کنفرانس بین المللی سبک‌سازی و زلزله
جهاد دانشگاهی استان کرمان
11 و 12 اردیبهشت 1389

بررسی تاثیر وجود انواع ناکاملی ها در رفتار سازه های فضاکار

محمد رضا شیدائی[1]، عطا اله ماهوتی[2]، مهرداد شایافر[3]

1-استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی مهندسی،دانشگاه ارومیه
m.sheidaii@mail.urmia.ac.ir
2-کارشناس ارشد سازه دانشگاه ارومیه
a.mahouti@yahoo.com
3-دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه
meh_sh2@yahoo.com

چکیده

با توجه به تعداد زیاد اعضا و گرهها در سازه های فضاکار وجود انواع ناکاملی ها در این سازه ها امری بدیهی و غیر قابل اجتناب است. مطالعات انجام گرفته در روی این سازه ها حساسیت این نوع از سازه ها را به وجود انواع ناکاملی ها در سازه نشان داده است. وجود این ناکاملی ها در سازه باعث تغییر رفتار سازه در مقایسه با سازه ایده آل در نظر گرفته شده خواهد شد. در این مقاله انواع ناکاملی های ممکن در سازه های فضاکار و تاثیر وجود هر یک از آنها در رفتار عضو دارای ناکاملی و همچنین رفتار کل سازه مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ناکاملی، سازه های فضاکار، ظرفیت نهائی، شبکه های تک لایه، شبکه های دو لایه

1. مقدمه

معماران و مهندسان همواره در پی یافتن راه حل های جدید برای حل مسئله فضاهای محصور بوده اند. با صنعتی شدن و توسعه دنیای مدرن تقاضا برای استفاده از سازه های با دهانه های بزرگ افزایش یافت. سازه های فضاکار یکی از پر استفاده ترین سازه ها برای پوشش دهانه های بزرگ هستند. این سازه های مشبک فضائی به دلیل تنوع بسیار و انعطاف پذیری معماری ، ابزار با ارزشی برای دستیابی به فرم های جدید توسط معماران و مهندسان است. فاکتورهای موثر در رفتار این نوع از سازه ها بسیار متنوع است و به رفتار تک تک اعضا و همچنین سیستم اتصال دهنده آنها بستگی دارد. با اینکه اعضای سازه های فضاکار به صورت صنعتی ساخته می شوند ولی با این حال به خاطر متفاوت بودن پارامترهای مکانیکی و هندسی، این اعضا دارای رفتارهای نامنظم خواهند بود[1].

با توجه به اینکه این گونه سازه ها از اعضا و گره های بسیاری ساخته می شوند عملاً ساخت این سازه ها بدون وجود ناکاملی های اولیه در سازه غیر ممکن خواهد بود. مطالعات انجام گرفته در روی رفتار خرابی شبکه های دو لایه نشان داده است که سازه های فضاکار در حالت الاستیک دارای رفتار متقارن هستند اما در حالت غیرالاستیک رفتار غیرمتقارن از خودنشان می دهند همچنین آزمایشات انجام گرفته در روی این سازه ها با مقیاس های مختلف نشانگر کاهش قابل توجه ظرفیت باربری آنها در مقایسه با نتایج پیش بینی شده توسط آنالیز های انجام گرفته در روی سازه است که این مسائل به خاطر وجود انواع ناکاملی ها در سازه است[2].

بر اساس تحقیقات انجام شده در روی شبکه های دو لایه تخت نیز مشخص شده است قبل از شروع بارگذاری سازه، اعضای آن دارای نیرو های اولیه ای بین 5 تا 10 درصد ظرفیت باربری خود بودند که این تفاوت در اعضای بحرانی بین 10 تا 25 در صد بوده است.

ناکاملی هایی مانند ، ،انحنا اولیه در اعضا، نابجائی گرهی، خروج از مرکزیت در گره ها و وجود ناکاملی در طول اعضا تاثیر بسزائی در رفتار سازه های فضاکار دارند . حساسیت این نوع سازه ها به وجود انواع ناکاملی ها توسط آزمایشات و تحقیقات بسیاری تایید شده است [3] .

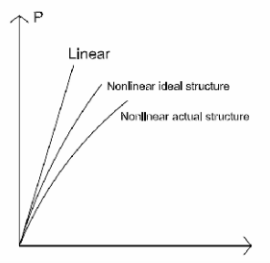
در این مقاله به بررسی تاثیر وجود انواع متداول ناکاملی ها در سازه های فضاکار و روشهای در نظر گرفتن این نوع ناکاملی ها پرداخته شده است.

2. تقسیم بندی انواع ناکاملی ها

با توجه به ماهیت ناکاملی ها، انواع ناکاملی های موجود را می توان به دو گروه ناکاملی های های هندسی و مکانیکی تقسیم کرد. این دو نوع

ناکاملی دارای ماهیت کاملاً متفاوتی هستند. ناکاملی های هندسی معمولاً تغییر شکل های اولیه را در سازه شامل می شوند، ناکاملی هایی از نوع انحنا اولیه اعضا، انحراف گره ها از محل ایده آل خود، وجود انحراف در طول اعضا در این گروه قرار می گیرند. اما ناکاملی های مکانیکی که مهمترین آنها عبارت است از تنش پسماند ایجاد شده در عضو در اثر جوشکاری و نورد اعضا باعث کاهش سختی خمشی عضو می شود. تاثیر هر دو نوع ناکاملی در روی عضو یکسان است و باعث کاهش مقاومت در عضو می گردد. البته این مسئله همواره درسازه های نامعین استاتیکی درست نیست[4].

از نقطه نظر دیگر انواع ناکاملی ها را می توان در دو دسته ناکاملی های عضوی و ناکاملی های سازه ای تقسیم بندی کرد. ناکاملی در عضو با بررسی عضو به صورت مجزا مشخص می گردد در حالی که ناکاملی سازه ای با بررسی رفتار کل سازه مشخص می شود. ناکاملی در عضو یک تاثیر مستقیم دارد که باعث کاهش ظرفیت باربری در عضو شده و یک تاثیر غیر مستقیم دارد که باعث کاهش سختی محوری عضو سازه و افزایش رفتار غیر خطی عضو می شود که این مسئله باعث به وجود آمدن پدیده های دیگر ناپایداری مانند ناپایداری گرهی، خطی یا ناپایداری کلی در سازه می شود[5]. با افزایش رفتار غیر خطی سازه تفاوت بین نتایج حاصل از تحلیل خطی سازه با رفتار واقعی سازه ساخته شده بیشتر خواهد شد. که این تفاوت در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل(1):تاثیر ناکاملی هندسی در رفتار سازه

3. ناکاملی در اندازه سطح مقطع عضو

ناکاملی در اندازه سطح مقطع اعضای مورد استفاده در سازه باعث کاهش یا افزایش در مقاومت عضو در برابر نیروها خواهد شد. همچنین این نوع ناکاملی باعث تغییر در نیروی داخلی اعضا و به تبع آن تغییر در جابجائی های سازه می شود برای اینکه بتوان یک رواداری مجاز در سازه برای ناکاملی در سطح مقطع اعضا به دست آورد می توان از روابط زیر استفاده گردد.

به عنوان مثال اگر یک خرپای فضائی با i گره و jعضو را در نظر بگیریم به صورتی که سطح مقطع اعضا در سازه بهینه به صورت $A=\{A_1,A_2,\ldots,A_j,\ldots,A_{J_o}\}^T$ باشد و طول اعضا $l=\{l_1,l_2,\ldots,l_j,\ldots,l_{J_o}\}^T$ و ناکاملی در مشخصات مصالح مورد استفاده وجود نداشته باشد یعنی مقدار E ثابت در نظر گرفته شود . اگر مقدار ناکاملی موجود در عضو را t فرض کنیم با توجه به ماهیت تصادفی ناکاملی ها در سازه مقدار آن را در روی هر عضو می تواند به صورت $t=\{t_1,t_2,\ldots,t_j,\ldots,t_{J_o}\}^T$ نشان داد. در این حالت مقدار واقعی سطح مقطع در المان jام به صورت $\{A_j+t_j\ ,\ A_j-t_j\}$ خواهد بود. اگر تغییر مکان در جهت i را در سازه ایده آل برابر u_i در نظر بگیریم مقدار آن در اثر وجود ناکاملی در سازه به مقدار زیر تغییر خواهد کرد.

$$u=u_i+s_{ij}t_j \qquad (1)$$

در رابطه فوق $s_{ij}=du_i/dA_j$ مقدار حساسیت جابجائی در جهت i نسبت به متغییر A_j است.

در حالت کلی مقدار ناکاملی ها در هر عضو نامشخص است و نیز مقدار حساسیت می تواند مثبت یا منفی باشد. برای اینکه سازه در اثر وجود ناکاملی در آن ایمن باقی بماند رابطه زیر باید در آن برقرار باشد.در این رابطه u^0 مقدار جابجائی مجاز در سازه است.

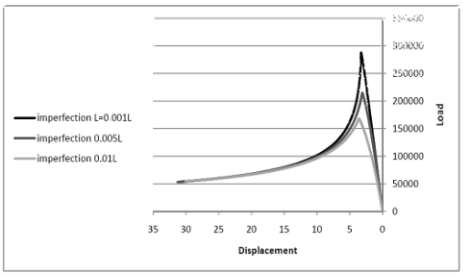
$$u^0-[u_i+|s_{ij}t_j|]\geq 0 \qquad (2)$$

روابطی مشابه روابط فوق را باید برای کنترل تنش در سازه نیز باید در نظر گرفت. با استفاده از روابط فوق می توان یک محدوده برای مقدار انحراف سطح مقطع اعضا از مقدار اسمی آنها تعیین کرد به طوری که باعث تاثیر عمده ای در رفتار سازه نشود. ولی بررسی چنین روابطی تنها برای سازه های کوچک با تعداد محدود اعضا قابل بررسی است و در سازه های فضاکار عملی بررسی چنین روابطی در روی صدها عضو و گره موجود در سازه امکان پذیر نخواهد بود. با توجه به

پیچیدگی بررسی روابط فوق تاثیر وجود ناکاملی از این نوع را می توان با اعمال یک ضریب اطمینان به سازه مانند آنچه در آئین نامه EC3 آمده است پوشش داد[6].

4. وجود انحنا اولیه در عضو

یکی از متداول ترین نوع ناکاملی ها در اعضای میله ای وجود انحنا اولیه در آن است. وجود این نوع ناکاملی تاثیر بسزائی در رفتار اعضای فشاری خواهد داشت که در شکل 2 رفتار بار-تغییر مکان محوری یک عضو فشاری بازای مقادیر مختلف انحنا اولیه نشان داده شده است[7]. وجود این نوع ناکاملی در عضو باعث کاهش بار بحرانی عضو می شود به همین خاطر باید مقدار آن در اعضا محدود شود. براساس استاندارد CEN بیشترین مقدار مجاز برای انحنا اولیه در اعضا به $L/1000$ یا $3mm$ هر کدام که بزرگتر باشد محدود شده است[8]. این در حالی است که ، بیشترین مقدار ناکاملی که در منحنی کمانش آئین نامه اروپا در نظر گرفته شده است دقیقاً $L/1000$ است. محدوده ذکر شده در بالا برای اعضای دارای طول بزرگتر از 3000 میلیمتر درست خواهد بود ولی برای اعضایی که طول کمتر از این مقدار دارند منحنی کمانش مقدار کمتری را در نظر گرفته است. مبحث 11 مقررات ملی ساختمان ایران نیز در بخش رواداری ها مقدار مجاز این نوع ناکاملی را در اعضای سازه ها $L/1000$ در نظر گرفته است. برای در نظر گرفتن اثر این نوع ناکاملی می توان از ضریب کاهش بار کمانش عضو (χ) استفاده کرد اگر مقدارانحنا اولیه دریک عضو از مقدار فرض شده در آئین نامه بیشتر باشد مقدار ضریب کاهش بار کمانش (χ) را می توان با استفاده از ضریب اصلاح ناکاملی ارائه شده توسط Rondal و Maquoi محاسبه کرد[4]. احتساب کردن انحنا اولیه در اعضا، برای سازه ها با تعداد اعضای کم بسیار مشکل خواهد بود و برای سازه هائی که دارای هزاران عضو است تقریباً غیر ممکن به نظرمی رسد به همین دلیل در طراحی سازه باید بیشترین مقدار ممکن برای انحنا اولیه در عضو را در نظر بگیریم. بهترین روش برای محدود کردن وجود این نوع ناکاملی در سازه کنترل اعضای آن در زمان تولید است چون اندازه گیری این ناکاملی در محل کارگاه امری غیر ممکن خواهد بود[4].

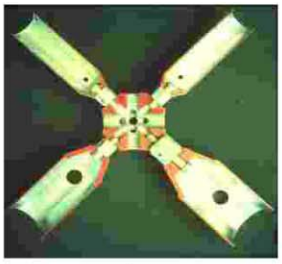


شکل(2):تاثیر انحنا اولیه در روی بار قابل تحمل توسط عضو

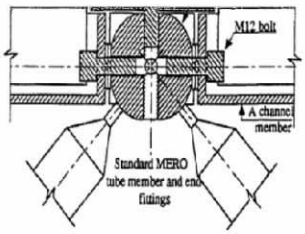
5. خروج از مرکزیت در اعضای متصل به گره

وجود خروج از مرکزیت در گرهها را می توان در زمره تغییر شکلهای اولیه در نظر گرفت. وجود این نوع ناکاملی باعث کاهش ظر فیت باربری کل سازه می شود. البته تحقیقات انجام گرفته نشان می دهد که اعضای فشاری دارای

خروج از مرکزیت، با اینکه در بار کمتر از بار بحرانی پیش بینی شده دچار خرابی می شوند ولی به خاطر وجود لنگر، خرابی شکل پذیر تری دارند. از اثرات این نوع ناکاملی می توان با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان صرفنظر کرد. البته امروزه با وجود سیستم های مدرن اتصال این مسئله تأثیر بسیار ناچیزی در روی رفتار سازه خواهد داشت[2].



الف



ب

شکل(3): سیستم اتصال استاندارد

6. وجود ناکاملی در طول اعضا

یکی از مهمترین ناکاملی های موجود در سازه های خرپائی وجود ناکاملی در طول اعضای این نوع سازه ها است. وجود انحراف در طول عضو در خرپاهای صفحه ای به علت معین استاتیکی بودن این نوع سازه ها تأثیر چندانی در رفتار سازه ندارد و تنها باعث می شود که نقاط گره ها از محل تئوری خود منحرف شوند . ولی در سازه های سه بعدی باعث ایجاد نیرو های اولیه بزرگی در سازه می شود[9].

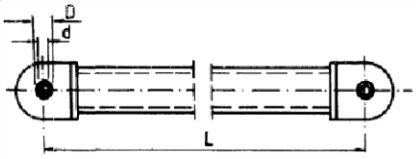
وجود این نوع ناکاملی در سازهای نامعین استاتیکی به واسطه ایجاد تنشهای اولیه در اعضای سازه تاثیر بسزائی در رفتار آن خواهد گذاشت. تاثیر این نوع ناکاملی در سازه بسته به نوع اتصال مورد استفاده در آن و همچنین شرایط سازه متفاوت خواهد بود. در صورتی که بخواهیم یک رواداری مجاز برای مقدار این نوع ناکاملی در یک خرپای فضائی تعیین کنیم باید علاوه بر محدودیتهای آورده شده در بخش 3 به خاطر اینکه وجود ناکاملی در اندازه طول اعضا باعث ایجاد تنشهای اولیه و تغییر شکل هائی در سازه های نامعین می شود باید یک سری رابطه اضافی که نشان دهنده تاثیر همزمان ایجاد تنش های اولیه و تغییر شکل های ایجاد شده در سازه در اثر این نوع ناکاملی است نیز به محدودیتهای فوق اضافه شود.[10] .. استفاده از این روابط برای بررسی حساسیت یک سازه، نسبت به وجود ناکاملی در طول اعضای آن بسیار پیچیده و در سازه ها با تعداد اعضا ی زیاد غیر ممکن خواهد بود.

6-1 بررسی تاثیر نوع اتصال در میزان ناکاملی در طول اعضا

میزان ناکاملی در طول اعضای مورد استفاده در سازه به نوع اتصال مورد استفاده در آن بستگی دارد. در حالت کلی اتصالات مورد استفاده در سازه های فضاکار به دو دسته اتصالات رایج و اتصالات خاص تقسیم می شوند .دلیل استفاده از اتصالات خاص می تواند باز دهی اتصال در سازه و یا به وجود آوردن ظاهری زیبا در سازه باشد [9]. اتصالات چه

جزء اتصالات رایج باشد یا اتصالات خاص می توان آنها را در دو گروه اتصالات قابل تنظیم و اتصالات غیر قابل تنظیم تقسیم بندی کرد.

سیستم های اتصال غیر قابل تنظیم به سیستم هایی گفته می شود که امکان تنظیم فاصله بین دوانتهای اتصال بسیارمحدوداست. به عنوان مثال اتصالات پیچی متداول جزو اتصالات غیر قابل تنظیم هستند چون در این نوع اتصال فاصله بین سوراخ پیچ ها در دو انتهای عضو ثابت است .در این حالت در صورتی که طول عضوی کمی بلند یا کوتاهتر از فاصله بین سوراخ ها باشد نصب عضو در محل به سادگی امکان پذیر نخواهد بود و باعث ایجاد اغتشاش[1] در عضو خواهد شد.چون طول عضو عملاً هیچگاه نمی تواند کاملا دقیق باشد بنابراین همواره باعث ایجاد تنش های اولیه ای دراعضا خواهد شد. یک مثال از حالت سیستم اتصال غیر قابل تنظیم در شکل 4 نشان داده شده است که می توان نتایج آن را به سایر سیستم های غیر قابل تنظیم ارجاع داد. در صورتی که طول عضو که در محدوده $L \pm \Delta_c$ بوده و Δ_C کمتر از D-d باشد می توان بدون اعمال نیروی محوری به عضو آن را در محل خود قرار داد. در این حالت دیگر تنشهای اولیه در سازه ایجاد نخواهد شد. D و d به ترتیب قطر سوراخ و قطر پیچ است. ولی در صورتی که مقدار طول عضو در محدوده بالا نباشد برای قرار گرفتن عضو در محل خود باید یک نیروی کششی و یا فشاری اضافی به عضو وارد کرد. که این نیرو باعث ایجاد تنش های اولیه در عضو دارای ناکملی و همچنین اعضای مجاور آن خواهد شد که می تواند تاثیر بسزائی در رفتار کل سازه داشته باشد که این تاثیر بسته به نوع سازه متفاوت خواهد بود.



شکل(4): نمونه سیستم اتصال غیر قابل تنظیم

در اتصالات قابل تنظیم درصورت وجود انحراف درطول عضو می توان فاصله را با استفاده از وسیله اتصال تنظیم کرد. در این نوع اتصالات تعیین حدی برای مقدار انحراف درطول عضو چندان کار مطلوبی نیست. به عنوان مثال اتصال جوشی از نوع اتصالات قابل تنظیم است . در این نوع اتصال تنشی ناشی از وجود انحراف در طول عضو در عضو ایجاد نمی شود.ولی در صورت استفاده از این نوع اتصال در صورتی که طول اعضا از مقدار ایده ال تفاوت داشته باشد این امر می تواند باعث تغییر در هندسه اولیه سازه شود.

2-6 تاثیر ناکاملی در طول اعضا در سازه های تک لایه فضاکار

با توجه به سختی کم سازه های شبکه ای تک لایه به خاطر کم بودن تراکم اعضا در این نوع سازه ها نسبت به شبکه های دو لایه، مهمترین ناکاملی سازه ای در این نوع از سازه ها انحراف گره ها از محل های ایده آل خودشان است این مسئله می تواند ناشی از خطاهای ساخت یا بی دقتی در اجرا باشد. شبکه های تک لایه دارای اتصالات مفصلی معمولاً سازه های معینی هستند به همین خاطر حساسیت زیادی نسبت به وجود ناکاملی در طول اعضا ندارند. اما سایر انواع ناکاملی ها مانند وجود انحنا اولیه در عضو ، تغییرات مکانیکی در مشخصات اعضا، باعث تغییر سختی خمشی عضو می

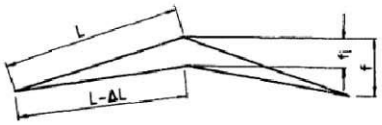
[1] -jamming

شود که هر دو عامل در روی سختی سازه و پایداری آن تاثیر بسزائی دارد. گنبدهای تک لایه به خصوص گنبد های با عمق کم نسبت به وجود ناکاملی حساسیت بیشتری دارند. وجود ناکاملی در طول اعضا باعث کج شدگی در هندسه اولیه عضو شده و در نتیجه باعث کاهش بار کمانش می شود. در طراحی ها باید مسئله تغییرات هندسه اولیه عضو در اثر وجود ناکاملی های اولیه در عضو در نظر گرفته شود [5]. در صورت استفاده از سیستم اتصال قابل تنظیم در شبکه های یک لایه باید کنترل شدیدی در روی هندسه سازه انجام شود تا از تغییرات زیاد در ارتفاع سازه جلوگیری شود چون باعث پدیده ناپایداری می شود. ولی در صورت استفاده از سیستم های اتصال غیر قابل تنظیم فاصله بین مرکز سوراخ ها می تواند بین $L-\Delta_m$ و $L+\Delta_m$ تغییر کند که Δ_m بیشترین مقدارانحراف از طول تئوری عضواست. درحالت شبکه های یک لایه ماکزیمم و مینیمم مقدار طول ممکن برای عضو بعد از نصب ، $L \pm \Delta L$ خواهد بود که ΔL به صورت زیر است[4].

$$\Delta L=\Delta_m-\Delta_c \qquad (3)$$

در صورتی که عضو دارای کوتاه شدگی به میزان ΔL باشد ارتفاع تئوری f به میزان f_i کاهش می یابدکه مقدار این کاهش از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$(L-\Delta L)^2+(f-f_i)^2=L^2-f^2 \qquad (4)$$



شکل(5) :اثر وجود انحراف در اندازه طول عضو

معادله ی فوق را می توان با صرفنظر کردن از ΔL^2 بصورت زیرنوشت:

$$f_i = f - \sqrt{f^2 - 2L\Delta L}$$

درصورتی که فرض کنیم $L=3000\ mm$ و $\Delta L=3\ mm$ و $f=150\ mm$ باشد مقدار کاهش ارتفاع $f_i=82.9$ خواهد بود که 55.3٪ مقدار تئوری است. اگر $\Delta L=f^2/2L$ باشد مقدار $f_i=f$ خواهد شد و در صورتی که ΔL از مقدار فوق بیشتر شود سرهم کردن اعضا به صورت تئوری حتی برای یک سلول نیز به سادگی امکان پذیر نخواهد بود و در حالت عملی نیز باعث به وجود آمدن خطاهای هندسی بسیار بزرگ خواهد شد . درحالت طبیعی مقدار$\Delta_c=2mm$ است و مقدار مجاز Δ_m برابر $5mm$ ، که نشان می دهد مقدار ΔL می تواند تا $7mm$ نیز باشد.این مقدار برای شبکه های تک لایه قابل قبول نیست چون منجر به ناکاملی های هندسی بسیار بزرگی می شود بنابراین یک کنترل سخت گیرانه برای انحراف طول اعضای چنین سازه هایی بسیار حیاتی است. حتی در چنین حالتی نیز تأثیر آن قابل اغماض نیست . اگردرمثال قبلی مقدار $\Delta L=1mm$ فرض شود $f_i = 21.5mm$ یعنی 14.3٪ مقدار f تئوری خواهد شد

3-6 تاثیر ناکاملی در طول اعضا در سازه های دو لایه فضاکار

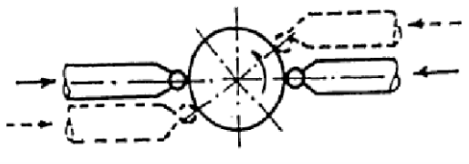
در سازه های معین استاتیکی نیروهای اعضا توسط معادلات تعادل به دست می آیند و وجود ناکاملی در هندسه اعضا در رفتار آنها تفاوتی ایجاد نمی کند. ولی شبکه های دولایه فضاکار به خاطر وجود تعداد اعضای زیاد ، دارای درجه

نامعینی زیادی می باشند . توسط Affan [3]. نشان داده شده است که تعداد اعضای اضافی که می توان آنها را حذف کرد بدون اینکه تأثیری در پایداری سازه های فضاکار دولایه بگذارد بین 15٪ تا 25٪ کل تعداد اعضای خرپای فضایی است این مسئله ممکن است باعث شود طراحان فکر کنند که به خاطر وجود این تعداد عضو اضافی در سازه ، این نوع خرپاها بسیار قابل اعتماد هستند ولی آزمایشاتی که روی شبکه های دولایه انجام شده است نشان می دهد که کمانش حتی یک عضو فشاری در اثر اعمال بار ممکن است باعث اعمال مقدار باری به اعضای مجاور شود که باعث به وجود آمدن خرابی پیش رونده در سازه گردد.[7] .

آزمایشات انجام گرفته روی شبکه های دو لایه فضاکار نشان می دهد که درجه نامعینی زیاد در خرپاهای فضایی نه تنها باعث جلوگیری ازخرابی پیش رونده دراین سازه ها نمی شود بلکه به خاطر وجود ناکاملی در طول اعضا نیروی اولیه ای در این اعضا به وجود خواهد آمد که ممکن است باعث خرابی زودرس تعدادی از اعضا شده و منجر به خرابی کل سازه گردد به همین خاطر نبایدانتظارداشت که ماهیت نامعینی زیاد شبکه های دولایه باعث افزایش ضریب اطمینان شود. پس وجود نامعینی تأثیرکم یا ناچیزی در افزایش ضریب اطمینان سازه خواهد داشت. به عبارت بهتر سازه های فضاکار دو لایه دارای نامعینی استاتیکی قابل توجهی هستند که نباید آن را با نامعینی سازه ای که توانایی سازه برای تحمل بارهای طراحی با از بین رفتن یک یا چند عضو است اشتباه گرفت .

به خاطر ماهیت نامعینی سازه های فضاکار ، وجود این نوع ناکاملی می تواند باعث ایجاد نیروهای اولیه در اعضای مختلف شود در نتیجه نیروهای ایجاد شده در اعضا با آنچه در آنالیزهای کامپیوتری در روی سازه ایده آل انجام گرفته متفاوت خواهد بود که به خاطر این مسئله ممکن است اعضا، باری بیش از مقدار به دست آمده از آنالیزها تحمل کنند که در می تواند باعث خرابی زودرس در سازه شودمطالعات آزمایشگاهی توسط محققان در روی شبکه های دو لایه تخت نشان داده است که وجود ناکاملی های مختلف به خصوص ناکاملی در طول اعضا باعث کاهش قابل توجهی در ظرفیت باربری سازه در مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل بر اساس تئوری های الاستیک می شود که این کاهش بین 25٪ تا 40٪ است [2].

به علت سختی زیاد در شبکه های دو لایه مهمترین اثر وجود ناکاملی در اعضای شبکه های دو لایه تاثیر آن در روی رفتار اعضای دارای ناکاملی به واسطه ایجاد تنش های اولیه است. در صورتی که در شبکه های دولایه فضاکاراز سیستم اتصال غیر قابل تنظیم استفاده شود درصورت وجود انحراف در طول عضو در اثر اعمال نیرو برای قرار دادن عضو در محل خود یک پیش تنیدگی نامطلوب در سازه ایجاد می گردد که مقدار این پیش تنیدگی بستگی به مقدارانحراف طول عضو دارد. به همین خاطر استفاده ازاتصالات قابل تنظیم برای شبکه های دولایه بسیار مناسب خواهد بود چون باعث کاهش چشمگیری در نیروی اولیه ی اعضا دراثر وجود انحراف در طول عضو خواهد شد. همچنین وجود ناکاملی در طول اعضای سازه علاوه بر ایجاد یک سری تنش های اولیه در عضو در صورت سختی کم گره ها می تواند باعث یک چرخش جزئی در گره ها شود. در طی بارگذاری سازه چرخش گرهی در سازه افزایش می یابد. الگوی تصادفی چرخش گرهی باعث می شود انحراف نیروی اعضا از مقدار ایده آل بیشتر شود. عضو بحرانی که بیشترین تنش را دارد کمانه کرده در حالی که سایر اعضا دارای تنش کمتری هستند. به خاطر رفتار ترد عضو در اثر کمانش، این عضو ظرفیت باربری خود را از دست داده و نیروی تحمل شده توسط این عضو به سایر اعضای بحرانی منتقل می شود. و این رفتار به صورت زنجیره ای ادامه می یابد که این مسئله خود نیز باعث افزایش ناپایداری گرهی می شود[2] (شکل 6).



شکل(6): ناپایداری گرهی

7. تاثیر ناکاملی در سازه های فضاکار کش بستی

یک سازه کش بستی از مجموعه اعضای فشاری گسسته که در درون اجزای کششی کابلی پیوسته قرار دارد تشکیل شده است و آرایش این اجزا طوری است که با هم تشکیل یک سازه مشبک فضائی را می دهند. سازه به دست آمده توسط اعمال پیش تنیدگی اولیه صلب و پایدار می شوند. علاوه بر ناکاملی های اجزای فشاری موجود در این سازه که مانند شبکه های تک لایه و دو لایه است یکی از مهمترین ناکاملی ها که تاثیر عمده ای در رفتار این سازه ها دارد خطا های ساخت در کابل های مورد استفاده درسازه است. بر اساس بررسی های انجام گرفته خطا در طول کابل های مورد استفاده نقش کلیدی در مقدار پیش تنیدگی و رفتار سازه خواهد داشت معمولاً در سازه های کش بستی از دو نوع کابل با طول ثابت و نیروی ثابت استفاده می شود. برای رسیدن کابل ها به یک نیروی ثابت نیاز به کشیدگی کابل است وجود ناکاملی در این کابل ها تاثیر چندانی در روی سازه نخواهد داشت. ولی وجود ناکاملی در طول کابل های با طول ثابت که در طول عمر سازه با همان طول باقی می مانند نقش کلیدی در رفتار سازه خواهد داشت.

یکی از انواع دیگر ناکاملی ها که می تواند در رفتار سازه موثر باشد وجود ناکاملی در سطح مقطع کابل و مدول الستیسیته آن است. وجود این خطا در سازه می تواند باعث تغییر در مقدار پیش تنیدگی و عملکرد سازه شود. یکی دیگر از مسائلی که در میزان پیش تنیدگی کابل ها تاثیر گذار است گالوانیزه کردن کابلهای فولادی برای جلوگیری از زنگ زدگی آنها است. گالوانیزه کردن کابل ها باعث افزایش قطر و وزن و همچنین کاهش مقاومت کابل می شود. معمولاً این کاهش مقاومت بین 3 تا 8 درصد است. از نتایج به دست آمده از تحلیل های کامپیوتری مشخص می شود که حساسیت سازه نسبت به وجود ناکاملی در طول کابل ها بیش از ناکاملی در میزانEA است.همچنین تحقیقات نشان می دهد در این نوع سازه ها وجود خطا در محل گره ها نیز می تواند باعث کاهش چشمگیری در ظرفیت نهائی سازه گردد البته قابل ذکر است که تاکنون بررسی های بسیار اندکی در مورد تاثیر انواع ناکاملی ها در روی رفتار سازه ها ی کش بستی انجام شده است و انجام تحقیقات بیشتر ضروری به نظرمی رسد.

9. خلاصه و نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله نشان دادن حساسیت سازه های خرپائی به وجود انواع ناکاملی ها می باشد در این مقاله به بررسی کلی تاثیر وجود ناکاملی های متداول در سازه های خرپائی پراخته شد. مطالعات انجام گرفته تاثیر عمده وجود انواع ناکاملی ها را در رفتار سازه و کاهش ظرفیت آن به وضوح نشان داده است به همین خاطر در نظر گرفتن تاثیر این ناکاملی ها در سازه امری ضروری خواهد بود.

اهم نتایج حاصل از این تحقیق را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- هر چه مقدار ناکاملی در سازه بیشتر باشد سازه رفتار غیرخطی بیشتری خواهد داشت. با توجه به اینکه برای طراحی سازه ها از آنالیز های خطی استفاده می شود هر چه مقدار ناکاملی موجود در سازه افزایش یابد ظرفیت باربری نهائی سازه از مقدار پیش بینی شده توسط آنالیزها کمتر خواهد بود.
- با توجه به ماهیت تصادفی وجود انواع ناکاملی ها در سازه ها نمی توان بررسی دقیق کمّی روی این مسئله انجام داد. ولی به خاطر تاثیر قابل توجه وجود این ناکاملی ها در ظرفیت باربری نهائی و رفتار سازه برای انجام یک طراحی درست باید تاثیرات این ناکاملی ها در سازه در نظر گرفته شود. همچنین تا حد امکان از وجود این ناکاملی ها در سازه جلوگیری گردد.
- در سازه ها ی فضاکار دو لایه حساسیت به وجود ناکاملی در طول اعضا بیشتر از وجود ناکاملی در هندسه اولیه سازه است که این مسئله در سازه های تک لایه برعکس است.
- استفاده ازاتصالات قابل تنظیم برای شبکه های دولایه بسیار مناسب خواهد بود چون باعث کاهش چشمگیری درنیروی اولیه ی اعضا که دراثر وجود انحراف در طول عضو ایجاد شده است خواهد شد.
- در صورت استفاده از اتصالات قابل تنظیم در خرپاهای تک لایه باید کنترل شدیدی در روی هندسه سازه انجام داد تا وجود ناکاملی در طول اعضا باعث تغییر شدید در هندسه اولیه سازه نشود.
- وجود ناکاملی در اعضای فشاری نسبت به اعضای کششی تاثیر بیشتری در رفتار کلی سازه دارد که این مسئله به خاطر رفتار پس کمانشی این اعضا است.
- قبل از نصب اعضای مختلف یک سازه خرپائی باید تمامی این اعضا کنترل شود تا مقدار ناکاملی در آنها از حد مجاز فراتر نباشد. در صورت وجود مقداری ناکاملی در عضو بهتر است در محل های غیر بحرانی سازه که اعضا دارای بار کمتری هستند استفاده گردد.

10. مراجع

[1] Akira Wada and Zhu Wang, 1992 : Influences of Uncertainties on Mechanical Behavior of a Double-Layer Space Truss. International journal of space structures. Volume 7 No 3

[2] Ariel Hanaor , 1995: Design and Behaviour of Reticulated Spatial Structural Systems international journal of space structures Volume 10 No 3

[3] El-Sheikh, A. I, 1995 : Sensitivity of Space Trusses to Member Geometric Imperfections, International Journal of Space Structures, Volume 10 No 2 , 89-98

[4] Bălut, Nicolae; Gioncu, Victor, 2000 : The Influence of Geometrical Tolerances on the Behaviour of Space Structures. International journal of space structures .Volume 15, Numbers 3-4, pp. 189-194(6).

[5] GIONCU, V. and BALUT, N, 1992: Instability Behaviour of Single Layer Reticulated Shells. International Journal of Space Structures, Volume 1No4, 243-252.

[6] CEN-European Committee for standardization: Execution of steel structures-part 1:general Rules and Rules for Buildings.Pr ENV 1090-1

[7] Lewis C. Schmidt. Peter R. Morgan. Ariel Hanaor, 1982: Ultimate Load Testing of Space Trusses. *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, No. 6, pp. 1324-1335

- قندی الهام، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد با عنوان بررسی ناپای‌داری سازه های کش بستی دولای‌ه. دانشگاه صنعتی سهندسال 8 1385

[9] Cuoco, Daniel A, 1997: Guidelines for the Design of Double-Layer Grids. American Society of Civil Engineers Task Committee on Double-Layer Grids

[10] W. Gutkowski and J. Latalski, 2005: Structural optimization with member dimensional imperfections. Structural and Multidisciplinary Optimization. Volume 30,1-10