Advanced Modeling in Civil Engineering
Website : https://amcen.razi.ac.ir/
Razi University

# Effect of Random Distribution of Initial Imperfection Curvature on The Bearing Capacity of Double -Layer Flat Grids With Different Configurations

**Arash Bayat**[1], **Hamidreza Ashrafi**[2]✉

1.Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: arashebayat127@gmail.com
2.Corresponding Author, Department Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: h.r.ashrafi@razi.ac.ir.

## Article Info

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
**Received**
2024-03-14
**Received in revised form**
2024-05-04
**Accepted**
2024-06-17
**Available online**
2024-06-28

***Keywords***:
Flat double-layer spatial grid,
Initial imperfection,
reliability,
Monte-Carlo method,
Different configurations

## ABSTRACT

Space frame structures have recently received significant attention for covering large spaces due to their high degree of indeterminacy, considerable stiffness, and low weight. The existence of various imperfections in these structures, whether during material production or construction, is inevitable given the large number of members and nodes. Studies on these structures have shown their sensitivity to the presence of various imperfections, which have a stochastic nature. The main objective of this research is to investigate the effect of initial member curvature on the load-bearing capacity and reliability of flat two-layer grid structures with different patterns. For this purpose, two types of grid patterns, namely, orthogonal and skewed, with and without openings, were evaluated, resulting in a total of eight different structures. For each structure, the initial curvature of the members was randomly assigned using a normal distribution, and then a nonlinear incremental load analysis was performed using the OpenSees software. This process was repeated 1,000 times for each structure, resulting in a total of 8,000 nonlinear analyses. Finally, the statistical parameters and reliability of each structure were evaluated using the Monte Carlo method. The results show that the flat two-layer grid structure with an orthogonal pattern and without openings has better performance, with not only a higher average vertical load-bearing capacity and reliability but also lower sensitivity to initial member curvature.

**Cite this article:** Bayat, A., Ashrafi, H. (2024). Effect of random distribution of initial imperfection curvature on the bearing capacity of double-layer flat grids with different configurations. *Advanced Modeling in Civil Engineering* 1(1),133-146. DOI: 10.22126/amcen.2024.3293

© The Author(s).
Publisher: Razi University
DOI: 10.22126/amcen.2024.3293

## Introduction

Space structures have a high degree of indeterminacy and typically contain hundreds of members which inevitably incorporate different types of imperfection. Initial curvature of a truss member is a common form of geometric imperfection in space structures. To estimate the safety and reliability of such structures, it is necessary to consider the effects of such uncertainty. Several investigations (Roudsari and Gordini 2015, Sheidaii and Gordini 2015, Wada and Wang 1992 Gholizadeh et al. 2016) have addressed one or more of these random variables. Roudsari and Gordini (2015) studied the Random imperfection effect on reliability of space structures with different supports. They showed that geometric imperfections like initial curvature have considerable influence on the load-carrying capacity of these structures. El-Sheikh (1991, 1995 1997 and 2002) studied the sensitivity of double-layer space structures to member geometric imperfections and the overall strength, behavior, and the location of trusses to determine critical areas at which imperfect members should be avoided. El-sheikh also has investigated the effect of member length imperfections on the capacity and failure mechanism of triple-layer space structures. Geometrical defects and materials are observed in all engineering structures, and it is impossible to build two-layer space work grids without initial imperfections. Geometric defect mostly refers to the length of members, geometric dimensions of elements, position of nodes and dimensions of the structure, while material defect includes the effects of residual stress in materials. In most cases, the presence of defects is associated with a decrease in the bearing capacity of the structure. Although great care is taken in the process of producing materials and building the structure to minimize defects in the structure as much as possible, its effects are very effective and evident in the behavior of the structure. The distribution of defects in the structure, as a result of the decrease in the bearing capacity of the structure, also has a random nature. Therefore, it is necessary to evaluate the existence of uncertainty in various parameters and finally the reliability of the system in estimating the real behavior of the structures. Many research has been done on determining the reliability of two-mode and multi-mode networks. In 1999, 'Alghanem' presented an algorithm to calculate all minimum continuity states and minimum discontinuity states in a network whose components have direction. In 2004, 'Malinowski' presented a method to calculate the reliability of the network, assuming that the minimum states of continuity (or discontinuity) are obtained. So far, no comprehensive research has been done on the imperfect effects of the initial curvature of the member in two-layer flat grids with various configurations. In this research, the effect of theimperfection of the initial curvature has been investigated probabilistically and simultaneously on the capacity of two-layer flat grids with horizontal and diagonal intersection of configurations in cases with and without grid distance.

## Method

In this research, 8 flat two-layer grids with two-way-on-two-way and diagonal-on-diagonal patterns without and with panel zones were evaluated using OpenSees. All meshes were modeled using the SAP2000 software according to AISC LRFD99. To consider the effect of initial curvature on the vertical bearing capacity of a double-layer flat grid, the members should be modeled as curves, and due to the random distribution of initial defects, the amount of curvature is also different in various members. Therefore, the structure must be modeled and

analyzed many times, while the geometry of the structure changes every time. First, the incomplete member with initial curvature is modeled separately and outside the structure, the behavior of elastoplastic materials is assumed to be complete. Then, the member is subjected to axial-compressive displacement, and its axial load-displacement diagram is drawn.

## Results

For calculating the vertical capacity of flat two-layer meshes, based on the normal distribution, the maximum initial curvature of each member is between 2-10, and the percentage of member length was selected. This work was done for all the members, so the degree of imperfection of the initial curvature of each member is different. Then, based on each member's initial random curvature, the incomplete member's stress-strain diagram was selected and attributed to the member's materials. The incremental load analysis structure was established and the total load diagram was drawn concerning the vertical displacement of the middle node. To investigate the effect of the randomness of the initial curvature of the members, repeat the above steps 1000 times for each structure. Therefore, 1000 force-displacement diagrams were obtained for each structure. According to diagrams, Reliability in two-way configuration is more than diagonal configuration, the shorter the length of members and the greater their number, the higher the reliability, and reliability in the state without panel zones is much more than the state with panel zones.

## Conclusions

The results show that the sensitivity of the flat grid with various configurations to the random distribution of the initial curvature is not the same. A flat double-layer spatial grid on double layer configuration and without panel zones has a better performance and not only the average vertical load capacity and its reliability is higher, but also its sensitivity to the initial curvature of the members is less. The results show that the sensitivity of double-layer meshes to the random distribution of the initial curvature is not the same. The double-layer spatial grid shows better behavior as the number of its divisions increases due to more elements and the phenomenon of redistribution of power. Also, the lower the height-to-span ratio is, the flatness of the structure increases and the structure shows softer behavior than the brittle behavior at high height-to-span ratios.

## Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدلسازی پیشرفته در مهندسی عمران
نشریه : https://amcen.razi.ac.ir/
دانشگاه رازی

# تاثیر توزیع تصادفی ناکاملی انحنای اولیه بر ظرفیت باربری شبکه‌های تخت دولایه فضاکار با بافتارهای مختلف

آرش بیات[۱]، حمیدرضا اشرفی[۲]✉

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: arashebayat127@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: h.r.ashrafi@razi.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:**
۱۴۰۲/۱۲/۲۴

**تاریخ بازنگری:**
۱۴۰۳/۰۲/۱۵

**تاریخ پذیرش:**
۱۴۰۳/۰۳/۲۸

**تاریخ انتشار:**
۱۴۰۳/۰۴/۰۸

**کلیدواژه‌ها:**
شبکه دو لایهٔ تخت فضاکار،
ناکاملی انحناء اولیه،
قابلیت اعتماد،
شبیه سازی مونت کارلو،
بافتارهای مختلف.

**چکیده**

سازه‌های فضاکار به علت درجه نامعینی بالا، سختی قابل توجه و وزن کم در سال‌های اخیر جهت پوشش فضاهای بزرگ به شدت مورد توجه قرار گرفته اند. وجود انواع ناکاملی در این سازه ها چه در حین تولید مصالح یا هنگام اجراء، با توجه به تعداد زیاد اعضاء و گره‌ها اجتناب ناپذیر است. مطالعات انجام گرفته بر روی این سازه ها حساسیت رفتار آنها را به وجود انواع ناکاملی ها که در واقع ماهیتی تصادفی دارند نشان داده است. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر انحنای اولیه اعضاء بر ظرفیت باربری و قابلیت اعتماد شبکه دولایه تخت با بافتارهای متفاوت است. برای این کار دو نوع بافتار دوراهه و اریبی در دو حالت با و بدون چشمه و مجموعا هشت سازه مختلف ارزیابی شده اند. برای هر سازه ابتدا انحنای اولیه در اعضاء بصورت تصادفی با توزیع نرمال اختصاص یافته سپس تحلیل المان محدود غیرخطی بارافزون قائم توسط نرم افزار OpenSees انجام شده است. این فرایند برای هر سازه ۱۰۰۰ بار تکرار شده و مجموعا ۸۰۰۰ تحلیل غیرخطی انجام شده است. نهایتا پارامترهای آماری و قابلیت اعتماد هر سازه بروش مونت کارلو ارزیابی شده اند. نتایج نشان می‌دهند که شبکه تخت دو لایه فضاکار با بافتار دولایه روی دولایه و بدون چشمه، عملکرد بهتری دارد و نه تنها میانگین ظرفیت باربری قائم و قابلیت اعتماد آن بیشتر است بلکه حساسیت آن نیز به انحنای اولیه اعضاء کمتر می‌باشد.

**استناد**: بیات، آرش؛ اشرفی، حمیرضا. (۱۴۰۳). تاثیر توزیع تصادفی ناکاملی انحنای اولیه بر ظرفیت باربری شبکه‌های تخت دولایه فضاکار با بافتارهای مختلف. *مجله مدلسازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱(۱)، ۱۴۶-۱۳۳.

DOI: 10.22126/amcen.2024.3293

ناشر: دانشگاه رازی.

© نویسندگان.

**۱. مقدمه**

نقص هندسی و مصالح در تمام سازه های مهندسی مشاهده می‌گردد و ساخت شبکه‌های دولایهٔ فضاکار بدون ناکاملی‌های اولیه غیر ممکن است. نقص هندسی بیشتر به طول اعضاء، ابعاد هندسی المان‌ها، موقعیت گره‌ها و ابعاد سازه اشاره دارد درحالیکه نقص مواد دربرگیرنده اثرات تنش پسماند در مصالح است. وجود نقص در اکثر موارد با کاهش ظرفیت باربری سازه همراه است. هر چند که در فرایند تولید مصالح و ساخت سازه دقت بسیار زیادی اعمال می شود تا حتی الامکان نقص در سازه کمینه گردد ولی اثرات آن در رفتار سازه بسیار موثر و مشهود است. توزیع نقص در سازه، در نتیجه میزان افت ظرفیت باربری سازه نیز دارای طبیعتی تصادفی است. بنابراین ضروری است که در برآورد رفتار واقعی سازه‌ها وجود عدم قطعیت در پارامترهای مختلف و نهایتا قابلیت اعتماد سیستم ارزیابی گردد. بررسی قابلیت اعتماد سیستمهایی مانند سازه های فضاکار یا شبکه انتقال آب شهری به علت تعداد زیاد اعضاء بسیار پیچیده است.

قابلیت اعتماد بصورت احتمال عملکرد یک عضو، سازه یا شبکه تعریف می‌شود. این عملکرد می‌تواند در سطوح مختلفی مانند عملکرد کامل و بدون نقص سیستم، یا عملکرد نسبی آن تعریف شود. در هر صورت اگر احتمال شکست را $P_f$ درنظر بگیریم، قابلیت اعتماد $R_e$ را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود [۱و۲] :

$$R_e=1-P_f \qquad (۱)$$

برای محاسبه قابلیت اعتماد یک سیستم، تابع حدی عملکرد به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$LSF=R-S \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق $R$ مقاومت سیستم و $S$ تحریک خارجی است. تابع حدی عملکرد در یک سازه ممکن است کنترل تنش، کنترل تغییرشکل و ... بوده و تحریک خارجی نیز می‌تواند هر نوع از بارگذاری شامل بار مرده، زنده، باد، زلزله، تغییر درجه حرارت و ... باشد. با مشخص بودن تابع چگالی احتمال $S$ و $R$ ، می‌توان قابلیت اعتماد را از رابطه زیر بدست آورد [۳]:

$$R_e = \int dR_e = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(s)\left[\int_s^{\infty} f_R(r)dr\right] ds \qquad (۳)$$

که $f_R(r)$ و $f_S(s)$ به‌ترتیب تابع چگالی احتمال مقاومت سیستم و تحریک خارجی می‌باشند. یکی از مشکلاتی که برای محاسبه قابلیت اعتماد سیستم وجود دارد، تعیین تابع حدی است، زیرا در بسیاری از موارد این تابع به‌صورت صریح و تحلیلی بدست نخواهد آمد. در این موارد تعیین $R_e$ طبق رابطه (۳) و استفاده از روشهای تحلیلی ساده مانند تقریب مرتبه اول یا دوم ممکن نیست و باید از روش‌های عددی مانند مونت کارلو استفاده نمود.

یکی از اولین روش‌هایی که برای محاسبه قابلیت اعتماد شبکه، براساس قابلیت اعتماد مولفه‌ها ارائه شد روش شمارش مودها بود. در این روش اگر هر عضو در دوحالت عملکرد یا عدم‌عملکرد {۱و۰} درنظر گرفته شود و گره‌ها نیز در برابر زلزله ایمن فرض شوند، برای سازه ای با $n$ عضو $2^n$ مود بدست می‌آید. برای تک‌تک مودها باید کارکرد سازه را کنترل نمود و مجموع احتمال مودها در حالت عملکرد، قابلیت اعتماد سازه خواهد بود. این روش برای یک سازه فضاکار متعارف با تعداد مثلاً ۳۰ عدد عضو، عملاً غیرقابل دستیابی است.

قابل ذکر است که شبکه‌های دوحالته (عملکرد یا عدم عملکرد) حالت خاصی از شبکه‌های چندحالته هستند. در این نوع سازه ها، هر عضو می‌تواند دارای سطوح عملکرد مختلفی مانند {۱و۰/۸و۰/۵و۰/۲و۰} باشد. اکثراً سطح عملکرد هر عضو را اعداد گسسته‌ای در بازه [۱و۰] درنظر می‌گیرند. اگر شبکه‌ای دارای $n$ عضو باشد و هر عضو $m$ سطح عملکرد داشته باشد تعداد مودهای شبکه برابر $m^n$ خواهد بود که برای یک شبکه فقط ۱۰ عضوی با ۵ سطح عملکرد برای هر عضو، $5^{10}$ مود داریم! بنابراین می‌توان گفت که روش شمارش مودها عملاً در تعیین قابلیت اعتماد شبکه‌ها غیرقابل استفاده است.

در مورد تعیین قابلیت اعتماد شبکه های دو حالته و چند حالته تحقیقات بسیار زیادی انجام شده است. در سال ۱۹۹۹ 'الغانم' الگوریتمی را برای محاسبه کلیه حداقل حالات تداوم و حداقل حالات قطع در شبکه‌ای که مولفه‌های آن دارای جهت باشند، ارائه نمود [۴]. مولفه‌ها فقط در دوحالت عملکرد یا عدم‌عملکرد فرض شدند. در سال ۲۰۰۴ 'مالینووسکی' روشی را برای محاسبه قابلیت اعتماد شبکه، با فرض معلوم بودن حداقل حالات تداوم (یا قطع) ارائه نمود [۵]. برای این‌کار یک نمودار درختی تجزیه شده از حداقل حالات تداوم یا

حداقل حالات قطع ترسیم شده، براساس آن قابلیت اعتماد شبکه محاسبه شد. فرضیات او این بود که کلیه گره‌ها ایمن هستند و هر مولفه دو حالت عملکرد و عدم‌عملکرد دارد و مولفه‌ها از نظر عملکرد (یا عدم‌عملکرد)، نسبت بهم غیروابسته‌اند. 'مارکز'و'جیانگ' در سال ۲۰۰۶ روشی را برای تعیین عدم‌قطعیت در محاسبه قابلیت اعتماد شبکه ارائه نمودند [۶]. از آنجائیکه قابلیت اعتماد شبکه براساس قابلیت اعتماد اعضاء محاسبه می‌گردد، و محاسبه دقیق قابلیت اعتماد اعضاء نیز بعلت هزینه‌بر و زمان‌بر بودن امکان‌پذیر نیست، سطح عملکرد اعضاء و انحراف معیار آن ممکن است عملاً بر اساس کاتالوگ شرکت سازنده، یا تعدادی نمونه برداری محدود تعیین شود. این قضیه عدم قطعیتی را درتعیین قابلیت اعتماد اعضاء بوجود می‌آورد که به محاسبه قابلیت اعتماد شبکه نیز منتقل می‌گردد.

نهایتا نکته مهم این است که بررسی قابلیت اعتماد شبکه‌های چند حالته نیز بیان کاملی از رفتار سازه‌های فضاکار نیست. اعضای خرپایی این سازه ها و خود سازه فضاکار در وضیتی کاملا پیوسته عمل می‌کنند و در نظر گرفتن حالت ۰ و ۱ یا چند حالت گسسته برای آنها صحیح نیست. نکته مهم دیگر این است که با وقوع آسیب در یک عضو سازه فضاکار، باز توزیع نیرو در سازه رخ می‌دهد و این فرض که قابلیت اعتماد اعضاء به هم وابسته نیستند قابل قبول نمیباشد.

بنابراین محاسبه قابلیت اعتماد سازه فضاکار براساس قابلیت اعتماد اعضاء غیر قابل قبول است و باید قابلیت اعتماد کل سازه را ناچارا به روش های عددی محاسبه نمود. به علت حساسیت بالای سازه‌های فضاکار به ناکاملی در اعضاء محققین تحقیقات زیادی را در سال‌های اخیر در این مورد انجام داده اند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. 'وادا' و 'ونگ' در سال ۱۹۹۲ تاثیر برخی از عوامل عدم قطعیت را بر ظرفیت باربری سازه‌های دو لایه فضاکار بررسی کردند [۷]. آن‌ها با در نظر گرفتن نقص در چند عضو مشخص سازه نتیجه گرفتند که ناکاملی می‌تواند منجر به کاهش شدیدی در ظرفیت سازه می‌شود و حتی احتمال خرابی پیشرونده نیز وجود دارد.

در سال ۱۹۹۲ 'الشیخ' مطالعاتی بر روی سازه های فضاکار انجام داد و ناکاملی طول اعضاء در این سازه ها را بررسی کرد [۸]. این تحقیق نشان داد که ناکاملی از این نوع می‌تواند باعث بوجود آمدن نیروهای ناخواسته فشاری در برخی از اعضای فشاری شده و کمانش زود هنگام این اعضا را به دنبال داشته باشد. طی سال های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲ تحقیقات انجام شده بر روی سازه های فضاکار توسط 'الشیخ' نشان داد که وجود نامعینی زیاد در این نوع سازه ها نمی‌تواند باعث جلوگیری از خرابی پیش رونده در سازه شود [۱۱-۹]. بنابراین ممکن است حتی با کمانش یک عضو فشاری بحرانی در اثر بارگذاری بیش از حد، چنان نیرویی به اعضای مجاور وارد شود که باعث خرابی پیش رونده در سازه گردد. البته در این تحقیقات، ناکاملی بطور تصادفی در تمام اعضای سازه در نظر گرفته نشد و فقط برخی از اعضای سازه ناکامل فرض شدند. در سال ۲۰۱۵ 'شیدایی' و 'گردینی' به بررسی اثر توزیع تصادفی اندازه نبودن طول اعضاء در یک سازه تخت دو لایه فضاکار پرداختند [۱۲]. آنها با در نظر گرفتن توزیع گاما برای نقص طول اعضاء و استفاده از تحلیل غیر خطی نرم افزار Opensees حساسیت سازه فضاکار را به این نوع نقص نشان دادند.

هر چند که محققین به اثر توزیع تصادفی ناکاملی اعضا در ظرفیت باربری و رفتار خرابی سازه های فضاکار توجه نموده‌اند ولی اثرات توزیع تصادفی نقص در سازه های فضاکار با بافتارهای مختلف، متفاوت است. تاکنون در مورد اثرات ناکاملی انحنای اولیه عضو در شبکه‌های تخت دو لایه فضاکار با بافتارهای مختلف تحقیقات جامعی انجام نشده است. در این مقاله تأثیر ناکاملی انحنای اولیه، به صورت احتمالاتی و همزمان در ظرفیت شبکه های تخت دولایه با بافتار دوراهه روی دوراهه و اریبی روی اریبی در دوحالت با و بدون چشمه بررسی شده است. برای هر سازه هزار تحلیل بار افزون قائم انجام شده و ظرفیت باربری قائم سازه بکمک تحلیل غیرخطی نرم افزار OpenSees با لحاظ نمودن غیرخطی مواد و هندسی محاسبه شده است [۱۳]. در هر تحلیل ابتدا میزان انحنای اولیه هر عضو بر اساس توزیع نرمال بصورت یک پارامتر تصادفی تعیین و به عضو اختصاص یافته است. بنابراین احتمال وقوع ناکاملی در تمام اعضای سازه مورد توجه قرار گرفته و قابلیت اعتماد سازه با به‌کارگیری روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهند عملکرد و

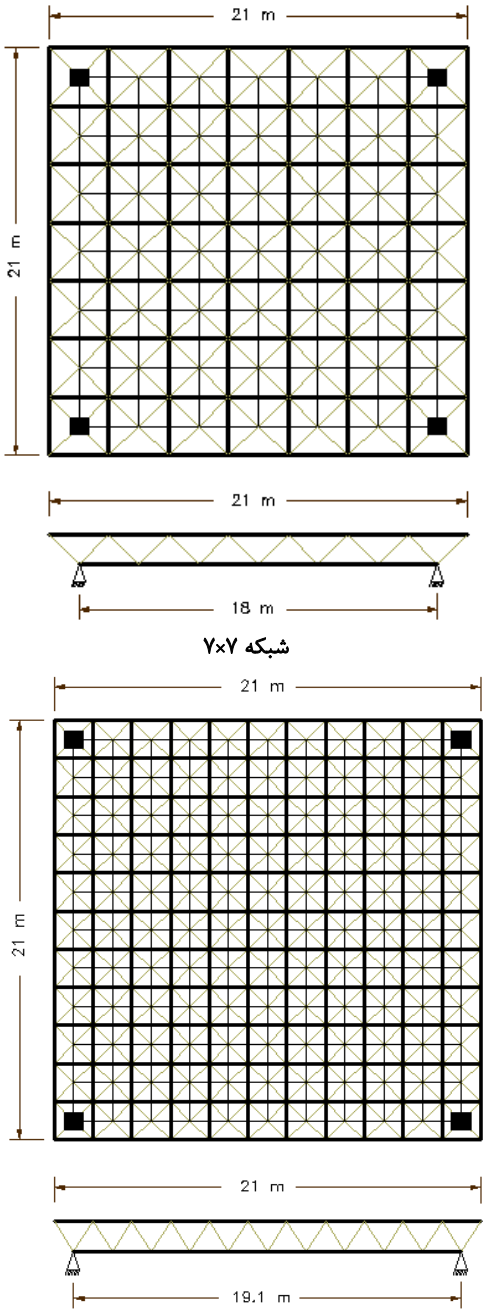
حساسیت شبکه دو لایه تخت فضاکار با بافتارهای مختلف نسبت به ناکاملی انحنای اولیه متفاوت است.

## ۲. سازه‌های مورد بررسی

در این تحقیق ۸ شبکه دو لایه تخت با نقش دو راهه روی دو راهه و اریبی روی اریبی بدون چشمه و دارای چشمه ارزیابی شدند. همانطوری که در شکل های ۱ الی ۴ مشاهده می‌گردد کلیه سازه‌ها با پلان مربعی به ابعاد ۲۱×۲۱ متر، در دو شبکه ی ۷×۷ و ۱۱×۱۱ با طول اعضای مختلف و تکیه گاه‌های گوشه‌ای بودند. اعضاء از مقطع لوله ای فولادی از نوع St-37 با مدول الاستیسیته ۲۱۰ Gpa، تنش تسلیم ۲۴۰ Mpa، ضریب پواسون ۰/۳ و کرنش سخت شوندگی در محدودهٔ ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۰۲ و رفتار الاستو-پلاستیک کامل انتخاب شدند و فاصله بین لایه‌ی بالا و پایین شبکه دو لایه تخت ۲ متر و کلیه اتصالات مفصلی در نظر گرفته شدند. بار مرده ناشی از وزن سازه، وزن پوشش و وزن تأسیسات احتمالی به میزان ۵۰ و بار برف ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع لحاظ شد و بر اساس سطح بارگیر گره های بالای سازه به آنها اعمال شد. کلیه شبکه ها در نرم افزار SAP2000 مدلسازی و براساس ضوابط آیین نامهٔ AISC LRFD99 طراحی شدند [۱۴]. جدول ۱ نتایج طراحی را برای شبکه‌های تخت دولایه دوراهه و اریبی نشان می‌دهد.

## ۳. تخمین پارامترهای مدل‌های سختی برشی اولیه

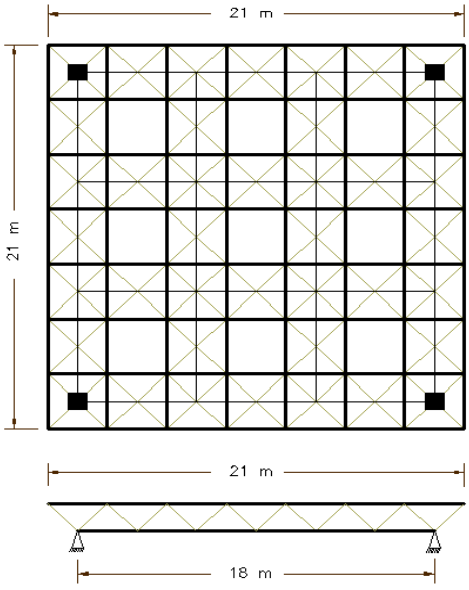
برای درنظر گرفتن اثر انحناء اولیه در ظرفیت باربری قائم شبکه تخت دولایه، باید اعضاء را بصورت منحنی مدلسازی نمود و به علت توزیع تصادفی نقص اولیه، میزان انحناء در اعضای مختلف نیز متفاوت است. بنابراین باید بارها و بارها سازه را مدلسازی و تحلیل نمود در حالیکه هندسه سازه هر دفعه تغییر می‌کند. انجام این کار عملا اگر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است. محققین برای انجام این کار روش ساده تری را انتخاب نموده‌اند و اثرات انحنای اولیه عضو را در مدل رفتاری مصالح می‌بینند. به عبارتی ابتدا عضو ناکامل و دارای انحنای اولیه بصورت جدا و خارج از سازه مدلسازی شده، رفتار مصالح الاستو-پلاستیک کامل فرض میشود. سپس عضو تحت اثر جابجایی محوری-فشاری قرار گرفته، نمودار بار-جابجایی محوری آن ترسیم می‌گردد.



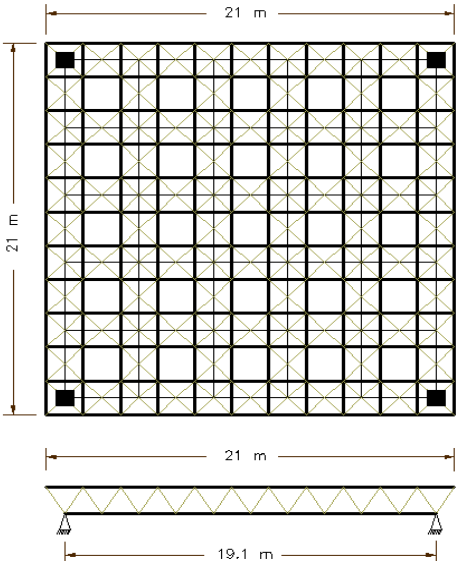

شبکه ۷×۷

شبکه ۱۱×۱۱

**شکل ۱. شبکه دو لایه تخت با نقش دو راهه روی دو راهه بدون چشمه T7 و T11**



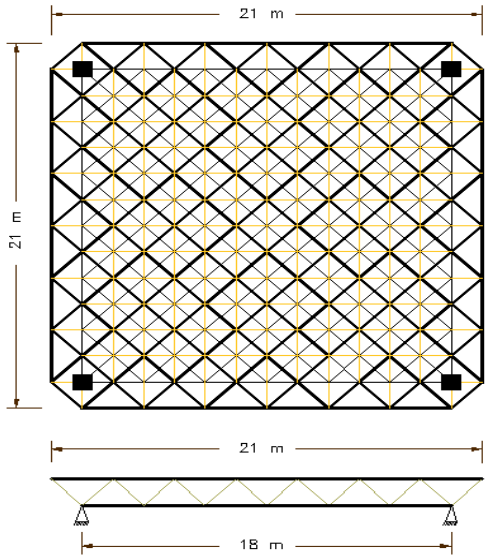

شبکه ۷×۷



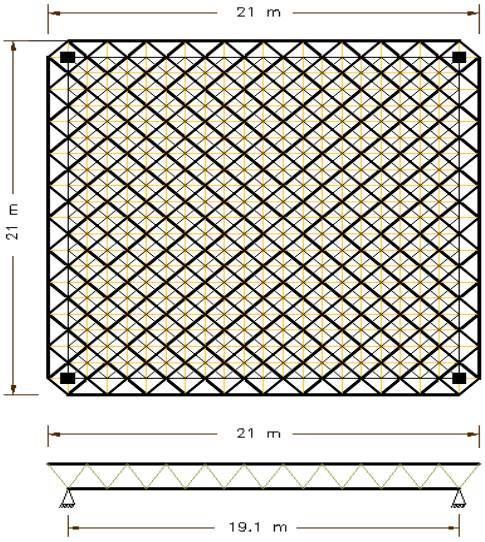

شبکه ۱۱×۱۱

**شکل ۲. شبکه دو لایه تخت با نقش دو راهه روی دو راهه با چشمه MT7 و MT11**

این تحلیل غیرخطی برای مقادیر مختلف انحنای اولیه تکرار می‌شود و کلیه نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده تبدیل به نمودار تنش-کرنش می‌گردند. حال میتوان عضو را بدون انحنای اولیه مدل نمود ولی از نمودار تنش-کرنش بدست آمده استفاده کرد که با نتیجه نمودار بار-جابجایی عضو ناقص یکسان خواهد بود. بنابراین بدون اینکه نقص انحناء اولیه اعضاء در هندسه سازه دیده شود، اعضاء کاملا مستقیم و بدون نقص مدلسازی می‌شوند ولی مدل رفتاری تنش-کرنش عضو تابعی از نقص انحنای اولیه، اندازه پروفیل و طول عضو خواهد بود. بنابراین برای هر طول-مقطع باید به ازای مقادیر مختلف انحنای اولیه، نمودار تنش-کرنش عضو دارای نقص را محاسبه نمود.



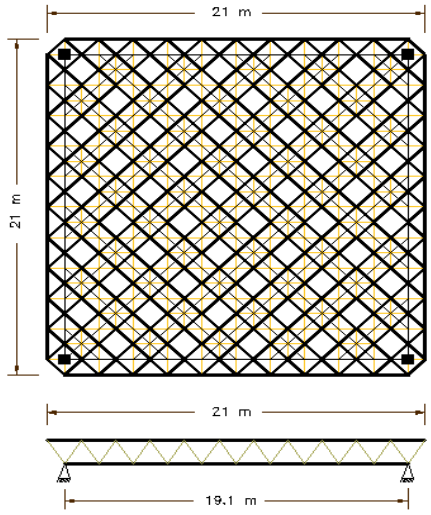

شبکه ۷×۷



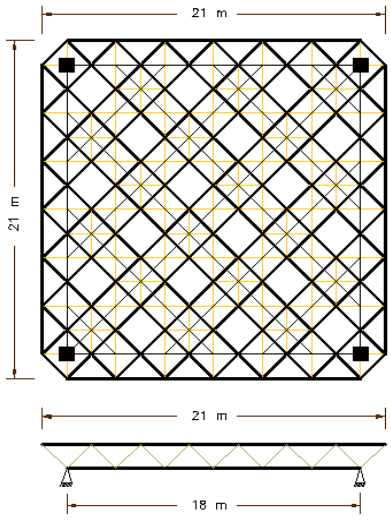

شبکه ۱۱×۱۱

**شکل ۳. شبکه دو لایه تخت با نقش اریبی روی اریبی با چشمه MO7 و MO11**

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد برای تحلیل عضو ناکامل، انحنای اولیه براساس شکل مود اول کمانشی، به شکل یک نیم موج سینوسی فرض گردید بطوریکه حداکثر انحراف اولیه ی آن در وسط دهانه برابر δ باشد. عضو فشاری در نرم افزار OpenSees با ۳۰ المان تیر ستون غیرخطی با طول های مساوی بصورت الاستوپلاستیک کامل مدل گردید.




شبکه ۷×۷




شبکه ۱۱×۱۱

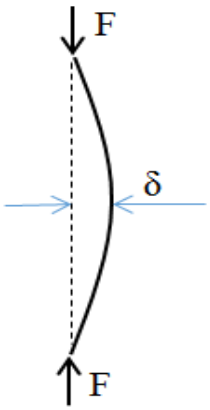
**شکل ۴. شبکه دو لایه تخت با نقش اریبی روی اریبی با چشمه MO7 و MO11**

## ۴. تحلیل غیرخطی سازه‌ها

برای محاسبه ظرفیت قائم شبکه های دولایه تخت ابتدا بر اساس توزیع نرمال، حداکثر انحنای اولیه هر عضو بین۰/۰۱ تا ۰/۱ درصد طول عضو انتخاب شد. این کار برای تمام اعضاء انجام شد بنابراین میزان ناکاملی انحنای اولیه هر عضو متفاوت است. سپس بر اساس میزان انحنای اولیه تصادفی هر عضو نمودار تنش-کرنش عضو ناکامل انتخاب و به مصالح عضو نسبت داده شد. سازه تحلیل بارافزون قائم شد و نمودار بار کل نسبت به جابجایی قائم گره میانی ترسیم شد. برای اینکه اثر تصادفی بودن انحنای اولیه اعضاء دیده شود مراحل فوق برای هر سازه ۱۰۰۰ بار تکرار شد.

بنابراین برای هر سازه هزار نمودار نیرو-جابجایی بدست آمد. شکل‌های ۷ تا ۱۴ نمودار نیرو-جابجایی را برای هر هشت سازه نشان می‌دهند. در این نمودارها محور قائم بر حسب نیوتن و محور افقی بر حسب میلیمتر است.

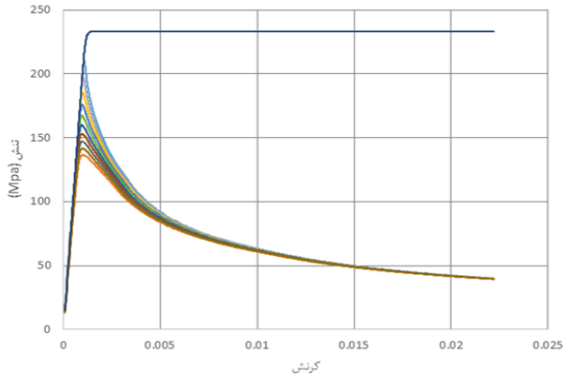
اگر در این نمودارها نقاط ماکزیمم به عنوان نقطه‌ی خرابی یا ظرفیت سازه در نظر گرفته شوند می توان میانگین و انحراف معیار ظرفیت سازه یا به عبارتی حساسیت آن را نسبت به نقص انحنای اعضاء به دست آورد. شکل ۱۵ نمودار چگالی احتمال ظرفیت باربری قائم شبکه دولایه تخت T11 را در هزار تحلیل نشان میدهد. توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری قائم سازه نیز نرمال است. (منظور از عبارت pdf مخفف probability density function است)



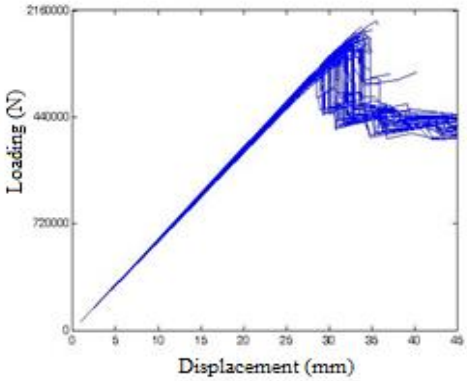

**شکل ۵. مشخصات هندسی مدل عضو فشاری ناکامل**

جدول ۱- تعداد اعضاء و مشخصات مقاطع در شبکه ها

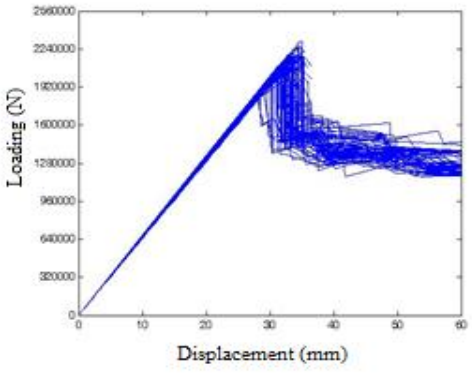
| شبکه | ابعاد مقطع | تعداد کل مقاطع | طول عضو (m) |
|---|---|---|---|
| T7 | CHS 114.3 - 5<br>CHS 114.3 – 6.3 | 392 | 2.9<br>3 |
| MT7 | CHS 114.3 - 5<br>CHS 114.3 – 6.3 | 320 | 2.9<br>3 |
| T11 | CHS 101.6 – 6.3<br>CHS 88.9 – 6.3 | 968 | 2.41<br>1.91 |
| MT11 | CHS 101.6 – 6.3<br>CHS 88.9 – 6.3 | 768 | 2.41<br>1.91 |
| O7 | CHS 88.9 – 6.3<br>CHS 114.3 – 4<br>CHS 88.9 – 4 | 728 | 2.5<br>3<br>2.12 |
| MO7 | CHS 88.9 – 6.3<br>CHS 101.6 – 5<br>CHS 88.9 – 5 | 584 | 2.5<br>3<br>2.12 |
| O11 | CHS 88.9 – 6.3<br>CHS 88.9 – 6.3<br>CHS 76.1 – 5 | 1848 | 2.22<br>1.91<br>1.35 |
| MO11 | CHS 88.9 – 6.3<br>CHS 101.6 – 6.3<br>CHS 88.9 – 6.3 | 1448 | 2.22<br>1.91<br>1.35 |



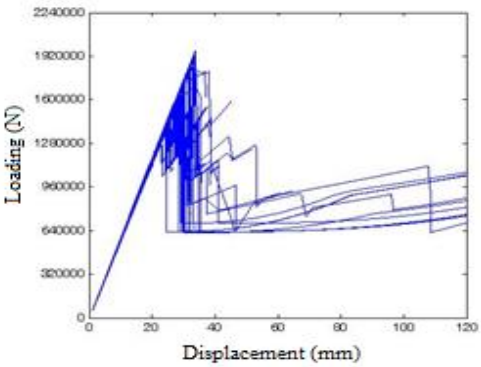

شکل ۶ . نمودار تنش-کرنش عضوکامل و ناکامل در ناحیه فش



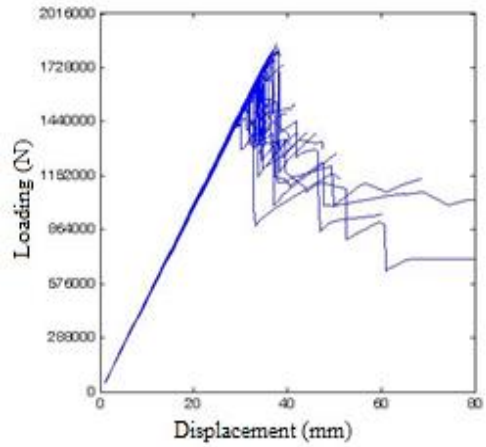

شکل ۸. نمودار بار- جابجایی شبکه T11



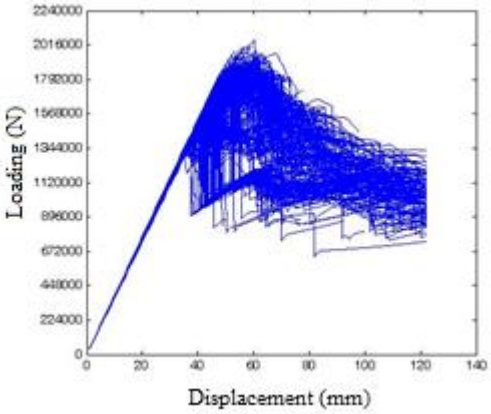

شکل ۷. نمودار بار- جابجایی شبکه T7



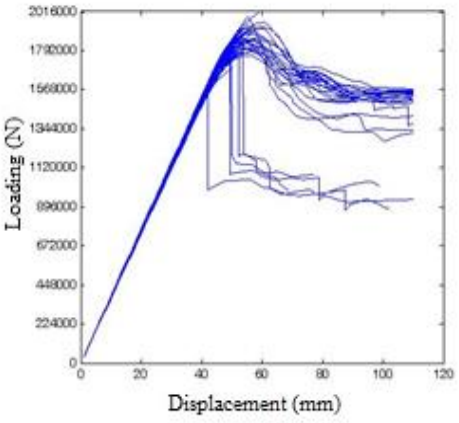

شکل۹. نمودار بار- جابجایی شبکه MT7



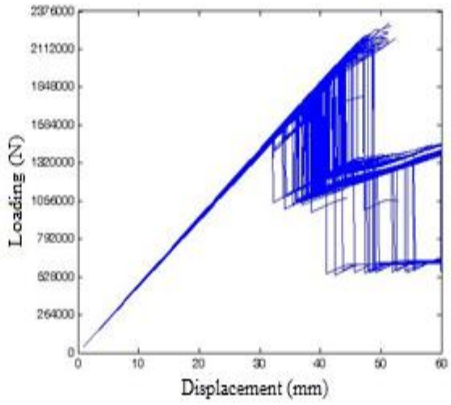

شکل۱۰. نمودار بار- جابجایی شبکه MT11



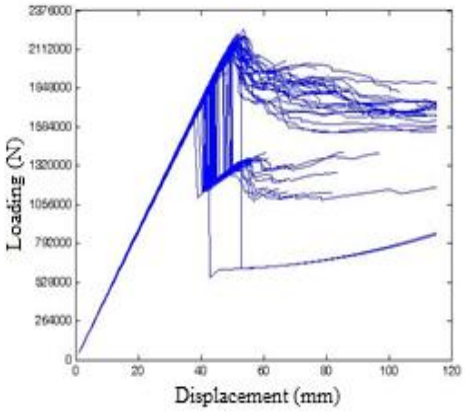

شکل۱۳. نمودار بار- جابجایی شبکه MO7



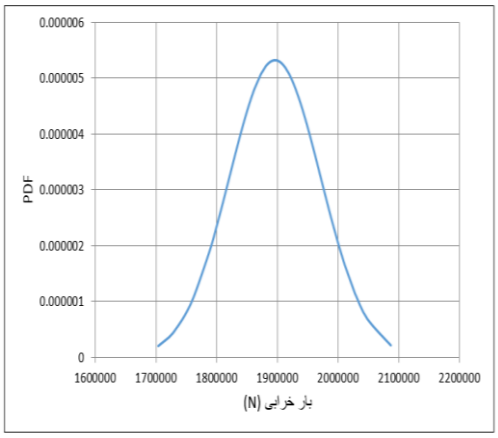

شکل۱۱. نمودار بار- جابجایی O7




شکل۱۴. نمودار بار- جابجایی شبکه MO11




شکل۱۲. نمودار بار- جابجایی شبکه O11




شکل۱۵. نمودار چگالی احتمال ظرفیت باربری شبکه دولایه تخت T11

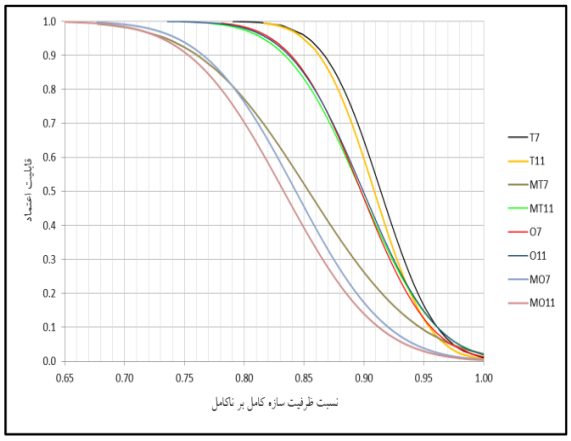
جزییات بیشتر شامل حداقل، حداکثر و میانگین ظرفیت باربری برای هر هشت سازه در جدول ۲ ارائه شده اند. در بافتار دوراهه با افزایش طول دهانه ظرفیت باربری کاهش می یابد ولی در بافتار اریبی با افزایش دهانه ظرفیت باربری افزایش یافته است. انحراف معیار و نسبت تغییرات ظرفیت باربری نیز در جدول ۲ ارائه شده اند. هرچه انحراف معیار کمتر باشد نشان دهنده حساسیت کمتر سازه به انحنای اولیه است. در هر دو بافتار، حالت با چشمه نسبت به بدون چشمه، به توزیع انحنای اولیه حساس‌تر است. بهترین عملکرد را بافتار دوراهه روی دوراهه بدون چشمه با دهانه ۷ متری دارد، زیرا دارای میانگین ظرفیت بالاتر و انحراف معیار کمتر است.

## ۵. قابلیت اعتماد

برای محاسبه قابلیت اعتماد سازه باید ظرفیت سازه کامل مشخص باشد. به علت اینکه سازه کامل و بدون نقص در عمل وجود ندارد، بیشترین ظرفیت باربری بدست آمده از ۱۰۰۰ تحلیل به عنوان ظرفیت باربری سازه کامل فرض شده است. فرض کنیم ۱۰۰۰ تحلیل را برای سازه ای خاص انجام داده ایم و ظرفیت باربری سازه کامل ۲۰۰ کیلو نیوتن است. اگر بخواهیم قابلیت اعتماد را برای ظرفیت ۱۸۰ کیلو نیوتن یعنی ۰/۹۰ ظرفیت سازه کامل محاسبه کنیم کافی است بدانیم چند مورد از این ۱۰۰۰ تحلیل ظرفیتی مساوی یا بیش از ۱۸۰ کیلو نیوتن را نشان داده‌اند. اگر ۶۵۰ تحلیل بالای ۱۸۰ KN جواب داده باشند قابلیت اعتماد ۰/۶۵ است. به همین روش قابلیت اعتماد برای هر ۸ سازه محاسبه و در شکل ۱۶ ارائه شده اند.

از مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت:

- قابلیت اعتماد در بافتار دو راهه بیش از بافتار اریبی است.
- هر چه طول اعضاء کمتر و تعداد آن‌ها بیشتر باشد، قابلیت اعتماد بیشتر است.
- قابلیت اعتماد در حالت بدون چشمه به مراتب بیش از حالت با چشمه است.




**شکل ۱۶. قابلیت اعتماد کلیه شبکه‌ها**

**جدول ۲. مشخصات آماری بار خرابی**

| نام شبکه | بار مینیمم (KN) | بار ماکزیمم (NK) | میانگین (KN) | انحراف معیار (KN) | نسبت تغییرات |
|---|---|---|---|---|---|
| T7 | 1820.8 | 2303.16 | 2105.23 | 84.81 | 4.0 |
| T11 | 1703.89 | 2086.88 | 1896.19 | 75.09 | 4.0 |
| MT7 | 1325.84 | 1956.97 | 1670.88 | 141.89 | 8.5 |
| MT11 | 1428.3 | 1850.93 | 1661.29 | 92.03 | 5.5 |
| O7 | 1566.72 | 2006.32 | 1800.83 | 91.78 | 5.1 |
| O11 | 1652.42 | 2245.86 | 2019.97 | 108.71 | 5.4 |
| MO7 | 1384.59 | 2045.83 | 1724.73 | 123.57 | 7.2 |
| MO11 | 1478.83 | 2292.29 | 1909.35 | 142.14 | 7.4 |

## ۶. نتیجه‌گیری

وجود ناکاملی‌ها در شبکه‌های دو لایه‌ی فضاکار که غالباً از تعداد زیادی گره و عضو تشکیل می‌شوند اجتناب‌ناپذیر بوده و نظر به طبیعت تصادفی توزیع ناکاملی‌ها، این تحقیق به بررسی تأثیر این عامل بر ظرفیت باربری شبکه‌های دو لایهٔ فضاکار با بافتارهای متفاوت پرداخته است. برای این کار دو نوع بافتار دوراهه و اریبی در دو حالت با و بدون چشمه و مجموعا هشت سازه مختلف ارزیابی شده اند. سازه‌ها با لحاظ نمودن توزیع تصافی انحنای اولیه تحت اثر جابجایی قائم قرار گرفتند و تحلیل المان محدود غیرخطی بار افزون قائم توسط نرم افزار OpenSees انجام شد. این فرایند برای هر سازه ۱۰۰۰ بار تکرار و مجموعا ۸۰۰۰ تحلیل غیرخطی انجام شد. نهایتا پارامترهای آماری و قابلیت اعتماد هر سازه به روش مونت کارلو ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهند که حساسیت شبکه تخت با بافتارهای مختلف به توزیع تصادفی انحنای اولیه یکسان نیست. شبکه تخت دو لایه فضاکار با بافتار دولایه روی دولایه و بدون چشمه، عملکرد بهتری

دارد و نه تنها میانگین ظرفیت باربری قائم و قابلیت اعتماد آن بیشتر است بلکه حساسیت آن نیز به انحنای اولیه اعضاء کمتر می‌باشد.
نتایج نشان می‌دهند که حساسیت شبکه‌های دولایه به توزیع تصادفی انحنای اولیه یکسان نیست. شبکه دو لایه فضاکار، هر چه تعداد تقسیمات آن بیشتر می‌گردد به دلیل اعضای المانی بیشتر و پدیده بازتوزیع بهتر نیرو رفتار بهتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین هر چقدر نسبت ارتفاع به دهانه کمتر باشد حالت تخت بودن سازه افزایش یافته و سازه رفتار نرم تری را نسبت به رفتار ترد در نسبت‌های بالای ارتفاع به دهانه از خود نشان می‌دهد. وجود ناکاملی‌ها در شبکه‌های دو لایهٔ فضاکار که غالباً از تعداد زیادی گره و عضو تشکیل می‌شوند اجتناب ناپذیر بوده و نظر به طبیعت تصادفی توزیع ناکاملی ها، این تحقیق به بررسی تأثیر این عامل بر ظرفیت باربری شبکه‌های دو لایهٔ فضاکار پرداخته است. مطالعات انجام شده بر مبنای آنالیز شبیه سازی مونت کارلو بر روی شبکهٔ دو لایهٔ انتخابی از نوع اسکالوپ، حاکی از حساسیت و کاهش ظرفیت قابل توجه این سازه ها در اثر ناکاملی‌های هندسی تصادفی اولیه بوده است. با استخراج نمودارهایی نظیر نمودار شکل ۱۶ و به کارگیری آن‌ها در طراحی سازه، می‌توان به راحتی بار طراحی لازم برای حصول ایمنی مورد نیاز را تعیین کرد. در حقیقت این نمودارها به طراح کمک خواهند کرد تا طراحی های خود را با سطح ایمنی مورد نظر بدون نیاز به انجام آنالیزهای مفصل قابلیت اعتماد برای هر طرح خاص، انجام دهد.

قابل توجه اینکه نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد در حالت کلی وجود ناکاملی‌های تصادفی اولیه در مدل فرضی شبکهٔ دولایهٔ فضاکار، ظرفیت این سیستم‌ها را در هر هشت نمونه مورد تحلیل حداقل ۹ و حداکثر ۲۲ درصد کاهش داده است. این توضیحات حساسیت سیستم های شبکهٔ دولایه نسبت به ناکاملی های اولیه را نشان داده و اهمیت در نظر گرفتن اثر احتمالاتی این ناکاملی ها در طراحی را مشخص می کنند. علاوه بر این آگاهی از مقدار حداکثر بار قابل‌تحمل توسط سازه به طراح این امکان را می‌دهد که ایمنی سازه را در برابر هر میزان اضافه‌بار احتمالی اعمال‌شده بر سازه ارزیابی نماید و در صورت لزوم تدابیر خاصی جهت افزایش ایمنی سازه اتخاذ نماید.

## References


[1] Ranganathan, R. (1990). “Reliability Analysis and Design of Structures”. McGraw–Hill, Indian Institute of Technology, Bombay.

[2] Nowak, A. S. & K. R. Collins. (2000). “Reliability of Structures”. McGraw, International Edition.

[3] Melchers, Robert E. (1999). “Structural Reliability Analysis and Prediction”. John Wiley & Sons, Second Edition.

[4] Al-Ghanim Amjed M. (1999). “A heuristic technique for generating minimal path and cut-sets of a general network”. Computers & Industrial Engineering, Vol. 36(1), pp. 45-55.

[5] Malinowski, Jacek. (2004). “Non-binary decomposition trees—a method of reliability computation for systems with known minimal paths/cuts”. Reliability Engineering & System Safety, Vol. 84(2), pp. 113-124.

[6] Ramírez-Márquez, J. E. and Jiang, W. (2006). “Confidence bounds for the reliability of binary capacitated two-terminal networks”. Reliability Engineering & System Safety Vol. 91(8), pp. 905-914.

[7] Wada, A. and Wang, Z. (1992). “Influence of uncertainties on mechanical behavior of a double-layer space truss”. International Journal of Space Structures, 7(3), pp. 223-235.

[8] El-Sheikh, A.l. (1991). “The effect of composite action on the behavior of space structures”. Ph.D. Dissertation, University of Cambridge, UK.

[9] El-Sheikh, A.l. (1995). “Sensitivity of space trusses to member geometric imperfections”. International Journal of Space Structures, 10(2), pp. 89-98.

[10] El-Sheikh, A.l. (1997). “Effect of member length imperfections on triple-layer space trusses”. Journal of Engineering Structures, 19(7), pp. 540-550.

[11] El-Sheikh, A.l. (2002). “Effect of geometric imperfections on single-layer barrel vaults”. International Journal of Space Structures, 17(4), pp. 271-283.

[12] Sheidaii, Mohammad Reza, and Mehrdad Gordini. (2018). “Effect of Random Distribution of Member Length Imperfection on Collapse Behavior and Reliability of Flat Double-Layer Grid Space Structures”. Advances in Structural

[13] McKenna, F. Fenves, GL. and Scott MH. (2000). "Open system for earthquake engineering simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center". University of California, Berkeley, Available from http://opensees.berkeley.edu.
[14] AISC. (2010). American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC360-10: Specification for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago, Illinois.
[15] Azad, S. K., & Aminbakhsh, S. (2021). High-dimensional optimization of large-scale steel truss structures using guided stochastic search. In Structures (Vol. 33, pp. 1439-1456). Elsevier.
[16] Azad, S. K., & Aminbakhsh, S. (2022). ε-constraint guided stochastic search with successive seeding for multi-objective optimization of large-scale steel double-layer grids. Journal of Building Engineering, 46, 103767.
[17] Liu, X., Zhan, X., Zhang, A., Zhang, X., & Tian, C. (2017). Random imperfection method for stability analysis of a suspended dome. International Journal of Steel Structures, 17(1), 91-103.
[18] Wagner, H. N. R., Hühne, C., Zhang, J., & Tang, W. (2020). On the imperfection sensitivity and design of spherical domes under external pressure. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 179, 104015.
[19] Liu, T., Chen, Y., Liu, L., Liu, Y., Leng, J., & Jin, L. (2021). Effect of imperfections on pseudo-bistability of viscoelastic domes. Extreme Mechanics Letters, 49, 101477.
[20] Zhao, Z. W., Liu, H. Q., Liang, B., & Yan, R. Z. (2019). Influence of random geometrical imperfection on the stability of single-layer reticulated domes with semi-rigid connection. Adv. Steel Constr., 15(1), 93-99.
[21] Zhang, H., Zhu, X., & Yao, S. (2020). Nonlinear dynamic analysis method for large-scale single-layer lattice domes with uncertain-but-bounded parameters. Engineering structures, 203, 109780.