

خلاصه :

بعد از جنگ جهانی دوم، مقاطع فولادی با سوراخ جان استفاده شده به عنوان اعضای سازه ای در تلاش برای بهبود رفتار خمشی بدون افزایش هزینه مورد استفاده قرار گرفت. امروزه، این مقاطع به طور گسترده ای با مشخصات هندسی متنوع، مناسب برای شرایط مختلف بارگذاری استفاده می شود. در مطالعه حاضر روش المان محدود برای بررسی مشخصه کمانش حول محور اصلی و با بارگذاری محوری ستونهای فولادی I شکل استفاده میشود. تجزیه و تحلیل عددی گسترده به منظور محاسبه در کاهش در کمانش ظرفیت ستون لانه زنبوری در اثر تغییر شکل برشی و خمشی انجام شده است. نتایج به دست آمده برای محاسبه ضریب تعدیل بدون بعد کمانش، η ، استفاده می شود و از آنجا بار کمانش بحرانی ستون با توجه به ابعاد ستون محاسبه میشود. بررسی فعلی حوزه گسترده ای از ابعاد هندسی و شرایط انتهایی ستون را در نظر میگیرد. یک روش ساده شده برای محاسبه ظرفیت کمانش ستون لانه زنبوری شده پیشنهاد میشود. نمودارهایی برای عملی سازی تخمین بار کمانش این ستون ها برای دقت بیشتر ارائه شده است.

1. مقدمه

اعضای فولادی I شکل اعضای سازه ای اصلی در خیلی از ساختمان های فولادی هستند به دلایل عملی ممکن است لازم باشد که خیلی از این اعضا دارای جان توخالی باشند که امکان عبور و نسب لوله کشی کاندوئیت های برقی و ... باشد. سوراخ جان که معمولاً در سازه های فلزی استفاده میشوند به صورت 6 ضلعی، 8 ضلعی یا دایره ای هستند. مقاله حاضر اختصاص داده شده است به مطالعه اثر زنبوری کردن جان ستون بر مشخصه های کمانش ستون های فولادی با بارگذاری محوری (شکل 1). خوشبختانه فرم زنبوری در طی ساخت اعضای فولادی سوراخدار معرفی شده است که عضو به صورت زیگزاگ در ناحیه جان بریده میشود سپس دو قطعه با جوش کاری مانند شکل 2a,b به هم جوش داده میشوند. اگرچه برآمدگی و فرورفتگی های یک مقطع I شکل سخت تری با افزایش ارتفاع جان تولید میکنند و ممان اینرسی بزرگتری می دهد باعث سرویس دهی بهتر و بهینه شدن استفاده از مصالح فولادی سازه ای گران قیمت میشود این مزایا همراه با تجهیزات کامپیوتری شده باعث استفاده گسترده از این روش در کاربردهای سازه ای شده است. اولین تلاش برای محاسبه بار محوری فشاری برای کمانش ستون توسط اوپلر انجام شد. او به صورت تئوریکی مشخص کرد که بار بحرانی کمانش (P_e) برای یک ستون دوسر مفصل با طول L و ممان اینرسی I که از یک جنس الاستیک با مدول الاستیسیته E با رابطه زیر داده میشود.

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

معادله بالا فقط سختی خمشی را در نظر میگیرد و حالتی که تغییر شکل های مربوط به برش صرفنظر میشود سپس فرمول اوپلر توسط انگسر تغییراتی پیدا کرد که در بر گیرنده اثر تغییر شکل های برشی روی ظرفیت فشاری ستون های منشوری بر طبق فرمول انگسر به صورت زیر بود.

$$P_{\sigma} = \frac{P_e}{1 + (nP_e/AG)} \quad (2)$$

A مساحت سطح مقطع ستون، v ضریب پواسون، G مدول برشی، و n یک ضریب عددی وابسته به سطح مقطع شکل میباشد. دقت فرمول انگسر در منظور کردن اثر برش روی پایداری الاستیک ستون های با جان صفحه ای توسط نانی و زیگلر اثبات شد. اثر تغییر شکل برشی در کاهش ظرفیت کمانش مخصوصاً برای ستونهای کوتاه توسط زیگلر برجسته شد. بررسی های بیشتر روی اثر تغییر شکل های برشی توسط جلیسویک با استفاده از فرمول انگسر هدایت شد. مطالعه، مناسب بودن فرمول انگسر را برای ستون هایی که می توانند به عنوان تیرهای برشی پیوسته تیموشنکو، شامل میشد که فرض میشود قسمتهای صفحه ای بعد از تغییر شکل صفحه بمانند اما نسبت به محور جابجا شده عمود نمانند. در مقایسه با ستونهای با جان صفحه ای

تغییر شکل های برشی تاثیر واضح بیشتری روی ظرفیت کمانش ستون های ساخته شده دارند. نقش حیاتی که برش در کاهش ظرفیت کمانش دارد بعداز شکست پل کبک در سال 1907 روشن شد.



Fig. 1. A photo of castellated columns in structural skeletons (by permission of Westok Limited, UK).

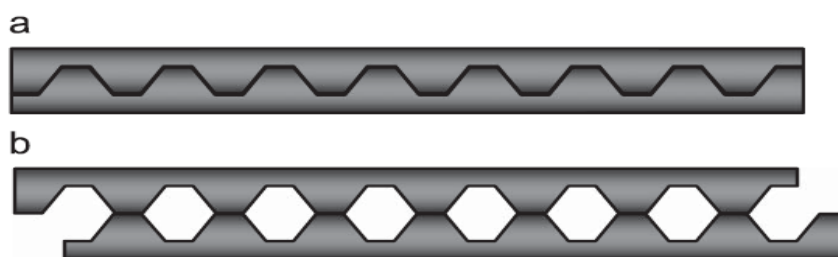


Fig. 2. Manufacturing of steel members with hexagonal web-castellation. (a) Typical cut of castellated member. (b) Reassembled castellated member.

آقای المهدی بیانه مفصلی در مورد اثر برش بر ظرفیت کمانشی ستونهای ساخته شده ارائه داد بررسی های گزارش شده آشکار میکند که ستونهای ساخته شده دارای سختی کاهش یافته ای میباشند که باعث افزایش خیزش جانبی و بنابراین کاهش ظرفیت فشاری ستون میشود. تیموشنکو و گیر یک فرمول تقریبی بدست آورده اند که انعطاف برشی ستون های ساخته شده را با ورق های اتصال منظور میکردند. براساس آخرین اطلاعات نویسنده هیچ فرمول مشابهی برای تخمین قابل اعتماد بار کمانش بحرانی ستون های زنبوری وجود ندارد.

مطالعات نشان میدهد که اطلاعات زیادی درباره اثر تغییر شکل برشی روی ستون های زنبوری وجود نداشته است ممکن است به این دلیل تولید اعضا با این ساختار در گذشته محدود بود. مقاله حاضر یک مطالعه قابل درکی از مقدار تاثیر تغییر شکل برشی روی ظرفیت کمانشی ستون ها وقتی که حول محور اصلی کمانش میکند ارائه میدهد. نسبت لاغری هم ارز برای ابعاد هندسی معمول و شرایط مرزی ستون های زنبوری وجود دارد که پاسخ فشاری این ستون ها را مشخص میکند

2. فلسفه طراحی

آیین نامه های طراحی بین المللی فعلی دیدگاه نسبت لاغری هم ارز را برای ارزیابی بار بحرانی ستون های ساخته شده می پذیرند. سیزدهمین ویرایش AISC (2005) فرمول زیر را برای نسبت لاغری ستون اصلاح شده $(KL/r)_m$ زیرا که مطابق با سطح مقطع هم ارز ستون ساخته شده کمانش کرده حول محور عمود بر صفحه ورق اتصال ارائه می دهد. a. برای اتصال دهنده میانی که با پیچ بسته میشوند

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \quad (3.a)$$

b. برای اتصال دهنده میانی که جوش میشوند یا با پیچ پیش تنیده متصل میشوند

$$\left(\frac{kL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{kL}{r}\right)_o^2 + 0.82 \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} \left(\frac{a}{r_{ib}}\right)^2} \quad (3.b)$$

که (kl/r) با اندیس صفر لاغری کل عضو ستونی است که به عنوان یک عضو واحد در جهت کمانش در نظر گرفته شده عمل می کند، a فاصله بین دو سطح اتصال است و r_i شعاع ژیراسیون کمینه تک عضو است و r_{ib} شعاع ژیراسیون هر جز مجزا نسبت به محور مرکزی موازی با محور عضو کمانشی است و α نسبت جداسازی $h/2r_{ib} = \alpha$ و h فاصله بین دو محور مرکزی اجزای ستون و عمود بر محور کمانش است برای اجتناب از اندر کنش بین کمانش موضعی بین هر جز ستون در طول آزاد بین ورق ها و همچنین کمانش کلی ستون نسبت (a/r_i) هر جز ستون نباید از $3/4$ لاغری حاکم عضو ساخته شده باشد. در ضمن آیین نامه طراحی برای پروفیل های نورد شده و جوش داده شده طبق BS 5950-1:2000. نسبت لاغری هم ارز ستون های با ورق جوش داده شده یا پیچی λ_b را حول محور عمود بر صفحه ورق ها بر اساس فرمول زیر ارائه می دهد

$$\lambda_b = \sqrt{\lambda_m^2 + \lambda_c^2} \geq 1.4\lambda_c \quad (4)$$

که λ_c نسبت لاغری جز بین جوش های انتهایی یا بولت های انتهایی ورق های مجاور بر اساس \min شعاع ژیراسیون میباشد. و λ_m نسبت لاغری کل میباشد $\left(\frac{L_E}{r}\right)$ که L_E طول کمانش موثر کل ستون و r شعاع ژیراسیون کل عضو موازی با محور کمانش است BS 5950-1:2000. این استاندارد شرط $\lambda_c < 50$ را برای حذف امکان اندر کنش بین ورق های اتصال و کمانش کلی ستون الزامی میکند.

با اینحال هیچ روش مستقیمی در آیین نامه های فعلی برای محاسبه ظرفیت فشاری ستون های با سوراخ های جان وجود ندارد. اهداف مطالعات فعلی برای یافتن روش ساده و قابل اعتماد بار بحرانی کمانش برای ابعاد عملی مختلف ستون های دارای جان باز با شرایط مرزی متفاوت ادامه دارد. این مطالعات با روش های مشابه بر اساس لاغری که در آیین نامه های طراحی بین المللی با رویکرد لاغری هم ارز انجام میشود ادامه دارد.

3. معرفی مدل جزء محدود

مدلسازی و تحلیل ستونهای با جان باز با استفاده از ANSYS[14] که یک نرم افزارچند منظوره میباشد، برای تعیین بار بحرانی کمانش الاستیک و مد شکست، انجام میگردد.المان سه بعدی شش گرهی و هشت گرهی با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره برای مدل کردن جزئیات هندسی ستون مورد تحلیل استفاده میشود. هندسه نمونه ستون لانه زنبوری شده در شکل 3 نشان داده شده است. مطابق این شکل فاصله مرکز -مرکز سوراخها d 1.5میباشد. قطر دایره محیطی سوراخ شش ضلعی میباشد. افزایش عمق مقطع نسبت به عمق اولیه حدود $0.433d$ تخمین زده میشود.

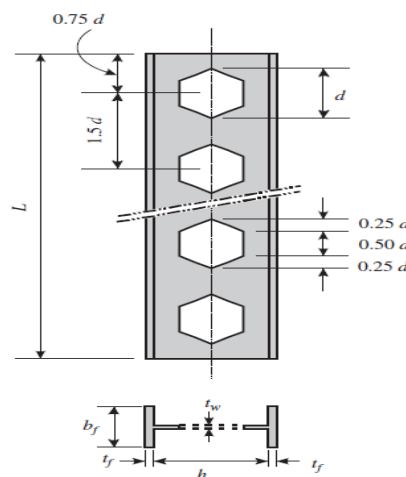


Fig. 3. Geometry of a typical castellated column.

3.1 فرضیات مدل سازی

فرضیات اصلی به کار رفته در بررسی ها به صورت زیر خلاصه میشود :

1. فرض میشود که همه ستون ها دارای مواد الاستیک خطی با مدول $E=2.1 \times 10^5$ مگاپاسکال و ضریب پواسون 0.3 میباشند
2. ستون I شکل در نظر گرفته شده دارای طول L و عرض بال bf و ضخامت بال tf و عرض جان hw و ضخامت جان tw در شکل 3.
3. سوراخ های 6 ضلعی جان با فواصل یکنواخت s در طول محور ستون قرار گرفته اند. نسبت L/s برای کنترل تعداد صحیح سوراخ ها در طول ستون کنترل میشود.
4. مد شکست قالب کمانش در صفحه ستون با خمش حول محور قالب میباشد.
5. شرایط انتهایی مختلفی برای سیموله کردن شرایط مرزی انجام میشود.
6. ستون با یک بار متمرکز محوری که در دو انتهای آن اعمال میشود بارگذاری میشود.
7. بار کمانش ستون با تئوری تغییر شکل های کوچک محاسبه میشود و بنابراین با حل یک مسئله مقادیر ویژه حل میشود.

3.2 فرضیات مدل سازی

بال ها به دو المان در جهت ضخامت و 10 المان در جهت عرض تقسیم میشوند. در ضمن صفحات جان با سه المان در ضخامت مدل میشوند. تعداد المان های استفاده شده برای مدل کردن قسمت های دیگر سطح مقطع ستون در جدول یک داده شده است. برای ابعاد هندسی فرض شده در مطالعه فعلی حدود نشان داده شده در جدول 1 و شکل 4a برای تعداد المانها به بار کمانش بر اساس چند تحلیل کمانش که با استفاده از تعداد بیشتر و کمتر المان ها انجام شده است همگرا میشود. به عنوان یک نتیجه از هندسه متقارن ستون فقط نصف ستون مطابق با شکل 4b مدل میشود. ترتیب مشهای استفاده شده برای تحلیل المان محدود در شکل 4c نشان داده شده است. تحلیل های کمانش اثر شرایط مرزی را روی ظرفیت ستون در 4 حالت زیر در نظر میگیرد (م-م) (گ-م) (گ-گ) (م-آ). باید متذکر شد که برای اجتناب از هر تنش ثانویه که از تغییر شکل های موضعی در انتهای ستون ها حاصل میشود (مخصوصا نزدیک سوراخ ، همه گره ها در هر انتهای ستون به صورت صلب مقید میشوند تا صفحه باقی ماندن سطح مقطع بعد از تغییر شکل تضمین شود برای انجام این ایده ال سازی شرایط انتهایی اعضای پوسته ای انعطاف پذیر مجازی با درجات آزادی دورانی و انتقالی گره ای به سطح مقطع ستون در انتها اضافه میشود.

3.3 اعتبار مدل ایجاد شده

مدل المان محدود 3بعدی پیشنهاد شده با ارزیابی بار کمانش بحرانی ستون های جان صفحه ای مستوی و مقایسه آن با ظرفیت فشاری که از فرمول تحلیلی انگسر بدست می آید معتبر میشود (2) که تغییر شکل برشی را در ستون منظور می کند. باید توجه کرد که اعتبار این روش برای شرایط مرزی غیر از حالت مفصلی مفصلی که توسط انگسر مطالعه شده است نیز برقرار است.

Table 1
Controlling parameters of finite element meshing.

Mesh parameter	Description	Minimum number of elements	Maximum number of elements
n_1	Number of elements along the spacing between perforations (s)	8	20
n_2	Number of elements along the web clear height (h_w)	12	20
n_3	Number of elements along each side of the hexagonal web perforation	4	-
n_4	Number of elements in half the solid web post between perforations ($(s-d)/2$)	4	10
n_5	Number of elements in the stem of the T-section located above and below each web perforation ($(h/2-d)/2-t_f$)	2	6

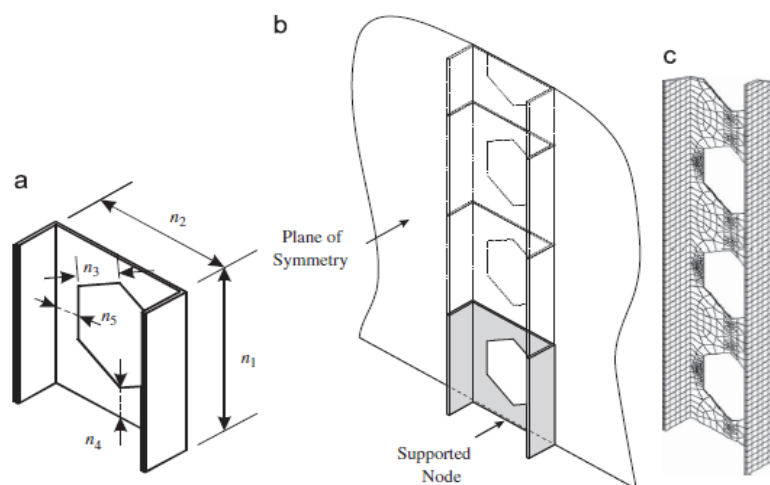


Fig. 4. Sample finite element mesh and controlling parameters for analyzed castellated columns.

تأثیر شرایط مرزی ستون روی بار کمانش با در نظر گرفتن شرایط مختلف انتهای ستون با ضریب $K=1, 0.7, 0.5, 2$ به ترتیب برای حالات (م-م) (م-گ) (گ-گ) (گ-آ) در نظر گرفته میشود. ضریب طول موثر کمانش K در محاسبه بار تأثیر داده میشود که عبارات زیر از آن بدست میآید

$$P_{an} = \frac{P_e}{1 + (nP_e/AG)} = \frac{EI}{(kL/\pi)^2 + (nEI/AG)} \quad (5)$$

که در آن $n=A/A_w$ و A مساحت سطح مقطع بوده و A_w مساحت جان میباشد. فرایند معتبر سازی تقریباً صد ستون مختلف را که با استفاده از مدل جز محدود مدل شده اند در نظر گرفته و بار کمانش P_{fe} آنها را بامقدار تحلیلی P_{an} مقایسه میکند. یک نمونه از نتایج بدست آمده برای ستون های $hw/tw=45$ و $KL/hw=30$ و $bf/tf=4$ و 25 در جدول 2 نشان داده شده است. مقایسه عددی بین 2 مجموعه از نتایج نشان می دهد خطا نسبی ماکزیمم مطلق 1.65% برای مورد ستون گیردار گیردار با $If/Iw=13.1$ و $bf/tf=4$ که $If/Iw=13.1$ ممان اینرسی بال و جان نسبت به محور مرکزی عمود بر صفحه کمانش میباشد و به صورت زیر تعریف میشود

$$I_f = \frac{b_f t_f^3}{12} + (b_f t_f) \left(\frac{h_w + t_f}{2} \right)^2 \quad (6.a)$$

$$I_w = \frac{t_w h_w^3}{12} \quad (6.b)$$

در ضمن خطای نسبی حداقل مطلق کمتر از 0.02% است که مطابق با ستون گیردار آزاد میباشد.

Table 2
Validation of the finite element model ($kL/h_w = 30$).

End conditions	b_f/t_f	I_f/I_w	P_{an} (kN)	P_{FE} (kN)	Relative error $ P_{an}-P_{FE} /P_{an} \%$
P-P	4	0.6	1866.6	1854.4	0.65
		1.7	3836.9	3816.2	0.54
		2.4	5239.6	5215.4	0.46
		4.3	8926.2	8905.3	0.23
		6.7	13830.6	13846.6	0.12
		9.6	19975.8	20104.8	0.65
		13.1	27350.3	27731.7	1.39
F-P	4	0.6	1866.6	1862.6	0.21
		1.7	3836.9	3829.7	0.19
		2.4	5239.6	5231.2	0.16
		4.3	8926.2	8922.5	0.04
		6.7	13830.6	13856.6	0.19
		9.6	19975.8	20090.6	0.57
		13.1	27350.3	27666.9	1.16
F-F	4	0.6	1901.2	1864.9	0.09
		1.7	3797.6	3834.6	0.06
		2.4	5113.5	5238.8	0.02
		4.3	8483.0	8940.2	0.16
		6.7	12826.3	13895.7	0.47
		9.6	18114.8	20167.2	0.96
		13.1	24302.1	27801.9	1.65
F-Free	4	0.6	1901.2	1854.3	0.66
		1.7	3797.6	3816.8	0.52
		2.4	5113.5	5216.9	0.43
		4.3	8483.0	8909.8	0.18
		6.7	12826.3	13856.6	0.19
		9.6	18114.8	20122.7	0.74
		13.1	24302.1	27759.8	1.50

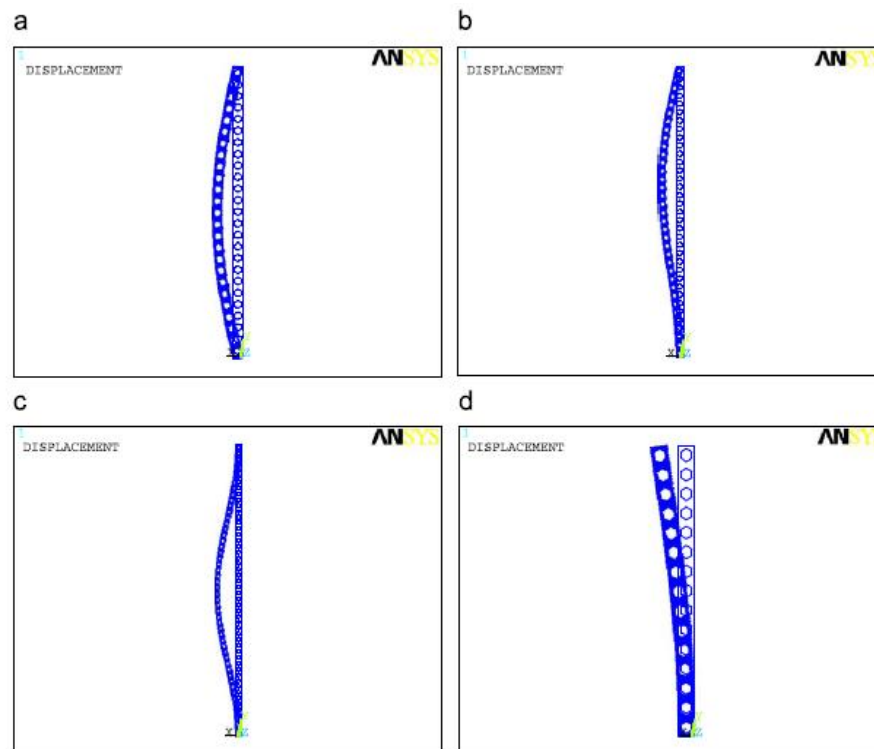


Fig. 5. Buckling modes of castellated columns for various boundary conditions. (a) Pinned-pinned (P-P), (b) fixed-pinned (F-P), (c) fixed-fixed (F-F) and (d) fixed-free (F-Free).

مقادیر خطای بزرگتر با I_f/I_w بزرگتر مربوط به مرتبه بالای خطا با تقریب پارامتر n در فرمول انگسر میباشد. نزدیک بودن جواب تحلیلی با نتایج عددی دقت روش جز محدود را در پیش بینی بار محوری ستون که شامل اثر تغییر شکل برشی میباشد معتبر می کند.

4. تحلیل عددی ستون های لانه زنبوری

مدل معتبر شده المان سه بعدی برای تحلیل پارامتری در سطح گسترده ای برای تعیین مشخصات کماتشی ستونهای لانه زنبوری استفاده میشود. دامنه وسیعی از خواص هندسی مقاطع تحلیل شده تحت پوشش این روش قرار میگیرند. مقاطع استفاده شده در اروپا و آمریکای شمالی با ابعاد مختلف توسط این روش محاسبه میشوند. به علاوه در این روش توصیه های کمیته استاندارد سازی اروپا برای مقاطع با در نظر گرفتن نسبت ممان اینرسی بال به جان از 0.6 تا 17 و نسبت عرض به ضخامت بال از 4 تا 25 منظور میشود. سازه سوراخ نسبت به ارتفاع جان از نیم تا 0.9 متغیر است.

خیلی مهم است که طول مناسب ستون را در مطالعات حاضر معین کنیم به این دلیل که ستونهای کوتاه ممکن است ظرفیت کماتش کاهش یافته نسبت به ستونهای بلند با همان سطح مقطع داشته باشند این امر به دلیل تغییر شکل برشی ایجاد شده در ستونهای کوتاه میباشد.

به علاوه کوتاه شدن قابل ملاحظه ستونهای تحلیل شده ممکن است مد شکست نامطلوبی را که نتیجه کماتش موضعی و کماتش کلی ستون است میباشد. ناپایداری توام موضعی و کلی باعث ناپایداری بیشتری در رفتارهای پس کماتشی خواهد شد و بنابراین ظرفیت کماتش ستون که اندر کنش موضعی و کلی را تحمل میکند به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش مییابد. تمرکز مطالعه جاری بر مشخصه کماتش کلی ستونهای با سوراخ جان میباشد و بنابراین ضروری است که هر گونه احتمال اندر کنش بین کماتش موضعی و کماتش کلی را حذف کنیم. در مدل المان محدود به کار رفته شرایط مرزی متقارن موجود تغییر شکل های خارج از صفحه جان را موجب میشود و بنابراین از کماتش موضعی جلوگیری میشود. از آنجاییکه این مورد خاص به صفحات بال به کار نمیرود کماتش موضعی بال ممکن است با اطمینان از اینکه کماتش کلی ستون قبل از شکست موضعی در صفحات بال بر طبق فرمول زیر انجام میشود اجتناب شود

$$f_{cr-overall} < f_{cr-fl} \quad (7)$$

سمت چپ رابطه فوق تنش فشاری بحرانی مربوط به کمانش کلی ستون میباشد از طرفی سمت راست تنش کمانش الاستیک صفحات بال میباشد و با رابطه زیر بدست می آید

$$f_{\sigma-f} = \psi \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)(b_f/2t_f)^2} \quad (8)$$

که ثای یک ثابتی است که به شرایط مرزی و نسبت طول به عرض صفحات بال بستگی دارد. مقدار ثای=0.7 برای شبیه سازی کردن به شرایط مرزی گیردار آزاد صفحه بال در نظر گرفته میشود که تنش کمانش الاستیک کلی ستون با معادله اساسی اوایلر داده میشود.

$$f_{cr-overall} = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad (9)$$

عبارت KI/r نسبت لاغری کلی میباشد، KI طول موثر کمانش میباشد و r شعاع ژیراسیون موازی با محور کمانش میباشد. معادلات 7 و 9 برای تعیین نسبت لاغری کلی ستون که کمانش ستون قبل از کمانش موضعی بال اتفاق میافتد استفاده میشوند. تحلیل برای بیش از 200 ستون با جان مسطح با ابعاد سطح مقطع های متفاوت و شرایط انتهایی متفاوت، نشان میدهد که مقدار $30 = KI/r$ شرط معادله 7 را برآورده میسازد. این مقدار بر یک ضریب اطمینان تقسیم میشود مقدار نهایی $h_w = KI/30$ بدست میآید که مارا مطمئن میسازد که کمانش کلی ستونهای مورد تحلیل مد کمانش غالب میباشد. گزارش تمامی تحلیلهای اجزای محدود و نتایج آنها برای $h_w = KI/30$ میباشد مگر آنکه خلاف آن ذکر شود یک روند با جزئیات در بخش بعدی برای توضیح چگونگی تعمیم نتایج مربوط به مقدار خاص $h_w = KI/30$ به مقادیر دیگر KI / h_w آمده است.

5-شناسایی مشخصه های کمانش

همچنان که قبلا اشاره شد هدف اصلی این مقاله این است که طراحان را برای ارزیابی ظرفیت کمانش ستون های لانه زنبوری به روشی مشابه با آیین نامه های طراحی بین المللی فعلی قادر سازد این امر نیازمند تعیین بار کمانش بحرانی بر حسب نسبت لاغری میباشد که مشخصه یکتایی از هر ستون لانه زنبوری خاص وابستگی آن به مشخصات هندسی می باشد بار بحرانی کمانش را می توان بر طبق فرمول زیر محاسبه کرد.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{(kL/r)_{eq}^2} \quad (10)$$

A مساحت ناخالص سطح مقطع بدون در نظر گرفتن کاهش مساحت مربوط به سوراخ های لانه زنبوری می باشد. و kL/r معادل نسبت لاغری هم ارز ستون لانه زنبوری میباشد که تخمین دقیقی از بار کمانش را نتیجه میدهد. به عبارت دیگر نسبت لاغری معادل یک پارامتر طراحی است که اثر سوراخ های جان را با در نظر گرفتن تغییرات تغییر شکل خمشی و برشی ستونهای لانه زنبوری شده نسبت به ستون های با جان مسطح منظور میکند. نسبت لاغری هم ارز را میتوان به عنوان تابعی از نسبت لاغری معمول توسط یک ضریب اصلاح کمانش بدون بعد بیان کرد

$$\eta = \frac{(kL/r)_{eq}}{(kL/r)} \quad (11)$$

روش به کار گرفته شده برای تعیین ضریب اصلاح کمانش دارای مراحل زیر است:

1. پیدا کردن P_{cr} با استفاده از روش المان محدود
 2. معادله 10 برای محاسبه ضریب لاغری معادل استفاده میشود
 3. نهایتا ضریب اصلاح کمانش اتا از روی معادله (11) پیدا میشود.
- نمونه های مدهای کمانش حاصل از تحلیل های المان محدود در شکل های (5.a-d) برای ستون های لانه زنبوری (م-م) (گ-م) (گ-گ) (آ-گ) آمده است.

یک مجموعه از تحلیل های المان محدود در مورد ستون های لانه زنبوری مختلف انجام شده است که تاثیر ابعاد جان ، ابعاد بال ، اندازه لانه زنبوری ها نسبت به ارتفاع جان و طول کمانش تئوری برای شرایط انتهایی مختلف نسبت به KL/h را در ستون های لانه زنبوری بررسی میکنیم. نتایج مقدماتی نشان میدهد که تحلیل های المان محدود به ستون های لانه زنبوری با پارامترهای کنترل مشابه $\frac{KL}{h_w}$ ، $\frac{I_f}{I_w}$ ، $\frac{d}{h_w}$ ، $\frac{h_w}{t_w}$ ضریب اصلاح یکسانی η ایجاد می کنند. این مشاهدات که در جدول 3 آمده است

نشان می دهد که برای ستون های مختلف با $h_w/Kl=30$ به طور وضوح ضریب اصلاح اتای یکسانی را میتوان برای نسبت های برابر $\frac{I_f}{I_w}$ ، $\frac{d}{h_w}$ ، $\frac{h_w}{t_w}$ به کار برد ، بدون توجه به ابعاد خاص صفحات جان و صفحه بال ستون ها.

Table 3
Variation of the buckling modification factor η for castellated columns with different cross-section dimensions and $Kl/h_w = 30$.

I_f/I_w	d/h_w	Web dimensions (mm)		Flange dimensions (mm)		h_w/t_w	b_f/t_f	η
		h_w	t_w	b_f	t_f			
0.6	0.5	100	5	20	5	20	4	1.023
		400	20	80	20			1.023
		200	10	100	4		25	1.024
		400	20	200	8			1.024
15.0	0.5	200	10	200	50	20	4	1.081
		800	40	800	200			1.081
		100	5	250	10		25	1.093
		200	10	500	20			1.093
0.6	0.6	100	5	20	5	20	4	1.034
		400	20	80	20			1.034
		200	10	100	4		25	1.035
		400	20	200	8			1.035
15.0	0.6	200	10	200	50	20	4	1.088
		800	40	800	200			1.088
		100	5	250	10		25	1.102
		200	10	500	20			1.102
0.6	0.7	100	5	20	5	20	4	1.050
		400	20	80	20			1.050
		200	10	100	4		25	1.053
		400	20	200	8			1.053
15.0	0.7	200	10	200	50	20	4	1.094
		800	40	800	200			1.094
		100	5	250	10		25	1.115
		200	10	500	20			1.115
0.6	0.8	100	5	20	5	20	4	1.075
		400	20	80	20			1.075
		200	10	100	4		25	1.079
		400	20	200	8			1.079
15.0	0.8	200	10	200	50	20	4	1.099
		800	40	800	200			1.099
		100	5	250	10		25	1.134
		200	10	500	20			1.134
0.6	0.9	100	5	20	5	20	4	1.108
		400	20	80	20			1.108
		200	10	100	4		25	1.118
		400	20	200	8			1.118
15.0	0.9	200	10	200	50	20	4	1.107
		800	40	800	200			1.107
		100	5	250	10		25	1.160
		200	10	500	20			1.160

به عنوان یک نتیجه کاهش قابل ملاحظه ای در مقدار نتایج عددی را میتوان ارائه نمود از آنجایی که هیچ همبستگی بین ضریب اصلاح و ابعاد سطح مقطع وجود ندارد تغییرات ضریب اصلاح اتا با پارامترهای کنترلی مختلف که هندسه ستون و ساختار لانه زنبوری ها را مشخص میکند در قسمت های بعدی بحث شده است.

5.1 تغییر ضریب اصلاح η با ابعاد جان $(\frac{h_w}{t_w})$

نتایج تحلیل های پارامتری آشکار میسازند که برای ستونهای با نسبت های برابر $\frac{I_f}{I_w}$ ، $\frac{d}{h_w}$ و $\frac{b_f}{t_f}$ نسبت منطری صفحه جان $(\frac{h_w}{t_w})$ اثر ناچیزی روی ضریب اصلاح اتا دارد . یک نمونه از نتایج در جدول 4 برای 16 ستون مختلف که پارامترهای هندسی نهایی را نشان میدهد که در آنها $\frac{d}{h_w}$ برابر 0.5 و 0.9 و $\frac{b_f}{t_f}$ برابر 4 و 25 میباشد نشان داده شده است. نصف ستون های در نظر گرفته شده با $\frac{I_f}{I_w}=0.6$ و نصف دیگر با $\frac{I_f}{I_w}=15$ در نظر گرفته شده اند. موارد تحلیل شده در جدول 4 طوری مرتب شده اند که برای ردیف های پشت سرهم پارامترهای کنترلی $\frac{I_f}{I_w}$ ، $\frac{d}{h_w}$ و $\frac{b_f}{t_f}$ برابر هستند در حالی که نسبت منطری صفحه جان $(\frac{h_w}{t_w})$ برابر نیستند و مقادیر آنها مقادیر 5 و 45 میباشد نتایج جدول نشان میدهد که مقدار ضریب اصلاح اتا تقریباً برای دو مقدار نهایی $\frac{h_w}{t_w}$ با حدکثر اختلاف 2.5% برابرند این گونه به نظر میاید که این موضوع مربوط به کاهش سختی خمشی سطوح مقطع با سختی خمشی $\frac{I_f}{I_w}$ برابر با اثر اندک $\frac{b_f}{t_f}$ و $\frac{d}{h_w}$ باشد.

5.2 تغییر ضریب اصلاح η با ابعاد بال $(\frac{b_f}{t_f})$

نتایج المان محدود نشان میدهد که η تناسب خطی با افزایش $\frac{b_f}{t_f}$ دارد. تغییرات بدست آمده در شکل‌های 6a-c برای ستونهای لانه زنبوری با $\frac{d}{h_w} = 0.5$ و 0.7 و 0.9 به عنوان یک نتیجه از نمودار خطی ضریب اصلاح کمانش η برای مقادیر $\frac{b_f}{t_f}$ غیر از 4 و 25 با درونیابی ساده خطی بین دو مقدار نهایی قابل محاسبه است که با توضیحات بیشتر در شکل 7 و 8 آمده است.

Table 4
Variation of the buckling modification factor η with web aspect ratio (h_w/t_w) for ($kl/h_w = 30$).

I_f/I_w	d/h_w	Web dimensions (mm)		Flange dimensions (mm)		h_w/t_w	b_f/t_f	η
		h_w	t_w	b_f	t_f			
0.6	0.5	50	10	20	5	5	4	1.023
		450	10	60	15	45		1.023
0.6	0.5	50	10	50	2	5	25	1.023
		450	10	150	6	45		1.024
15.0	0.5	50	10	100	25	5	4	1.084
		450	10	300	75	45		1.082
15.0	0.5	50	10	250	10	5	25	1.117
		450	10	750	30	45		1.088
0.6	0.9	50	10	20	5	5	4	1.098
		450	10	60	15	45		1.111
0.6	0.9	50	10	50	2	5	25	1.113
		450	10	150	6	45		1.119
15.0	0.9	50	10	100	25	5	4	1.109
		450	10	300	75	45		1.112
15.0	0.9	50	10	250	10	5	25	1.162
		450	10	750	30	45		1.166

5.3 تغییر ضریب اصلاح η با سختی خمشی نسبی $(\frac{I_f}{I_w})$

نتایج تحلیل پارامتری نشان میدهد که سختی نسبی خمشی $(\frac{I_f}{I_w})$ عامل عمده ایست که در محاسبه ظرفیت کمانش ستونهای لانه زنبوری باید در نظر گرفته شود زیرا همبستگی قوی بین این عامل و ضریب اصلاح η وجود دارد. شکل‌های 7 و 8 تغییرات η را نسبت به پارامتر بدون بعد $(\frac{I_f}{I_w})$ و $\frac{d}{h_w}$ نشان میدهند. برای $\frac{b_f}{t_f}$ مساوی 4 و 25. هر دو شکل برای اجتناب از اندرکنش بین ناپایداری کلی و موضعی توضیح داده شده در بخش 4 با لاغری مرجع $h_w = 30 = Kl$ مطابقت دارد. اگرچه نمودارها فقط برای دو مقدار $\frac{b_f}{t_f}$ مساوی 4 و 25 رسم شده اند ضریب اصلاح η با درونیابی خطی برای هر نسبت $\frac{b_f}{t_f}$ قابل محاسبه است. نمودارها نشان میدهند که کاهش بیشتر در ظرفیت کمانش مربوط به افزایش نسبت سختی خمشی $(\frac{I_f}{I_w})$ میباشد که آنهم مربوط به کاهش سختی برشی جان و بنابراین ستون است. نمودارها همچنین نشان میدهند که مقدار بهینه نسبت سختی خمشی $(\frac{I_f}{I_w})$ مقداری است که با کمترین کاهش ظرفیت کمانش میباشد و در حدود 2 میباشد. این مقدار در حقیقت مقدار متوسط $(\frac{I_f}{I_w})$ برای مقاطع فولادی است که در عمل استفاده می شود. هر دو شکل مشخص میکنند که ستون های با ابعاد لانه زنبوری بزرگتر کاهش ظرفیت کمانش بیشتری را خواهد داشت که نشان دهنده ضریب اصلاح بزرگتر η است به عنوان یک نتیجه حاصل از کاهش سختی برشی بیشتر است. برای ستونهای با $\frac{d}{h_w}$ کوچکتر ضریب η به یک نزدیک میشود که نشان دهنده اثر کم تغییر شکل برشی در ستون های لانه زنبوری می باشد.

5.4 تغییر ضریب اصلاح η با طول ستون

ضریب اصلاح η که در قسمت قبل و شکل های 7 و 8 توضیح داده شد برای ستونهای لانه زنبوری شده با $30 = Kl/h_w$ بدست آمده است و فقط ظرفیت کمانشی مربوط به پایداری کلی را کنترل میکند برای استفاده از این ضرایب η برای تعیین بار بحرانی

کمانش مربوط به مقدار اختیاری KI/h_w ، ضروری است که اثر تغییر شکل های برشی روی ظرفیت کمانش ستونهای لانه زنبوری را از پارامترهای دیگر جدا کرد فرمول انگسر (2) را میتوان به صورت زیر نوشت

$$P_{cr} = \frac{P_e}{1 + (nP_e/AG)} \text{ or } \frac{n}{AG} = \left(\frac{1}{P_{cr}} - \frac{1}{P_e} \right) \quad (12)$$

مهم است که توجه کنیم عبارت $\frac{nP_e}{AG}$ اثر تغییر شکل برشی را روی بار کمانش بحرانی ستون لانه زنبوری نشان میدهد. عبارت $\frac{n}{AG}$ به ندرت به سطح مقطع و ابعاد بستگی دارد در حالی که P_e بار کمانش اوپلر میباشد که تابعی از اثر برش نیست اما وابسته به طول ستون است در این مطالعه فرض پایداری پذیرفته شده است در صورتی که ستون های با $KI/h_w < 150$ برای حذف اثر تغییر شکل برشی به اندازه کافی بلند در نظر گرفته میشوند. بار اوپلر به P به صورت زیر تعریف میشود

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_{eq}}{(kL)^2} = \frac{\pi^2 EI}{\eta^2 (kL)^2} \quad (13)$$

1302

K.M. El-Sawy et al. / Thin-Walled Structures 47 (2009) 1295–1304

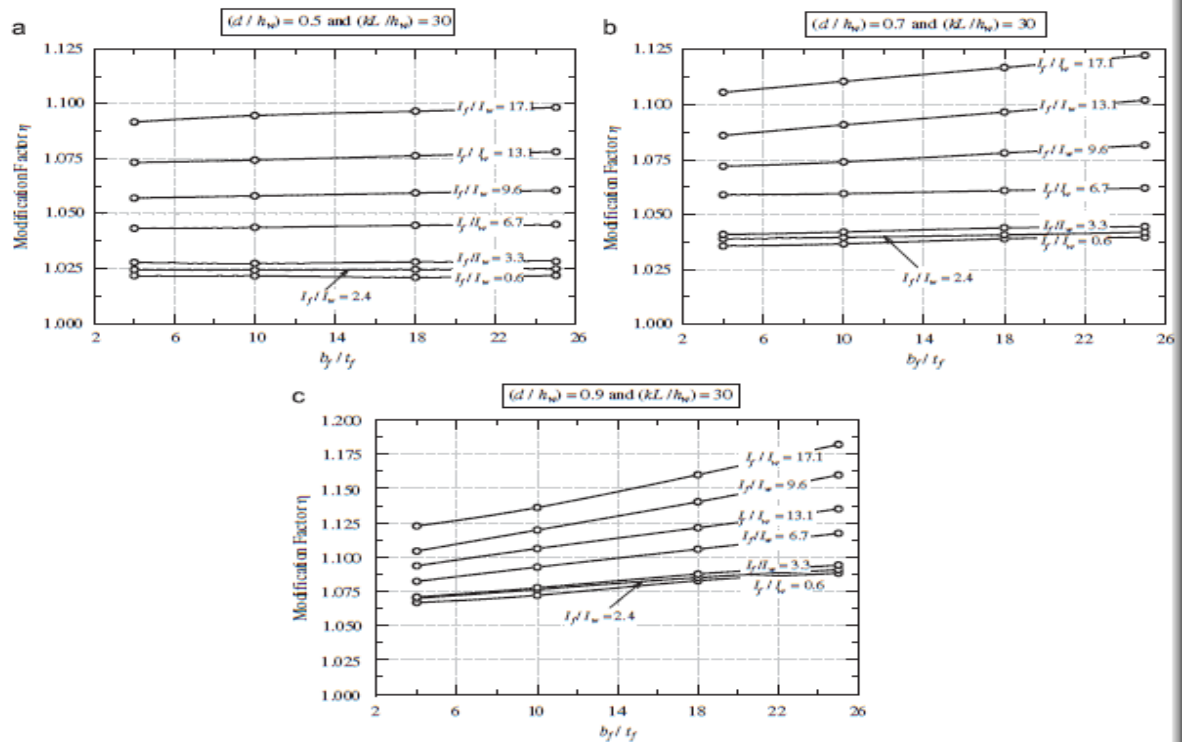


Fig. 6. Variation of the buckling modification factor η with $(b_y t_f)$ for different (d/h_w) values. (a) Case of $d/h_w = 0.5$; (b) Case of $d/h_w = 0.7$; (c) Case of $d/h_w = 0.9$.

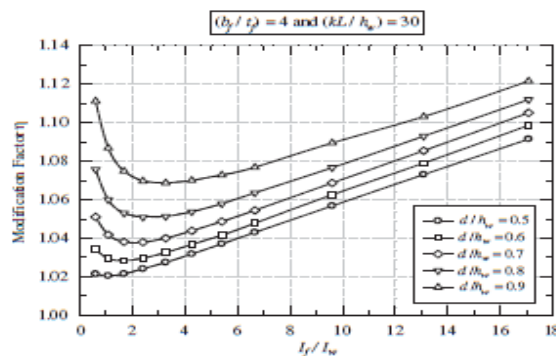


Fig. 7. Variation of the buckling factor η with column dimensions for $(b_y t_f) = 4$.

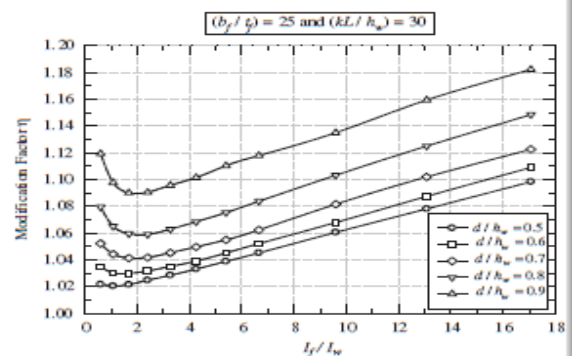


Fig. 8. Variation of the buckling factor η with column dimensions for $(b_y t_f) = 25$.

I_{eq} ممان ثانویه معادل سطح مقطع ستون است و یک پارامتر کلیدی است که باید محاسبه شود. واضح است که I_{eq} مقدماتاً به خواص سطح مقطع و مخصوصاً به خواص خالص جان لانه زنبوری شده بستگی دارد. محاسبه سطح مقطع کاهش پیدا کرده لانه زنبوری یک محاسبات سعی و خطا است که سطح مقطع مناسب برای I_{eq} بدست آید محاسبات زیادی با ستونهای طول بلند (h_w) انجام شده اند و قابل مقایسه با معادله 13 هستند این فرایند نشان میدهد که در نظر گرفتن یک جان مجازی با سائز $0.860/d$ ممان اینرسی ثانویه کاهش یافته مناسبی را تحت شرایط اساسی زیر ارائه می دهد:

- بار کماتش بحرانی P_{cr} معادله (13) باید برابر با P_{fe} باشد که توسط انسیس بدست آمده است. مطلب فوق بیانگر آن است که روش پیشنهاد شده باید با نتایج بدست آمده از روش المان 3 بعدی برای تحلیل ستون لانه زنبوری یکسان باشد.
 - ضریب اصلاح η بدون بعد برای ستونهایی که طول آنها نسبت به سطح مقطعشان زیاد است به یک نزدیک شود یعنی ستون شبیه به یک میله با فقدان اثر تغییر شکل برشی عمل کند و کاهش بار کماتشی انتظار نرود.
- برای بدست آوردن عبارتی برای η برای هر ستون لانه زنبوری با طول L معادله 12 را میتوان برای دو طول مختلف نوشت ابتدا برای طول مرجع ($30 = Kl/h_w$) و ثانیاً برای هر طول اختیاری L

$$\frac{n}{AG} = \left(\frac{1}{P_{cr}} - \frac{1}{P_e} \right) = \left(\frac{1}{P_{cr}} - \frac{1}{P_e} \right)_i$$

$$= \frac{\eta^2 (kL)^2}{\pi^2 EI} - \frac{(kL)^2}{\pi^2 EI_{eq}} = \frac{\eta_i^2 (kL_i)^2}{\pi^2 EI} - \frac{(kL_i)^2}{\pi^2 EI_{eq}} \quad (14)$$

معادله 14 را میتوان ساده کرد و فرمول کلی زیر را برای η در مورد ستون لانه زنبوری با طول L بدست آورد

$$\eta_i = \sqrt{\left(\frac{I}{I_{eq}} \right) + \left(\frac{L}{L_i} \right)^2 \left(\eta^2 - \frac{I}{I_{eq}} \right)}, \text{ where } I_{eq} = I - \frac{t_w (0.806d)^3}{12} \quad (15)$$

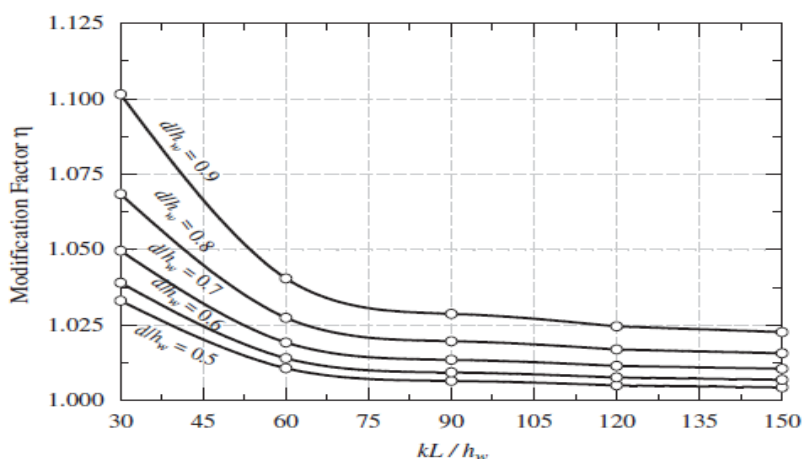


Fig. 9. Variation of the buckling factor η with column length.

شکل 9 نتایج نمونه ای که تغییرات η را نسبت به Kl/h_w برای ستونهای با جان $10 \times 450 \text{ mm}$ و بال $16 \times 400 \text{ mm}$ نشان میدهد. برای 5 سائز مختلف $d/h_w = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ و 0.9 نتایج نموداری از تغییرات η برحسب طول ستون رسم شده اند. (Kl/h_w)

6- خلاصه و نتیجه گیری

مطالعه حاضر، یک رویکرد ساده برای ارزیابی اثر تغییر شکلهای برشی روی ستونهای با جان، بار گذاری شده محوری و نهایتاً تعیین ظرفیت بار کماتش مربوطه میباشد. روش اجزای محدود برای تحلیل پایداری ستونهای I شکل با ابعاد و شرایط مرزی متفاوت به روش عددی، به کار میرود. نتایج تحلیل ها برای تعیین یک پارامتر بدون بعد استفاده میشود. این

پارامتر برای محاسبه طول کمانش ستونهای با جان لانه زنبوری با در نظر گرفتن اثر لانه زنبوری شدن روی تغییر شکلهای خمشی و برشی نسبت به ستونهای با ابعاد مشابه با جان مسطح، استفاده میشود. نتایج تحلیل عددی همچنین برای بررسی تغییرات ضریب بار کمانش با پارامترهای مختلف که هندسه ستون و ساختار لانه زنبوری را نشان میدهند، استفاده میشود. نتایج اصلی که از این مطالعه ممکن است استخراج شود به صورت زیر خلاصه میشود.

- نتایج نشان میدهند که ستونهای با اندازه بزرگتر سوراخ در جان (d/h_w)، مقادیر ضریب تغییر η بزرگتری دارند. و به علت کاهش سختی برشی ظرفیت کمانشی آنها بیشتر کاهش پیدا میکند. برای ستونهای با (d/h_w) کمتر، ضریب تغییر کمانش η به 1 نزدیک میشود، که برابر با مقدار مربوط به ستونهای با جان مسطح با حداقل اثر تغییر شکل برشی میباشد.
- تحلیلهای عددی نشان میدهند که نسبت (h_w/t_w) جان تاثیر بسزائی در مقدار ضریب تغییر کمانش η ندارد و با نسبت (b_f/t_f) بال به صورت خطی افزایش پیدا میکند.
- نمودارهایی برای نشان دادن تغییرات ضریب اصلاح کمانش بر حسب نسبت سختی بال به جان (I_f/I_w) برای یک مقدار مرجع $30=Kl/h_w$ ممان اینرسی های ناخالص یکسان رسم شده اند. نمودارهای رسم شده کاهش بیشتر در ظرفیت کمانش را که مربوط به افزایش نسبت فوق است برای ممان اینرسی های ناخالص یکسان نشان میدهد. زیرا کاهش در سختی برشی جان و بنابراین کل ستون باعث امر فوق میشود نمودارها همچنین نشان میدهند که حداقل کاهش در ظرفیت کمانش مطابق است با یک مقدار بهینه $2=(I_f/I_w)$. این مقدار متوسط نوعی مقاطع فولادی استفاده شده را در عمل نشان میدهد.
- اثر طول ستون با جان لانه زنبوری روی ظرفیت کمانش آن نیز بررسی شده است. یک روش کلی برای محاسبه ضریب تغییر η برای هر طول ستون غیر از مقدار مرجع $30=Kl/h_w$ ، پیشنهاد شده است. این روش بر اساس ترکیب نمودارهای η با اثر برش و در نظر گرفتن کاهش سختی خمشی مقطع هم ارز بدست میاید. خاصیت سطح مقطع هم ارز پیشنهاد شده برای مقطع مجازی دارای جان یکنواخت با اندازه برابر با 0.806 برابر سائز اولیه جان لانه زنبوری بدست می آید.

قدر دانی

این کار به پشتیبانی مالی مرکز تحقیقات دانشگاه امارات متحده عربی تحت قرارداد شماره 06/11-07-34-05 انجام شده است.