در وسط دهانه بدست می‌آید. نتایج حاصل از آزمایشها نشان داد که گسترش ناحیه پلاستیک در طول تیر و به دور از ناحیه بحرانی، با

معتبر بوده به شرط آنکه I_y و $\phi(x)$ در این مراحل بارگذاری مشخص باشند، معادله (۳). هم I_y و هم $\phi(x)$ تابعی از خصوصیات ماده، خصوصیات مقطع و تاریخچه بارگذاری هستند.

به منظور تخمین θ_p با استفاده از معادله (۴)، طول معادل مفصل پلاستیک باید مشخص شود. با مرتبط ساختن رفتار واقعی با رفتار ایدئال، اولین بار یک روش تجربی برای تعیین I_p توسط بیکر [۳] پیشنهاد شد:

$$I_p = k_1 k_2 k_3 \left(\frac{z}{d}\right)^{0.25} d \quad (5)$$

که k_1 برای فولاد نرم برابر ۰٫۷ و برای فولاد سرد نورد شده برابر ۰٫۹ است. $k_2 = 1 + 0.5 \left(\frac{P_u}{p_0}\right)$ که P_u نیروی فشاری محوری و p_0 ظرفیت ستون تحت بار محوری است. هنگامی که $f'_c = 5100 \text{ psi}$ مقدار k_3 برابر ۰٫۶ و زمانی که $f'_c = 1700 \text{ psi}$ مقدار k_3 برابر ۰٫۹ است. این معادله برای اعضای با بتن غیرمحصور توسعه داده شد. برای محدوده وسیعی از اعضای سازه‌ای این معادله منجر به مقادیری در حدود $0.4d$ الی $2.4d$

افزایش نسبت z/d و کاهش شاخص فولاد کششی خالص $(\omega-\omega')$ در مقطع بحرانی افزایش می‌یابد.

کورلی [۶] تأثیر اندازه و عرض تیر، شاخص فولاد و محصورشدگی توسط خاموتهای بسته را بر روی رفتار غیرالاستیک ۷۷ تیر با تکیه‌گاههای ساده مورد بررسی قرار داد و به کمک نتایج حاصل از آن معادله زیر را برای طول معادل مفصل پلاستیک پیشنهاد داد:

$$I_p = 0.5 d + 0.2 \sqrt{d} \left(\frac{z}{d} \right) \quad (۷)$$

به دنبال آن متوک [۷] معادله زیر را پیشنهاد داد که به طور طبیعی محافظه‌کارانه و شکل ساده‌تری از معادله (۷) بود:

$$I_p = 0.5 d + 0.05 z \quad (۸)$$

سویر [۸] معادله زیر را پیشنهاد کرد:

$$I_p = 0.25 d + 0.075 z \quad (۹)$$

در معادله فوق فرض شد ناحیه تسلیم به فاصله $d/4$ از مقطعی که در آن گشتاور خمشی به تسلیم (M_y) می‌رسد، ادامه یابد. لازم به یادآوری است که I_p ، طول معادل مفصل پلاستیک در یک طرف مقطع بحرانی بود.

بررسی‌های گسترده آزمایشگاهی و تحلیلی نشان داد که در طول تیر، تغییرات طول مفصل پلاستیک در مفاصل بتن‌آرمه بین $0.4d$ الی $2.4d$ است [۸]. در حقیقت، فرض یک طول ثابت برای مفصل پلاستیک بدین معنی است که تأثیر لایه‌بندی سازه‌ای، بزرگا و نوع بار بر روی دوران غیرالاستیک صرف‌نظر شده است. بیشتر معادلات پیشنهادی به صورت تابعی از z ارائه شدند که این مقدار، z ، برای تیرهای با تکیه‌گاههای ثابت و تیرهای طره‌ای ثابت بود. در صورتی که، مقدار z برای تیرهای نامعین در طول تاریخچه بارگذاری متغیر بوده و بسته به جزئیات فولادگذاری تیر، طول دهانه، نوع و موقعیت بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی افزایش یا کاهش می‌یابد.

کهن [۹] یک روش ساده و منطقی برای کنترل سازگاری دوران مفاصل پلاستیک در تیرهای پیوسته بتن‌آرمه پیشنهاد داد. به کمک این روش، معادلات مناسبی برای دورانهای پلاستیک و ظرفیتهای دوران مفاصل پلاستیک حاصل شد. مقادیر ثابت

$I_p=L/15$ و $\varepsilon_{cu}=0.035$ در محاسبات به کار رفت که L طول دهانه تیر است. برای تیرهای تحت اثر بارهای متمرکز، معادله ساده زیر پیشنهاد شد:

$$\frac{I_y}{z} = 1 - \frac{M_y}{M_u} \quad (۱۰)$$

ریوا و کهن [۱۰] با تحلیل غیرخطی ۵۶ تیر دو انتها ساده و ۳۲ تیر پیش‌تنیده و مسلح بتنی، یک مطالعه پارامتریک در خصوص منحنی گشتاور-انحنا و طول مفصل پلاستیک انجام دادند. تأثیر توزیع بار، درصد فولاد کششی، شکل مقطع، شرایط تکیه‌گاهی و پیش‌تنیدگی مورد مطالعه قرار گرفتند. از آنجایی که فاصله z در تیرهای پیوسته در طول تاریخچه بارگذاری متغیر بود، لذا تیرهای بتن‌آرمه معین استاتیکی مورد مطالعه قرار گرفتند. دوران پلاستیک با در نظر گرفتن یک توزیع انحنای پلاستیک ثابت در طول نصف جزء به دست آمد (یعنی $\theta_p = \varphi_p I_e / 2$ که I_e طول عضو بود). به دلیل فرض انحنای ثابت در طول عضو، مقادیر دوران پلاستیک در مقطع بحرانی به ابعاد عضو در تحلیل حساس نبودند. نتایج نشان دادند که نسبت I_p/z به تغییرات نسبت z/h حساس نبوده (h : ارتفاع مقطع) و اساساً متاثر از توزیع گشتاور خمشی و درصد فولاد است. بر اساس نتایج تحلیلی، روابط پیشنهادی برای I_p/z در سه مرحله مختلف بارگذاری به قرار زیر بودند:

الف) از حالت حدی ترک‌خوردگی تا تسلیم:

$$\frac{I_p}{z} = \left(A - \frac{B}{800w} \right) \left(\frac{\varphi_p}{\varphi_{py}} \right)^{80w} \left(\frac{b'}{b_w} \right)^{\frac{D}{640w^2}} f(\gamma) \quad (۱۱)$$

ب) از حالت حدی تسلیم تا سخت‌شوندگی کرنش فولاد:

$$\frac{I_p}{z} = \left(\frac{I_p}{z} \right)_y \left(\frac{\varphi_p}{\varphi_{py}} \right)^{-(0.9-0.8\gamma)} \quad (۱۲)$$

ج) حالت حدی نهایی (اگر $\frac{\varphi_{pu}}{\varphi_{py}} > 7.0$):

$$\frac{I_p}{z} = \left(\frac{E}{100} + \frac{F}{1000} \cdot \frac{\varphi_{pu}}{\varphi_{py}} \right) \left(\frac{b}{b_w} \right)^G \quad (۱۳)$$

که I_p در معادله (۱۲) برابر مقدار I_p/z از معادله (۱۱) زمانی که $\varphi_{pu} / \varphi_{py} = 1$ باشد. b عرض بال فشاری و b_w عرض جان

است. پارامترهای ϕ_{py} و ϕ_{pu} و ثابتهای A, B, C, D, E, F, G و $f(\gamma)$ به توزیع گشتاور خمشی بستگی داشته که در مطالعات ریوا (۱۹۸۸) موجودند.

ریوا و کهن [۱۱] تحقیقات خود را بر روی ظرفیت دوران پلاستیک در حالت حدی نهایی متمرکز کردند. تحقیقات نشان دادند با افزایش مقادیر شاخص فولاد، برای مقاطع کم فولاد ($\rho < 0.004$)، گسیختگی فولاد) ظرفیت دوران پلاستیک افزایش یافته در حالی که برای مقاطع پرفولاد ($\rho > 0.004$)، گسیختگی ناحیه فشاری بتن) ظرفیت دوران پلاستیک کاهش می یابد. بارهای گسترده بر روی تیرهای با تکیه گاههای ساده منجر به مقادیری برای θ_p می شوند که از ۲ الی ۵ برابر نسبت به شرایط مشابه با بارگذاری متمرکز متغیرند. اگرچه فرمول پیشنهادی ریوا و کهن [۱۱] برای هر مرحله بارگذاری معتبر بوده و تأثیرات توزیع گشتاور و شکل مقطع را در نظر می گیرد، اما به سبب پیچیدگی مدل، استفاده از آن در مسائل اجرایی و آئین نامه ای مشکل است.

پارک و همکاران [۱۲] چهار ستون بتنی با مقطع مربع و نسبت H/h برابر ۲ را در مقیاس واقعی مورد آزمایش قرار دادند. بارهای محوری وارد به ستونها در محدوده $0.2f'_c A_g$ الی $0.6f'_c A_g$ قرار داشتند. پارک و همکاران، طول مفصل پلاستیک نمونه های آزمایش شده را به کمک معادله زیر تخمین زدند:

$$\Delta_{tip} = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y \cdot L^2}{3} + (\phi - \phi_y) I_p (1 - 0.5I_p) \quad (14)$$

آنها نتیجه گرفتند که طول مفصل پلاستیک به دست آمده از آزمونهای آزمایشگاهی به سطح بار محوری حساس نبوده و مقدار متوسطی در حدود $0.42h$ دارد، که h عمق کلی مقطع ستون است. آنها استفاده از مقدار $0.4h$ را برای طول مفصل پلاستیک ستونهای بتنی پیشنهاد کردند.

به کمک یک روش مشابه، پرستلی و پارک [۱۳] معادله زیر را برای محاسبه طول مفصل پلاستیک، l_p در ستونهای بتن آرمه پیشنهاد کردند:

$$l_p = 0.08L + 6d_b \quad (15)$$

معادله (۱۵) دارای دو مولفه است. پرستلی و پارک [۱۳] بیان نمودند که جمله اول اساساً برای منظور کردن خمش ستون بوده در حالی که جمله دوم برای منظور کردن لغزش آرماتورها ناشی از افزایش طول آرماتورهای طولی بوده است.

پاولی و پرستلی [۱۴] معادله (۱۵) را برای منظور کردن رده های مختلف آرماتورهای خمشی مورد بازنگری قرار دادند و معادله های زیر را پیشنهاد دادند:

$$l_p = 0.08L + 0.15d_b f_y \quad (f_y \text{ in ksi}) \quad (16)$$

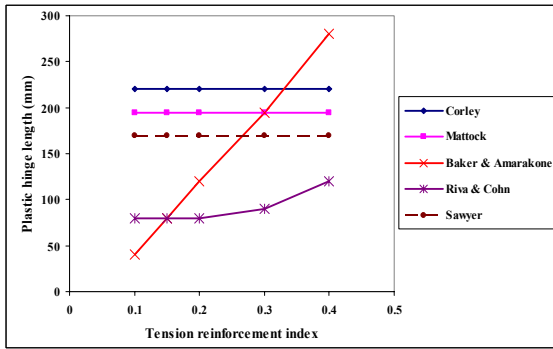
$$l_p = 0.08L + 0.022d_b f_y \quad (f_y \text{ in MPa})$$

پاولی و پرستلی بیان کردند که معادله (۱۶) برای ستونهای مختلف در حدود $l_p \approx 0.5h$ نتیجه می دهد.

بر اساس مطالعه گسترده کارهای گذشتگان، ساکای و شیخ [۱۵] گزارش کردند که با افزایش نسبت اندازه ابعاد (H/h یا H/D) طول مفصل پلاستیک، l_p ، افزایش می یابد. منحنیهای دوخطی که نشان دهنده رابطه بین l_p و نسبت ابعاد بود، توسط ایشان ارائه شد. آنها نتیجه گرفتند که طول مفصل پلاستیک متأثر از مقدار آرماتورهای عرضی، سطح بارمحوری و نسبت ابعاد است.

شیخ و خوری [۱۶] شیخ و همکاران [۱۷] و باراک و شیخ [۱۸] گزارش کردند که طول مفصل پلاستیک، l_p ، اندازه گیری شده در آزمونهای آزمایشگاهی ستونها در حدود $1.0h$ است. لازم به یادآوری است که بیشتر ستونهای آزمایش شده تحت اثر بارهای محوری بالایی قرار داشتند.

مندیس [۱۹]، ۱۳ تیر بتن آرمه با تکیه گاههای ساده را تحت اثر بارهای متمرکز مورد آزمایش قرار داد و طول مفصل پلاستیک را در آنها اندازه گیری نمود. او گزارش داد که با افزایش نسبت H/h یا نسبت آرماتورهای طولی، طول مفصل پلاستیک، l_p ، افزایش یافته اما با افزایش مقدار آرماتورهای عرضی این طول کاهش می یابد. براساس نتایج چهار نمونه ستون آزمایش شده، که سطوح بارمحوری در آنها پایین بود ($P/(f'_c A_g)$ بین 0.06 الی 0.2 بود)، مندیس نتیجه گرفت که طول مفصل پلاستیک، l_p ، به سطح بارمحوری حساس نیست.

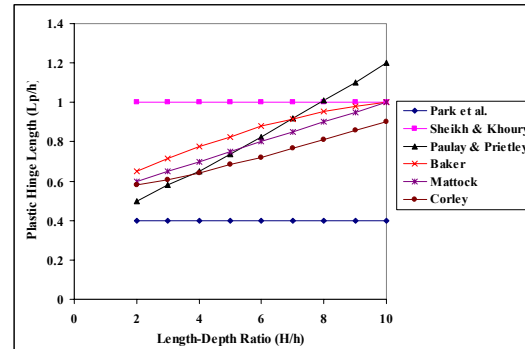


شکل ۴- مقایسه فرمولهای محققان مختلف برای طول مفصل

پلاستیک

سالهای اخیر تمرکز اصلی محققان، بر روی رفتار ستونهای بتنی بوده است.

اگرچه تأثیر بار محوری بر روی طول مفصل پلاستیک ستونهای بتنی توسط محققان زیادی گزارش شده، اما گزارشات ارائه شده دارای تناقض اند. همان طوری که قبلاً بحث شد، پارک و همکاران [۱۲] و مندیس [۱۹] بر اساس آزمایشات خود نتیجه گرفتند که طول مفصل پلاستیک حساس به سطح بار محوری نیست. بر خلاف آنچه گفته شد، آتالی و پنزین [۲۱] گزارش دادند که گسترش حالت پلاستیک یا طول ناحیه خسارت دیده، همراه با افزایش سطح بار محوری افزایش می یابد. نتایج آزمایشگاهی تامسون و والاس نشان دادند که افزایش طول مفصل پلاستیک به تبع افزایش بار محوری را می توان در ستونهای با بتن مقاومت بالا نیز مشاهده کرد. بای و باراک [۲۰] نیز در آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش سطح بار محوری طول مفصل پلاستیک افزایش می یابد. همچنین شکل (۴) نشان می دهد که مقدار تحلیلی l_p برای مقادیر مختلف شاخص فولاد کششی ثابت نیست. روش قبلی بیکر، معادله (۵)، برای مقادیر مختلف ω مقدار ثابتی از l_p برابر با ۱۹۴٫۵ میلیمتر را تخمین می زند، در صورتی که در معادله پیشنهادی توسط بیکر و آماراکون (معادله ۶) [۴]، l_p به طور خطی با نسبت c/d افزایش می یابد. فرمول ریوا و کهن [۱۱] منجر به تولید کمترین مقدار برای طول مفصل پلاستیک می شود. نظریه های کورلی [۶]،



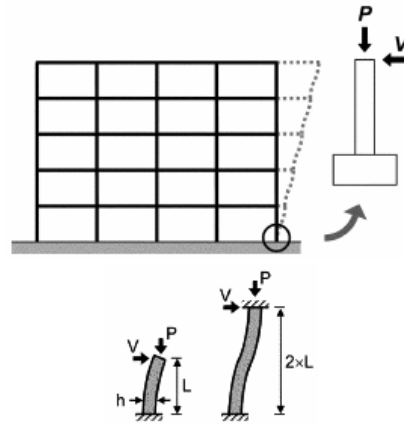
شکل ۳- مقایسه معادلات پیشنهادی توسط محققان مختلف در

خصوص طول مفصل پلاستیک

بای و باراک [۲۰] به بررسی عملکرد لرزه ای ستونهای بتن آرمه در مقیاس واقعی پرداختند و تأثیر طول مفصل پلاستیک و اثر $p-\Delta$ را بر روی روابط بین ظرفیت تغییر مکان نسبی، شکل پذیریهای انحنا و تغییر مکان مورد بحث و بررسی قرار دادند. آنها در ابتدا به بررسی رابطه پیشنهادی توسط پارک و همکاران [۱۲] برای تعیین تغییر مکان حداکثر ستون پرداختند و نشان دادند که در این روابط یک ارتباط خطی بین شکل پذیریهای انحنا و تغییر مکان ستون وجود دارد و طول مفصل پلاستیک، l_p ، و ارتفاع ستون، H ، دو پارامتر مهمی هستند که این رابطه را تحت تأثیر قرار می دهند. بای و باراک [۲۰] در ادامه تحقیق خود و بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، یک روش تحلیلی جدیدی را برای تخمین طول مفصل پلاستیک، l_p ، ارائه دادند و بر اساس یافته های آزمایشگاهی خود، رابطه ای را برای تخمین طول مفصل پلاستیک پیشنهاد کردند.

مقایسه بین معادلات پیشنهادی توسط محققان مختلف در خصوص طول مفصل پلاستیک در شکل های (۳) و (۴) آورده شده است. این شکل های نشان می دهند که تغییرات و پراکندگی زیادی در بین معادلات پیشنهادی وجود دارد. لازم به یادآوری است که به جز معادلات پیشنهادی توسط بیکر [۳] و بیکر و آماراکون [۴]، بیشتر معادلات بار محوری را به عنوان یک پارامتر در نظر نمی گیرند. زیرا در تحقیقات اولیه بر روی مفصل پلاستیک، تمرکز اصلی بر روی رفتار تیرهای بتنی بوده، اما در

می‌گیرد. تأثیر پارامترهای فوق بر روی تغییرشکلهای نهایی ستونهای بتن‌آرمه بررسی شده و معادله جدیدی به منظور در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای مختلف در محاسبه طول مفصل پلاستیک تحت زمین‌لرزه توسعه داده می‌شود.



شکل ۵- مدل کردن نمونه ستون [۲۲]

۳- بررسی دقت و صحت مدل‌های تحلیلی

بررسی صحت روش اجزای محدود شامل مدل‌سازی نمونه آزمایش‌شده توسط بای و باراک [۲۲] در دانشگاه تگزاس با ابعاد و خصوصیات مشخص است. بای و باراک [۲۲] ۵ نمونه ستون بتن‌آرمه را در مقیاس واقعی در دانشگاه تگزاس مورد آزمایش قرار دادند. این ستونها در حالی که بارهای محوری ثابت را تحمل می‌کردند تحت اثر بارهای تناوبی قرار گرفتند. همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است نمونه‌های مورد آزمایش ستون، به عنوان نیمه‌ای از یک ستون که در خمش دو انحنایی قرار دارد در نظر گرفته شدند. یک عدد از این ستونها به عنوان ستون کنترلی بود که برای بررسی صحت مدل اجزای محدود می‌توان آن را مورد استفاده قرار داد. مشخصات این ستون در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) نمایش داده شده ارتفاع ستون برابر ۳۰۰ سانتیمتر است. فولادهای طولی مورد استفاده ۱۲ عدد آرماتور نمره ۲۲ و فولادهای برشی نیز آرماتورهای با قطر ۱۰ میلیمتر بوده که جزییات فولادگذاری در شکل (۶) آورده شده است. در شروع آزمایش بار محوری ثابت به ستون وارد شد و به دنبال آن نمونه تحت اثر سیکلهای تغییرمکان جانبی افزایشی قرار گرفت. ستون و صفحات بارگذاری به صورت یک حجم مدل شدند. ترکیب احجام صفحه و آرماتورهای فولادی در شکل (۷) نمایش داده شده است. مش‌بندی آرماتورها در مقایسه با احجام دیگر یک حالت خاص محسوب می‌شود. هیچ‌گونه مش‌بندی برای آرماتور نیاز نیست. زیرا اجزای مجزا در مدل از طریق گره‌های تولیدشده توسط مش‌بندی حجم بتن تولید شده‌اند.

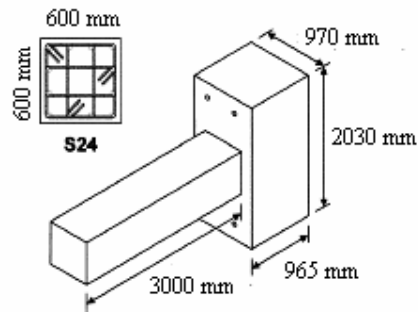
هدف از مقایسه مدل اجزای محدود و آزمایشهای آزمایشگاهی این است که مطمئن شویم المانها، خصوصیات

متوک [۷] و سویر [۸] بدون توجه به شاخص فولاد، مقادیر ثابتی را به ترتیب برابر ۲۱۵/۴ میلیمتر (۰/۸۵d)، ۱۹۶/۹ میلیمتر (۰/۷۸d) و ۱۶۸/۲ میلیمتر (۰/۶۶d) برای طول مفصل پلاستیک ارائه می‌کنند.

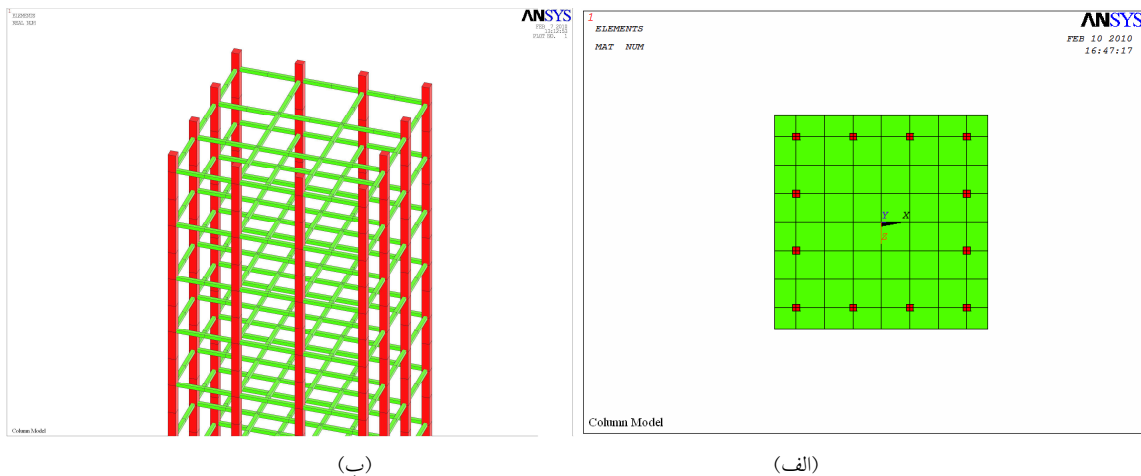
اگرچه روشهای مختلفی برای محاسبه طول مفصل پلاستیک و ظرفیت دوران غیرالاستیک پیشنهاد شده، اما هیچ سازگاری و انطباق کلی بر روی مشخصه‌های رفتاری غیرالاستیک ستونهای بتن‌آرمه وجود ندارد. از سویی، در بیشتر کارهای گذشتگان، از آنجایی که رفتار یک تیر بتنی در تعیین طول مفصل پلاستیک مورد بررسی قرار می‌گرفته، لذا از تأثیر مقدار بار محوری در مقدار I_p غفلت شده است. طبیعت و پیچیدگیهای مسائل مورد بحث در این خصوص به اندازه‌ای است که به منظور روشن شدن تأثیر پارامترهای مختلف مانند مشخصات زلزله، مشخصات فیزیکی عضو، سطح بار محوری و نسبت فولاد نیاز به تحقیقات بیشتر است. لذا در این راستا و به منظور بررسی تأثیرات ارتفاع به بعد ستون (H/h)، بار محوری (P/P_0)، درصد فولاد مصرفی ($\rho = A_s / A_g$) و مشخصات زلزله بر طول مفصل پلاستیک، ستونهای بتن‌آرمه تحت اثر بار محوری متوسط تا زیاد و رکوردهای زلزله‌های انتخابی تحلیل می‌شوند. یک برنامه تحلیل اجزای محدود غیرخطی، ANSYS، برای تعیین طول تسلیم و طول مفصل پلاستیک مورد استفاده قرار

جدول ۱- جزییات ستون کنترلی

$\frac{P}{P_o}$	آرماتورهای عرضی				آرماتورهای طولی			f'_c (MPa)	ابعاد مقطع (mm×mm)	نمونه
	f_{ys} (MPa)	ρ_s (%)	گام خاموت (mm)	قطر (mm)	f_y (MPa)	ρ_l (%)	قطر (mm)			
۰.۵	۴۴۰	۱.۲۸	۱۰۰	۱۰	۵۸۰	۱.۲۵	۲۲	۳۰	۶۰۰×۶۰۰	S24-IUT



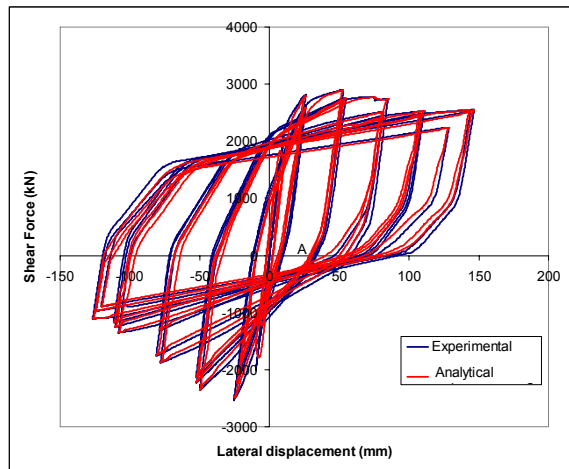
شکل ۶- ابعاد و فولادگذاری نمونه مورد آزمایش [۲۲]



شکل ۷- سطح مقطع ستون در برنامه ANSYS؛ (ب) فولادهای طولی و عرضی نمونه تحلیلی در برنامه ANSYS

می‌زند. یک مورد اختلاف بین رفتار آزمایشگاهی و تحلیلی، میزان باریک‌شدگی و تا حدی تخمین حد پایین سختی در بارگذاری مجدد سطوح مختلف بارگذاری در تحلیل اجزای محدود است. با وجود این، تحلیل اجزای محدود، مقاومت جانبی را مشابه مقادیر آزمایشگاهی محاسبه کردند. برای کارهای آزمایشگاهی، حداکثر بار ۱۹۳/۱۲ کیلونیوتن در تغییر

مواد، ثابتهای حقیقی و معیارهای همگرایی برای مدل کردن پاسخ عضو مناسب‌اند. منحنی پسماند نیروی برشی-تغییرشکل جانبی ستون در دو حالت تحلیلی و آزمایشگاهی در شکل (۸) قابل مشاهده است. در قیاس با پاسخ آزمایشگاهی، تحلیل اجزای محدود، مقاومت جانبی نهایی، تغییرمکانهای ماندگار، سختی ترک‌خوردگی و میزان اتلاف انرژی را به خوبی تخمین



شکل ۸- منحنی پسماند نیروی برشی-تغییر شکل جانبی ستون

جدول ۲- مشخصات زلزله‌های حوزه دور

ردیف	زلزله	سال	ایستگاه	مولفه	بزرگای (M_w)	فاصله تا گسل (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
۱	Kern County	۱۹۵۲	Taft	۱۱۱	۷/۴	۸۱	۰/۱۷	۱۷/۴۷	۸/۸۳
۲	Tabas	۱۹۷۸	Dayhook	TR	۷/۴	۱۰۷	۰/۴	۲۶/۱۷	۹/۱
۳	Imperial Valley	۱۹۷۹	Calexco	225	۶/۵	۹۰/۶	۰/۲۷	۲۱/۲۳	۸/۹۸
۴	Loma Prieta	۱۹۸۹	Presidio	000	۶/۹	۸۳/۱	۰/۰۹۹	۱۲/۹۱	۴/۳۲
۵	Loma Prieta	۱۹۸۹	Cliff House	90	۶/۹	۸۴/۴	۰/۱۰۷	۱۹/۷۸	۵/۰۶
۶	Manjil	۱۹۹۰	Abbar	L	۷/۳۷	۷۴	۰/۵۱	۴۲/۴۶	۱۴/۹۲
۷	Kocaeli	۱۹۹۹	Ambarli	90	۷/۴	۷۸/۹	۰/۱۸	۳۳/۲۲	۲۵/۸۴

بزرگای بین ۶/۵ الی ۷/۴ داشته که در فواصل ۷۴ الی ۱۰۷ کیلومتری از سایت و بر روی خاکهای نرم یا سفت ثبت شده‌اند. در جدول (۲) مشخصات این رکوردها اعم از ایستگاه ثبت رکورد، مولفه لرزه‌ای، بزرگای زلزله، فاصله تا گسل، حداکثر شتاب زمین، حداکثر سرعت زمین و حداکثر جابه‌جایی زمین آورده شده است. همچنین در شکل (۹) مقایسه بین پاسخ شتاب، پاسخ سرعت، پاسخ جابه‌جایی و جریان انرژی رکوردهای حوزه دور انتخابی نمایش داده می‌شود.

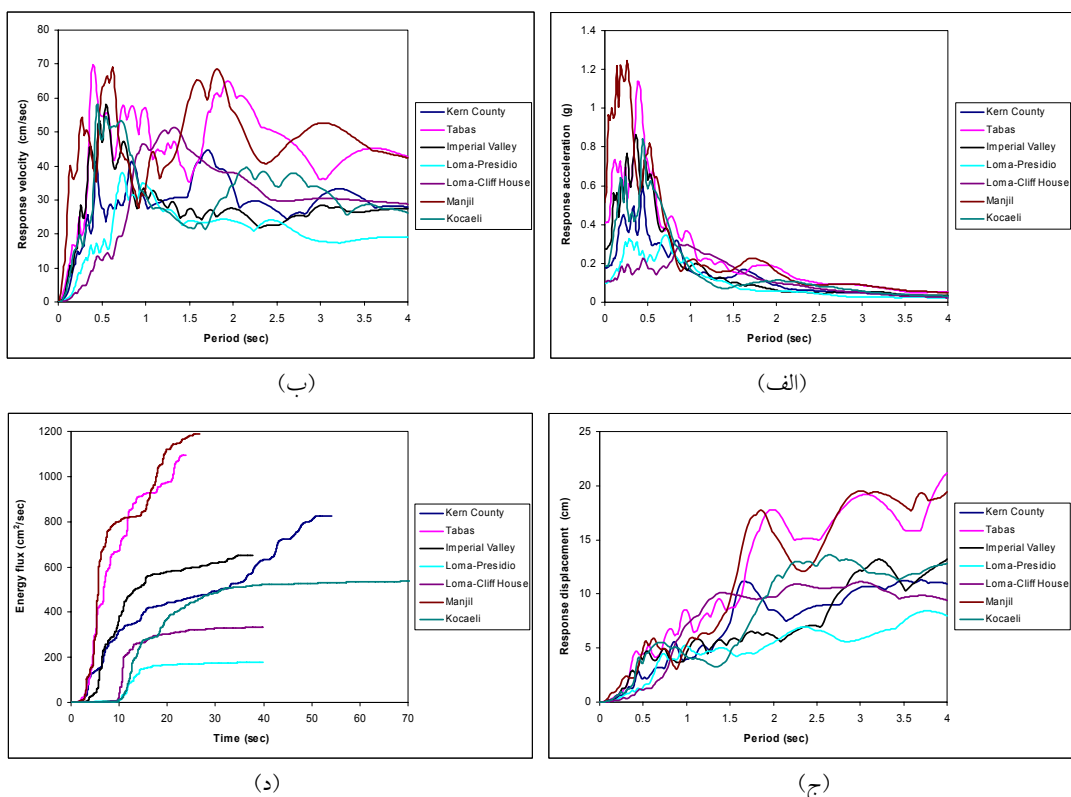
۵- تعیین طول مفصل پلاستیک

به منظور ساده‌سازی تخمین تغییر مکان یک ستون، انحناهای

مکان ۱۴/۱۴ میلیمتر گزارش شد، در حالی که برای تحلیل اجزای محدود حداکثر بار ۱۸۵/۴۲ کیلونیوتن در تغییر مکان جانبی ۱۴/۰۵ میلیمتر به دست آمد. همان طوری که از شکل مشخص است انطباق خوبی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد. این تطابق نشان می‌دهد که برنامه ANSYS را می‌توان با اطمینان در تحلیل سازه‌های بتن‌آرمه به کار برد [۲۳].

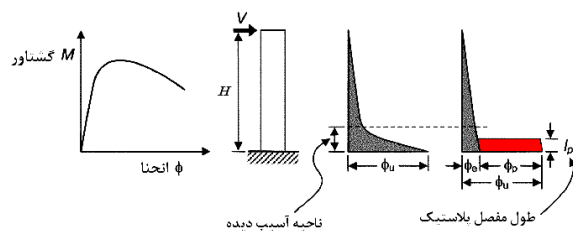
۴- شتاب نگاشتهای در نظر گرفته شده برای تحلیل

برای انجام تحلیلهای غیرخطی، پس از بررسیهای مختلف، ۷ رکورد به منظور پوشش محدوده‌ای از محتوای فرکانسی، مدت زمان و دامنه انتخاب شدند. رکوردهای زلزله‌های انتخابی



شکل ۹- مقایسه بین پاسخ (الف) شتاب، (ب) سرعت، (ج) جابه‌جایی و (د) جریان انرژی رکوردهای حوزه دور انتخابی

در ناحیه مفصل پلاستیک و در مرحله بار نهایی رخ می‌دهد. دوران مفصل پلاستیک را می‌توان یا با محاسبه ناحیه هاشورخورده به دست آورد و یا با حاصلضرب ارتفاع $(\phi_u - \phi_e)$ و عرض، l_p ، یک مستطیل معادل. در تحلیل ستونها، مقاومت فشاری بتن ۲۵ مگاپاسگال و تنش تسلیم فولاد ۴۰۰ مگاپاسگال فرض شده است.



شکل ۱۰- تعریف طول مفصل پلاستیک

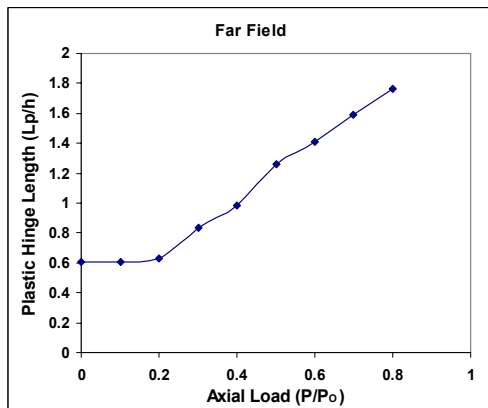
۱-۵- تأثیر بار محوری

به منظور بررسی تأثیر بار محوری بر روی طول مفصل پلاستیک ستونهای بتن‌آرمه تحت زمین‌لرزه، ۴۲ تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام می‌شود. نام مدلها و مشخصات تحلیلهای مذکور در جدول (۳) آورده شده است. در این تحلیلهای، یک ستون مربع‌شکل با سطوح مختلف بار محوری تحت ۷ رکورد انتخابی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. درصد فولاد طولی و نسبت ارتفاع

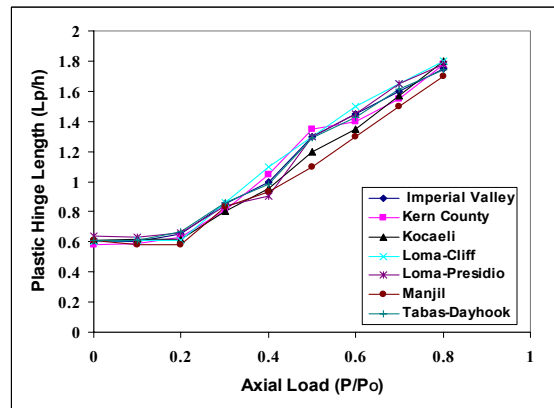
غیرالاستیک در مفاصل پلاستیک معمولاً در طول ناحیه مفصل پلاستیک ثابت فرض می‌شوند. بنابراین اگر طول مفصل پلاستیک شناخته شود، تغییر مکان انتهای یک ستون را می‌توان به راحتی با انتگرال‌گیری انحناها و برعکس به دست آورد. شکل (۱۰) تعریف مفصل پلاستیک را به طور نمایشی برای یک ستون بتنی نشان می‌دهد. ناحیه هاشورخورده در شکل (۱۰)، دوران پلاستیک بوده که علاوه بر دوران الاستیک

جدول ۳- مشخصات نمونه‌های مورد بررسی با بار محوری متغیر

نام مدل	سطح بار محوری ($\frac{P}{P_0}$)	نسبت ارتفاع به بعد ($\frac{H}{h}$)	درصد فولاد مصرفی ($\frac{A_s}{A_g}$)	رکورد زلزله
FF-P...-...	۰٫۱	۵	۱	Imperial Valley-Calexico Kern County-Taft Kocaeli-Ambarli Loma Prieta-Cliff House Loma Prieta-Presidio Manjil-Abbar Tabas-Dayhook
	۰٫۲			
	۰٫۳			
	۰٫۴			
	۰٫۵			
	۰٫۶			
	۰٫۷			
	۰٫۸			



(ب)



(الف)

شکل ۱۱- تاثیر بار محوری بر روی I_p تحت اثر (الف) رکوردهای انتخابی؛ (ب) مقدار متوسط داده‌ها

است، مندیس [۱۹] گزارش داد که طول مفصل پلاستیک ستونهای آزمایش شده در تحقیقاتش حساس به سطح بار محوری نیست. از آنجایی که کلیه ستونهای مطالعه شده توسط مندیس [۱۹] تحت اثر بار محوری کم ($P \leq 0.2P_0$) قرار داشتند و با توجه به نتایج حاصل از مطالعه حاضر در شکل (۱۱)، می‌توان به دلیل نتیجه‌گیری مندیس در گزارشات خود پی برد. مقدار تخمینی I_p برابر $0.6h$ را می‌توان با مقدار پیشنهادی $0.4h$ توسط پارک و همکاران [۱۲] و مقدار $0.5h$ توسط پاولی و پریستلی [۱۴] مقایسه کرد.

به بعد ستون ثابت و به ترتیب برابر یک درصد ($\rho_s = 0.01$) و $H/h = 5$ در نظر گرفته می‌شود.

برای هر حالت مطالعه شده در شکل، طول مفصل پلاستیک به کمک روند توضیح داده شده در قبل تخمین زده می‌شود. شکل (۱۱) نتایج حاصل از تحلیل را نمایش می‌دهد. همان‌طوری که از شکل دیده می‌شود، طول مفصل پلاستیک برای بارهای محوری کم ($P \leq 0.2P_0$) تقریباً ثابت است و تقریباً برابر $0.6h$ است. از بار محوری $0.2P_0$ ، با افزایش بار محوری، طول مفصل پلاستیک افزایش می‌یابد. لازم به یادآوری

جدول ۴- مشخصات نمونه‌های مورد بررسی با نسبت ارتفاع به بعد (H/h) متغیر

نام مدل	سطح بار محوری ($\frac{P}{P_0}$)	نسبت ارتفاع به بعد ($\frac{H}{h}$)	درصد فولاد مصرفی ($\frac{A_s}{A_g}$)	رکورد زلزله
FF-P..-A...-	۰٫۱ ۰٫۲ ۰٫۳ ۰٫۴ ۰٫۵	۲	۱	ImperialValley-Calexico KernCounty-Taft Kocaeli-Ambarli LomaPrieta-Cliff House LomaPrieta-Presidio Manjil-Abbar Tabas-Dayhook
		۳		
		۴		
		۵		
		۶		
		۷		
		۸		
		۹		
		۱۰		

عرضی به صورت فشرده قرار می‌گیرند باید بزرگتر از ناحیه مفصل پلاستیک پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه (۱٫۰h) از هر طرف تکیه‌گاه باشد. به طور خلاصه می‌توان گفت، طول مفصل پلاستیک پیشنهادی توسط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، برای ستونهایی که بار محوری زیادی را تحمل می‌کنند، غیرمحافظة‌کارانه است.

۲-۵- نسبت ارتفاع به بعد (H/h)

محققان فهمیدند که طول یک مفصل پلاستیک متأثر از نسبت H/h است. به منظور بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به بعد (H/h) بر طول مفصل پلاستیک (l_p)، ۲۱۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی، که مشخصات آنها در جدول (۴) آورده شده، انجام می‌گیرد. ستونهای بتن‌آرمه با سطوح مختلف بار محوری و نسبتهای مختلف ارتفاع به بعد تحت رکوردهای انتخابی تحلیل می‌شوند. در این گروه از تحلیلها مقدار فولاد طولی ثابت و برابر ۰٫۰۱ فرض می‌شود.

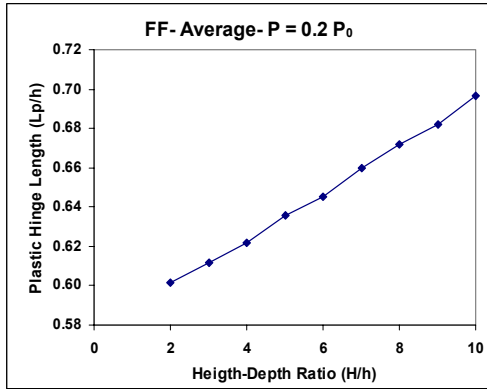
نتایج حاصل از تحلیل در شکلهای (۱۲) تا (۱۶) نمایش داده شده‌اند. همان طوری که از نتایج دیده می‌شود، برای یک سطح بار محوری مشخص، با افزایش نسبت H/h، طول مفصل

فصل بیستم از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۲۴]، طرح و اجرای ساختمانهای بتن‌آرمه (آیین‌نامه بتن ایران)، الزام می‌کند که به دلیل تسلیم خمشی حاصل از تغییرشکل‌های جانبی غیرالاستیک زیاد که در دو انتهای ستون رخ می‌دهد، به طول l_0 از دو انتهای ستون باید آرماتورهای عرضی فشرده به‌کار برده شود. طول l_0 ، ناحیه بحرانی، که از بر اتصال به اعضای جانبی اندازه‌گیری می‌شود نباید کمتر از مقادیر زیر در نظر گرفته شود: الف) یک ششم ارتفاع آزاد ستون؛ ب) ضلع بزرگتر مقطع مستطیلی شکل ستون یا قطر مقطع دایره‌ای شکل ستون؛ و ج) 450 میلی‌متر. بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان حداکثر بار محوری که می‌توان به ستون وارد کرد، در حدود $0.54P_0$ ، که محاسبات آن به دنبال آمده است.

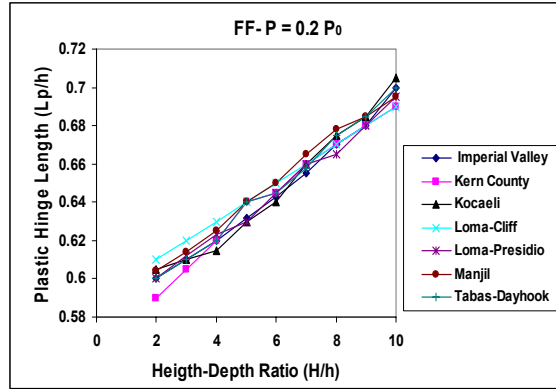
$$N_{fmax} = 0.8 [0.85 f_c (A_g - A_s) + f_y A_s] \Rightarrow N_{fmax} = 0.8P_0 \quad (17)$$

$$N = \varphi N_{fmax} = \varphi \times 0.8P_0 = 0.67 \times 0.8P_0 = 0.54P_0$$

با توجه به شکل (۱۱) طول مفصل پلاستیک معادل بار محوری $0.54P_0$ برابر $1.20h$ است که نزدیک به مقدار مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، $1.0h$ است. اما بنا بر آنچه که در خصوص مفصل پلاستیک توضیح داده شد، طول ناحیه‌ای که انحنای غیرالاستیک در آن توسعه می‌یابد، بزرگتر از طول معادل مفصل پلاستیک است. بنابراین، طول مورد نیاز که در آن آرماتورهای

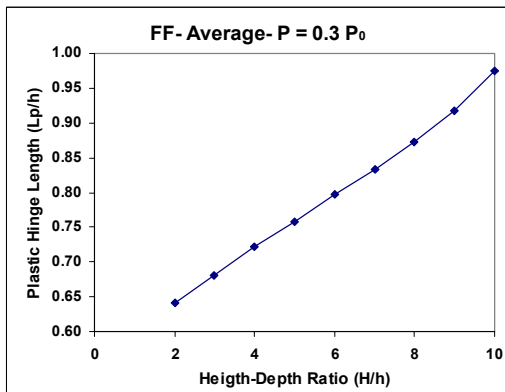


(ب)

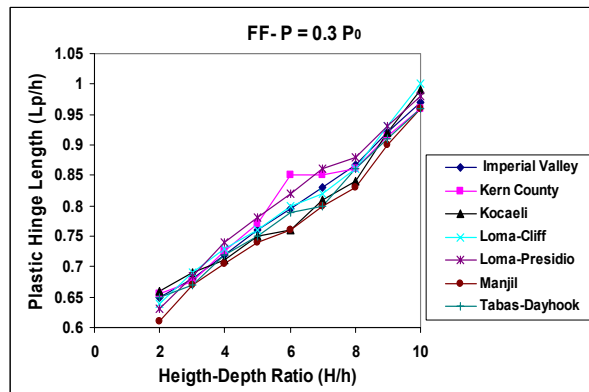


(الف)

شکل ۱۲- تاثیر نسبت ارتفاع به بعد (H/h) بر روی I_p در بار محوری $P=0.2P_0$ تحت اثر رکوردهای انتخابی؛ (ب) مقدار متوسط داده‌ها

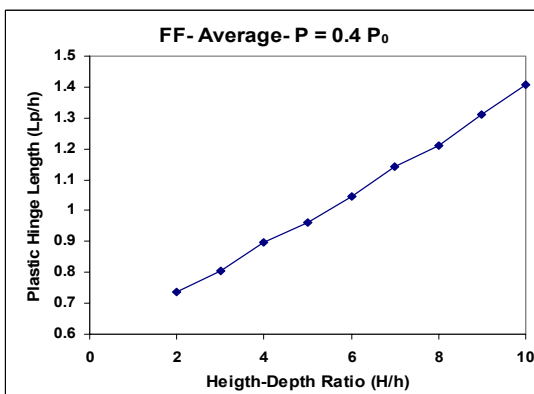


(ب)

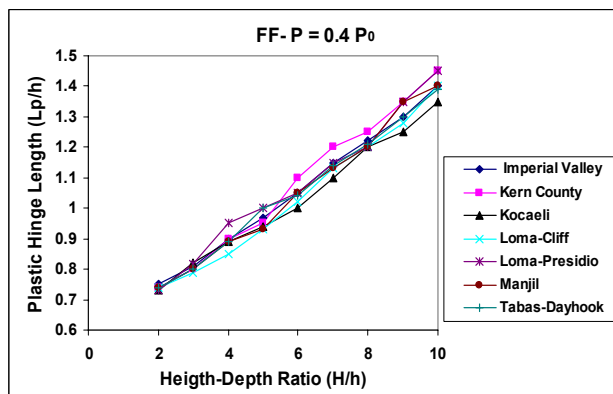


(الف)

شکل ۱۳- تاثیر نسبت ارتفاع به بعد (H/h) بر روی I_p در بار محوری $P=0.3P_0$ تحت اثر رکوردهای انتخابی؛ (ب) مقدار متوسط داده‌ها

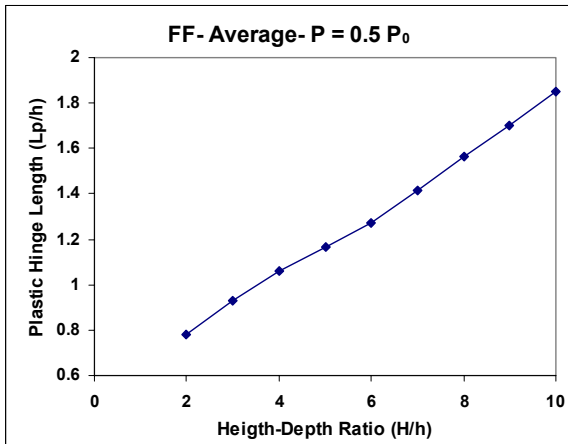


(ب)

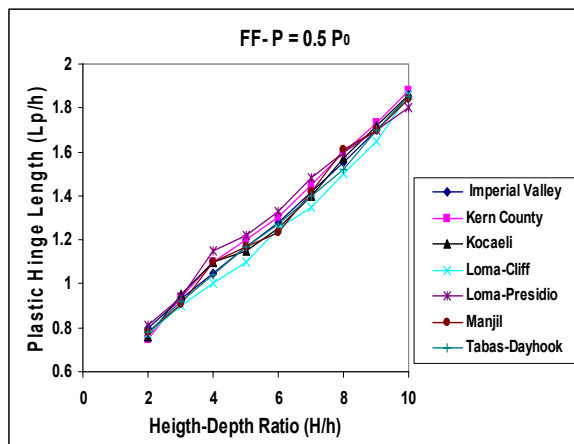


(الف)

شکل ۱۴- تاثیر نسبت ارتفاع به بعد (H/h) بر روی I_p در بار محوری $P=0.4P_0$ تحت اثر رکوردهای انتخابی؛ (ب) مقدار متوسط داده‌ها

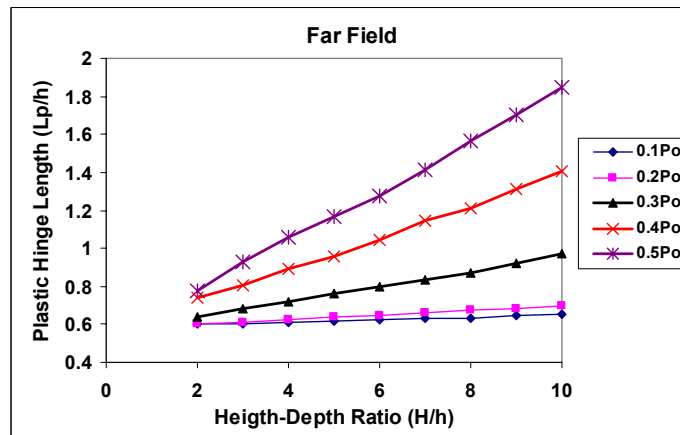


(ب)



(الف)

شکل ۱۵- تاثیر نسبت ارتفاع به بعد (H/h) بر روی I_p در بار محوری $P=0.5P_0$ تحت اثر رکوردهای انتخابی؛ (ب) مقدار متوسط داده‌ها



شکل ۱۶- رابطه بین طول مفصل پلاستیک و نسبت ارتفاع به بعد (H/h) در بارهای محوری مختلف تحت اثر رکوردهای انتخابی

نشان می‌دهد که برای نسبت $H/h=2/2$ ، تأثیر بار محوری بر روی I_p در مقایسه با اثرات مشاهده‌شده در نسبت‌های بالای H/h ، نسبتاً کم است.

تأثیر $P-\Delta$ بر روی رفتار ستونهای بتنی با مقایسه رفتار دو نمونه FF-P5-A5 و FF-P5-A7 بررسی می‌شود. نمونه‌های FF-P5-A5 و FF-P5-A7 به ترتیب دارای ابعاد مقطع ۶۰ و ۴۳ سانتیمتر با ارتفاع یکسان ۳۰۰ سانتیمتر بوده و تحت اثر بار محوری $P/P_0 = 0.5$ قرار دارند. این دو نمونه با توجه به مقاومت بتن و مقدار و جزییات فولادهای طولی و عرضی به گونه‌ای طراحی شدند که خصوصیات مقطعی مشابهی داشته

پلاستیک افزایش می‌یابد. با وجود این، برای بارهای محوری کم ($\approx 0.2P_0$)، افزایش طول مفصل پلاستیک به همراه افزایش نسبت H/h محسوس نیست.

برای یک مقدار مشخص H/h ، همزمان با افزایش بار محوری، افزایش می‌یابد. افزایش I_p در نسبت‌های کوچک H/h نسبت به نسبت‌های بزرگتر H/h قابل ملاحظه نیست. لازم به یادآوری است که پارک و همکاران [۱۲] یک گروه از ستونهای بتنی با نسبت $H/h=2/2$ را مورد آزمایش قرار دادند. بر اساس نتایج آزمایشات، آنها نتیجه گرفتند که I_p متاثر از بارهای محوری نبوده و مقدار $0.4h$ را پیشنهاد دادند. شکل (۱۶) دقیقاً

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل دو نمونه FF-P5-A5 و FF-P5-A7

مدل	Δ_y (mm)	ϕ_y ($\times 10^{-6}/\text{mm}$)	تغییر مکان نسبی %	μ_Δ	μ_ϕ
FF-P5-A5	۱۰٫۹	۵٫۵	۲٫۵	۵٫۸	۸٫۹
FF-P5-A7	۱۵٫۱	۵٫۹	۱٫۵	۲٫۶	۹٫۲

۵-۳- مقدار فولاد طولی ($\rho = A_s / A_g$)

متوک [۷] گزارش داد که با کاهش فولاد کششی خالص $A_s / (A_s - A_{s'})$ ، مساحت فولاد کششی، $A_{s'}$ مساحت فولاد فشاری و A_b مساحت فولاد بالانس، I_p افزایش می‌یابد. تأثیر فولاد کششی خالص توسط کورلی [۶] بیشتر مورد مطالعه قرار گرفت. بر خلاف آنچه گفته شد، مندیس [۱۹] گزارش داد که با افزایش فولاد کششی، طول مفصل پلاستیک افزایش می‌یابد. لازم به یادآوری است که تمامی این نتیجه‌گیریها بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات مربوط به تیرهای بتن‌آرمه بوده است.

لذا به دلیل فقدان اجماع کلی در بین محققان و به منظور بررسی تأثیر فولاد کششی بر طول مفصل پلاستیک (I_p)، ۲۱۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی، که مشخصات آنها در جدول (۶) آورده شده، انجام می‌گیرد. ستونهای بتن‌آرمه با سطوح مختلف بار محوری و مقادیر مختلف فولاد طولی تحت اثر رکوردهای انتخابی تحلیل می‌شوند. در این گروه از تحلیلها نسبت ارتفاع به بعد ستون ثابت و برابر ۵ فرض می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل در شکلهای (۱۷) الی (۲۱) آورده شده است. همان طوری که این نتایج نشان می‌دهند تحت اثر رکوردهای انتخابی با افزایش فولاد کششی طول مفصل پلاستیک افزایش می‌یابد.

در کارهای آزمایشگاهی بای و باراک [۲۲] به سبب اثرات محصورشدگی در محل اتصال ستون به فونداسیون، سطوح خسارت دیده به فاصله تقریباً $0.25h$ از فونداسیون فاصله گرفتند. لذا این دو محقق در روابط پیشنهادی خود برای طول مفصل پلاستیک مقدار $0.25h$ را از مقادیر حاصل از کارهای

باشند. بنابراین، تنها تفاوت بین این دو نمونه نسبت H/h بوده که این نسبت در دو نمونه FF-P5-A5 و FF-P5-A7 به ترتیب ۵ و ۷ است. نتایج حاصل از تحلیل این دو نمونه در جدول (۵) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش نسبت H/h از ۵ به ۷ کاهش قابل ملاحظه‌ای در شکل‌پذیری تغییر مکانی از ۵٫۸ به ۲٫۶ به وجود می‌آید. همچنین، ظرفیت تغییر مکان نسبی از ۲٫۵ درصد به ۱٫۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش در ظرفیت تغییر مکان نسبی به سبب اثر $P-\Delta$ است زیرا اثر $P-\Delta$ در نسبتهای H/h بزرگ تقویت می‌شود.

این مشاهدات تا حدی با مقادیر حاصله از روابط پارک و همکاران [۱۲] تناقض دارد. همان طوری که قبلاً بحث شد این معادلات نشان می‌دهند که ظرفیت تغییر مکان نسبی با افزایش نسبت H/h افزایش می‌یابد. این تناقض به دلیل اثر بار محوری است. اگر اثر بار محوری که اثر $P-\Delta$ است به درستی در نظر گرفته نشود یک رابطه خطی بین نسبت H/h و ظرفیت تغییر مکان نسبی به دست می‌آید. به عبارت دیگر هنگامی که اثر $P-\Delta$ مهم نباشد، افزایش نسبت H/h تأثیر مثبتی بر روی ظرفیت تغییر مکان نسبی دارد. این حالت زمانی برای تیرها و ستونهای بتنی صحیح بوده و مصداق دارد که سطوح بار محوری بسیار کم یا نسبت H/h بسیار کم استفاده شود. هنگامی که سطح بار محوری بالاست، ظرفیت تغییر مکان برای ستونها با نسبت H/h بالا توسط اثر $P-\Delta$ محدود می‌شود. بنابراین به منظور بررسی تأثیرات نسبت H/h بر روی رفتار ستونها، تأثیرات سطح بار محوری باید در نظر گرفته شود.

جدول ۶- مشخصات نمونه‌های مورد بررسی با نسبت فولاد طولی ($\rho_s = \frac{A_s}{A_g}$) متغیر

نام مدل	سطح بار محوری ($\frac{P}{P_0}$)	نسبت ارتفاع به بعد ($\frac{H}{h}$)	درصد فولاد مصرفی ($\frac{A_s}{A_g}$)	رکورد زلزله
FF-P...S...-	۰٫۱	۵	۱	ImperialValley-Calexico KernCounty-Taft Kocaeli-Ambarli LomaPrieta-Cliff House LomaPrieta-Presidio Manjil-Abbar Tabas-Dayhook
	۰٫۲		۲	
	۰٫۳		۳	
	۰٫۴		۴	
	۰٫۵		۵	
			۶	
			۷	
			۸	

تحلیل‌های حداقل مربعات استفاده می‌شود؛ که نهایتاً بر اساس گروه‌های مختلفی از تحلیل‌های حداقل مربعات و نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، رابطه جدیدی برای تعیین طول مفصل پلاستیک، l_p ، ستون‌های بتن‌آرمه تحت اثر زمین‌لرزه به شکل زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{l_p}{h} = \left[0.4 \left(\frac{P}{P_0} \right) + 3 \left(\frac{A_s}{A_g} \right) - 0.1 \right] \left(\frac{H}{h} \right) + 0.6 \geq 0.6 \quad (18)$$

در معادلات فوق، h بعد مقطع عضو، P بار محوری وارد به ستون، P_0 ظرفیت محوری ستون، A_s سطح مقطع فولاد کششی، A_g سطح مقطع بتن، و H ارتفاع عضو است.

به منظور صحت‌سنجی معادلات پیشنهادی، طول مفصل پلاستیک چهار نمونه مشخص به کمک معادلات مختلف محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی بای و باراک [۲۲] در جدول (۷) مقایسه می‌شوند. نتایج مقایسه نشان می‌دهند که استفاده از معادله پیشنهادی منجر به تخمین‌های مناسبی از طول مفصل پلاستیک می‌شود. همچنین، نتایج مقایسه معادله پیشنهادی با معادلات گذشتگان نشان می‌دهد، استفاده از برخی معادلات سبب می‌شود که مقادیر طول مفصل پلاستیک در بارهای محوری بالا، در حد پایینی تخمین زده شوند و بالعکس. اما

آزمایشگاهی کم کردند. با اضافه کردن مقدار $0.25h$ و در نظر گرفتن تغییرشکل‌های برشی و لغزش آرماتورها در تحلیل، مقادیر تحلیلی انطباق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارند.

۶- رابطه پیشنهادی برای تعیین طول مفصل پلاستیک

طول یک مفصل پلاستیک به پارامترهای زیادی بستگی دارد که از جمله آنها می‌توان به (۱) سطح بار محوری؛ (۲) گرا دیان گشتاور؛ (۳) سطح تنش برشی در ناحیه مفصل پلاستیک؛ (۴) خصوصیات مکانیکی آرماتورهای طولی و عرضی؛ (۵) مقاومت بتن؛ (۶) میزان محصورشدگی و (۷) مشخصه‌های مختلف زلزله‌ها اشاره کرد. معادلات موجود در تحقیقات گذشتگان بیشتر این پارامترها را در نظر نمی‌گیرند. لذا اختلاف زیادی بین مقادیر مختلف مفاصل پلاستیک محاسبه‌شده به کمک این معادلات تجربی وجود دارد. از سویی، نتایج حاصل از تحلیل‌های گذشته نشان داد، بار محوری، نسبت ارتفاع به بعد و مقدار فولاد طولی، پارامترهای اصلی در تخمین طول مفصل پلاستیک هستند. بر اساس این مشاهدات و برای سادگی، ارتباطی خطی بین پارامترها ($\rho = A_s / A_g$ و H/h ، P/P_0) فرض می‌شود. برای تعیین یک ضریب مشخص برای هر یک از پارامترهای فوق، از

جدول ۷- طول مفاصل پلاستیک محاسبه شده از معادلات مختلف

معدلات پیشنهادی	اندازه‌گیری شده	شیخ و خوری	پاولی و پرستلی	پارک و همکاران	متوک	کورلی	بیکر	نمونه
۱,۰۴h	۰,۹۷h	۱,۰h	۰,۸h	۰,۴h	۰,۷h	۰,۴۹h	۰,۶h	S24-2UT
۱,۲۴h	۱,۱۹h	۱,۰h	۰,۹۶h	۰,۴h	۰,۸h	۰,۵۲h	۰,۶۵h	S17-3UT
۰,۶۹h	۰,۷۳h	۱,۰h	۰,۷۲h	۰,۴h	۰,۷h	۰,۴۹h	۰,۶۲h	S24-4UT
۰,۶۹h	۰,۷۲h	۱,۰h	۰,۷۲h	۰,۴h	۰,۷h	۰,۴۹h	۰,۵۶h	S24-5UT

جدول ۸- مشخصات مکانیکی بتن و فولاد

فولاد عرضی		فولاد طولی		بتن	قاب
تیر	ستون	تیر	ستون		
$\phi 10@100$ $f_y=394 \text{ MPa}$	$\phi 10@100$ $f_y=394 \text{ MPa}$	$8 \phi 16$ $f_y=332 \text{ MPa}$	$12 \phi 16$ $f_y=346 \text{ MPa}$	۳۱ MPa	SN30

جدول ۹- مقایسه طولهای مفاصل پلاستیک تحلیلی و آزمایشگاهی (میلیمتر)

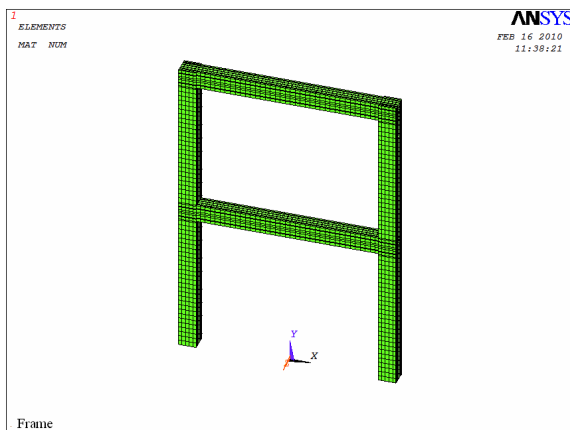
$\frac{l_p(\text{Pro})}{l_p(\text{Exp})}$	$\frac{l_p(\text{Anl})}{l_p(\text{Exp})}$	معدلات پیشنهادی	تحلیلی	اندازه‌گیری شده	$\frac{H}{h}$	$\frac{A_s}{A_g}$	$\frac{P}{P_0}$	ستون
۱,۰۶	۱,۰۴	۳۰۸	۳۰۲	۲۹۰	۷	۰,۰۲	۰,۲	طبقه اول
۰,۹۳	۰,۹۴	۳۲۲	۳۲۸	۳۴۶	۸	۰,۰۲	۰,۲	طبقه دوم

بود. شکل (۲۲-ب) نحوه راه‌اندازی آزمایش را نمایش می‌دهد. نوع بارگذاری مورد استفاده در آزمایش شامل بارهای ثقلی و چرخه‌ای بود.

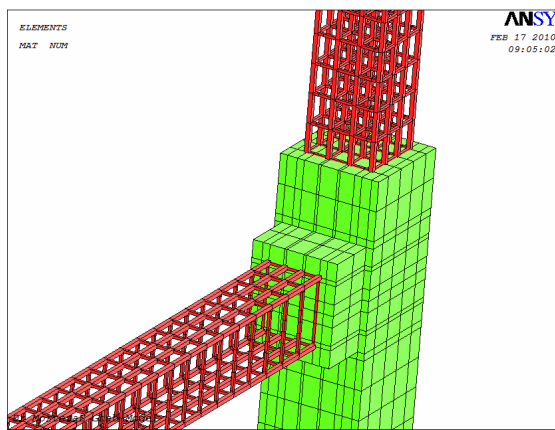
خصوصیات بتن و فولاد مورد استفاده در تحلیل در جدول (۸) آورده شده است. برای ساخت مدل اجزای محدود در برنامه ANSYS، از المان SOLID65 برای مدل کردن بتن و جزء LINK8 برای مدل نمودن آرماتورهای فولادی به کار رفت. نحوه مدلسازی قاب، حجم تولیدشده و مش‌بندی قاب به همراه چیدمان فولادهای طولی و عرضی در برنامه ANSYS در شکل‌های (۲۳) الی (۲۵) آورده شده است. شکل (۲۶) الگوی ترک‌خوردگی قاب را در تغییر مکان نسبی ۴ درصد نشان می‌دهد. بتن در ناحیه تحتانی سمت راست تیر طبقه دوم به سبب فشار زیاد خرد شد. خردشدگی مشابهی در بخش فوقانی

استفاده از معادله پیشنهادی سبب می‌شود که چه در بار محوری پایین و چه در بار محوری بالا، تخمین قابل قبولی از طول مفصل پلاستیک زده شود.

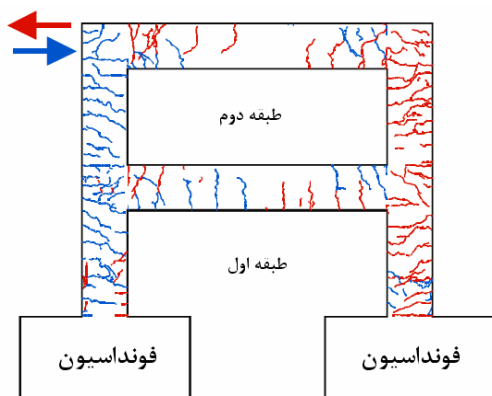
همچنین در ارزیابی دیگری برای بررسی صحت معادله پیشنهادی، قاب آزمایش شده توسط بچتولا و همکاران مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. بچتولا و همکاران [۲۵] دو قاب بتن‌آرمه دو طبقه و تک دهانه را به منظور بررسی رفتار ساختمانهای بتن‌آرمه در دانشگاه کیوتو ژاپن مورد آزمایش قرار دادند. این قابها بر اساس دستورالعمل سال ۱۹۹۹ ژاپن طراحی و ساخته شدند. سطح مقطع ستونها 350×350 میلیمتر و برای تیرها 350×300 میلیمتر بود. ارتفاع طبقه اول و دوم به ترتیب 2600 میلیمتر و 3200 میلیمتر بودند. همان‌طور که در شکل (۲۲-الف) نمایش داده شده، طول دهانه 4000 میلیمتر



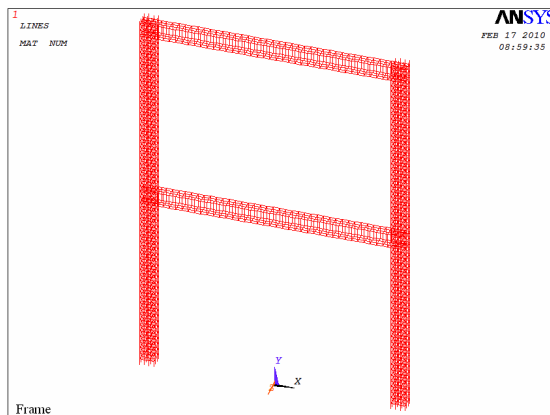
شکل ۲۴- نحوه مش بندی قاب



شکل ۲۳- نحوه مدل سازی قاب و حجم تولید شده



شکل ۲۶- الگوی ترک خوردگی قاب SN30



شکل ۲۵- چیدمان فولادهای طولی و عرضی در قاب

جدول ۹- مقایسه طولهای مفاصل پلاستیک تحلیلی و آزمایشگاهی (میلیمتر)

$\frac{l_p (Pr o)}{l_p (Exp)}$	$\frac{l_p (Anl)}{l_p (Exp)}$	معادلات پیشنهادی	تحلیلی	اندازه گیری شده	$\frac{H}{h}$	$\frac{A_s}{A_g}$	$\frac{P}{P_0}$	ستون
۱,۰۶	۱,۰۴	۳۰۸	۳۰۲	۲۹۰	۷	۰,۰۲	۰,۲	طبقه اول
۰,۹۳	۰,۹۴	۳۲۲	۳۲۸	۳۴۶	۸	۰,۰۲	۰,۲	طبقه دوم

از دقت بالای معادله پیشنهادی دارد.

سمت چپ تیر طبقه دوم نیز مشاهده شد.

طول مفصل پلاستیک نمونه تحلیلی به کمک معادله پیشنهادی محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی در جدول (۹) مقایسه می شود. مقایسه نتایج آزمایشگاهی، تحلیلی و معادله پیشنهادی نشان می دهد که انطباق خوبی بین سه گروه نتایج وجود دارد. حداکثر انحراف بین مقادیر ۷ درصد بوده که نشان

۷- نتیجه گیری

مفاصل پلاستیک در نواحی گشتاور حداکثر ستونهای بتن آرمه شکل می گیرد. تعیین طول مفصل پلاستیک یک گام

در آن خاموت فشرده مورد استفاده قرار می‌گیرد از $1/10h$ به $1/5h$ افزایش داده شود.

۴. مدل‌های تحلیلی تحت بارهای محوری بالا، مفاصل پلاستیک طولتری را نسبت به مدل‌های با بار محوری کمتر توسعه دادند.

۵. نمونه ستونهای بتن‌آرمه‌ای که ضوابط بخش لرزه‌ای آیین‌نامه بتن ایران را رعایت می‌کنند، تحت اثر بار محوری زیاد ($P/P_0=0.5$) در نسبت $H/h=5$ رفتار لرزه‌ای (ظرفیت تغییرمکان $2/6$ درصد) مناسبی از خود نشان دادند. از سوی دیگر، نمونه دیگر با رفتار مقطعی مشابه اما نسبت $H/h=7$ ، کاهش ظرفیت تغییرمکان نسبی $1/6$ درصد از خود نشان داد. این کاهش در ظرفیت تغییرمکان نسبی به سبب اثر $P-\Delta$ است. بنابراین ستونهایی که سازگار با ضوابط بخش لرزه‌ای آیین‌نامه بتن ایران هستند، انتظار می‌رود که تحت اثر محدوده وسیعی از بارهای محوری ($P/P_0 \leq 0.5$) رفتار مناسبی از خود بروز دهند، به شرط آنکه نسبت H/h در این ستونها از 5 بیشتر نباشد.

۶. رابطه خطی بین شکل‌پذیری انحنایی و شکل‌پذیری تغییرمکانی، که توسط پارک و پاولی پیشنهاد شده، باید با دقت در تخمین ظرفیت تغییرشکل ستونها مورد استفاده قرار گیرد زیرا این رابطه نقش اثر $P-\Delta$ را بر روی رفتار ستون در نظر نمی‌گیرد.

مهم و تعیین‌کننده در پیش‌بینی پاسخ بار جانبی- تغییرشکل نسبی ستونها است. از آنجایی که تعیین طول مفصل پلاستیک به کمک روشهای تحلیلی مشکل است، اغلب این مقدار به کمک داده‌های آزمایشگاهی یا معادلات تجربی تخمین زده می‌شود.

در این مقاله، نتایج یک مطالعه تحلیلی جامع در خصوص طول مفصل پلاستیک ستونهای بتن‌آرمه ارائه شد. 462 تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی به منظور ارزیابی طولهای مفاصل پلاستیک ستونهای بتن‌آرمه تحت اثر زمین‌لرزه انجام و نتایج حاصل از آنها ارائه شد. برخی از نتایج این بررسی به طور خلاصه از این قرار است:

۱. نتایج تحلیلی ارتباط و سازگاری خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشتند. این مطلب موید این قضیه است که، تحلیل اجزای محدود غیرخطی یک ابزار قدرتمند در مطالعه رفتار انواع مختلف اجزای بتن‌آرمه تحت اثر زمین‌لرزه است.
۲. مقادیر حاصل از روش پیشنهادی به منظور محاسبه طول مفصل پلاستیک ارتباط خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشتند.
۳. نتایج نشان می‌دهند برای ستونهایی که بار محوری زیادی را تحمل می‌کنند طول مفصل پلاستیک پیشنهادی توسط آیین‌نامه بتن ایران رضایت‌بخش نبوده و در برخی موارد غیرمحافظه‌کارانه است. پیشنهاد می‌شود که طول نواحی که

واژه‌نامه

1. tension-stiffening

۱. مرتضایی، ع.، "پاسخ دینامیکی ساختمانهای بتن‌آرمه به زلزله‌های حوزه نزدیک"، رساله دکتری، دانشگاه سمنان، سمنان، ۱۳۸۹.

2. Kheyroddin, A., and Mortezaei, A., "The Effect of Element Size and Plastic Hinge Characteristics on Nonlinear Analysis of RC Frames," *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B, Engineering, Vol. 32(B5), pp. 451-470, 2008.
3. Baker, A.L.L., *Ultimate load theory applied to the design of reinforced and prestressed concrete frames*. Concrete Publications Ltd., London, UK, p. 91 1956.

2. Shape factor

مراجع

4. Baker, A.L.L., and Amarakone, A.M.N., "Inelastic Hyperstatic Frames Analysis," *Proc. of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete*, ASCE-ACI, Miami, pp. 85-142, 1964.
5. Mattock, A.H., "Rotational capacity of Hinging Regions in Reinforced Concrete Beams," *Proc. of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete*, ASCE-ACI, Miami, pp. 143-181, 1964.
6. Corley, W.G., "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 92(ST5), pp. 121-146, 1966.

7. Mattock, A.H., (Discussion of) "Rotational Capacity of Hinging Regions in Reinforced Concrete Beams," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 93(ST2), pp. 519-522, 1967.
8. Sawyer, H.A., "Design of Concrete Frames for Two Failure Stages," *Proceedings of international symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete; Miami, ACI, SP-12*, pp. 405-431, 1964.
9. Cohn, M.Z., "Rotational Compatibility in the Limit Design of Reinforced Concrete Beams," *Proceedings of the International Symposium on the Flexural mechanics of reinforced concrete, ASCE-ACI, Miami, Fla.*, pp. 359-382, 1964.
10. Riva, P., and Cohn, M.Z., "Engineering Approaches to Nonlinear Analysis of Concrete Structures," *ASCE, Journal of Structural Engineering Division*, Vol. 116, No. 8, pp. 2162-2186, 1990.
11. Riva, P., and Cohn, M.Z. "Rotation Capacity of Structural Concrete Members," *Magazine Concrete Research*, Vol. 46, No. 168, pp. 223-234, 1994.
12. Park, R., Priestley, M.J.N., and Gill, W.D. "Ductility of Square-confined Concrete Columns," *ASCE, Journal of Structural Division*, Vol. 108(ST4), pp. 929-950, 1982.
13. Priestley, M.J.N., and Park, R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 84(1), pp. 61-76, 1987.
14. Paulay, T., and Priestley, M.J.N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley and Sons, New York, 1992.
15. Sakai, K., and Sheikh, S.A., "What Do We Know about Confinement in Reinforced Concrete Columns? (A Critical Review of Previous Work and Code Provisions)," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 2, pp. 192-207, 1989.
16. Sheikh, S.A., and Khoury, S.S., "Confined Concrete Columns with Stubs," *ACI Structural Journal*, Vol. 90(4), pp. 414-431, 1993.
17. Sheikh, S.A., Shah, D.V., and Khoury, S.S., "Confinement of High-Strength Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 91(1), pp. 100-111, 1994.
18. Bayrak, O., and Sheikh, S.A., "Confinement Reinforcement Design Considerations for Ductile HSC Columns," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124(9), pp. 999-1010, 1998.
19. Mendis, P., "Plastic Hinge Lengths of Normal and High-Strength Concrete in Flexure," *Advances in Structural Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 189-195, 2001.
20. Bae, S., and Bayrak, O., "Plastic Hinge Length of Reinforced Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 105(3), pp. 290-300, 2008.
21. Atalay, M. B., and Penzien, J., "The Seismic Behavior of Critical Regions of Reinforced Concrete Components as Influenced by Moment, Shear and Axial Force," Report No. EERC 75-19, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 226 pp, 1975.
22. Bae, S., and Bayrak, O., "Seismic Performance of Full-Scale Reinforced Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 105(2), pp. 123-133, 2008.
23. Mortezaei, A., Zahrai, S.M. Seismic Finite Element Analysis of Irregular Reinforced Concrete Buildings in Elevation, The Third International Conference on Concrete and Development, April 27-28, 2009, Tehran, Iran.
۲۴. مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمانهای بتن آرمه، وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت امور مسکن و ساختمان، ۱۳۸۸.
25. Bechtoula, H., Sakashita, M., Kono, S., Watanabe, F., and Eberhard, M. "Simulation of Damage Progression in Lower Stories of 11-story Building," *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada*, paper No. 3246, 2004.