Journal of Structural and Construction Engineering, 8(11), 2022, pp. 239-258

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Buckling behavior of composite double-layer space-grid structures

Parviz Shahbazi-Reveshti1, Shahrokh Maalek2, Reza Akbari3*

1- PhD Candidate, Department of Civil Eng., Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran
2 -President, Iranian Institute of Spatial Structures and Faculty Member, School of Civil Eng., Univ. of Tehran, Iran
3- Senior Bridge and Structural Engineer, Road Maintenance and Transportation Organization, Tehran, Iran

ABSTRACT

In order to better understanding the structural response of double-layer flat grids, the effects of using of a reinforced concrete (RC) topping in composite action with double-layer space-grid structures on the buckling behavior of such grids are studied. Both non-composite and composite flat grids (with and without any integral RC topping) with different span lengths are considered. The base models with span lengths of 15, 30 and 60 meters are initially selected and designed employing the well-known weight–density procedure. The finite element models are then developed in the ABAQUS environment with special consideration in the modeling procedure for beam type elements of pin connections at two ends in order to employ the capabilities of the software for buckling and post-buckling analyses. Elastic buckling analyses as-well-as non-linear analyses incorporating both the geometric and material non-linearities emphasizing the structural stability and post-buckling behavior are performed. It was found that the presence of a RC cover in composite action with double-layer flat grids can lead a decrease in the weight of steel around 29 % as-well-as maximum vertical deflection around 61 %. The presence of a RC layer can also improve the elastic buckling capacity up to 94 %. The results showed that the ultimate strength of such structures in composite state increases significantly. Finally, the RC layer can improve the post-buckling behavior which can lead an increase in the structural reliability from progressive failure or sudden loss of the structural strength.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 December 2020
Revise Date: 19 April 2021
Accept Date: 01 June 2021

Keywords:
Space grids
Double-layer grids
Composite structures
Buckling
Post-buckling

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262313.2310

*Corresponding author: Reza Akbari
Email address: rakbari@ut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

رفتار کمانشی شبکه‌های دو لایه فضاکار تخت مختلط

پرویز شهبازی روشتی[۱]، شاهرخ مالک[۲]، رضا اکبری[۳*]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۲-رئیس انجمن سازه های فضاکار ایران و دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳-دانش آموخته دکترای مهندسی سازه دانشکده فنی دانشگاه تهران و معاون سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، تهران، ایران

چکیده

بمنظور شناخت بهتر از رفتار سازه‌ای شبکه های دو لایه تخت مختلط در مقیاس واقعی و در ابعاد متفاوت، نتایج مطالعات تحلیلی درخصوص تاثیر لایه بتنی بصورت عملکرد مرکب با شبکه تخت دولایه فضاکار در رفتار کمانشی شبکه در این مقاله ارائه شده است. ابتدا مشخصات هندسی مدلهای اولیه به دهانه ۱۵، ۳۰ و۶۰ متر به روش چگالی وزنی تعیین شده و به منظور بهره‌گیری از قابلیت‌های تحلیلی نرم افزار آباکوس، مدل‌های انتخابی با المانهای تیر دراین نرم افزار مدلسازی شده‌اند. با انجام تحلیل‌های خطی استاتیکی و کمانش الاستیک نه تنها رفتار اولیه و ظرفیت کمانش الاستیک مدلهای سازه‌ای ارزیابی شده است بلکه مطالعات تکمیلی و رفتار پس کمانش با در نظر گرفتن دو عامل غیر خطی مصالح و هندسی صورت گرفته است. نتایج مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان داد اجرای دال بتنی بطور متوسط ۲۹/۲ درصد صرفه‌جویی در مصرف فولاد و بیش از ۶۱/۲۴ درصد کاهش خیز در بر دارد. این نتایج نشان می‌دهد ظرفیت کمانش الاستیک که یکی از شاخص‌های مهم در سازه‌های فضاکار بشمار می‌رود با اجرای دال بتنی روی مدل‌های سازه‌ای بطور میانگین ۹۳/۶۲ درصد ارتقاء یافته است. نتایج تحلیل‌های غیرخطی که برای بررسی رفتار پس‌کمانش مدلهای سازه‌ای صورت گرفته است نشان می‌دهد، مرکب سازی شبکه‌های دولایه ایده موثری است که نه تنها ظرفیت اولیه این مدلها را بطور متوسط بیش از ۹۸ درصد نسبت به مدل‌های غیرمختلط ارتقاء داده بلکه با بهبود رفتار پس کمانش، مانع خرابی پیشرونده و شکست ناگهانی این نوع سازه‌ها میگردد که خود یکی از ویژگی‌های مهم سازه های ایمن به شمار می‌رود.

کلمات کلیدی: سازه های فضاکار، شبکه های دولایه، سازه‌های مختلط، کمانش، پس کمانش

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262313.2310	doi:
۱۳۹۹/۰۹/۲۶	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۴۰۰/۰۳/۱۱	۱۴۰۰/۰۳/۱۱	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	10.22065/jsce.2021.262313.2310	

*نویسنده مسئول: رضا اکبری

پست الکترونیکی: rakbari@ut.ac.ir

۱- مقدمه

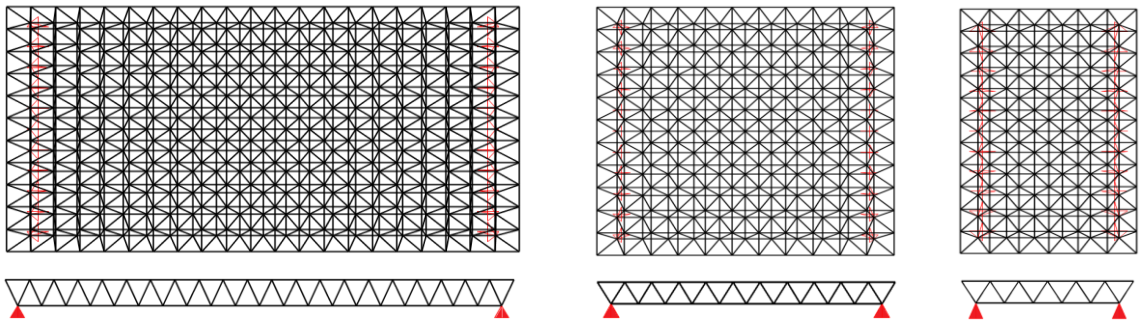
سازه‌های فضاکار به دلیل مزایا و قابلیت‌های معماری و سازه‌ای بالا و توسعه مصالح و تکنولوژی ساخت و ورود نرم افزارهای قوی به عرصه‌های تحلیل و طراحی، بطور گسترده و روز افزون در پروژه‌های بزرگ ملی و بین المللی در پوشش آمفی‌تئاترها، پایانه‌های مسافربری، سالن‌های صنعتی، آشیانه هواپیماها، سالن‌های ورزشی و نمایشگاه‌ها و نظایر آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد. علیرغم این واقعیت که امروزه هزاران سازه فضاکار در جهان ساخته شده است، متاسفانه خیلی از ضعف‌های سازه‌ای این سازه‌ها ازجمله ناپایداری و خرابی موضعی و کلی به جهت کمانش المانهای فشاری و پدیده خرابی پیشرونده بطور رضایت بخشی حل نشده است. رفع ضعف‌های سازه‌ای این گروه از سازه‌ها از یک سو و تقاضای مستمر برای کاربری‌های خاص از سوی دیگر زمینه ساز ایده‌های نو در سازه‌های فضاکار گردیده است و سازه‌های فضاکار مختلط حاصل این ایده‌های جدید می باشد که نه تنها رفتار سازه‌ای این نوع از سازه‌ها را بهبود می‌بخشد بلکه زمینه را برای کاربرد این نوع از سازه‌ها در پروژه‌های خاص نظیر آشیانه هواپیمایی، پلسازی، سکوهای دریایی و ساختمان سازی فراهم ساخته است. بررسی سوابق تحقیقات انجام شده، بیانگر این واقعیت است که مطالعات صورت گرفته روی سازه‌های فضاکار مختلط اندک و بیشتر در مقیاس کوچک می‌باشد.

ایده عملکرد مرکب اولین بار توسط کاستیلو [۱] در سال ۱۹۶۷ روی شبکه دولایه تخت فضاکار مورد ارزیابی قرار گرفت و البزاز در سال ۱۹۷۶ [۲] مطالعات بیشتری انجام داد و روند پیش ساخته کردن این نوع سازه‌ها در سال ۱۹۸۴ توسط سواره و همکاران [۳] دنبال شد. در دهه نود احمد الشیخ از دانشگاه داندی مطالعات گسترده‌ای روی سازه‌های فضاکار مختلط داشت که نتایج آن را طی چندین مقاله در مجلات و مجامع علمی ارائه نمود. مقاله " مطالعه آزمایشگاهی رفتار خرپاهای فضایی"در سال ۱۹۹۳ [۴]، مقاله" اثر عملکرد مرکب روی رفتار سازه های فضاکار " در سال ۱۹۹۶ [۵] و مقاله" طراحی دال های بتنی فوقانی در خرپاهای فضایی مرکب " در سال ۱۹۹۹ [۶] از جمله مقالات این محقق می‌باشد. اما در مطالعات جدید در دهه اخیر، لاکشمی و همکاران [۷ و۸] با مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی روی شبکه های فضاکار دو لایه تخت در کنار عوامل مختلف ازجمله موقعیت و شرایط تکیه‌گاهی، تاثیر دال بتنی بر رفتار شبکه دو لایه فضاکار را ارزیابی نمودند و نتایج آن را در دو مقاله منتشر نمودند و نشان دادند که اجرای دال بتنی روی شبکه فوقانی نه تنها باعث افزایش مقاومت و سختی سازه شده و کاهش خیز را به دنبال دارد بلکه برای دهانه‌های متوسط و بزرگ اقتصادی نیز می‌باشد. در سال ۲۰۱۴، سنگتا و سنتیل [۹] با انجام مطالعه تحلیلی روی سه مدل شبکه دولایه مختلط به ارزیابی تاثیر پارامترهایی چون ابعاد مدول، مقاومت بتن و ضخامت دال در رفتار سازه‌ای این نوع از سازه‌ها پرداختند، نتایج این تحقیق نشان داد افزایش مقاومت بتن و ضخامت دال از یک حد بهینه به بعد تاثیر چندانی در ارتقای رفتار سازه‌ای این مدل‌ها ندارد .مصطفی الشمی و همکاران [۱۰] تاثیر بازشوها را روی شبکه‌های فضاکار دو لایه تخت مختلط مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که حذف قسمتی از دال بتنی از شبکه دولایه مختلط به کاهش ظرفیت باربری سازه منجر می‌شود که در سازه با تکیه‌گاه کناری قابل توجه است. گاسی [۱۱] سبک جدیدی از سازه‌های فضاکار مرکب با کابل ابداع نموده که در آن از المانهای میله‌ای یا کابلی در اعضای تحت کشش استفاده نموده است و با انجام تحلیل‌های مقایسه‌ای، سبک سازی، صرفه جویی اقتصادی و صنعتی سازی و سهولت اجرا را ازجمله مزایای این روش بیان نموده است. مالک و همکاران [۱۲] مطالعات مشابه را روی پل‌های متشکل از شبکه‌های دولایه در ترکیب با عرشه بتن‌آرمه انجام دادند. سنگتا [۱۳] در تکمیل مطالعات خود روی شبکه‌های دولایه مختلط، تاثیر بازشو در دال بتنی را با مدلسازی شبکه دولایه مختلط به با شرایط تکیه‌گاهی مختلف و ایجاد بازشو در گوشه، لبه کناری و وسط دال بتنی مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان داده است حذف قسمتی از دال بتنی از شبکه دولایه تخت مختلط باعث کاهش ظرفیت باربری سازه می‌شود بطوریکه بدترین شرایط بازشو بر اساس شرایط تکیه‌گاهی متفاوت بوده و در شرایط تکیه‌گاهی گوشه، تکیه‌گاه کناری و تکیه‌گاه محیطی به ترتیب قسمت میانی لبه‌های کناری، وسط و لبه کناری و مرکز دال بیان شده است. شهبازی و همکاران [۱۴] مطالعه جدیدی را روی رفتار کمانشی چلیک‌های دولایه مختلط انجام دادند و نشان دادند بکارگیری پوسته بتنی در ترکیب با شبکه فوقانی این سازه‌ها نه تنها ظرفیت اولیه و نهایی این سازه‌ها را ارتقاء می‌دهد بلکه به بهبود رفتار پس کمانش آنها نیز منجر می‌شود.

مطالعه رفتاری روی شبکه‌های دولایه تخت مختلط به لحاظ استفاده گسترده از این سازه ترکیبی و تلاش برای بهبود رفتار سازه-ای شبکه‌های دولایه تخت با بکارگیری دال بتنی روی شبکه فوقانی ضروری می‌نماید. در این تحقیق که به منظور بررسی رفتار کمانشی شبکه دولایه تخت مختلط صورت گرفته است مدل‌هایی در مقیاس واقعی در سه گروه سازه‌ای در دهانه‌های مختلف انتخاب شده و بصورت بهینه طراحی شده‌اند. با انجام مطالعات اولیه و تحلیل کمانش الاستیک، موقعیت‌های بحرانی در مدلهای غیر مختلط و مختلط شناسایی شده و از این اطلاعات برای مطالعات تکمیلی و بررسی رفتار غیرخطی این دو گروه سازه‌ای استفاده شده است. نتایج اولیه ناشی از تحلیل-های خطی و نتایج مطالعات تکمیلی غیر خطی و پس کمانش که بصورت گرافیکی و عددی در بخش‌های مختلف مقاله ارائه شده است به روشنی نشان می‌دهد بکارگیری دال بتنی روی لایه فوقانی شبکه دولایه فضاکار تخت تاثیر فوق‌العاده‌ای در بهبود سازه و رفتار کمانشی آن دارد.

۲- مدلسازی

عوامل متعددی در رفتار سازه‌های فضاکار و شبکه‌های دو لایه تخت تاثیر گذارند که برای دستیابی به یک طرح بهینه و پاسخ‌های قابل اطمینان و موثر، در نظر گرفتن آنها در فرایند مدلسازی، تحلیل و طراحی حائز اهمیت می‌باشد. از اینرو فرم سازه‌ای، شرایط تکیه-گاهی، نوع اعضاء و اتصالات، مصالح و نوع پوشانه‌ها، شیوه ساخت و نصب و حتی اجزاء غیر سازه‌ای از جمله عوامل تاثیرگذار مهمی می‌باشند که می‌بایست در مدلسازی و رفتارشناسی سازه‌های فضاکار در نظر گرفته شوند. سازه‌های مورد مطالعه در این مقاله شبکه‌های دو لایه تخت می‌باشند که بمنظور واقعی‌سازی، ابعاد اصلی مدل‌ها در مقیاس بزرگ و در سه گروه سازه‌ای به ابعاد ۳۰×۱۵، ۳۰×۳۰ و۳۰×۶۰ متر با شرایط تکیه‌گاهی یکطرفه مطابق شکل(۱) انتخاب شده است. از طرفی با توجه به کاربرد وسیع شبکه‌های فضایی مربع روی مربع در این تحقیق نیز فرم سازه‌ای انتخابی شبکه دو لایه تخت با مدول‌های مربع روی مربع می‌باشد.



شکل۱: مدل‌های انتخابی با شرایط تکیه‌گاهی یکطرفه

۲-۱- اعضاء و مشخصات فنی مصالح

اعضای مدل‌های سازه‌ای از پروفیل لوله از جنس فولاد گرم نورد شده طبق استاندارد DIN En-10210-1 با در نظر گرفتن مسائل فنی و اجرایی مطابق جدول (۱) انتخاب شده است. پوشانه بسته به نوع مشخصات و رفتار آن بصورت غشایی یا پوسته‌ای مدل‌سازی می‌شود از اینرو در این تحقیق در شبکه‌های فضاکار تخت غیر مختلط پوشانه بصورت غشایی و تنها برای انتقال بار مرده و زنده مدلسازی شده است درحالیکه در نوع مختلط پوشانه نقش سازه‌ای داشته و در مدلسازی شبکه‌های فضاکار تخت مختلط بصورت دال بتنی در ترکیب با شبکه فوقانی در نظر گرفته شده است. مشخصات فنی مصالح، فولاد و بتن نیز به ترتیب در جدول‌های(۲) و(۳) آورده شده است.

جدول ۱ : مشخصات هندسی مقاطع انتخابی اعضای مدل‌ها

Type	*D mm*	*t mm*	*A cm^2*	*I cm^4*	*i cm*
P1	33.7	4.0	3.73	4.19	1.06
P2	42.4	4.0	4.83	8.99	1.36
P3	48.3	4.0	5.57	13.8	1.57
P4	60.3	5.0	8.69	33.5	1.69
P5	76.1	5.0	11.2	70.9	2.52
P6	88.9	4.0	10.7	96.3	3.00
P7	101.6	6.3	18.9	215	3.38
P8	114.3	5.0	17.2	313	3.82
P9	139.7	6.3	26.4	589	4.66
P10	168.3	8.0	40.3	1297	5.67

جدول ۲: مشخصات فنی فولاد مصرفی در مدل‌های سازه‌ای

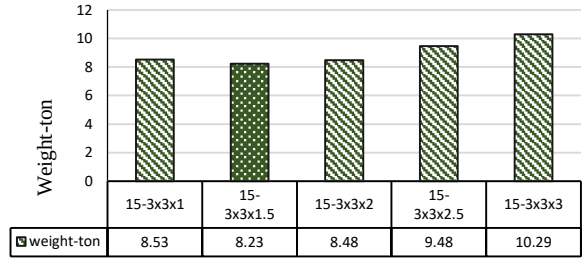
Type	$F_y\ kg/cm^2$	$F_u kg/cm^2$	$E_S kg/cm^2$	ν
St 57	3600	5200	2.0E6	0.2

جدول ۳: مشخصات فنی بتن مصرفی در مدل‌های مختلط

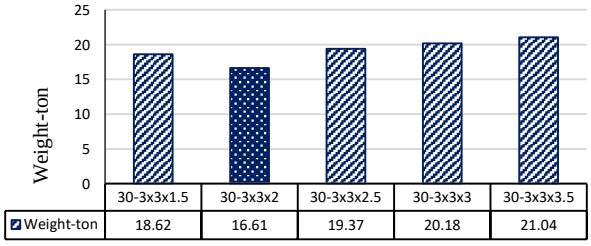
Type	$f_c kg/cm^2$	$E_c kg/cm^2$	ν
C40	400	3.16E5	0.3

۳-۲- انتخاب مدل پایه با بهینه یابی وزنی

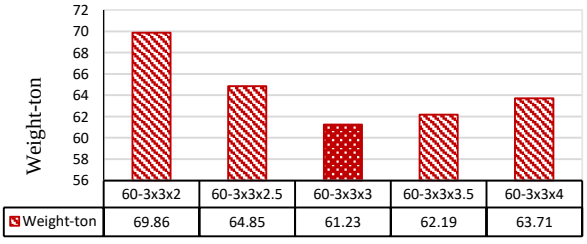
بمنظور دستیابی به مدول مناسب و بهینه، مطالعه تحلیلی بر پایه بهینه‌یابی وزنی روی مدل‌های سازه‌ای غیرمختلط صورت گرفته است. چگالی شبکه‌های فضاکار و نسبت ارتفاع به دهانه باید به نحوی انتخاب شوند که علاوه بر دستیابی به یک طرح بهینه، تحت تاثیر بارها و نیروهای خارجی پاسخ مطلوبی نیز برای سازه حاصل شود. به این منظور مدل پیشنهادی با بار مرده ۲۰۰ و بار برف ۱۵۰ کیلوگرم برمترمربع با تغییر ابعاد و ارتفاع شبکه توسط نرم‌افزار sap2000-v20 مطابق آیین نامه AISC 360-10 مورد مطالعه و تحلیل و طراحی چرخه‌ای قرار گرفته است. وزن سازه برای مدل‌های مختلف استخراج شده و جهت مقایسه به صورت نمودار شکل(۲) ارائه شده است.



الف- نمودار وزن مدل‌های ۱۵ متری



ب- نمودار وزن مدل‌های ۳۰ متری



ج- نمودار وزن مدل‌های ۶۰ متری

شکل ۲: نمودار وزن مدل‌ها برحسب مدول‌های مختلف

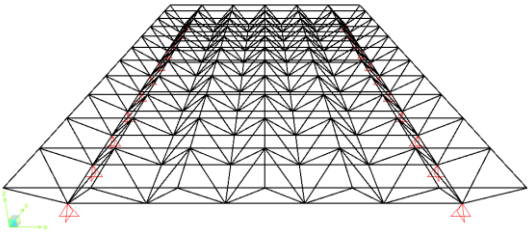
نظر به نتایج حاصل از بهینه یابی وزنی مطابق نمودارهای شکل(۲) مدول بهینه برای مدل به دهانه ۱۵ متری شبکه ۳×۳ با ضخامت ۱,۵ متر، برای مدل به دهانه ۳۰ متری شبکه ۳×۳ با ضخامت ۲ متر و برای مدل به دهانه ۶۰ متری شبکه ۳×۳ با ضخامت ۳ متر می‌باشد. با توجه به ابعاد ۳متری شبکه فوقانی ضخامت دال بتنی روی شبکه فولادی بر اساس ملاحظات آیین نامه‌ای ۷۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. بمنظور سهولت نامگذاری مدلهای سازه‌ای در ادامه این تحقیق مدل‌های سازه‌ای غیرمختلط و مختلط به ترتیب با حروف NC و حرف C با اندازه دهانه نام گذاری شده است.

۳-تحلیل و طراحی مدل‌ها

مدل‌های سازه‌ای بصورت غیرمختلط و مختلط با دال بتنی با رعایت مشخصات مدل پایه حاصل از بهینه‌یابی وزنی مدلسازی شده و تحت ترکیب بار بیان شده تحلیل و طراحی شده است. نتایج این تحلیل و طراحی مدل‌ها نه تنها برای ارزیابی اولیه از عملکرد مدل‌های سازه‌ای و تاثیر دال بتنی بر رفتار سازه‌ای مدل‌ها مورد استفاده بوده بلکه برای مدلسازی و تحلیل‌های تکمیلی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. نتایج گرافیکی این تحلیل و طراحی شامل تصویری از مدل سه بعدی سازه، گرافیکی از نتایج طراحی که بصورت مقطع عرضی از مدل با پروفیل‌های طراحی شده و نمودار توزیع نیروی محوری در مقطع عرضی و مقطعی از مدل تغییرشکل یافته جهت مقایسه در سه گروه سازه‌ای در دو حالت غیرمختلط و مختلط در شکل‌های (۳) الی(۸) نشان داده شده است. این نتایج گرافیکی نه تنها ساختار هندسی، مشخصات سازه‌ای و موقعیت های بحرانی مدل‌های سازه‌ای را نشان می‌دهد بلکه تاثیر اولیه دال را در بهبود رفتار سازه‌ای مدل‌های مختلط با تغییر وضعیت توزیع نیرو و کاهش خیز در مدل‌های سازه‌ای مختلط نسبت به مدل‌های غیر مختلط را نشان می‌دهد.

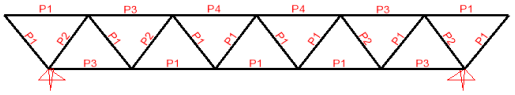
۳-۱-تحلیل و طراحی مدل به دهانه ۱۵متر

این مدل سازه‌ای که کوچکترین مدل تحلیلی در این تحقیق می‌باشد یک شبکه دو لایه تخت به دهانه ۱۵ متر و طول ۳۰ متر است که ضخامت بهینه آن ۱,۵متر بوده و در نوع مختلط آن شبکه فوقانی سازه با دال به ضخامت ۷۵ میلیمتر ترکیب شده است. مدل سازه ای NC15 و مدل C15 مدل‌های سازه‌ای شبکه دولایه تخت غیر مختلط و مختلط این مدل هستند که تحت ترکیب بار بیان شده تحلیل و طراحی شده و نتایج گرافیکی آن که شامل سایز پروفیل‌های طراحی شده مدل، نمودار توزیع نیروی محوری در مقطع عرضی و مقطعی از مدل تغییرشکل یافته سازه می‌باشد در دو حالت غیرمختلط و مختلط طی شکل‌های(۳)و(۴) ارائه شده است.

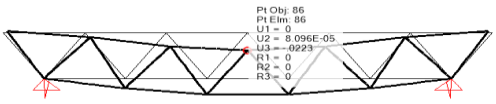


الف- مدل غیرمختلط به دهانه ۱۵ متر

ب- توزیع نیروی محوری در اعضای مدل غیرمختلط به دهانه ۱۵ متر

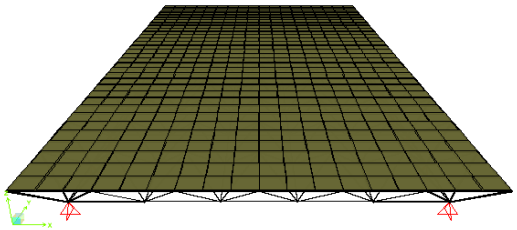


ج- نتایج طراحی مدل غیر مختلط به دهانه ۱۵ متر با نتایج طراحی

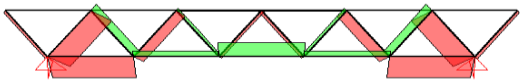


د- مقطع عرضی تغییرشکل یافته مدل غیرمختلط به دهانه ۱۵ متر

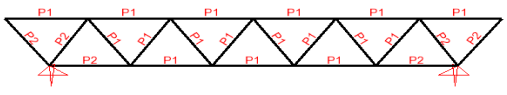
شکل ۳: نتایج گرافیکی تحلیل و طراحی مدل غیرمختلط به دهانه ۱۵ متر



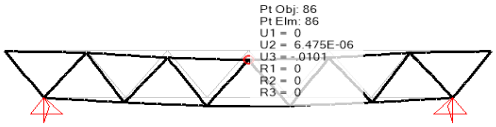
الف- مدل مختلط به دهانه ۱۵ متر



ب- توزیع نیروی محوری در اعضای مدل مختلط به دهانه ۱۵ متر



ج- نتایج طراحی مدل مختلط به دهانه ۱۵ متر با نتایج طراحی

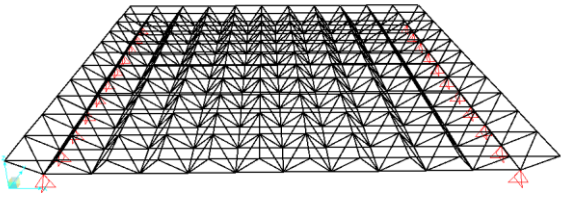


د- مقطع عرضی تغییرشکل یافته مدل مختلط به دهانه ۱۵ متر

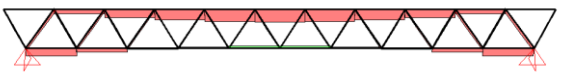
شکل ۴: نتایج گرافیکی تحلیل و طراحی مدل مختلط به دهانه ۱۵ متر

۲-۳-تحلیل و طراحی مدل به دهانه ۳۰ متر

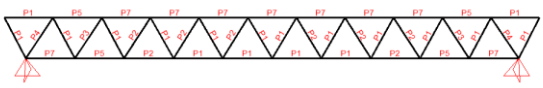
این مدل سازه‌ای متوسط یک شبکه دولایه تخت به دهانه ۳۰ متر و طول ۳۰ متر است که ضخامت بهینه آن ۲ متر ارزیابی شده و در نوع مختلط آن شبکه فوقانی سازه با دال به ضخامت ۷۵ میلیمتر ترکیب شده است مدل سازه‌ای 30NC و مدل 30C مدل‌های سازه‌ای شبکه دولایه تخت غیرمختلط و مختلط این مدل هستند که تحت ترکیب بار بیان شده تحلیل و طراحی شده و نتایج گرافیکی آن که شامل سایز پروفیل‌های طراحی شده مدل، نمودار توزیع نیروی محوری در مقطع عرضی و مقطعی از مدل تغییر شکل یافته سازه می‌باشد در دو حالت غیرمختلط و مختلط طی شکل‌های (۵)و(۶) ارائه شده است.



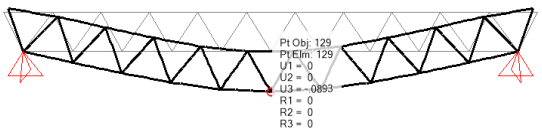
الف- مدل غیرمختلط به دهانه ۳۰ متر



ب- توزیع نیروی محوری در اعضای مدل غیرمختلط به دهانه ۳۰ متر

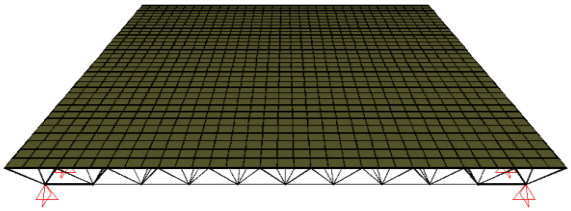


ج- مقطع عرضی مدل غیر مختلط به دهانه ۳۰ متر با نتایج طراحی

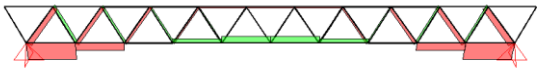


د- مقطع عرضی تغییرشکل یافته مدل غیرمختلط به دهانه ۳۰ متر

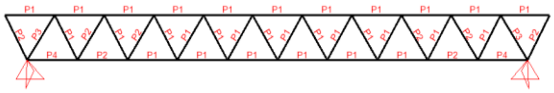
شکل۵: نتایج گرافیکی تحلیل و طراحی مدل غیرمختلط به دهانه ۳۰ متر



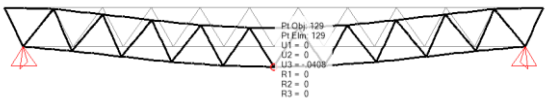
الف- مدل مختلط به دهانه ۳۰ متر



ب- توزیع نیروی محوری در اعضای مدل مختلط به دهانه ۳۰ متر



ج- مقطع عرضی مدل مختلط به دهانه ۳۰ متر با نتایج طراحی



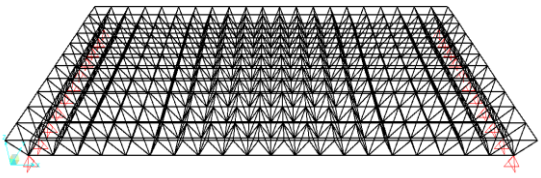
د- مقطع عرضی تغییرشکل یافته تخت مختلط به دهانه ۳۰ متر

شکل ۶: نتایج گرافیکی تحلیل و طراحی مدل مختلط به دهانه ۳۰ متر

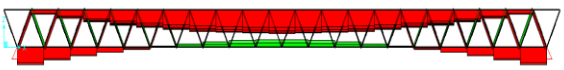
۳-۳- تحلیل و طراحی مدل به دهانه ۶۰ متر

این مدل سازه‌ای که بزرگترین مدل تحلیلی در این تحقیق می‌باشد یک شبکه دو لایه تخت به دهانه ۶۰ متر و طول ۳۰ متر است که ضخامت بهینه آن ۳ متر ارزیابی شده و در نوع مختلط آن شبکه فوقانی سازه با دال به ضخامت ۷۵ میلیمتر ترکیب شده است. مدل سازه‌ای 60NC و مدل 60C مدلهای سازه‌ای شبکه دولایه تخت غیرمختلط و مختلط این مدل هستند که تحت ترکیب بار بیان شده تحلیل و طراحی شده و نتایج گرافیکی آن که شامل سایز پروفیل‌های طراحی شده مدل، نمودار توزیع نیروی محوری در مقطع عرضی و مقطعی از مدل تغییرشکل یافته سازه می‌باشد در دو حالت غیرمختلط و مختلط طی شکل‌های (۷)و(۸) ارائه شده است.

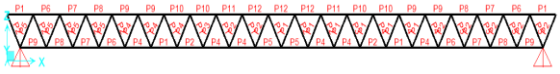
بررسی توزیع نیرو در نتایج گرافیکی مدل‌های غیر مختلط نشان می‌دهد شبکه فوقانی این مدل‌ها فشاری و شبکه تحتانی کششی و فشاری می‌باشد بطوریکه در تمامی مدل‌ها اعضای میانی شبکه فوقانی با حداکثر نیرو فشاری بحرانی بوده و احتمال کمانش در این اعضا وجود دارد. با اجرای دال بتنی روی مدل‌های سازه‌ای و عملکرد مرکب آن با شبکه فوقانی مکانیزم توزیع نیرو در این سازه‌ها تغییر یافته است. بررسی و مقایسه نتایج تحلیل این سه مدل سازه‌ای در دو حالت غیرمختلط و مختلط نشان می‌دهد که عملکرد مرکب دال بتنی با سازه فضاکار دولایه تخت رفتار سازه‌ای و توزیع نیروهای داخلی سازه را بهبود داده و تاثیر قابل توجه‌ای در کاهش وزن و تغییرشکل مدل-های سازه‌ای دارد که نتایج آن در شکل (۹)و(۱۰) بصورت نمودار نشان داده شده است.



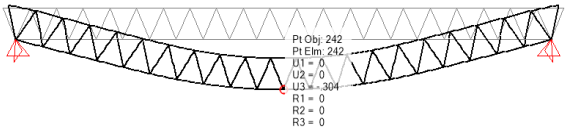
الف- مدل غیرمختلط به دهانه ۶۰ متر



ب- توزیع نیروی محوری در اعضای مدل غیرمختلط به دهانه ۶۰ متر

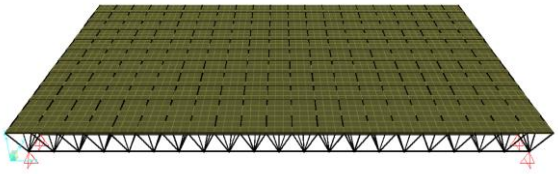


ج- مقطع عرضی مدل غیر مختلط به دهانه ۶۰ متر با نتایج طراحی

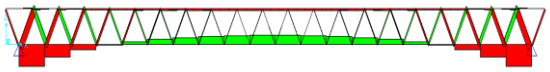


د- مقطع عرضی تغییرشکل یافته مدل غیرمختلط به دهانه ۶۰ متر

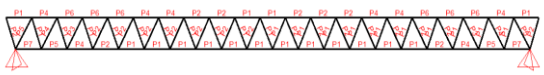
شکل ۷: نتایج گرافیکی تحلیل و طراحی مدل غیرمختلط به دهانه ۶۰ متر



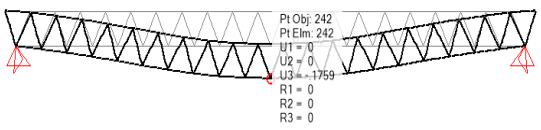
الف- مدل مختلط به دهانه ۶۰ متر



ب- توزیع نیروی محوری در اعضای تخت مختلط به دهانه ۶۰ متر



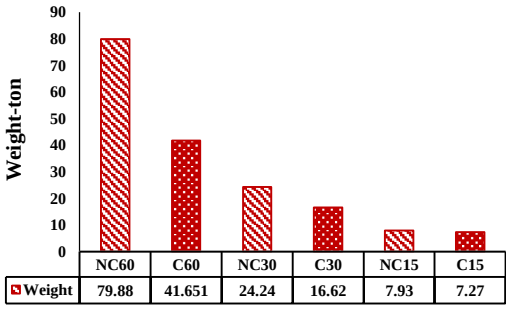
ج- مقطع عرضی مدل مختلط به دهانه ۶۰ متر با نتایج طراحی



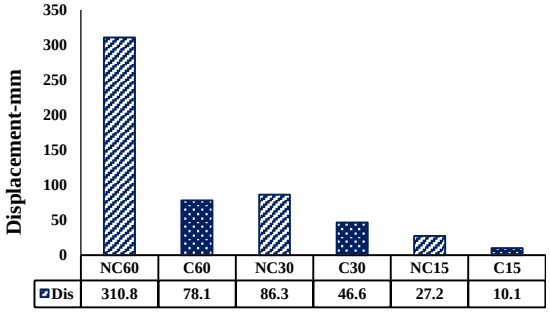
د- مقطع عرضی تغییرشکل یافته مدل مختلط به دهانه ۶۰ متر

شکل ۸: نتایج گرافیکی تحلیل و طراحی مدل مختلط به دهانه ۶۰ متر

این نتایج نشان می‌دهد دال بتنی روی مدلهای سازه‌ای بزرگتر بیشترین تاثیر را دارد بطوریکه در مدل ۶۰ متری ۴۷/۸۶ درصد کاهش وزن فولاد و ۷۴/۸۷ درصد کاهش تغییرشکل را نسبت به مدل غیرمختلط شاهد هستیم در حالیکه در مدل متوسط ۳۰ متری این تاثیر کمتر بوده و به ترتیب ۳۱/۴۳ و ۴۶ درصد را شامل می‌شود اما در مدل ۱۵ متری این تاثیر در کاهش وزن جزئی و حدود ۸/۳۲ درصد است ولی در کاهش تغییرشکل موثرتر بوده و ۸۶/۶۲ درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۹: مقایسه وزن مدل‌ها در حالت مختلط و غیر مختلط



شکل ۱۰: مقایسه تغییرشکل مدل‌ها در حالت مختلط و غیر مختلط

بمنظور مقایسه عددی تغییرات نیروی محوری در نواحی مختلف مدلهای سازه‌ای، مقادیر نیروهای کششی و فشاری حداکثر در دال بتنی، المانهای شبکه فوقانی، تحتانی و اعضای قطری در دو حالت غیرمختلط و مختلط استخراج و در جدول (۴) ارائه شده است.

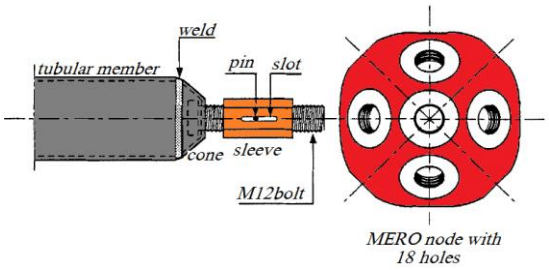
جدول ۴: مقادیر حداکثر نیروی کششی و فشاری در المانهای سازه دال بتنی

Regen	Top		Diagonal		Bottom		Concrete	
Type	Maximum Compressive Force KN	Maximum Tensile Force KN	Maximum Compressive Force KN	Maximum Tensile Force KN	Maximum Compressive Force KN	Maximum Tensile Force KN	Maximum Compressive Force KN/m	Maximum Tensile Stress KN/m
NC15	150.85	10.81	111.00	73.48	119.77	73.55	-	-
C15	2.78	0.24	91.42	47.67	85.55	57.51	68.015	6.70
NC30	834.42	16.17	140.00	130.43	539.34	137.09	-	-
C30	15.45	0.18	162.68	113.27	406.16	143.78	259.40	11.82
NC60	2231.53	10.86	255.67	251.67	1585.54	491.90	-	-
C60	32.18	1.10	261.9	221.37	1246.82	79.23	685.00	-

۴-مدلسازی سازه‌های فضاکار با اتصالات مفصلی در نرم افزار آباکوس

هرچند نرم‌افزار آباکوس یکی ازنرم‌افزارهای توانمند در حوزه‌های فنی مهندسی است و از قابلیت‌های بالایی برای شبیه‌سازی سازه‌ها و عناصر سازه‌ای برخوردار می‌باشد. ولی به لحاظ بعضی کمبودها در این نرم‌افزار مطالعات تحلیلی سازه‌های فضاکار اسکلتی در محیط این نرم‌افزار با مشکلاتی روبرو است از طرفی مطالعات تحلیلی سازه‌های فضاکار اسکلتی در نرم افزار آباکوس با انتخاب و بکارگیری المان خرپایی Truss بصورت میله، خیلی از نیازهای تحلیلی این نوع سازه‌ها را در حوزه‌های مختلف از جمله تحلیل کمانش و تحلیل‌های غیرخطی برآورده نمی‌سازد. لذا انتخاب المان Beam بجای المان Truss به منظور مطالعات تحلیلی پیشرفته این نوع از سازه‌ها در این نرم-افزار امری ضروری است با این حال اعمال شرایط سرحدی ابتدا و انتهای المانهای سازه، مشابه دیگر نرم‌افزارهای این رشته نظیر Sap و Etabs براحتی صورت نمی‌گیرد و این در سازه‌های فضاکار به لحاظ تعداد زیاد گره و المان فوق‌العاده پیچیده و بنحوی غیر ممکن می‌نماید. از طرفی بهره‌مندی از قابلیت‌های این نرم‌افزار باعث می‌شود با بکارگیری تکنیک‌های خاص هر چند سخت و پرهزینه بتوان زمینه استفاده این نرم‌افزار را برای این سازه‌ها فراهم نمود.

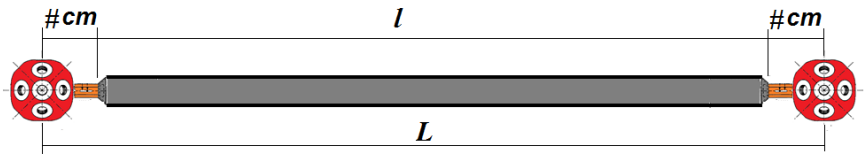
در این تحقیق با توجه به ساختار سازه‌های فضاکار اسکلتی با اتصال مفصلی نظیر سیستم گوی‌سان مطابق شکل(۱۱) که المان-های لوله‌ای از طریق رابط‌های پیچی بر پیوندهها اتصال می‌یابند سعی شده است با در نظر گرفتن قابلیت‌های موجود در این نرم‌افزار شرایط سرحدی نزدیک به واقعیت را برای این سازه‌ها در این نرم‌افزار مدلسازی نمود .



شکل ۱۱: جزئیات اتصالات مفصلی مرو در سازه های فضاکار [۱۵]

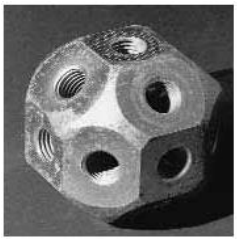
۴-۱-مدلسازی المان‌های سازه‌ای و پیوندهها

المان‌های تیری سازه‌های فضاکار که معمولا از پروفیل لوله می‌باشد براساس قطر پیوندهها و طول رابط بین المان و پیوند مطابق شکل(۱۲) چند سانتی‌متر از ابتدا و انتهای المان کوچکتر در نظر گرفته می‌شود. المان تحتانی، فوقانی و قطری به ترتیب با نام‌های MB، MT، MD در ماژول Part ایجاد می‌شود.



شکل ۱۲: تصویر شماتیکی از المان، رابط و پیونده در سیستم مرو

از طرفی پیونده‌ها در سازه‌های فضاکار اسکلتی با اتصال مفصلی نظیر سیستم گوی‌سان بر اساس موقعیت‌شان در سازه از جهات مختلف عضو می‌پذیرند بطوریکه در یک سازه فضاکار دولایه پیونده میانی حداکثر ۸ عضو می‌گیرد از اینرو می‌توان در ماژول Part و ماژول Assembly این نوع پیونده را به نام N8 با استفاده از المانهای تیری کوچک به طول ۵ سانتی‌متر ایجاد نموده و در جهت یکپارچه نمودن آنها را Merge کرد. البته پیونده N8 که تصویر آن در شکل (۱۳) نشان داده شده است در هر موقعیتی با المان‌های کمتر کارایی داشته و خالی ماندن تعدادی از پذیرنده‌های آن ایرادی ندارد.



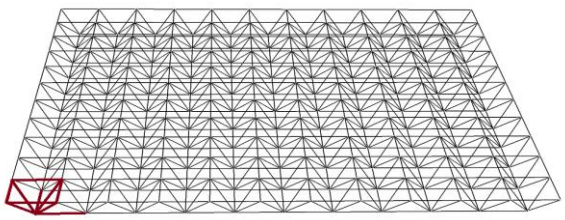
ب- سیستم پیونده در حالت اجرایی[۱۶]

الف- سیستم پیونده در محیط گرافیکی نرم افزار

شکل ۱۳: نمونه‌ای از سیستم پیونده توپی مرو

۴-۲- تاشه‌پردازی و ایجاد سازه

ازآنجایی که سازه‌های فضاکار مدول‌های مشابه و تکرار شونده هستند، برای تاشه پردازی این سازه‌ها مدولی از سازه، با آوردن نمونه المان‌ها و پیونده سازه‌ای به ماژول Assembly و ویرایش آن با ابزارهای موجود در این ماژول ایجاد می‌شود بطوریکه المان‌های میله‌ای در راستای صحیح و ما بین پیوندها با فاصله‌ای معادل ۵ سانتی‌متر از همدیگر قرار گیرند. با استفاده ازابزار Liner Pattern یا Radial Pattern و تکثیر این مدول در جهات مورد نظر می‌توان سازه فضاکار دو لایه تخت یا چلیکی و گنبدی را ایجاد نمود. شکل(۱۴) نمونه‌ای از مدول پایه و تکثیر آن در جهات x و y را در سازه تخت نشان می‌دهد.

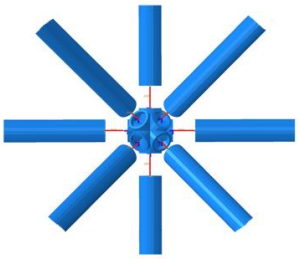


شکل ۱۴: نمونه‌ای از مدول پایه تکثیر یافته در حالت تخت

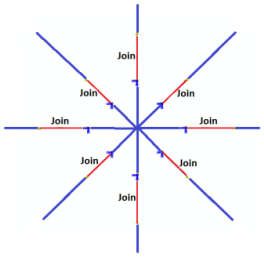
۴-۳- اعمال شرایط مرزی

تشخیص و اعمال درست شرایط مرزی به عناصر سازه‌ای و سازه مهمترین بخش از مدلسازی است چرا که اعمال شرایط مرزی نزدیک به واقعیت به المانها، اتصالات و تکیه‌گاه‌های سازه به نتایج قابل قبول و دقیقتری منجر شده و رفتار سازه را به درستی و نزدیک به واقیت مدل خواهد نمود و این خود نقش بسیار مهمی در دقت و صحت نتایج تحلیل خواهد داشت. اعمال بخشی از شرایط مرزی به عناصر سازه‌ای در ماژول Interaction از طریق قیود و رابطها صورت می‌گیرد و بخش دیگر آن در ماژول Load تکمیل می‌گردد. آنچه در ماژول Interaction روی سازه اعمال می‌شود نحوه اتصال المان‌ها به پیونده‌ها می‌باشد که بدین منظور لازم است مطابق شکل (۱۵) در ابتدا و انتهای المانها در حد فاصل المان‌ها و پیونده‌ها Wire ایجاد نموده سپس با انتخاب رابط مناسب و اعمال آن به Wire های ایجاد شده اتصال

مورد نظر را تعریف نمود. از آنجایی که اتصالات در سازه‌های فضاکار دو و چند لایه معمولاً اتصالات مفصلی است رابط مناسب برای آن از بین انواع اتصالات Basic رابط Join انتخاب شده است. رابط Join موقعیت دو گره را با هم یکسان نموده و درجات آزادی دورانی را در گره مربوطه فعال نمی‌سازد. این نوع رابط در شکل (۱۶) بصورت اعمال شده به Wire نشان داده شده است.



شکل ۱۵: ایجاد wire بین المان و پیونده



شکل ۱۶: اعمال رابط join به wire و شرایط مرزی

اعمال چنین شرایط مرزی به ابتدا و انتهای المانهای سازه شاید برای بعضی مدل‌ها کفایت نماید ولی در بیشتر تحلیل‌ها پیشرفته سازه‌های فضاکار این اتصال به تنهایی نیازهای تحلیلی را برآورده نمی‌کند. تحلیل کمانش و پس کمانش المانها و سازه‌های فضاکار نیازمند مش‌بندی و ایجاد مفاصل در طول المان می‌باشد که با توجه به اتصال مفصلی ایجاد شده در ابتدا و انتهای المانها، سازه ناپایدار شده و تحلیل با خطا مواجه می‌شود از اینرو اعمال شرایط مرزی دیگر به ابتدا یا انتهای این رابط برای مقید نمودن این رابط ضروری است. این شرایط مرزی در ماژول Load به رابط‌ها اعمال می‌شود. بمنظور تعریف شرایط مرزی مورد نظر در کادر محاوره‌ای Create Boundary Condition با انتخاب نامی نظیر BC-Join و انتخاب Rotation Displacement در کادر محاوره‌ای مربوطه درجات آزادی دورانی UR1،UR2 و UR3 را مقید کرده و بعنوان شرایط مرزی رابط‌ها ذخیره می‌شود. با انتخاب یکی از دو انتهای رابط‌ها و اعمال شرایط مرزی ذخیره شده به آن، شرایط پایدار سازه تامین شده و هرگونه تحلیل کمانشی با هر تعداد مش‌بندی در مدل سازه‌ای فراهم می‌شود.

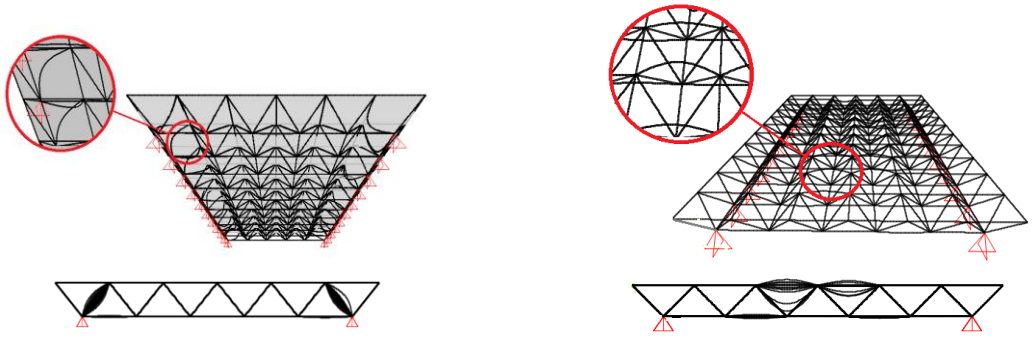
۵-تحلیل کمانش

رفتار کمانشی سازه‌های فضاکار اسکلتی در بر گیرنده کمانش اعضای تکی است که اگر سازه در اثر کمانش و خرابی اعضا به مکانیزم تبدیل شود دچار کمانش کلی می‌شود. لذا بررسی کمانش اعضا و نقاط بحرانی این سازه ها و تقویت محل مورد نظر امری ضروری در تحلیل و طراحی این نوع از سازه‌ها می‌باشد. با شناسایی نقاط ضعف و محل‌های بحرانی سازه، ضمن تقویت محل مذکور و ارتقای ظرفیت کمانش آن می‌توان خرابی سازه را به نقاط غیر بحرانی هدایت کرده و از خرابی پیش‌رونده سازه جلوگیری نمود. با اجرای دال روی سازه فضاکار و عملکرد مرکب آن با شبکه فوقانی علاوه بر کنترل خیز و صرفه‌جویی اقتصادی در فولاد مصرفی، با تامین تکیه‌گاه جانبی برای المانهای تحت فشار شبکه فوقانی کمانش اعضای این شبکه منتفی شده و ضمن ارتقای ظرفیت کمانش، رفتار پس کمانشی سازه نیز بهبود می‌یابد. بمنظور بررسی دقیق‌تر تاثیر دال بتنی روی ظرفیت کمانش مدلهای سازه‌ای و مطالعه رفتار پس کمانشی این نوع از سازه‌ها، هریک از مدل‌ها در دو حالت غیر مختلط و مختلط با اتصالات مفصلی در نرم افزار آباکوس مدلسازی شده است و تحلیل کمانش الاستیک و تحلیل های غیرخطی پس کمانش روی مدلهای سازه ای صورت گرفته است .

۵-۱- تحلیل کمانش الاستیک مدل‌های سازه‌ای

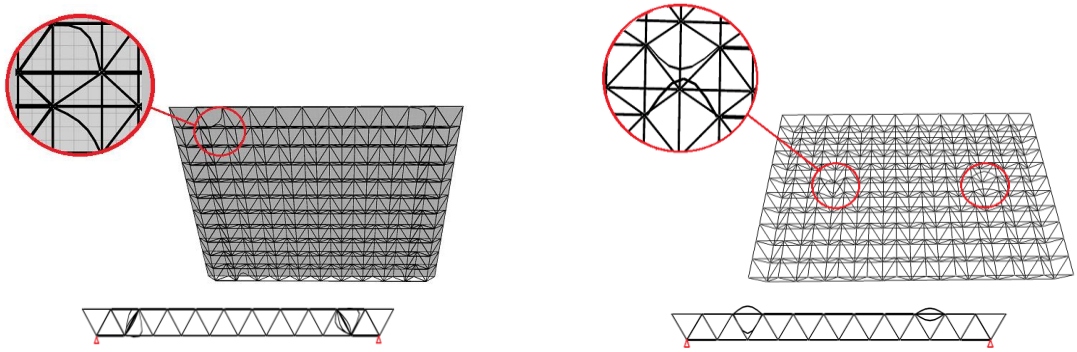
پدیده کمانش الاستیک بر اساس رابطه اویلر در اعضای فشاری سازه که از لاغری بزرگتر و تنش فشاری بیشتری بر خوردار هستند اتفاق می‌افتد بطوریکه برخی از اعضای فشاری قبل از رسیدن به بار طراحی، کمانش کرده و قابلیت باربری خود را از دست می‌دهد که اگر سازه در اثر کمانش و خرابی اعضا به مکانیزم تبدیل شود دچار کمانش و خرابی کلی می‌شود. با مدلسازی مناسب مدلهای غیر مختلط و مختلط در آباکوس و انجام تحلیل کمانش، نتایج بصورت گرافیکی و عددی جهت بررسی رفتار کمانش الاستیک مدلهای سازه‌ای و

ارزیابی بهبود و ارتقای ظرفیت کمانش الاستیک مدلهای مختلط نسبت به مدلهای غیرمختلط ارائه شده است. نتایج گرافیکی تحلیل‌های کمانش صورت گرفته روی مدل‌ها با بزرگ نمایی از ناحیه کمانش در شکل‌های (۱۷) الی(۱۹) نشان داده شده است.



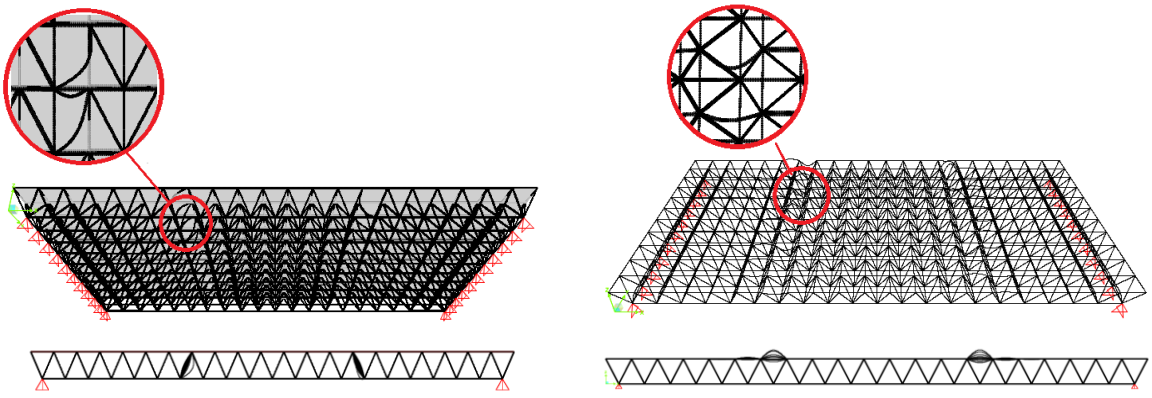
الف- مدل غیرمختلط ب- مدل مختلط

شکل ۱۷: کمانش الاستیک مدل‌ها به دهانه ۱۵ متر



الف- مدل غیرمختلط ب- مدل مختلط

شکل ۱۸: کمانش الاستیک مدل‌ها به دهانه ۳۰ متر

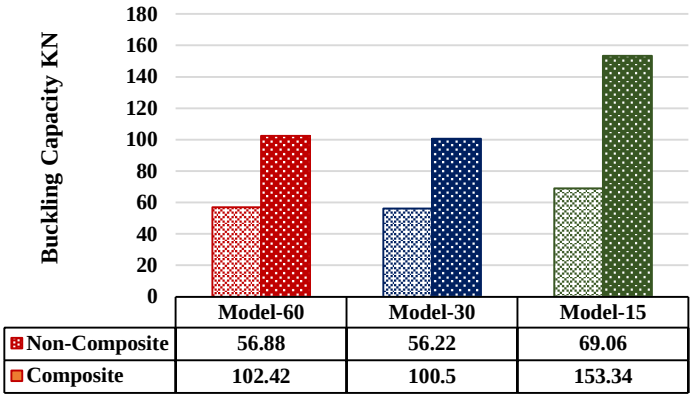


الف- مدل غیر مختلط ب- مدل مختلط

شکل ۱۹: کمانش الاستیک مدل‌ها به دهانه ۶۰ متر

بطوریکه از نتایج گرافیکی شکل‌های (۱۷-الف) الی (۱۹-الف) ملاحظه می‌شود مدلهای سازه‌ای غیر مختلط به لحاظ فشار زیاد در لایه فوقانی با کمانش المانهای بحرانی این شبکه به ظرفیت کمانش الاستیک رسیده‌اند. با اجرای دال و پوسته بتنی بر روی شبکه فوقانی مدلها، نه تنها فشار از روی شبکه فوقانی مدل‌های سازه‌ای برداشته شده بلکه با بوجود آمدن تکیه‌گاه جانبی برای المانهای شبکه فوقانی مدل‌های مختلط، احتمال کمانش در المانهای شبکه فوقانی این مدل‌ها منتفی شده است با این حال به جهت تمرکز فشار روی المانهای

قطری و تحتانی مدل‌های مختلط، کمانش در المانهای قطری با لاغری و تنش بزرگتر اتفاق افتاده است که نتایج گرافیکی آن در شکل‌های (۱۷-ب) الی (۱۹-ب) نشان داده شده است. بمنظور مطالعه و مقایسه عددی ظرفیت کمانش الاستیک مدلها نتایج عددی حاصل از تحلیل کمانش مدل‌های سازه‌ای مختلط و غیرمختلط بصورت نمودار در شکل (۲۰) جمع‌بندی شده است .

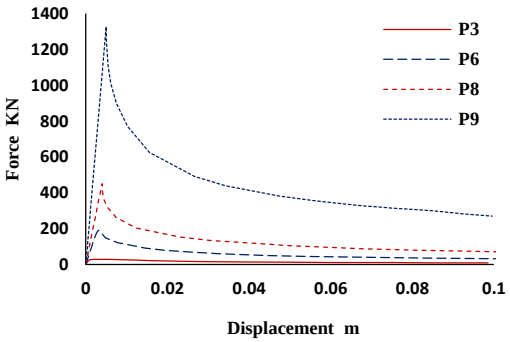


شکل ۲۰: ظرفیت کمانش الاستیک مدل‌های مختلف

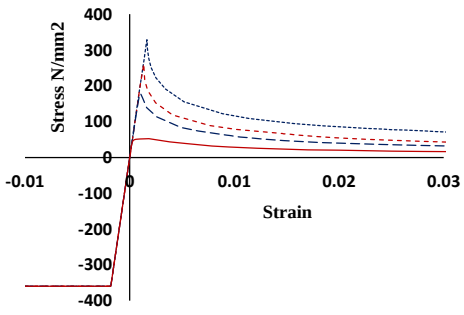
بطوریکه از نمودار شکل(۲۰) ملاحظه می‌شود در تمامی مدلها، اجرای دال بتنی روی شبکه فوقانی ظرفیت کمانش این مدلها را بطور چشمگیری ارتقا داده است. بررسی عددی این نتایج نشان می‌دهد ظرفیت کمانش الاستیک مدلهای مختلط بطور متوسط۹۳/۶۲ در صد نسبت به مدلهای غیرمختلط ارتقاء یافته است.

۲-۵-تحلیل کمانش غیر خطی

بطوریکه ملاحظه شد سازه‌های فضاکار اسکلتی اساساً تحت نیروهای محوری قرار دارند که کمانش در اعضای فشاری با لاغری بزرگتر محتمل می باشد. در صورت کمانش عضوی از سازه، رفتار عضو کمانشی از مشخصه‌های پس کمانشی عضو تبعیت خواهد کرد. بنابر این در صورتی که رفتار پس کمانشی اعضای فشاری و رفتار بعد از تسلیم اعضای کششی تعیین شود می‌توان رفتار سازه بعد از خرابی اعضایی از آن را دنبال کرد. در این تحقیق و بمنظور تحلیل‌های پس کمانشی مدلهای سازه‌ای رفتار نیرو- جابجایی اعضا در کشش بصورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است و برای تعیین رفتار اعضا در فشار فرض شده است که عضو دو سر مفصل خرپایی از انحنای اولیه کوچکی که به آن ناکاملی اولیه گفته می‌شود برخوردار باشد. حداکثر انحراف اولیه از تار میانی در وسط عضو برابر با مقدار مجاز 0.001L در نظر گرفته شده است که در آن L طول عضو می‌باشد. با استفاده از روش عناصر محدود و با انجام تحلیل غیر خطی هندسی و مصالح، واکنش نیرو–جابجایی برای چهار المان بکار رفته در مدلهای سازه‌ای (P3,P6,P8,P9) تحت اثر نیروی فشاری مطابق شکل(۲۱) بدست آمده و این نتایج نموداری با در نظر گرفتن مشخصات هندسی اعضا مطابق شکل (۲۲) به منحنی‌های تنش- کرنش رفتاری اعضا تبدیل شده است.



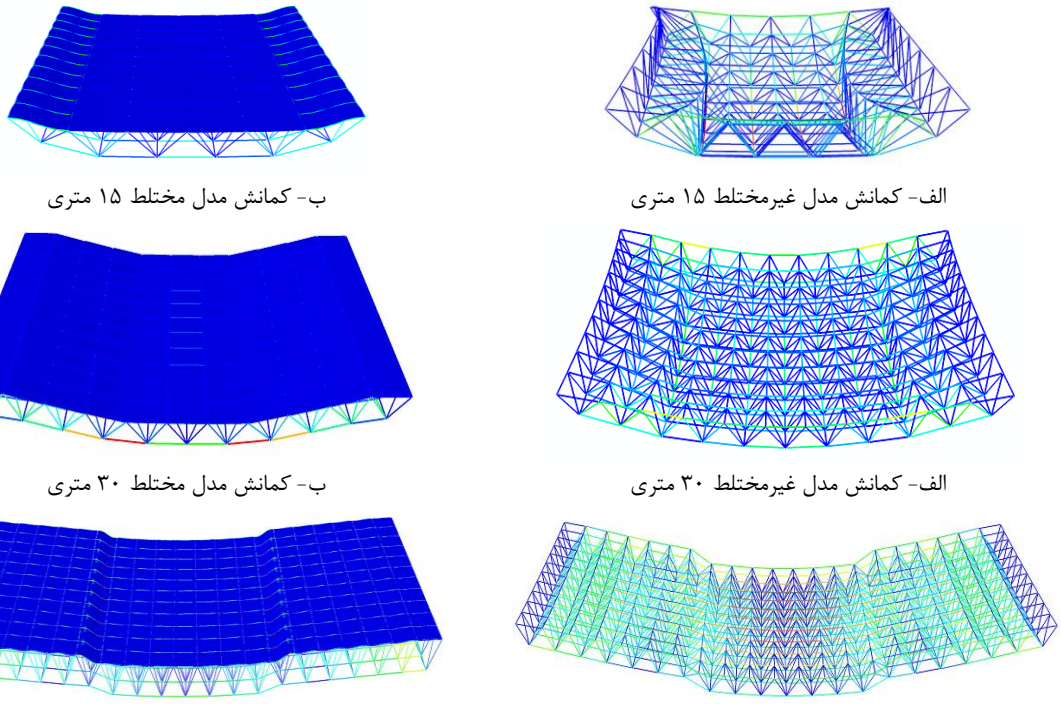
شکل ۲۱: نمودار نیرو-تغییرمکان چهار المان



شکل ۲۲: نمودار تنش – کرنش چهار المان

در نهایت با انتخاب مصالح به صورت ایزوتروپیک و تعریف مقادیر تنش-کرنش در محدوده خطی و غیرخطی حاصل از آنالیز اعضای فشاری، ناکاملی‌های فوق به بخش غیرخطی مصالح نرم‌افزار تحلیلی تعریف شده است. بمنظور اعمال این رفتار غیر خطی اعضا به مدلهای اصلی، ناحیه‌های بحرانی مدلهای سازه‌ای بکمک نتایج گرافیکی تحلیل‌های خطی شناسایی و اعضا با ناکاملی فوق بنحوی در ناحیه بحرانی سازه توزیع شده است که سازه با کمترین بار تحریک و دچار کمانش و ناپایداری شود. با انجام تحلیل بار افزون روی مدلهای سازه‌ای با اعضای ناکامل در ناحیه بحرانی آنها نتایج گرافیکی این تحلیل‌ها بصورت تصویری از سازه‌های کمانش یافته در دو حالت مختلط و غیرمختلط در شکل (۲۳) برای هر سه گروه سازه‌ای ارائه شده است.

نتایج عددی این تحلیل‌ها بصورت نمودار بار-جابجایی در دو حالت غیرمختلط و مختلط جهت ارزیابی و مقایسه رفتار سازه‌ای این دو حالت برای هر سه گروه سازه‌ای در شکل (۲۴) نشان داده شده است. در نگاه اول به نمودارهای بار-جابجایی مدل‌های سازه‌ای ملاحظه می‌شود به لحاظ حضور و عمل مرکب دال بتنی با شبکه فوقانی، این سازه‌ها از سختی بالایی نسبت به مدل‌های غیرمختلط برخوردار بوده و ظرفیت نهایی آن بطور قابل توجه‌ای ارتقاء یافته است.

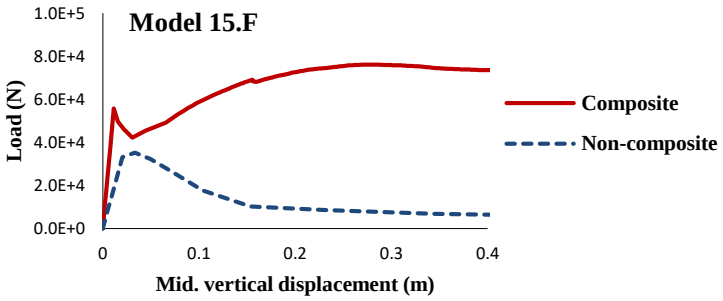


الف- کمانش مدل غیرمختلط ۱۵ متری
ب- کمانش مدل مختلط ۱۵ متری
الف- کمانش مدل غیرمختلط ۳۰ متری
ب- کمانش مدل مختلط ۳۰ متری
الف- کمانش مدل غیرمختلط ۶۰ متری
ب- کمانش مدل مختلط ۶۰ متری

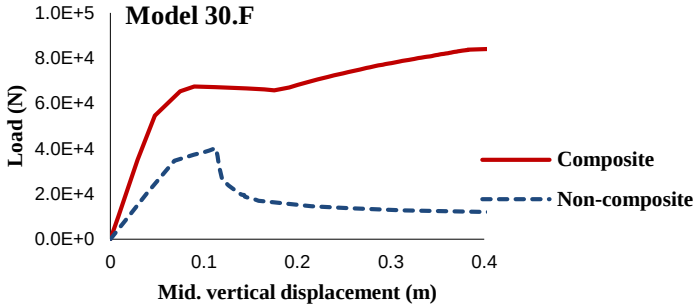
شکل ۲۳: کمانش مدل‌ها در دو حالت غیرمختلط و مختلط

با توجه به نمودار بار-جابجایی مدل غیرمختلط به دهانه ۱۵ متر در شکل (۲۴-الف) ملاحظه می‌شود مدل سازه‌ای غیرمختلط با کمانش اولیه اعضایی از سازه، پایداری خود را حفظ نموده تا اینکه سایر اعضای بحرانی کمانش کرده و در سازه یک مکانیزم کلی تشکیل شده و سازه قابلیت باربری خود را کلاً از دست داده و ناپایداری کلی در سازه اتفاق افتاده است. این در حالی است که مطابق همین شکل نمودار بار-جابجایی مدل مختلط به لحاظ حضور و عمل مختلط دال با شبکه فوقانی از سختی و ظرفیت اولیه بالایی نسبت به مدل سازه‌ای غیرمختلط برخوردار است بطوریکه ظرفیت اولیه مدل مختلط ۲۳/۵ درصد و ظرفیت نهایی آن ۶۸/۱ درصد نسبت به ظرفیت مدل غیرمختلط ارتقاء یافته است. با این حال با کمانش اعضای قطری بر تکیه‌گاه در مدل مختلط، سازه دچار یک فروجهش دینامیکی و افت مقاومت شده که با تغییرشکل بزرگی در سازه توام می‌باشد در ادامه این رفتار پس کمانشی حضور دال و پوسته بتنی و عملکرد مختلط آن با مدل سازه‌ای باعث باز توزیع بهتر نیروهای پس کمانش شده و سازه را به یک حالت تعادل پایدار رسانده است بطوریکه سازه قادر به تحمل بار اضافی بوده و ظرفیت نهایی آن نسبت ظرفیت اولیه ۳۶/۲ درصد نسبت به ظرفیت اولیه افزایش می‌یابد.

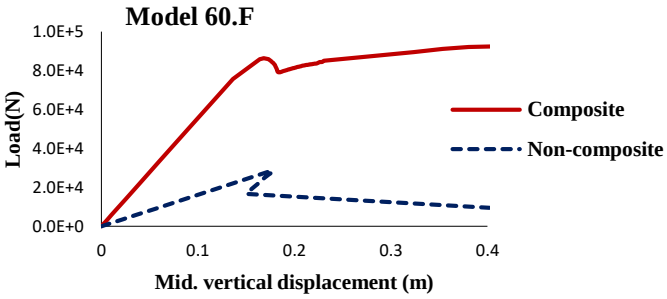
با توجه به نمودار بار-جابجایی مدل غیر مختلط به دهانه ۳۰ متر در شکل (۲۴-ب) ملاحظه می‌شود با کمانش اولین مجموعه اعضای بحرانی، سازه پایدار بوده و به لحاظ باز توزیع می‌تواند بار اضافی دیگری را تحمل نماید تا اینکه با کمانش مجموعه دیگری از اعضا و باز توزیع بیشتر بار، سازه دچار کمانش کلی شده و ظرفیت باربری خود را بکلی از دست داده است. برخلاف مدل سازه‌ای غیر مختلط، رفتار پس کمانشی مدل سازه‌ای مختلط متفاوت بوده و بدلیل حضور دال بتنی و تحمل نیروهای اضافی ناشی از کمانش اعضای بحرانی رفتار پس کمانشی غیر مخربی را بروز داده است. بطوریکه نمودارهای بار-جابجایی این مدل سازه‌ای در شکل(۲۴-ب) نشان می‌دهد ظرفیت اولیه مدل مختلط ۶۷/۵ درصد و ظرفیت نهایی آن ۱۱۰ درصد نسبت به ظرفیت مدل غیرمختلط ارتقاء یافته است. بعد از کمانش چندین مرحله‌ای اعضا بحرانی و رفتار ملایم پس کمانشی اعضای فشاری، سازه بعد از یک تغییرشکل بزرگ دچار یک فروجهش جزئی شده که با باز توزیع بهتر نیروها سایر اعضا بارهای باز توزیع شده را تحمل و جذب نموده‌اند لذا حضور دال بتنی و عملکرد مختلط آن با مدل سازه‌ای نه تنها باعث باز توزیع بهتر نیروهای پس کمانش شده و سازه را به یک حالت تعادل پایدار رساند است بلکه سازه قادر به تحمل بار اضافی بوده و ظرفیت نهایی ۲۵/۴ درصد نسبت به ظرفیت اولیه افزایش یافته است.



الف- نمودار بار-جابجایی مدل به دهانه ۱۵ متر در دو حالت غیرمختلط و مختلط



ب- نمودار بار-جابجایی مدل به دهانه ۳۰ متر در دو حالت غیرمختلط و مختلط



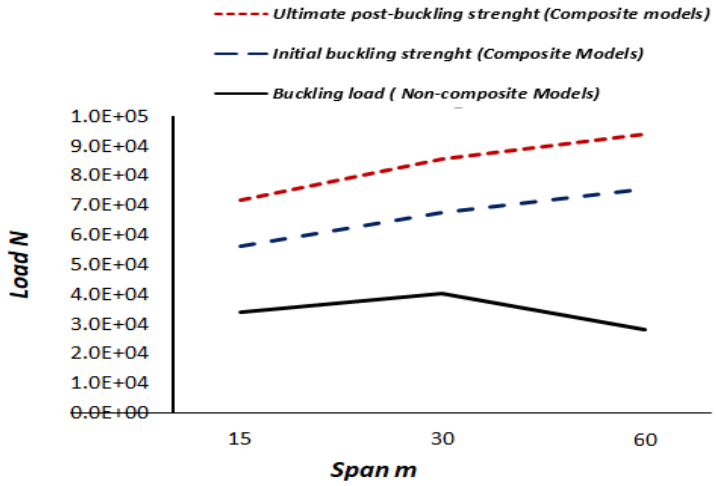
پ- نمودار بار-جابجایی مدل به دهانه ۶۰ متر در دو حالت غیرمختلط و مختلط

شکل ۲۴: نمودار بار-جابجایی مدل‌های تحلیلی در دو حالت غیرمختلط و مختلط

نتایج عددی تحلیل‌های مدل ۶۰ متری بصورت نمودار بار-جابجایی در دو حالت غیرمختلط و مختلط جهت ارزیابی و مقایسه رفتار سازه‌ای این دو حالت در شکل(۲۴-پ) نشان داده شده است. در نگاه اول به نمودارهای بار-جابجایی این مدلهای سازه‌ای ملاحظه می‌شود ناپایداری مدل غیرمختلط با کمانش و ناپایداری المانهای ناکامل مخرب و آنی بوده و سازه ظرفیت خود را بصورت آنی از دست داده است حال آنکه به لحاظ حضور و عمل مرکب دال بتنی با شبکه فوقانی، مدل سازه‌ای مختلط از ظرفیت و سختی بالایی برخوردار بوده بطوریکه ظرفیت اولیه مدل مختلط ۲۰۴ درصد و ظرفیت نهایی آن ۲۳۱ درصد نسبت به ظرفیت مدل غیرمختلط ارتقا یافته است. برخلاف مدل سازه‌ای غیر مختلط، رفتار پس کمانشی مدل سازه‌ای مختلط متفاوت می‌باشد بطوریکه از نمودار بار-جابجایی مدل مختلط ملاحظه می‌شود با کمانش اولین اعضای بحرانی، سازه با تغییرشکل جزئی پایدار بوده و می‌تواند بار اضافی دیگری را تحمل نماید تا اینکه با کمانش مجموعه دیگری از اعضا و باز توزیع بیشتربار، مسیر تعادل نمودار بار- تغییر شکل سازه به یک نقطه حدی اولیه رسیده و سازه برای

رسیدن به یک حالت تعادل پایدار جدید دچار یک فروجهش شده و یک ناپایداری موضعی را تجربه میکند با این حال به جهت حضور دال بتنی و باز توزیع بهتر بار به اعضای مجاور سازه نه تنها به تعادل پایدار دست یافته بلکه قادر به تحمل بار اضافی بوده و ظرفیت نهایی آن ۹ درصد نسبت به ظرفیت اولیه افزایش یافته است.

با در نظر گرفتن ظرفیت نهایی مدلهای سازه ای در حالت غیرمختلط و ظرفیت حد پایداری اولیه و ثانویه ای مدلهای مختلط و بررسی عددی نتایج حاصل، بطوریکه از نمودار شکل (۲۵) ملاحظه می‌شود با اجرای دال روی شبکه‌های دو لایه تخت بطور متوسط بیش از ۹۸ در صد ظرفیت کمانشی مدلهای مختلط نسبت به مدلهای غیرمختلط ارتقا یافته است این در حالی است ظرفیت ثانویه نهایی این مدل-ها بعد از فروجهش بطور متوسط بیش از ۲۳ درصد نسبت به ظرفیت کمانش اولیه مجدداً افزایش یافته است. بنابر این ایده اجرای دال و پوسته بتنی روی شبکه‌های دولایه تخت و چلیکی نه تنها باعث ارتقای ظرفیت نهایی این سازه‌ها می‌شود بلکه به بهبود رفتار پس کمانشی این سازه‌ها منجر شده و مانع بروز پدیده خرابی پیشرونده و فروریزی ناگهانی این سازه‌ها می‌گردد که خود یکی از ویژه گی های اصلی سازه‌های ایمن تلقی می‌شود.



شکل ۲۵: نمودار مقایسه‌ای ظرفیت کمانشی مدل‌های تحلیلی در دو حالت غیرمختلط و مختلط

۶-نتیجه گیری

سازه‌های فضاکار مختلط ایده‌ای نوین در راستای ارتقای ظرفیت باربری و بهبود رفتار سازه‌ای و زمینه ساز کاربرد سازه‌های فضاکار در دیگر سازه‌های عمرانی نظیر پل، اسکله، ساختمان طبقاتی و ... است که نیازمند مطالعات پیشرفته بمنظور شناخت بهتر از رفتار و عملکرد این سازه‌ها است. در مقاله حاضر که به بررسی رفتار کمانشی شبکه های دو لایه تخت مختلط پرداخته شده است نتایج ارزنده ای بدست آمده که خلاصه آن در این قسمت جمع‌بندی شده است.

۱-بررسی و مقایسه نتایج تحلیل و طراحی روی مدل‌های سازه‌ای نشان داد که عملکرد مرکب دال بتنی با شبکه دولایه تخت تاثیر قابل توجه‌ای در کاهش وزن و تغییر شکل این سازه‌ها دارد بطوریکه اجرای دال بتنی روی شبکه دولایه تخت بطور متوسط ۲۹/۲ درصد کاهش وزن فولاد و ۶۱/۲۴ در صد کاهش تغییر شکل را نسبت به شبکه دولایه غیرمختلط نشان می‌دهد .

۲- مطالعات تحلیلی سازه‌های فضاکار اسکلتی در نرم افزار آباکوس با انتخاب و بکارگیری المان خرپایی Truss بصورت میله، خیلی از نیازهای تحلیلی این نوع سازه‌ها را در حوزه‌های مختلف از جمله تحلیل کمانش و تحلیل‌های غیرخطی برآورده نمی‌سازد. لذا انتخاب المان Beam بجای المان Truss به منظور مطالعات تحلیلی پیشرفته این نوع از سازه‌ها در این نرم‌افزار امری ضروری است با این حال اعمال شرایط سرحدی به اعضای سازه‌های فضاکار اسکلتی در نرم‌افزار آباکوس یکی از مشکلات اساسی این نوع سازه‌ها است که با

استفاده از تکنیک پیشنهادی و ایجاد اتصالات مفصلی در مدل سازی سازه‌های فضاکار می‌توان با رفع چالش‌های موجود از قابلیت‌های تحلیلی این نرم‌افزار استفاده نمود.

۳-هرچند تحلیل کمانش الاستیک برمبنای رفتار خطی صورت می‌گیرد ولی نتایج گرافیکی و عددی آن اطلاعات قابل توجه‌ای در خصوص رفتار سازه‌های فضاکار مختلط و غیرمختلط ارائه می‌دهد بطوریکه نتایج گرافیکی آن نحوه کمانش و موقعیت اعضای بحرانی در سازه را مشخص نموده و نتایج عددی آن نیز ظرفیت کمانش الاستیک سازه را در مودهای مختلف تعیین می‌کند. بر اساس نتایج گرافیکی این قسمت، المانهای فشاری شبکه فوقانی در مدل‌های غیرمختلط به لحاظ نیروی فشاری و لاغری بزرگتر کمانش کرده در حالی که در مدلهای مختلط به لحاظ عملکرد مختلط دال کمانش المانهای فوقانی منتفی شده و المانهای تحتانی و قطری نزدیک تکیه‌گاه به جهت نیروی فشاری زیاد کمانش می‌کنند. نتایج عددی این قسمت نیز حاکی از ارتقای ظرفیت کمانش الاستیک مدلهای سازه‌ای مختلط نسبت به مدلهای غیرمختلط می‌باشد بطوریکه ظرفیت کمانش الاستیک مدلهای مختلط بطور متوسط۹۳/۶۲ در صد نسبت به غیر مختلط ارتقا یافته است.

۴- نتایج حاصل از تحلیل‌های غیرخطی که بصورت نمودارهای بار–جابجایی در دو حالت غیرمختلط و مختلط ارائه شد، نشانگر این واقعیت می‌باشد که اجرای دال روی مدلهای سازه‌ای و عملکرد مرکب آن نه تنها ظرفیت کمانش مدلهای سازه‌ای را بطور قابل توجه ای ارتقا داده است بلکه رفتار پس کمانشی مدلهای سازه‌ای غیرمختلط را از مود خرابی کلی و پیشرونده به یک مود فروجهش موضعی و پایدار در مدلهای مختلط تبدیل ساخته و شرایط پس کمانشی سازه را قابل اطمینان نموده است.

۵- بررسی و مقایسه عددی نتایج تحلیل‌های غیرخطی در دو حالت غیرمختلط و مختلط نشان می‌دهد اجرای دال بتنی روی شبکه‌های دو لایه تخت ظرفیت حد پایداری اولیه مدلهای مختلط را نسبت به مدلهای غیرمختلط بطور متوسط بیش از ۹۸ درصد ارتقاء داده است این در حالی است ظرفیت نهایی این مدلها بعد از فروجهش بطور متوسط بیش از ۲۳ درصد نسبت به ظرفیت اولیه مجدداً افزایش یافته است.

منابع

[1] Castillo, H. (1967), A space frame construction with steel and reinforced concrete-tridilosa spatial structure, In: Davies, R. M. (Ed.), Space Structures, Blackwell Scientific Publisher, Oxford: pp1089-1093.

[2] Al-Bazzaz, A. J. (1976), An investigation into composite double layer space grid structures, PhD thesis, University of Strathclyde.

[3] Soare M. V, Crainicescu. M & Tarog. D, (1985), Double layer grids with steel members and reinforced concrete slabs. Int. Journal of space structures, Vol 1, No 1,27-32,1985

[4] El-Sheikh, A. I. and Mc Contvd, R. E. (1993), Experimental study of behaviour of composite space trusses, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No. (3): pp. 747-766

[5] El-Sheikh, A. I. (1996), Effect of Composite Action on Space Truss Behaviour: Overview. International Journal of Structures, 16 (2). pp. 57-72.

[6] El-Sheikh A. I. (1999), Design of Top Concrete Slabs of Composite Space Trusses, Structural Engineering and Mechanics, Vol.7, No. (3), pp.319-330.

[7] Lakshmikandhan.K. N, et al, (2010), Parametric Studies on the Behavior of Steel and Composite Space Structures, International Journal of Space Structures Vol. 25 No. 3 2010

[8] Lakshmikandhan.K. N, et al, (2010), Comparative study on steel and concrete composite space structures, Journal of Structural Engineering, Vol. 37, No. 3, August-September 2010 pp. 180–187

[9] Sangeetha. P, Dr. R. Senthil. (2014), Analytical Study on behavior of the Composite space truss", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X PP 01-05

[10] El-Shami M, Mahmoud S, Elabd M (2018), Effect of floor openings on the capacity of composite space trusses. Journal of King Saud University - Engineering Sciences 30(2): 130-140.

[11] Gasii GM (2018) The steel and concrete composite cable space frames. Annual of the University of Architecture, Civil Engineering, and Geodesy, Sofia, 51(4): 67-75.

[12] Maalek S, Maalek R, Maalek B (2018), Intrinsic Characteristics of Composite Double Layer Grid Bridge Superstructures. Proceedings of the 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges (CSCE 2018), Quebec City, Canada.

[13] Sangeetha. P, (2020), Analytical Study on the behavior of Composite space truss structures with openings in a concrete slab. CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING REPORTS,E-ISSN 2450-8594, CEER 2020; 30 (3): 0265-0280, DOI: 10.2478/ceer-2020-0044
[14] Shahbazi-Reveshti. P, Shahrokh. M, Akbari. R (2020), Buckling behaviour of composite double layer braced barrel vaults, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00148, ISSN 0965, E-ISSN 1751-7702
[15] Welington V. Silva, et al, (2020), Experimental Analysis of Space Trusses Using Spacers of Concrete with Steel Fiber and Sisal Fiber, Materials 2020, 13, 2305; doi:10.3390/ma13102305
[16] Chilton John, (2000). Space Grid Structures. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041, pp191.