

پایداری قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی با در نظر گرفتن امکان کمانش خارج از صفحه

محمد تقی کاظمی (دانشیار)

موسی موسی پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در اغلب ساختمان‌های شهری ایران به علت معماری رایج، منظور کردن مهار^۱‌های ضربدری و A در جهت شرقی-غربی ساختمان، کاری مشکل است. زیرا عمده‌ی درب و پنجره‌ها در اطراف شمالی و جنوبی ساختمان قرار دارند. یکی از شیوه‌هایی که مورد توجه قرار گرفته، استفاده از مهارهای دروازه‌یی است. کار با این مهار مشابه مهار نوع A است. با این تفاوت که هر ضلع A به صورت خط شکسته‌یی در آمده و محل شکستگی به وسیله‌ی عضو دیگری به گوشه‌ی قاب وصل می‌شود. مهار دروازه‌یی به لحاظ تأمین فضای بازتر معماری بر مهار نوع A ارجحیت دارد ولی سختی آن کمتر است. همچنین در این‌گونه مهارها امکان کمانش خارج از صفحه وجود داشته و اتصال اعضای مهار به یکدیگر ضوابط ویژه‌یی را می‌طلبد. در این نوشتار، رفتار این نوع سیستم مهاربندی با در نظر گرفتن امکان کمانش خارج از صفحه، ارزیابی شده است. بررسی پایداری مهار دروازه‌یی، شامل ارزیابی پایداری جانبی آن با هندسه‌های مختلف و شرایط متفاوت اتصال اعضای مهار است. نتایج نشان می‌دهد که برای جلوگیری از کمانش خارج از صفحه اعضای مهار، نسبت ممان اینرسی خارج از صفحه به داخل صفحه در مقاطع انتخابی، نباید از یک مقدار معین، بسته به شرایط هندسی قاب، کمتر باشد.

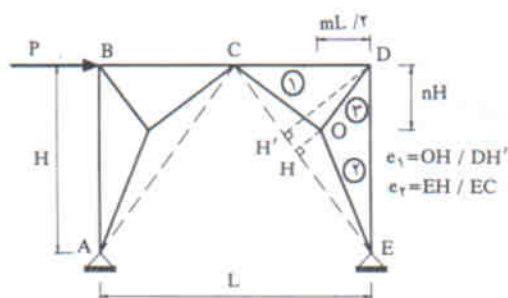
مقدمه

یکی از روش‌های رایج برای مقابله با زلزله در ساختمان‌های فولادی، استفاده از انواع مهارهاست. اهداف اصلی طراحی لرزه‌یی سازه‌ها تأمین مقاومت، سختی، پایداری و شکل‌پذیری است. به‌ویژه در فلسفه‌های جدیدتر طراحی، شکل‌پذیری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. علاوه بر موارد فوق که بیشتر جنبه‌ی سازه‌یی دارند، طراح باید محدودیت‌ها و اهداف دیگری را که عمدتاً غیرسازه‌یی‌اند در نظر داشته باشد. به‌خصوص ملاحظات معماری نقش تعیین‌کننده‌یی در انتخاب هندسه‌ی پادبند ساختمان دارد. پذیرش هرگونه‌یی از مهارها توسط آیین‌نامه، پس از انجام آزمایش‌های مختلف و تحلیل‌های دقیق توسط متخصصین و پژوهشگران صورت می‌پذیرد. اگر چه هنوز تعداد قابل توجهی از شیوه‌های مهاربندی مورد تأیید صریح آیین‌نامه‌ها قرار نگرفته‌اند. در کشور ما با این‌که تعداد آزمایش‌های بسیار اندکی صورت گرفته، بدون پشتوانه‌ی تحلیل‌های دقیق، متأسفانه انواع متنوعی از مهارهای ابتکاری رواج یافته است که هیچ‌گونه ضابطه‌یی نیز در مورد آنها وجود ندارد. یکی از این مهارها «مهار دروازه‌یی» است که مشابه مهار نوع A است. با این تفاوت که در مهار A هر ضلع آن به صورت خط شکسته‌یی

درآمده و محل شکستگی به وسیله‌ی عضو دیگری به گوشه‌ی قاب وصل می‌شود. مهار دروازه‌یی به لحاظ تأمین فضای بازتر معماری بر مهار نوع A ارجحیت دارد، ولی سختی آن کمتر است و امکان کمانش خارج از صفحه در آن وجود دارد. مسئله‌ی دیگری که در مورد این مهارها مطرح است، رفتار اتصالات اعضای مهار در آنهاست. از آنجا که اغلب سیستم‌های مهاربندی در کشور ما در قاب‌هایی با اتصالات مفصلی به کار می‌روند، بخش اصلی سازه برای جذب انرژی زلزله و تأمین پایداری همین مهارها خواهند بود. نکته‌ی جالب در مورد مهارهای دروازه‌یی آن است که در اثر اعمال بار به سمت راست، هر عضو مهاربندی سمت چپ در کشش و هر سه عضو مهار سمت راست در فشار قرار می‌گیرند، که خلاف انتظار در نگاه اول است. در این سیستم، با از دست رفتن مقاومت سه عضو فشاری در یک سمت، تیر به‌طور ناگهانی تحت اثر نیروی شدیدی قرار گرفته و سیستم ناپایدار می‌شود.^[۱]

رفتار کلی قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی

یک قاب مهاربندی دروازه‌یی مطابق شکل ۱ در نظر بگیرید. اتصالات اعضا در قاب با مهاربندی دروازه‌یی همانند سایر قاب‌های



شکل ۳. تعریف مختصات گره میانی در صفحه‌ی قاب.

هندسه‌ی مهاربندی متقارن فرض می‌شود. پارامتر e_1 که نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی گره میانی از ضلع Δ است به صورت:

$$e_1 = \frac{OH}{DH'} \quad (الف-۱)$$

تعریف شده و پارامتر e_2 که نشان‌دهنده‌ی موقعیت گره میانی در راستای ضلع Δ است به صورت:

$$e_2 = \frac{EH}{EC} \quad (ب-۱)$$

در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، مقدار $e_1 = 0$ بیان‌کننده‌ی قرار گرفتن گره میانی روی اضلاع Δ است. با توجه به محدود بودن ناحیه‌ی حرکت گره میانی، با مشخص بودن پارامتر e_1 ، محدوده‌ی پارامتر e_2 به دست می‌آید. مقدار این محدوده به صورت زیر قابل بیان است:

$$\text{Min } e_2 = e_1 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \quad (الف-۲)$$

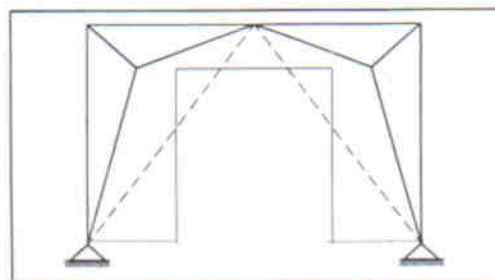
$$\text{Max } e_2 = 1 - e_1 \left(\frac{L/2}{D} \right)^2 \quad (ب-۲)$$

که در آن:

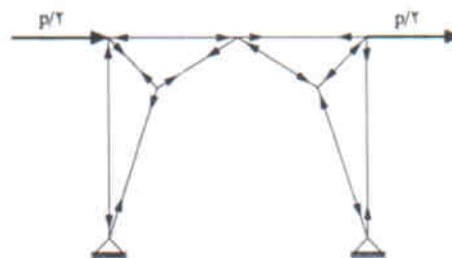
$$D^2 = \left(\frac{L}{2} \right)^2 + H^2 \quad (ج-۲)$$

پایداری قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی

در شکل ۴، هندسه‌ی تغییر شکل یافته‌ی نمونه‌یی از قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی مشاهده می‌شود. خطوط نقطه‌چین نشانگر هندسه‌ی قبل از اعمال بار جانبی است، و خطوط پرنحوی تغییر شکل قاب تحت اثر بار جانبی اعمال شده به آن را نشان می‌دهد. در این شکل سازوکار خرابی سازه در صفحه‌ی قاب با فرض تأمین پایداری کافی در جهت خارج از صفحه، براساس کمانش اعضای فشاری و تشکیل مفصل خمیری در وسط تیر، نشان داده شده است. با این فرض که تیر در فاصله‌ی دو ستون ممتد است، ملاحظه می‌شود که



شکل ۱. نمونه‌یی از قاب با مهاربندی دروازه‌یی.



شکل ۲. مسیر انتقال نیروی جانبی توسط اعضای قاب.

مهاربندی شده فرض می‌شود. یعنی اتصالات تیر به ستون و همچنین اعضای مهاربندی به قاب، در صفحه‌ی قاب مفصلی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه رفتار قاب از نوع خرابی‌ی بوده و نیروهای ایجاد شده در اعضا عمدتاً محوری است. سیستم انتقال نیروهای جانبی توسط این گونه مهاربندی‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

آنچه در نگاه اول در مهاربندی‌های دروازه‌یی با اهمیت جلوه می‌کند، موقعیت اتصال اعضای مهاربندی به یکدیگر (گره‌های میانی) در صفحه‌ی قاب است. زیرا با تغییر موقعیت این گره‌ها در صفحه‌ی قاب، فضای بازشوی قاب تغییر می‌کند. به عبارت دیگر هر چه گره‌های میانی به سمت گوشه‌ی قاب حرکت کنند از بازشوی بزرگ‌تری می‌توان استفاده کرد ولی در عین حال سختی قاب در برابر بارهای جانبی کاهش می‌یابد. لذا لزوم انتخاب یک موقعیت مناسب برای گره میانی در صفحه‌ی قاب به منظور برآورده کردن نیازهای معماری در عین تأمین نیازهای سازه‌یی احساس می‌شود.

تعریف موقعیت گره میانی بر مبنای مهار Δ

با توجه به اینکه هدف، بررسی رفتار مهاربندی دروازه‌یی با توجه به موقعیت گره میانی است، برای مشخص شدن وضعیت گره میانی در صفحه‌ی قاب نسبت به اضلاع Δ ، محورهای مختصات منطبق بر اضلاع Δ و عمود بر آن در نظر گرفته شده‌اند. وضعیت گره میانی براساس این مختصات در شکل ۳ نشان داده شده است. در واقع دو خروج از مرکزیت برای گره میانی تعریف می‌شود. یکی خروج از مرکزیت در جهت عمود بر ضلع Δ و دیگری در راستای آن.

چنین شرایطی، اعضای مهار علاوه بر تحمل نیروی محوری، مقداری خمش خارج از صفحه‌ی قاب را نیز متحمل می‌شوند. یعنی این اعضا در جهت خارج از صفحه، دیگر اعضای خرابایی نیستند بلکه به صورت یک تیر-ستون رفتار خواهند کرد.

با توجه به اینکه اتصالات اعضای مهار به قاب، در صفحه‌ی قاب، مفصلی فرض شده است، می‌توان ضریب طول مؤثر اعضا برای بررسی کمانش داخل صفحه‌ی قاب را برابر واحد فرض کرد، ولی در جهت خارج از صفحه ضریب طول مؤثر برای کمانش، دیگر برابر واحد نخواهد بود. چون عضو یک عضو دو سر مفصل نیست. برای آگاهی از ضریب طول مؤثر اعضا لازم است تا کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار بررسی شود.

کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار

در قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی در جهت خارج از صفحه، هر یک از اعضای مهار به صورت عضوی هستند که یک انتهای مفصلی دارند و انتهای دیگرشان برش و لنگر را تحمل می‌کند. مقادیر لنگر و برش در انتهای عضو مهار در محل گره میانی و در جهت خارج از صفحه به صورت زیر به دست می‌آید:^[۱]

$$M_i = \left(\frac{EI_i}{L_i} \right) (S_i'' \theta_i - S_i'' \phi_i) \quad (3-الف)$$

$$V_i L_i = \frac{EI_i}{L_i} \left[-S_i'' \theta_i + (S_i'' - \pi^2 \rho_i) \phi_i \right] \quad (3-ب)$$

که در آن:

$$S_i'' = S_i (1 - c_i^2) \quad i = 1, 2, 3 \quad (3-ج)$$

c_i و S_i توابع پایداری هستند.^[۲-۴]

با فرض اینکه اعضای مهار با افق زاویه‌ی β_i می‌سازند، معادلات تعادل در جهت خارج از صفحه را برای گره میانی به صورت زیر می‌توان نوشت:

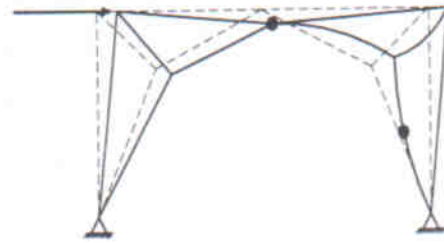
$$M_1 \cos \beta_1 + M_2 \cos \beta_2 + M_3 \cos \beta_3 = 0 \quad (4-الف)$$

$$M_1 \sin \beta_1 + M_2 \sin \beta_2 + M_3 \sin \beta_3 = 0 \quad (4-ب)$$

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0 \quad (4-ج)$$

لازم به ذکر است که از سختی پیچشی اعضا صرف نظر شده است.

با داشتن نیروی محوری اعضای مهار (P_i) طول اعضای مهار (L_i) زاویه‌ی آنها با افق (β_i) و ممان اینرسی خارج از صفحه‌ی عضو مهار (I_i) می‌توان روابط شیب-افت (۳) را برای هر یک از اعضای



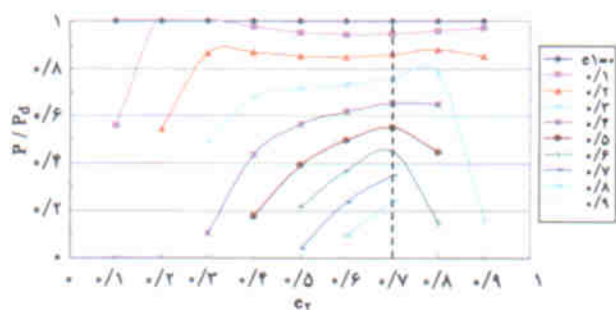
شکل ۴. نحوه‌ی تشکیل مکانیزم در قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی.

تحت تأثیر بار جانبی اعمال شده از چپ به راست، هر سه عضو مهار سمت راست در فشار و هر سه عضو مهار سمت چپ در کشش قرار می‌گیرند. با افزایش بار جانبی، حداقل یکی از اعضای مهار فشاری کمانش کرده و در آن مفصل پلاستیک تشکیل می‌شود و با افزایش بیشتر بار جانبی و تشکیل مفصل خمیری در وسط تیر، سازه به صورت مکانیزم درمی‌آید و ناپایدار می‌شود.

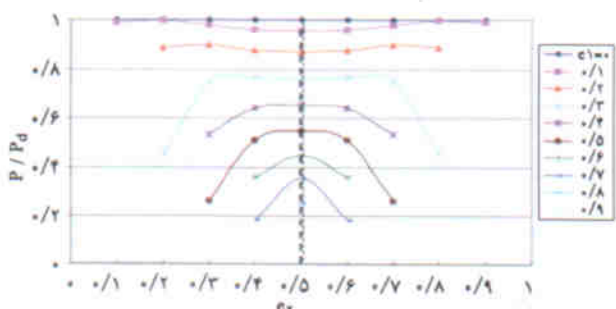
در حالت کلی این‌گونه مهاربندی‌ها ممکن است تحت تأثیر نیروی جانبی زیاد دچار ناپایداری خارج از صفحه شوند. یعنی این امکان وجود دارد که تحت اثر نیروهای جانبی، مهارهای فشاری دچار کمانش خارج از صفحه شده و گره متصل‌کننده‌ی این مهارها به یکدیگر (گره میانی) به خارج از صفحه‌ی قاب پرتاب شود.

بررسی پایداری این‌گونه قاب‌ها در محدوده‌ی کشش به کمک توابع پایداری و در نظر گرفتن تغییر شکل‌های محوری امکان‌پذیر است.^[۴-۱] بدین منظور با فرض اتصالات مفصلی برای اعضای قاب و مهارها، نیروهای داخلی اعضای قاب محاسبه می‌شود و براساس آن سختی خمشی اعضا به دست می‌آید. با توجه به وارد شدن اثر نیروی محوری، سختی اعضای فشاری کاهش و سختی اعضای کششی افزایش خواهد داشت. بدیهی است مقدار نیروی محوری اعضای مهار، به‌طور عمده بستگی به زاویه‌ی مهارها با قاب دارد.

پایداری قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی در صفحه‌ی قاب، مانند دیگر انواع مهاربندی‌های محوری قابل بررسی است. در قاب‌های مهاربندی شده عمدتاً اتصالات اعضای قاب به یکدیگر و همچنین اتصال اعضای مهار به قاب از نوع مفصلی در نظر گرفته می‌شود. در قاب‌های با مهاربندی دروازه‌یی نیز اتصال اعضای قاب و اتصال اعضای مهار به گوشه‌های قاب مفصلی فرض می‌شود. اتصال اعضای مهار به یکدیگر را نیز می‌توان از نظر چرخش اعضا در داخل صفحه‌ی قاب از نوع مفصلی فرض کرد، ولی چون مفصلی بودن آن در جهت حرکت عمود بر صفحه‌ی قاب باعث ناپایداری هندسی قاب خواهد شد، لذا لازم است اتصال در محل تقاطع سه عضو مهار، دارای صلیب خمشی کافی برای حرکت به خارج از صفحه باشد. با در نظر گرفتن



شکل ۵. تغییرات بار بحرانی کمانش خارج از صفحه برای $H/L=3/4$.



شکل ۶. تغییرات بار بحرانی کمانش خارج از صفحه برای $H/L=3/6$.

بار بحرانی کمانش خارج از صفحه در حالت Δ ($e_1=0$) P_{Δ} است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای یک مقدار ثابت e_2 ، با افزایش مقدار e_1 مقدار بار کمانشی کم می‌شود. زیرا افزایش مقدار e_1 دال بر حرکت گره میانی به سمت گوشه‌ی قاب است، که به کاهش سختی جانبی قاب می‌انجامد و قاب برای تحمل نیروی جانبی ضعیف‌تر خواهد شد؛ در نتیجه کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار، تحت بار جانبی کم‌تری روی می‌دهد. برای یک مقدار ثابت e_1 ، مقدار بار بحرانی با افزایش e_2 ، ابتدا زیاد شده و سپس کم می‌شود. نقطه‌ی آغاز کاهش در مقدار بار بحرانی کمانش خارج از صفحه، وضعیتی است که امتداد عضو مهار سوم، بر ضلع Δ عمود می‌شود. برای قاب مورد تحلیل، مقدار e_2 در نقطه‌ی شروع کاهش برابر $e_2=0/7$ است که در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است. همچنین ملاحظه می‌شود که برای یک مقدار e_1 ثابت، برای مقادیر نزدیک به مقدار e_2 ، میزان بار بحرانی کمانش خارج از صفحه اعضای مهار تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

در شکل ۶ نیز مقدار بار بحرانی کمانش خارج از صفحه، برای $H/L=0/5$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نحوه‌ی تغییرات همانند حالت قبل است با این تفاوت که مقدار $e_2=0/5$ حاصل می‌شود.

محاسبه‌ی ضریب طول مؤثر اعضای مهاری

با توجه به اینکه نیروی محوری اعضای مهاری به صورت نسبتی از

مهار نوشت. برای خمش خارج از صفحه، $\theta_1 =$ تغییر شیب نظیر M_1 و Δ تغییر مکان گره میانی در جهت عمود بر صفحه‌ی قاب است.

فرض صلبیت خمشی خارج از صفحه‌ی اتصال اعضای مهار به یکدیگر لازم می‌دارد که شیب‌های آنها در محل اتصال سازگار باشند. با فرض تغییر شکل‌های کوچک، شیب را می‌توان به صورت بردار در نظر گرفته و از روابط تبدیل برداری استفاده کرد.^[۱]

بدین ترتیب از نظر تغییر شکل، سه مجهول Δ ، θ_x ، θ_y وجود خواهند داشت و مقادیر لنگر و برش در انتهای عضو مهار Δ در محل گره میانی به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$M_i = \frac{EI_i}{L_i} \left[s_i''(\theta_x \cos \beta_i + \theta_y \sin \beta_i) - s_i'' \frac{\Delta}{L_i} \right] \quad (5)$$

$$V_i L_i = \frac{EI_i}{L_i} \left[-s_i''(\theta_x \cos \beta_i + \theta_y \sin \beta_i) + (s_i'' - \pi^2 \rho_i) \frac{\Delta}{L_i} \right] \quad (6)$$

با قرار دادن معادلات فوق در معادلات تعادل ۴، سه معادله بر

حساب متغیر Δ ، θ_x ، θ_y به دست می‌آید.

هدف از تشکیل این دستگاه معادلات به دست آوردن مقدار بار جانبی است که به ازای آن، اعضای مهار در جهت خارج از صفحه کمانش می‌کنند. لحظه‌ی که سه عضو مهار در جهت خارج از صفحه کمانش کنند، سختی سازه برابر صفر خواهد بود. با مرتب کردن معادلات تعادل می‌توان آنها را به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \Delta \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

با برابر صفر قرار دادن دترمینان ماتریس سختی در معادله‌ی فوق، معادله‌ی مشخصه‌ی بر حسب بار جانبی اعمال شده به قاب به دست می‌آید که ریشه‌های آن در واقع مقادیری هستند که باعث صفر شدن سختی مجموع اعضای مهار می‌شوند. کم‌ترین ریشه‌ی این معادله‌ی مشخصه، بار کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار خواهد بود. اگر مقدار بار جانبی اعمال شده به قاب با مهاربندی دروازه‌یی به این مقدار برسد، اعضای مهار فشاری در جهت خارج از صفحه‌ی قاب کمانش کرده و گره میانی به بیرون پرتاب می‌شود.

تأثیر موقعیت گره میانی در مقدار بار کمانشی خارج از صفحه در شکل ۵، مقدار بار بحرانی کمانش خارج از صفحه‌ی سازه، P ، در مقابل تغییر گره میانی — تعریف شده به وسیله پارامترهای e_1 ، e_2 — برای قاب با ارتفاع $H=3m$ ، طول دهانه‌ی $L=4m$ و ممان اینرسی خارج از صفحه‌ی یکسان اعضای مهار به مقدار $I=125cm^4$ ، ملاحظه می‌شود. محور قائم در شکل ۵، بیانگر نسبت P به مقدار

دوم است، لذا ضریب طول مؤثر عضو اول با افزایش e_2 عمدتاً افزایش می‌یابد. نحوه‌ی این تغییرات در شکل (۷الف) ملاحظه می‌شود. ضریب طول مؤثر عضو دوم، رفتاری خلاف عضو اول دارد (شکل ۷-ب)، یعنی با افزایش e_2 برای یک مقدار ثابت e_1 - بیشتر حالت کاهش دارد، زیرا با افزایش e_2 شکل کمانش خارج از صفحه‌ی عضو و دوم مهار به حالت میله‌ی دو سر مفصل نزدیک‌تر می‌شود.

در مورد ضریب طول مؤثر عضو سوم، دیده می‌شود که ضریب طول مؤثر با افزایش e_2 - برای یک مقدار ثابت e_1 - ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. یعنی با افزایش e_2 ، طول عضو سوم و نیروی محوری آن کاهش می‌یابد و در نتیجه ضریب طول مؤثر افزایش می‌یابد. تا جایی که مقدار e_2 به حدی می‌رسد که امتداد عضو سوم بر ضلع عمود شود. در این حالت عضو سوم کم‌ترین طول و کم‌ترین نیروی محوری و در نتیجه بیشترین ضریب طول مؤثر را خواهد داشت. با افزایش e_2 از این مقدار، طول و نیروی محوری عضو افزایش یافته و ضریب طول مؤثر کاهش می‌یابد. با توجه به این مطلب که اعضای مهار با هم کمانش می‌کنند و با کمانش کردن یکی از اعضای مهار در جهت خارج از صفحه، عملاً سایر اعضای مهار نیز از سیستم باربری خارج می‌شوند. برخی از توصیه‌های طراحی اینگونه بایندها را می‌توان در مرجع ۵ ملاحظه نمود.

کنترل کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار

با داشتن ضریب طول مؤثر هر یک از اعضای مهار می‌توان لاغری اعضا را در جهت خارج از صفحه کنترل کرده و بر اساس آن مقطع مناسب را برای اعضای مهار انتخاب کرد. کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار، شکل‌پذیری کمتری را برای سازه تأمین می‌کند و ممکن است به ریزش دیوارها و ایجاد خرابی‌های ناسازه‌یی زیادی بیانجامد و در نتیجه سازوکار خرابی مناسبی نخواهد داشت.

برای کنترل کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار، لازم است بار بحرانی برای سازوکار کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار از بار بحرانی این سازوکار در صفحه‌ی قاب کم‌تر نباشد. برای اینکه کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار زودتر از کمانش داخل صفحه روی ندهد باید لاغری اعضای مهار در جهت خارج از صفحه‌ی قاب از لاغری مهارها در صفحه‌ی قاب بیشتر نباشد:

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_{out} \leq \left(\frac{KL}{r}\right)_{in} \quad (9)$$

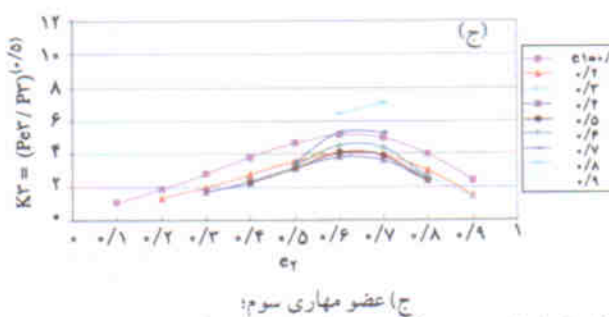
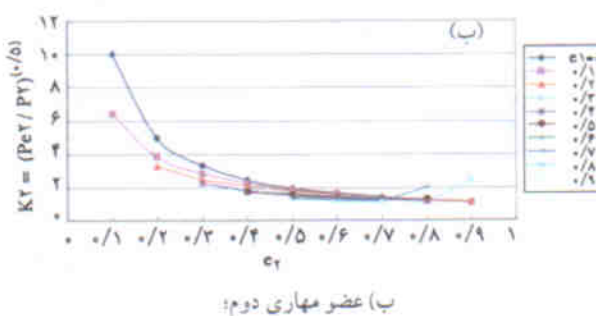
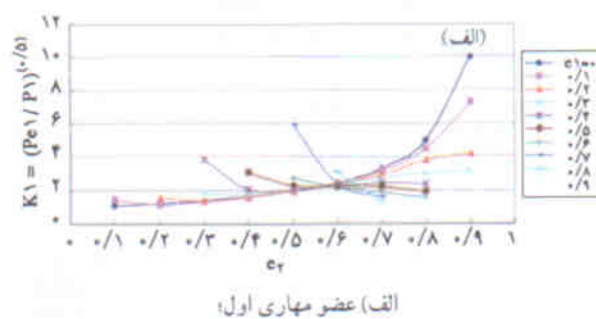
از آنجا که ضریب طول مؤثر اعضای مهار در صفحه‌ی قاب، برابر واحد بوده و طول عضو و سطح مقطع آن در داخل و خارج از صفحه قاب یکسان است، رابطه‌ی ۹ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$I_{out} \geq K_{out}^2 I_{in} \quad (10)$$

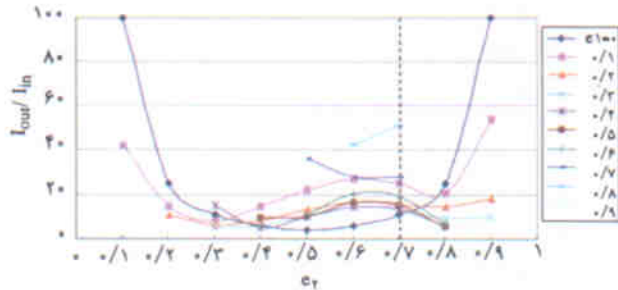
بار جانبی وارده به قاب قابل محاسبه است، هنگام کمانش اعضای مهار، نیروی محوری ایجاد شده در هر عضو، P_i ، معلوم است. در نتیجه، مقدار ضریب طول مؤثر برای اعضای مهار برای کمانش خارج از صفحه برابر است با:

$$k_i = \sqrt{\frac{P_{ei}}{P_i}} \quad (8)$$

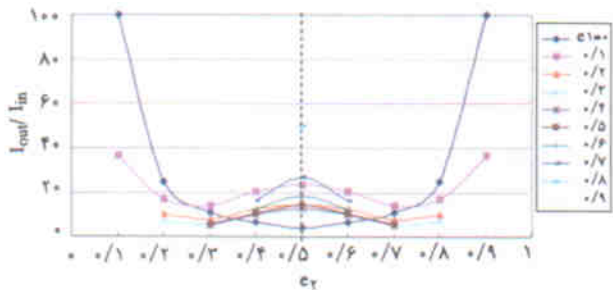
که در آن، P_{ei} معرف بار کمانش اولر خارج از صفحه عضو i است. در شکل ۷ تأثیر مختصات گره میانی در ضریب طول مؤثر اعضای مهار برای کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای اول تا سوم مهار (شکل ۳) برای قاب با طول دهانه‌ی $L=4m$ ملاحظه می‌شود. ضریب طول مؤثر عضو اول با افزایش e_2 - برای یک مقدار ثابت e_1 - در بیشتر موارد حالت افزایشنده دارد. زیرا با افزایش مقدار e_2 ، طول عضو کاهش و نیروی محوری عضو افزایش می‌یابد. با توجه به این که تأثیر طول عضو در رابطه‌ی محاسبه‌ی بار اولر به صورت توان



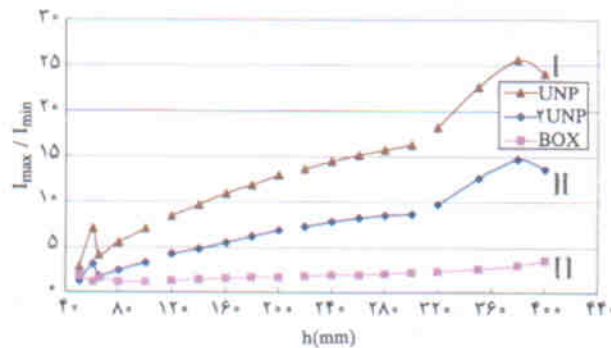
شکل ۷. تغییرات ضریب طول مؤثر خارج از صفحه‌ی اعضای مهار در قاب با $H/L=3/4$



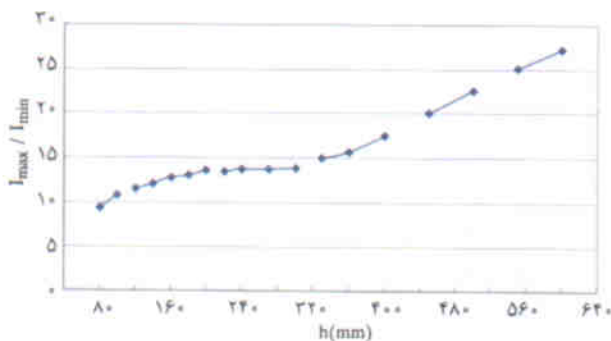
شکل ۸. نسبت ممان اینرسی خارج از صفحه به داخل صفحه لازم برای کنترل کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار، برای $H/L = 3/4$.



شکل ۹. نسبت ممان اینرسی خارج از صفحه به داخل صفحه لازم برای کنترل کمانش خارج از صفحه‌ی اعضای مهار، برای $H/L = 3/6$.



شکل ۱۰. نسبت ممان اینرسی قوی به ضعیف در مقاطع UNP, UNP و BOX برحسب ارتفاع مقطع (h).



شکل ۱۱. نسبت ممان اینرسی قوی به ضعیف در مقطع IPE برحسب ارتفاع مقطع (h).

که در آن، in معرف داخل صفحه و out بیان کننده‌ی خارج از صفحه است. یعنی در مقطع انتخابی برای اعضای مهار، ممان اینرسی داخل و خارج از صفحه‌ی عضو باید شرط فوق را تأمین کند تا کمانش خارج از صفحه‌ی اعضا، زودتر از کمانش در صفحه‌ی قاب روی ندهد. بدیهی است برای موقعیت‌های مختلف گره میانی در صفحه‌ی قاب، این نسبت تغییر خواهد کرد، زیرا مقادیر K_{out} تغییر می‌کند. چنانچه مقاطع اعضای مهار ی یکسان در نظر گرفته شود، رابطه‌ی ۱۰ را به صورت زیر می‌توان ساده کرد:

$$I_{out} \geq K_{Max-out}^2 \cdot I_{in} \quad (11)$$

نحوه‌ی تغییر نسبت I_{out}/I_{in} حداقل لازم برای محافظت از کمانش خارج از صفحه‌ی قاب، برای مقادیر مختلف e_p ، که بیان‌کننده‌ی موقعیت‌های متفاوت گره میانی در صفحه‌ی قاب است، در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که برای مقادیر غیر معمول e_p ، مقدار این نسبت بسیار زیاد است و تا حدود ۵۰ برابر می‌رسد. تأمین چنین شرایطی تقریباً غیر ممکن به نظر می‌رسد. برای مقادیر متوسط e_p ، این نسبت تا حدودی مناسب‌تر شده و در حدود ۱۰ الی ۱۵ برابر است. برای تصور بهتر از مقاطع قابل استفاده برای اعضای مهاربندی دروازه‌یی، نسبت ممان اینرسی حول محور قوی به ممان اینرسی حول محور ضعیف برای پروفیل‌های مختلف IPE، ناودانی تک، ناودانی دوپل و مقاطع قوطی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بررسی شده است. بدیهی است که به لحاظ محدودیت‌های معماری و بازار از تمام این مقاطع استفاده نمی‌شود.

در شکل ۱۱ دیده می‌شود که مقاطع IPE دارای نسبت ممان اینرسی قوی به ضعیف قابل توجهی هستند. اگر فرض شود که با توجه به ملاحظات معماری تا مقطع $IPE 300$ را بتوان مورد استفاده قرار داد، نسبت ممان اینرسی قوی به ضعیف بین ۱۰ تا ۱۵ متغیر است. یعنی اگر مقاطع IPE به نحوی قرار داده شوند که محور قوی پروفیل در صفحه‌ی قاب قرار گیرد، می‌توان نسبت I_{out}/I_{in} را تا حدود ۱۵ تأمین کرده و در این دامنه، کمانش را در صفحه‌ی قاب محدود کرد. این محدوده‌ی خاص، برای نسبت‌های مختلف ارتفاع به طول دهانه‌ی قاب متفاوت است و هرچه طول دهانه‌ی قاب بیشتر باشد، به علت فضای بیشتر در صفحه‌ی قاب، این محدوده وسیع‌تر می‌شود. برای اینکه درک بهتری از تأثیر موقعیت گره میانی بر میزان نسبت ممان اینرسی خارج از صفحه به داخل صفحه لازم برای کنترل کمانش خارج از صفحه حاصل شود، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تراز تغییرات I_{out}/I_{in} لازم برای اینکه کمانش خارج از صفحه زودتر از کمانش داخل صفحه روی ندهد برای موقعیت‌های مختلف گره میانی در صفحه‌ی قاب، رسم شده است. لازم به ذکر است که این شکل‌ها نشان‌دهنده‌ی نیمه‌ی سمت راست قاب با مهاربندی دروازه‌یی‌اند. در

مطالعات ژئوتکنیکی رسوبات کف دریاچه ارومیه

اسماعیل افلاکی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

از نظر ژئوتکنیکی پژوهش‌های زیادی روی رسوبات بستر دریاچه‌های شور دنیا، مثل دریاچه‌ی نمک آمریکا و بحرالمت در شمال آفریقا، انجام شده است. دریاچه‌ی ارومیه نیز که در شمال شرقی ایران قرار گرفته یکی از پهنه‌های آبی شور است که تاکنون مطالعات کاملی روی رسوبات بستر آن انجام نشده است. در این نوشتار رسوبات بسیار نرم کف دریاچه، مسیر بزرگراه تبریز - ارومیه، مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات ژئوتکنیکی شامل حفر گمانه‌های اکتشافی، تهیه‌ی برش‌های زمین‌شناسی همراه با آزمایش‌های درجا و آزمایشگاهی است. برای شناخت کامل ویژگی‌های رسوبات بستر دریاچه تا اعماق مؤثر خصوصیات فیزیکی لایه‌بندی خاک، مقاومت فشاری، مقاومت برشی، تحکیم‌پذیری و حساسیت رسوبات مورد بررسی قرار گرفته، و در نهایت همبستگی بین پارامترهای فوق، خاک بستر دریاچه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده با اطمینان می‌توان خصوصیات تغییر شکل‌پذیری رسوبات نرم و تحکیم نیافته کف دریاچه را برای دستیابی به شاخص‌های طراحی برآورد کرد.

مقدمه

رسوب‌گذاری دارد. در این مطالعه، مسائل ژئوتکنیکی با حفر مجموعاً ۲۰ گمانه‌ی اکتشافی بر روی مسیر بزرگراه موجود و ۲ گمانه در قسمت میانی ساخته نشده‌ی کف دریاچه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در تحقیقات صحرایی، به دلیل حساس بودن لایه‌های رسوبی و بسیار نرم بودن آنها به‌خصوص در ۱۰ متر اول، استفاده از دستگاه حفاری به منظور نمونه‌برداری دست‌نخورده امکان‌پذیر نبوده است. بنابراین از دستگاه‌های نفوذ استاندارد و برش پره‌ی برای انجام آزمایش‌های درجا استفاده شده است. از طرف دیگر آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های گرفته شده از اعماق پائین‌تر، منجر به برآورد مقاومت برشی به مقدار کمتر از مقاومت برشی واقعی لایه‌های رسوبی در مقایسه با نتایج آزمایش‌های درجا بوده است. از این رو یک بررسی جامع و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی و آزمایش‌های درجا برای دستیابی به شاخص‌های طراحی مناسب ضرورت دارد.

خلاصه‌ی از زمین‌شناسی دریاچه‌ی ارومیه

دریاچه‌ی ارومیه بزرگ‌ترین پهنه‌ی آبی داخل ایران است که در شمال باختری و در یک منطقه‌ی کوهستانی (میان‌کوه‌ساری) قرار دارد. (شکل ۱). ارتفاع این دریاچه از سطح آب‌های آزاد +۱۲۸۰ متر. طول آن ۱۴۰ کیلومتر، و عرض آن بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر است. سطح دریاچه بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلومتر مربع و عمق متوسط آن بین ۶ تا ۸ متر است.

از نظر زمین‌شناسی دریاچه‌ی ارومیه یک فرونشست تکنیکی

دریاچه‌ی ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه‌ی داخلی ایران است که به‌صورت یک حوضه‌ی بسته در شمال باختری کشور قرار دارد. میانگین مساحت این دریاچه حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع است. تاکنون مطالعات زمین‌شناسی، هیدرولیکی و ژئوتکنیکی وسیعی برای ساختن بزرگراهی که دو ساحل شرقی و غربی دریاچه‌ی ارومیه را در کم‌ترین پهنای آن - حدود ۱۵ کیلومتر (برای اتصال بندر سفید گنبد به کرانه‌ی دیگر دریاچه در خاور کوه زنیل) - به یکدیگر می‌پیوندد، انجام شده است.

هدف از احداث این بزرگراه ارتباط دو شهر بزرگ تبریز و ارومیه در استان‌های آذربایجان شرقی و غربی است که یکی از پروژه‌های بزرگ و با اهمیت بوده و از دیدگاه مهندسی موضوع‌های زیادی را دربر می‌گیرد که باید به آن پرداخته شود.

بر مبنای اطلاعات موجود، طرح عملی احداث بزرگراه در سال ۱۳۵۸، و با ریختن مستقیم سنگریزه در دریاچه، از دو سمت ساحل ارومیه و تبریز شروع شد. در حال حاضر بدنه‌ی بزرگراه دریاچه بر روی بستری از مواد ریزدانه‌ی رسوبات دریاچه‌ی شور قرار گرفته است. حدود ۱۰۸۶۰ متر طول بزرگراه از سمت ارومیه و ۳۱۲۰ متر از سمت تبریز ساخته شده است. فاصله‌ی باز میانی آن ۱۴۲۰ متر است که باید با توجه به شرایط چرخشی آب دریاچه و جنبه‌های زیست‌محیطی آن، به وسیله‌ی پلی به هم مربوط شوند.

ساختن راه و پل بر روی رسوبات نرم و فراشور کف دریاچه نیازمند پژوهش‌های ژئوتکنیکی و شناخت دقیق شاخص‌های طراحی است که این شاخص‌ها خود بستگی به نوع و نحوه‌ی