

Investigating the effect of microstructural defects arising from the additive manufacturing process including variable diameter and bond distortion on the rate-dependent response of a symmetric twelve-layer lattice material made of Ti6Al4V alloy

M. R. Karamooz-Ravari^{1*}, B. Shahriari², S. Yadegari³

1- Associate Professor, Faculty of Mechanical and Materials Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

3- M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

ABSTRACT

In recent years, the use of lattice materials has increased in various industries due to their unique properties such as high strength to weight, impact absorption properties, low density and adjustable properties. Although the use of additive manufacturing technology is considered a suitable solution for the manufacture of this category of materials, despite the microstructural defects arising from this production process, the control of the mechanical properties of these materials has faced challenges. In this article, the effect of two defects of variable diameter and bond distortion on the strain-rate-dependent response of a symmetric twelve-layer lattice material made of Ti6Al4V alloy has been investigated. For this purpose, a finite element model based on the Timoshenko beam element has been developed to consider these two types of defects and is validated using the available experimental data for a strain rate of 1000/s. The results show that increasing the amount of both types of defects leads to a decrease in the stress level in the stress-strain curve. Also, increasing the variable diameter defect has reduced the fluctuation of this curve in the non-linear area, while the distortion of the links does not have much effect on this matter. Examining the elastic modulus indicates that the increase in diameter changes along each link causes the elastic modulus to decrease almost linearly, while the increase in distortion of the link reduces the elastic modulus with an almost quadratic relationship. By increasing the average diameter of the grafts, the effect of variable diameter defects and graft distortion increases and decreases, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 October 2023

Revise Date: 11 January 2024

Accept Date: 15 February 2024

Keywords:

Lattice material
Additive manufacturing
Microstructural defects
Timoshenko beam
Dynamic response
Strain rate

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.415428.3214>

*Corresponding author: M. R. Karamoozravari.

Email address: m.karamooz@kgut.ac.ir

بررسی تاثیر عيوب ریزساختاری برآمده از فرآیند تولید افزایشی شامل قطر متغیر و اعوجاج پیوند بر پاسخ وابسته به نرخ ماده مشبک دوازده سطحی متقارن ساخته شده از آلیاژ Ti6Al4V

محمد رضا کارآموز راوری^{۱*}، بهروز شهریاری^۲، سپهر یادگاری^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

۳- کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از مواد مشبک به دلیل خواص منحصر به فردی همچون استحکام به وزن بالا، خاصیت جذب ضربه، چگالی اندک و خواص قابل تنظیم در صنایع مختلف افزایش یافته است. هرچند که استفاده از تکنولوژی ساخت افزایشی راهکاری مناسب جهت ساخت این دسته از مواد محسوب می‌گردد، با این وجود عيوب ریزساختاری برآمده از این فرآیند تولید، کنترل خواص مکانیکی این مواد را با چالش‌هایی روبرو کرده است. در مقاله حاضر به بررسی تاثیر دو عیب قطر متغیر و اعوجاج پیوند بر پاسخ وابسته به نرخ کرنش ماده مشبک دوازده سطحی متقارن ساخته شده از آلیاژ Ti6Al4V پرداخته شده است. برای این منظور یک مدل اجزای محدود بر پایه المان تیر تیموشنکو برای در نظر گرفتن این دو نوع عیب توسعه داده شده و با استفاده از داده‌های تجربی موجود برای نرخ کرنش ۱۰۰۰ بر ثانیه صحت‌سنجی می‌گردد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش میزان نوسانات این منحنی در ناحیه غیرخطی شده حال آن که اعوجاج منجر می‌شود. همچنین افزایش عیب قطر متغیر باعث کاهش میزان نوسانات این منحنی در ناحیه غیرخطی شده حال آن که اعوجاج پیوندها تاثیر چندانی بر این مهم ندارد. بررسی مدول الاستیک حاکی از آن است که افزایش تغییرات قطر در امتداد هر پیوند باعث می‌شود که مدول الاستیک تقریباً به صورت خطی کاهش یابد، این در حالی است که افزایش اعوجاج پیوند مدول الاستیک را با رابطه تقریباً درجه دو کاهش می‌دهد. با افزایش قطر متوسط پیوندها تاثیر عيوب قطر متغیر و اعوجاج پیوند به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: مواد مشبک، فرآیند تولید افزایشی، عيوب ریزساختاری، تیر تیموشنکو، پاسخ دینامیکی، نرخ کرنش

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.415428.3214	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.415428.3214	۱۴۰۳/۰۷/۳۰	۱۴۰۲/۱۱/۲۶	۱۴۰۲/۱۱/۲۶	۱۴۰۲/۱۰/۲۱	۱۴۰۲/۰۷/۳۰
محمد رضا کارآموز راوری m.karamooz@kgut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مواد سلولولی^۱ به دسته‌ای از مواد گفته می‌شود که از اتصال شبکه‌ای از پیوندها یا صفحات در فضای سه‌بعدی ایجاد می‌شوند. موادی همچون چوب و استخوان نمونه‌های طبیعی و فوم‌های پلیمری و فلزی نمونه‌های مصنوعی از این نوع مواد می‌باشند. استحکام بالا در وزن اندک، چگالی کم و خاصیت جذب ضربه، ارتعاش و صوت، مواد سلولولی را به گزینه‌هایی مناسب برای استفاده در صنایع مختلف تبدیل کرده‌است [۱]. ساختارهای مشبک^۲ گروهی از مواد سلولولی هستند که ساختاری منظم دارند. این مهم به طراح این امکان را می‌دهد که بتواند خواص مکانیکی را از طریق تغییر ساختار ماده مشبک کنترل نماید. هرچند که مواد مشبک خواص ویژه‌ای را فراهم می‌آورند که توسط مواد عادی قابل دستیابی نیست، ولی به دلیل محدودیت‌های تولید این مواد، استفاده از آن‌ها تا چند دهه گذشته مورد استقبال قرار نگرفت. با ظهور تکنولوژی تولید ساخت افزایشی^۳، امکان تولید این دسته از مواد فراهم شده و کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف روز به روز در حال افزایش است. از اولین باری که بشر توانست صرفاً با داشتن اطلاعات دیجیتالی از یک شی، مدل آن را بدون نیاز به ابزار بسازد، حدوداً ربع قرن می‌گذرد؛ این دستاورد بزرگ ابتدا نمونه‌سازی سریع^۴ نام گرفت اما در ادامه به نام فناوری ساخت افزایشی که معنای جامع‌تری را در بردارد، تغییر نام یافت [۲]. ساخت افزایشی که به روش ساخت رشته‌دوبی^۵ (FFF) یا مدل‌سازی رسوب‌دوبی^۶ (FDM) هم گفته می‌شود، یکی از متداولترین روش‌ها در بازار و صنعت است [۳].

در تکنولوژی ساخت افزایشی، ابتدا مدل سه‌بعدی قطعه‌ای که قرار است تولید گردد در نرم‌افزارهای طراحی ایجاد می‌گردد؛ سپس این مدل سه‌بعدی به لایه‌هایی با ضخامت کم در امتداد ارتفاع نمونه تقسیم می‌شود؛ پس از آن، اطلاعات این لایه‌ها به دستگاه تولید افزایشی ارسال شده و قطعه مورد نظر از تولید و اتصال این لایه‌ها به یکدیگر ایجاد می‌گردد. بسته به اینکه لایه‌ها چگونه تولید شده و به هم متصل می‌شوند، تاکنون، روش‌های تولید افزایشی متفاوتی ابداع شده‌است [۴]. هر چند که روش تولید افزایشی تاکنون به طور موفقیت‌آمیز برای تولید قطعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌است، اما وجود عیوب ریزساختاری ایجاد شده، استفاده از این روش را برای ساخت ساختارهای مشبک با چالش مواجه کرده‌است. مواد مشبک تولید شده با استفاده از روش‌های مختلف تولید افزایشی از عیوبی همچون قطر متغیر پیوند، اعوجاج در پیوندها، تخلخل، تمرکز ماده در رئوس و انحراف از سطح مقطع طراحی شده رنج می‌برند [۵]. با توجه به این مهم، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص تاثیر عیوب ریزساختاری مختلف بر پاسخ مکانیکی این دسته از مواد انجام شده‌است. یک رهیافت کلی برای لحاظ کردن کلیه عیوب ریزساختاری در مدل‌های عددی وارد کردن مستقیم هندسه نمونه تولید شده با استفاده از اسکن‌های سه‌بعدی است [۶-۸]. هرچند که با استفاده از این روش هندسه ایجاد شده در مدل کامپیوتری مطابقت مطلوبی با نمونه ساخته شده دارد، ولی به دلیل آنکه مدل تولید شده وابسته به یک نمونه مشخص است از آن نمی‌توان برای پیش‌بینی خواص ماده مشبک پیش از فرآیند ساخت استفاده نمود. کمپولی و همکارانش [۹] با فرض قطر متغیر پیوند به عنوان تنها عیب ریزساختاری، مدل اجزا محدودی بر پایه المان تیر توسعه دادند. کارآموز و همکارانش [۱۰] عیب ریزساختاری قطر متغیر را با استفاده از تصاویر میکروسکوپی استخراج نموده و توزیع آماری این عیوب را در امتداد پیوندهای ماده مشبک استخراج نمودند. آن‌ها سپس از این داده‌های آماری برای توسعه مدل‌های اجزا محدود بر اساس المان‌های تیر و المان پیوسته استفاده نمودند. در مطالعه‌ای دیگر [۱۱]، آن‌ها دو نوع مدل اجزا محدود بر پایه المان‌های پیوسته برای در نظر گرفتن اثرات عیب قطر متغیر و اعوجاج پیوند برای بررسی رفتار مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار مشبک توسعه دادند. به منظور تولید مدلی با حجم محاسبات کم، کارآموز و همکارانش [۱۲] دو عیب ریزساختاری قطر متغیر و اعوجاج پیوند را در یک نمونه تست کشش ساده اعمال کرده و از پاسخ خروجی آن برای ایجاد مدلی بر پایه المان تیر تیموشنکو استفاده نمودند. لیو و همکارانش [۱۳] با استفاده از

¹ Cellular Materials

² Cellular Lattice Structures

³ Additive Manufacturing

⁴ Rapid Prototyping

⁵ Fused Filament Fabrication (FFF)

⁶ Fused Deposition Modeling (FDM)

تصاویر میکروسکوپی، داده‌های آماری مربوط به توزیع عیوب ریزساختاری دو ماده مشبک متفاوت را استخراج نموده و از آن برای توسعه مدل اجزا محدودی جهت پیش‌بینی رفتار الاستیک و فروپاشی این مواد استفاده نمودند. گودال و همکارانش [۱۴] به بررسی تاثیر پیوندهای ساخته نشده حین فرآیند تولید افزایشی بر پاسخ مکانیکی و مکانیزم‌های تغییرشکل این مواد پرداختند. لازانوسکی و همکارانش [۱۵] با بهره‌گیری از تصاویر پرتونگاری مقطعی و استفاده از روش اجزا محدود بر پایه المان‌های پیوسته، مدلی را برای در نظر گرفتن عیوب ریزساختاری شامل قطر متغیر، اعوجاج پیوند و انحراف از سطح مقطع دایره‌ای توسعه دادند. در پژوهشی دیگر [۱۶]، آن‌ها از مدل ارائه شده در مرجع [۱۵]، زنجیره‌های مارکو و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای پیش‌بینی سختی ساختارهای مشبک استفاده نمودند. آلانا و همکارانش [۱۷] با استفاده از یک مدل اجزا محدود همگن‌سازی شده، تاثیر عدم دقت‌های هندسی ایجاد شده حین فرآیند ساخت را بر رفتار الاستیک غیرایزوتروپیک ساختار مشبک الماسی مورد بررسی قرار دادند. کائو و همکارانش [۱۸] به توسعه مدل اجزا محدودی برای بررسی تاثیر عیوب ریزساختاری شامل تخلخل، قطر متغیر و اعوجاج پیوند پرداختند. جیانگ و همکارانش [۱۹] با بهره‌گیری از مدل اجزای محدود دوبعدی، اثرات زبری سطح و وجود تخلخل در پیوند را بر پاسخ مکانیکی ساختارهای مشبک مورد ارزیابی قرار دادند. رادلوف و همکارانش [۲۰] به منظور در نظر گرفتن قطر متغیر پیوندها، قطر متوسط هر پیوند را با استفاده از تصاویر میکروسکوپی استخراج نموده و از آن برای ایجاد مدل اجزا محدودی با پیوندهای با قطر متفاوت استفاده نمودند. راقوندر و همکارانش [۲۱] با استفاده از مدل اجزا محدود بر پایه المان‌های پیوسته، دو عیب ریزساختاری قطر متغیر و اعوجاج پیوند را در مدل ساختار مشبک مکعبی ساده وارد نمودند.

هر چند که تاثیر عیوب ریزساختاری بر پاسخ مکانیکی ساختارهای مشبک در بارگذاری شبه استاتیکی طی مطالعات گسترده مورد بررسی قرار گرفته است اما مطالعات زیادی در خصوص تاثیر این عیوب بر رفتار این مواد در بارگذاری‌های دینامیکی انجام نشده است. با این وجود که مدل‌های بر پایه المان‌های سه‌بعدی می‌توانند به نتایج مطلوبی منجر شوند ولی حجم محاسبات مورد نیاز از مقبولیت این روش‌ها کاسته است. در این مقاله یک مدل اجزا محدود بر پایه المان تیر تیموشنکو جهت بررسی اثرات دو عیب قطر متغیر و اعوجاج پیوند توسعه داده شده و، پس از صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های تجربی موجود، تاثیر این دو پارامتر بر پاسخ مکانیکی ساختار مشبک دوازده سطحی متقارن^۷ (RD) در نرخ کرنش‌ها و تخلخل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش میزان هر دو نوع عیب به کاهش سطح تنش در منحنی تنش-کرنش منجر می‌شود. همچنین افزایش عیب قطر متغیر باعث کاهش میزان نوسانات این منحنی در ناحیه غیرخطی شده حال آنکه اعوجاج پیوندها تاثیر چندانی بر این مهم ندارد. بررسی مدول الاستیک مبین آن است که با افزایش قطر متوسط پیوندها تاثیر عیوب قطر متغیر و اعوجاج پیوند به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا ساختار مشبک مورد نظر مورد بررسی قرار گرفته و سپس مدل اجزا محدود توسعه داده شده و نحوه ایجاد عیوب قطر متغیر و اعوجاج پیوند بیان می‌گردد. در ادامه، نحوه اعمال بارگذاری و شرایط مرزی عنوان گشته و در پایان معادلات ساختاری حاکم بر رفتار ماده سازنده پیوندها ارائه می‌شود.

۲-۱- ماده مشبک

شکل ۱ یک سلول واحد از ساختار RD، به طول سلول واحد L و قطر پیوند D را نمایش می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود سلول واحد این ماده مشبک دارای ۲۲ نقطه راس است که توسط ۳۲ پیوند^۸ به یکدیگر متصل شده‌اند. با در نظر گرفتن S بعنوان تعداد پیوندها و ν تعداد رئوس، عدد ماکسول^۹ با استفاده از رابطه ۱ قابل بیان خواهد بود [۲۲]:

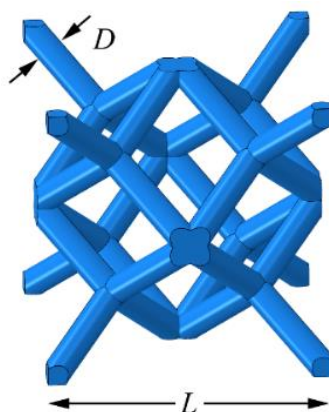
^۷Rhombohedral Dodecahedron

^۸Ligament

^۹Maxwell

$$M = s - 3v + 6$$

(۱)



شکل ۱: سلول واحد متناظر با ساختار مشبک RD

چنانچه عدد ماکسول کوچکتر از صفر باشد مکانیزم اصلی تغییر شکل، خمش پیوندها است حال آنکه برای ساختار مشبکی با عدد ماکسول بزرگتر مساوی صفر مکانیزم اصلی تغییر شکل، بارگذاری محوری است. با استفاده از رابطه ۱ عدد ماکسول برای ساختار RD برابر با ۲۸- خواهد بود که نشان دهنده خمش پیوندها به عنوان مکانیزم اصلی تغییر شکل می باشد. بسته به روش تولید افزایشی که برای ساخت ماده مشبک مورد استفاده قرار می گیرد، عیوب مختلفی ممکن است در آن ایجاد شود. رایج ترین این عیوب عبارتند از قطر متغیر پیوندها، اعوجاج پیوندها، انحراف از سطح مقطع طراحی شده، تمرکز ماده در رئوس و وجود حفره در پیوندها. مطالعات انجام شده نشان می دهد که این عیوب می توانند بشدت بر خواص مکانیکی ماده مشبک اثرگذار باشند [۱۰].

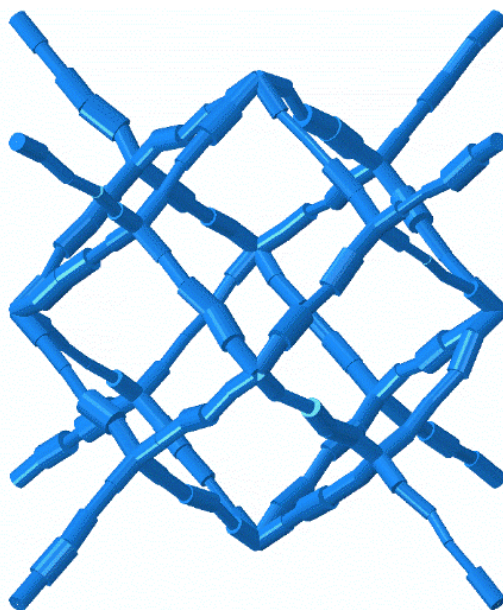
۲-۲- مدل سازی اجزا محدود

هرچند که می توان کلیه عیوب ریزساختاری ذکر شده در بخش قبل را با استفاده از تصاویر میکروسکوپی و استفاده از المان های سه بعدی در مدل های عددی وارد نمود، اما حجم محاسبات مورد نیاز توسعه چنین مدل هایی را محدود می سازد. در این مقاله از یک مدل بر پایه المان تیر تیموشنکو، که همزمان اثرات خمش و تغییر شکل های برشی را در نظر می گیرد، جهت در نظر گرفتن دو عیب قطر متغیر و اعوجاج پیوند استفاده می شود [۱۳]. برای این منظور، همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، هر پیوند از ساختار مشبک به N قسمت مساوی تقسیم می شود. سپس، برای در نظر گرفتن قطر متغیر پیوند، به هر بخش از پیوند یک قطر تصادفی با استفاده از رابطه (۲) اختصاص داده می شود.

$$D_r = D_{av} + \rho D_v \quad (2)$$

در این رابطه D_r قطر تصادفی تولید شده، D_{av} قطر متوسط پیوند، D_v مقدار حداکثر تغییرات قطر و ρ یک عدد تصادفی بین ۱- و ۱ است. به منظور وارد کردن عیب اعوجاج پیوند، نقاط مرزی بخش های یک پیوند در صفحه ای، که بردار عمود بر آن پیوند بدون آسیب است، به موقعیتی تصادفی جابجا می شود. در این حالت اگر P_1 و P_2 دو نقطه راس یک پیوند باشد، i -امین نقطه تقسیم بر روی پیوند، P_i ، با استفاده از رابطه ۳ تعیین می شود.

$$P_i = P_1 + \frac{i}{N}(P_2 - P_1) \quad (3)$$

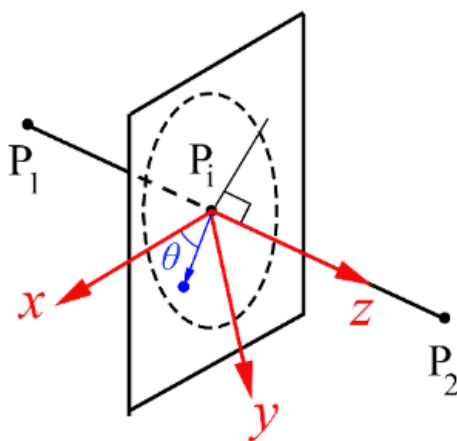


شکل ۲: یک سلول واحد از مدل اجزا محدود ماده مشبک RD بر پایه المان تیر برای در نظر گرفتن عیوب قطر متغیر و اعوجاج پیوندها

حال در دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل ۳، موقیعت نقطه مرزی جابجا شده با استفاده از روابط ۴ و ۵ تعیین می‌گردد. در این روابط δ حداکثر مقدار اعوجاج پیوند، α یک عدد تصادفی بین -۱ و ۱ و θ عددی تصادفی بین ۰ و 2π می‌باشند. شکل ۲ یک سلول واحد از ساختار RD را به تصویر می‌کشد که دو عیب مورد نظر به صورت اغراق آمیز در آن ایجاد شده‌اند.

$$x = (\alpha\delta) \cos(\theta) \quad (۴)$$

$$y = (\alpha\delta) \sin(\theta) \quad (۵)$$



شکل ۳: نحوه ایجاد نقطه مرزی جهت اعمال اعوجاج در پیوند

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که تمرکز ماده در رئوس ماده مشبک می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی آن اثرگذار باشد. برای وارد کردن این مهم در مدل عددی، کره‌ای به شعاع D_{ov} و به مرکزیت رئوس ساختار مشبک را در نظر گرفته و شعاع بخش‌هایی از پیوند که در این کره قرار می‌گیرند در ضریب ۱/۲ ضرب می‌شوند [۲۳، ۲۴، ۱۲].

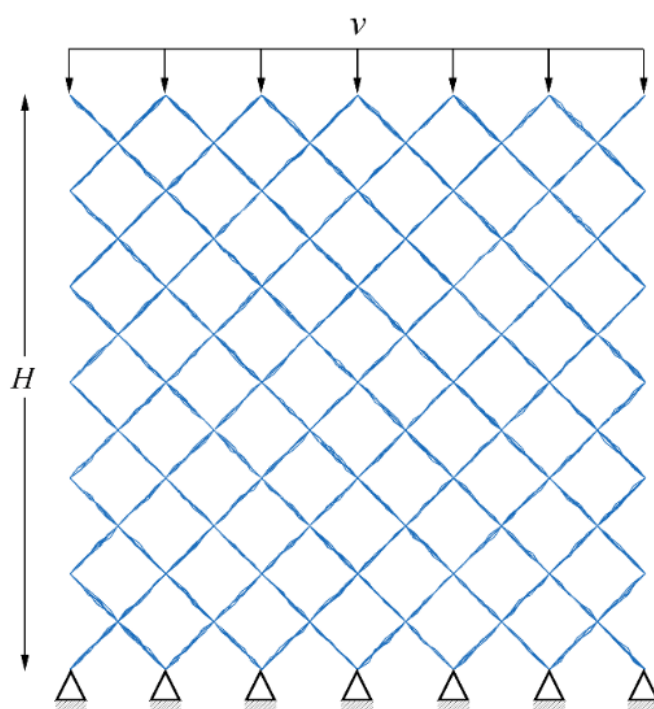
به منظور ایجاد مدل اجزا محدود اشاره شده، یک برنامه به زبان پایتون بعنوان ورودی نرم افزار اجزا محدود آباکوس توسعه داده می‌شود. این برنامه مختصات رئوس سلول واحد متناظر با ماده مشبک مورد بررسی، نحوه اتصال آن‌ها به یکدیگر، تعداد سلول واحد در جهات x ، y و z ، تعداد تقسیمات پیوندها و مشخصات هندسی را دریافت کرده و مدل بر پایه تیر تیموشنکو متناظر با آن را تولید می‌کند. در این مقاله ساختار مشبکی با تکرار ۳ سلول واحد در هر سه راستای دستگاه مختصات کارتزین برای ارزیابی خواص مکانیکی در نظر گرفته شده‌است.

۲-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

برای آن که بتوان شرایط مرزی متناظر با بارگذاری فشاری را اعمال نمود، لازم است که سطوح پایین و بالای نمونه مورد ارزیابی به صورت مسطح باشند. از این رو در فرآیند ایجاد آسیب در مدل اجزا محدود، فرض می‌شود که نقاطی که بر روی سطوح بالایی و پایینی نمونه قرار دارند هیچ گونه جابجایی را تجربه نکنند. در پژوهش حاضر، همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده‌است، سطح پایینی ماده مشبک بطور کامل گیردار در نظر گرفته می‌شود. برای اعمال بارگذاری دینامیکی، سطح بالایی نمونه با سرعت ثابت v به سمت پایین حرکت داده می‌شود تا بارگذاری فشاری مورد نیاز فراهم گردد. در این حالت اگر $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش مورد نظر، H ارتفاع کلی نمونه، Δ حداکثر فشردگی مد نظر و t زمان لازم برای انجام آزمایش باشد آنگاه [۶]:

$$v = \dot{\epsilon}H \quad (6)$$

$$t = \frac{\Delta}{v} \quad (7)$$



شکل ۴: نحوه اعمال بارگذاری و شرایط مرزی در مدل اجزا محدود

۲-۴- معادلات ساختاری

از آنجا که هدف بررسی رفتار وابسته به نرخ کرنش سازه مشبک است لازم است که اثرات نرخ کرنش در معادلات ساختاری ماده سازنده در نظر گرفته شود. برای این منظور، در مقاله حاضر، از مدل جانسون-کوک^{۱۰} استفاده می‌شود [۲۵]. معادله کارسختی جانسون-کوک بصورت حالت خاصی از کارسختی ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود، که در آن تنش تسلیم استاتیک، σ_0 ، عبارت است از:

$$\sigma_0 = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n](1 - \tilde{T}^m) \quad (۸)$$

در این رابطه $\bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل و A ، B ، m و n ثوابت مادی هستند که در دمای کمتر از دمای انتقال، T_{tr} ، اندازه‌گیری می‌شوند. دمای انتقال دمایی است که با رسیدن به آن دما، وابستگی رفتار مادی به دما آغاز می‌شود و در دماهای کمتر از آن، وابستگی قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد. همچنین \tilde{T} عبارت است از:

$$\tilde{T} = \begin{cases} 0 & T < T_{tr} \\ (T - T_{tr}) / (T_m - T_{tr}) & T_{tr} \leq T < T_m \\ 1 & T > T_m \end{cases} \quad (۹)$$

که در آن T دمای فعلی و T_m دمای ذوب ماده است. به منظور وارد کردن اثرات نرخ کرنش، فرض می‌شود که تنش تسلیم، $\bar{\sigma}$ ، با استفاده از رابطه ۱۰ با نرخ کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\epsilon}^{pl}$ ، مرتبط شود. در این رابطه $\dot{\epsilon}_0$ و C دو ثابت مادی هستند که در دمای کمتر از T_{tr} اندازه‌گیری می‌شوند.

$$\bar{\sigma} = \sigma_0(1 + C \ln(\dot{\epsilon}^{pl} / \dot{\epsilon}_0)) \quad (۱۰)$$

برای در نظر گرفتن پدیده شکست در مدل جانسون-کوک، فرض می‌شود که شکست زمانی محقق می‌شود که پارامتر آسیب، ω ، که توسط رابطه ۱۱ تعریف می‌شود، به مقدار ۱ برسد.

$$\omega = \sum \Delta \bar{\epsilon}^{pl} / \bar{\epsilon}_f^{pl} \quad (۱۱)$$

که در آن $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ یک گام از کرنش پلاستیک و $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ کرنش پلاستیک شکست است، که توسط رابطه ۱۲ بیان می‌گردد. دقت شود که در این رابطه عملیات جمع روی کلیه گام‌های حل انجام می‌پذیرد. در این رابطه p/q نسبت فشار به تنش انحرافی، d_1 تا d_5 ثوابت مادی مربوط به شکست در دمای کمتر از T_{tr} و $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مبنا است.

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 e^{\frac{d_3 p}{q}}][1 + d_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0})](1 + d_5 \tilde{T}) \quad (۱۲)$$

قانون گسترش آسیب مبین نرخ کاهش سختی ماده مورد نظر پس از شروع آسیب است. برای مدلسازی این رفتار، در هر لحظه از آنالیز، تانسور تنش ماده با استفاده از معادله اسکالر آسیب و با استفاده از رابطه ۱۳ بیان می‌گردد، که در آن $\bar{\sigma}$ مبین تانسور تنش موثر (بدون آسیب) است که در هر گام از حل محاسبه می‌شود، λ متغیر اسکار آسیب و σ تانسور تنش نهایی است که آسیب را نیز شامل می‌شود. در این حالت هنگامی که پارامتر آسیب به مقدار $\lambda = 1$ برسد ماده توانایی تحمل بار را از دست خواهد داد.

$$\sigma = (1 - \lambda)\bar{\sigma} \quad (۱۳)$$

¹⁰ Johnson-Cook

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی شامل منحنی تنش-کرنش و مدول الاستیک یک ساختار مشبک RD که از جنس آلیاژ Ti6Al4V ساخته شده‌است مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. برای این منظور سازه مشبکی متشکل از ۳ سلول واحد در هر یک از جهات X، Y و Z در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس و با استفاده از المان تیر تیموشنکو ایجاد می‌گردد. در این حالت طول سلول واحد $L = 5\text{mm}$ در نظر گرفته می‌شود. هر پیوند از این ساختار به ۵ قسمت در امتداد آن تقسیم‌بندی می‌گردد ($N = 5$). جدول ۱ پارامترهای مادی مربوط به ماده سازنده این ساختار، که برای مقاصد شبیه‌سازی مورد نیاز هستند، را نمایش می‌دهد [۶].

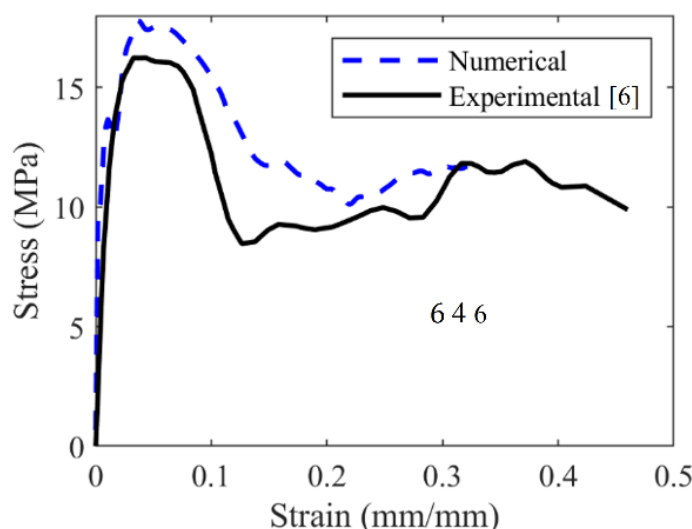
جدول ۱: پارامترهای مادی آلیاژ Ti6Al4V برای استفاده جهت مقاصد شبیه‌سازی [۶]

پارامتر	مقدار
Elastic Modulus (MPa)	113800
Poisson Ratio	0.34
Density (Kg/m^3)	4430
A (MPa)	1030
B (MPa)	952
C	0.01
m	0.8
n	0.4
T_{tr}	298
T_m	1878
d_1	-0.2
d_2	0.25
d_3	0.2
d_4	0.014
d_5	3.87

در این مقاله دو نرخ کرنش ۵۰۰ و ۱۰۰۰ بر ثانیه، که به ترتیب معادل سرعت فشرده شدن سازه به میزان ۱۵۰۰۰ و ۷۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه هستند، جهت مقاصد مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور بررسی حساسیت به مش، با شروع از مقدار ۰/۴ میلی‌متر، اندازه مش با ضریب ۰/۵ کاهش داده می‌شود تا جایی که اختلاف در نتایج بدست آمده در دو گام متوالی به کمتر از ۱۰ درصد کاهش یابد. با استفاده از این روش اندازه مش به میزان ۰/۱ میلی‌متر به دست آمده و برای کلیه تحلیل‌های این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد. نکته دیگری که لازم است مورد توجه قرار گیرد آن است که به دلیل ماهیت تصادفی مدل ایجاد شده، نتایج به دست آمده در هر اجرا می‌تواند با اجرای دیگر متفاوت باشد. از این رو به منظور کاهش وابستگی نتایج به پارامترهای تصادفی مدل، به ازای هر دسته از پارامترهای مدل حاضر، ۲۰ اجرا انجام شده و منحنی تنش-کرنش متوسط به عنوان نتیجه نهایی گزارش می‌گردد.

۳-۱- صحت‌سنجی مدل

در این بخش مدل ایجاد شده جهت بررسی پاسخ دینامیکی سازه مشبک RD با استفاده از نتایج تجربی ارائه شده توسط ژائو و همکارانش [۶] صحت‌سنجی می‌گردد. برای ساختار مشبک مذکور قطر طراحی شده برابر با ۰/۵۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. با این حال، با استفاده از تصاویر میکروسکوپی، مقدار قطر متوسط پیوندها تقریباً ۰/۶ میلی‌متر بدست می‌آید. برای مقاصد مدل‌سازی و با استفاده از تصاویر میکروسکوپی $\delta = 0.1D_m$ و $D_v = 0.3D_m$ در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۵ منحنی تنش-کرنش تجربی و عددی ساختار مشبک مورد نظر را در نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 1000 (1/s)$ به تصویر می‌کشد. همانگونه که دیده می‌شود مدل توسعه داده شده به خوبی رفتار سازه مشبک RD را تحت بارگذاری دینامی پیش‌بینی می‌کند. در این حالت تنش فروپاشی ساختار مشبک با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی و تحلیل‌های عددی به ترتیب ۱۶/۲۴ و ۱۷/۷۹ مگاپاسکال می‌باشد که مبین اختلافی به میزان ۹/۵۶ درصد است.



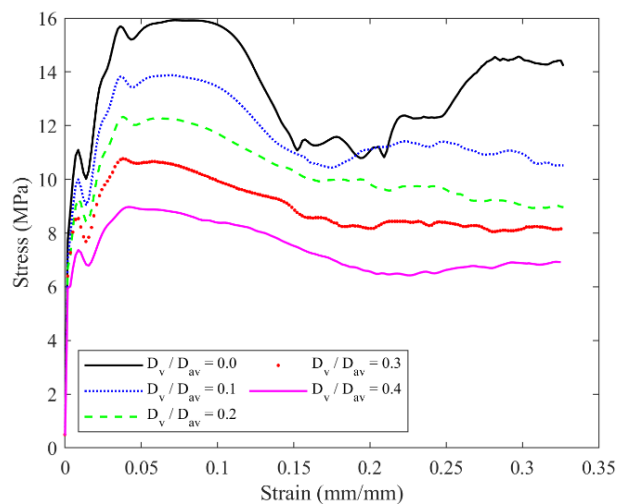
شکل ۵: مقایسه منحنی تنش-کرنش به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با منحنی تجربی ارائه شده توسط ژیانو و همکارانش [۶] در نرخ کرنش ۱۰۰۰ بر ثانیه

۳-۲- بررسی تاثیر تغییرات قطر بر پاسخ مکانیکی

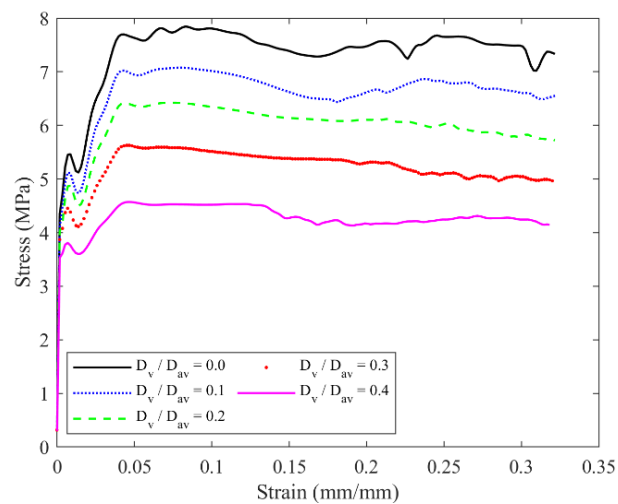
منحنی تنش-کرنش ساختار مشبک RD برای مقادیر مختلف نسبت D_v / D_{av} در نرخ کرنش ۱۰۰۰ و ۵۰۰ بر ثانیه به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده‌است. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش مقدار تغییرات قطر پیوند، سطح تنش در منحنی تنش-کرنش کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده تمرکز تنش در محل تغییرات قطر و کمانش موضعی پیوندها است که سبب می‌شود تحمل بار سازه تا حد زیادی کاهش یابد. از سوی دیگر می‌توان دید که با افزایش مقدار تغییرات قطر پیوند، نوسانات منحنی تنش-کرنش در ناحیه غیرخطی کاهش می‌یابد. در این حالت نوسانات این منحنی برای سازه بدون عیب به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سازه‌های دارای عیب قطر متغیر است. دلیل این امر وجود نواحی متعددی از پیوندهاست که تغییرشکل‌های پلاستیک را تجربه کرده و با ایجاد میرایی، از نوسان سطح تنش جلوگیری می‌کنند.

نگاهی به منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که میزان کرنش نرمی نیز با افزایش میزان عیب قطر متغیر در ساختار مشبک افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که شدت این کرنش نرمی با افزایش قطر متوسط پیوندهای ساختار مشبک افزایش می‌یابد. همان‌گونه که پیش‌تر نیز عنوان شد، مکانیزم اصلی تغییرشکل ساختار مشبک RD از نوع خمش پیوندهاست. از این رو، هنگامی که قطر متوسط ساختار مشبک افزایش می‌یابد، سهمی از تارهای پیوندهای ساختار مشبک که وارد ناحیه پلاستیک شده و به دنبال آن دچار فروپاشی می‌شوند افزایش یافته و سبب می‌شوند که مقدار تنش قابل تحمل توسط سازه با سرعت بیشتری کاهش یابد.

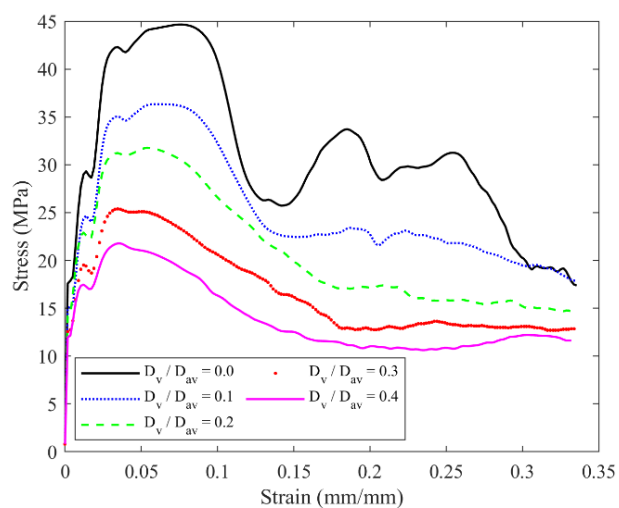
مقایسه بین منحنی تنش-کرنش به دست آمده در نرخ کرنش‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ بر ثانیه مبین آنست که نرخ کرنش تاثیر چندانی بر رفتار مکانیکی سازه مشبک RD ندارد. به طوری که مقدار تنش فروپاشی در نرخ کرنش‌های ارزیابی شده تقریباً مقدار واحدی خواهد داشت. این مشاهده پیش‌تر نیز توسط ژیانو و همکارانش طی بررسی‌های تجربی و عددی گزارش شده‌است [۶].



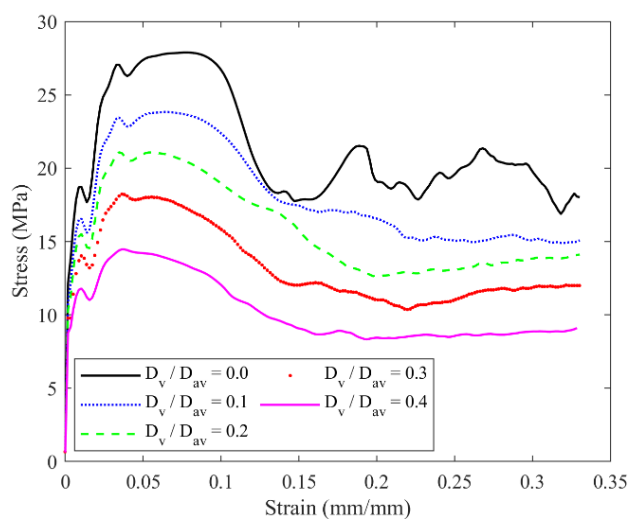
(ب)



(الف)



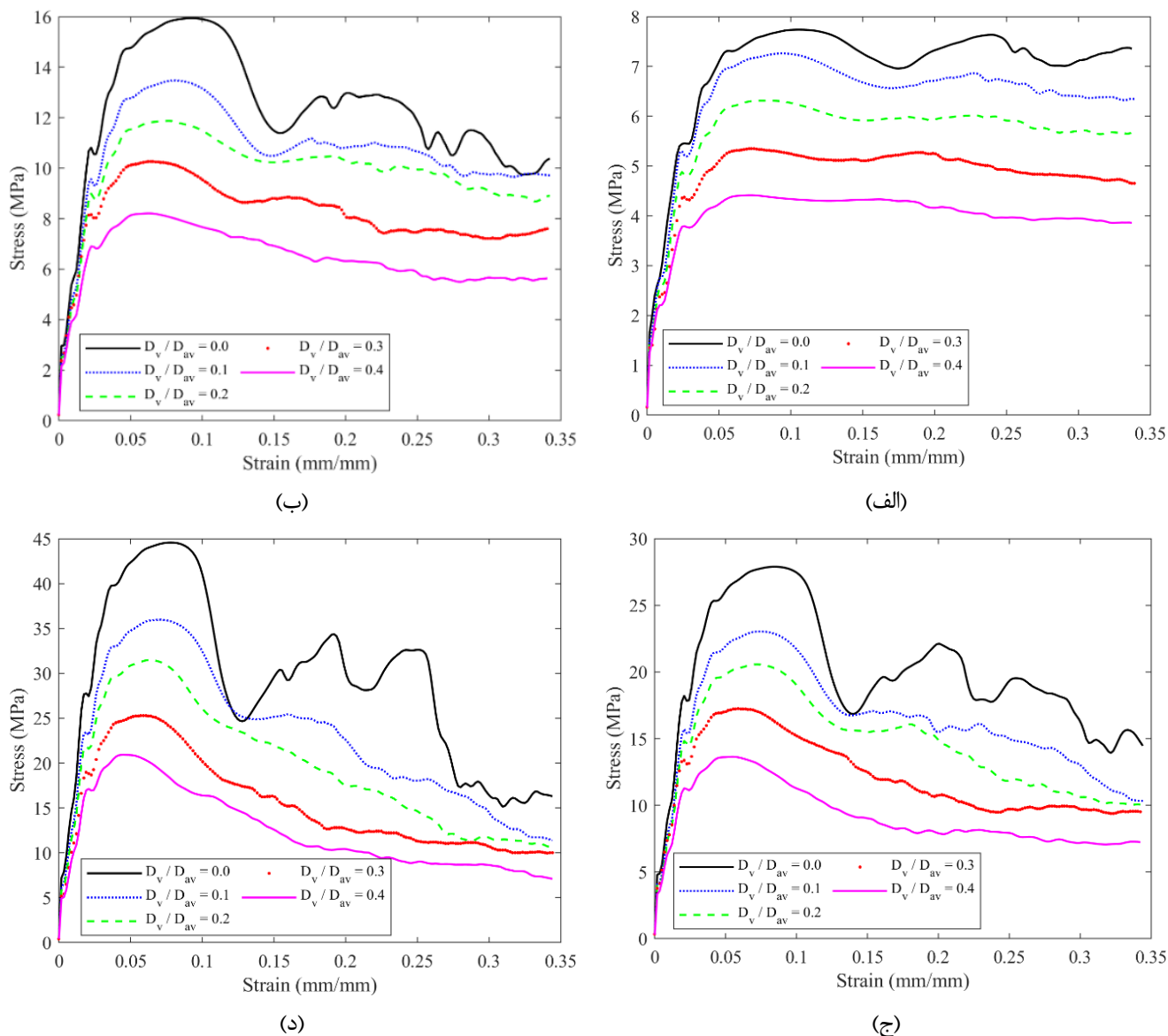
(د)



(ج)

شکل ۶: تاثیر عیب قطر متغیر پیوند بر منحنی تنش-کرنش ساختار مشبک RD در نرخ کرنش ۱۰۰۰ بر ثانیه برای الف) $D_{av} = 0.4mm$ ، ب)

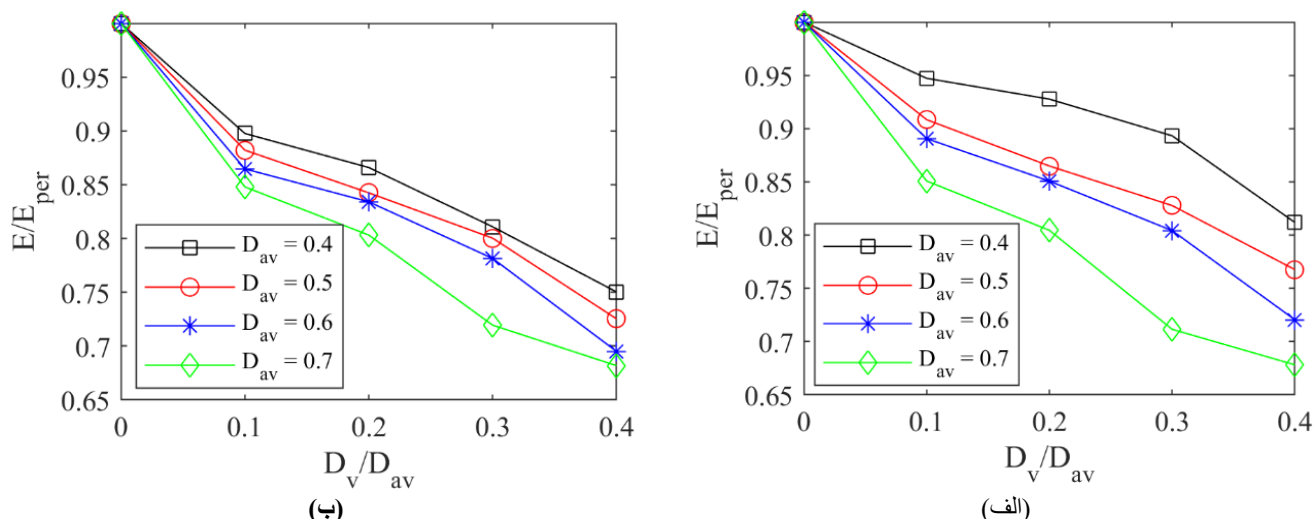
ج) $D_{av} = 0.5mm$ ، د) $D_{av} = 0.6mm$ و ه) $D_{av} = 0.7mm$



شکل ۷: تاثیر عیب قطر متغیر پیوند بر منحنی تنش-کرنش ساختار مشبک RD در نرخ کرنش ۵۰۰ بر ثانیه برای الف) $D_{av} = 0.4mm$ ، ب)

$$D_{av} = 0.7mm \text{ (د) و } D_{av} = 0.6mm \text{ (ج) ، } D_{av} = 0.5mm$$

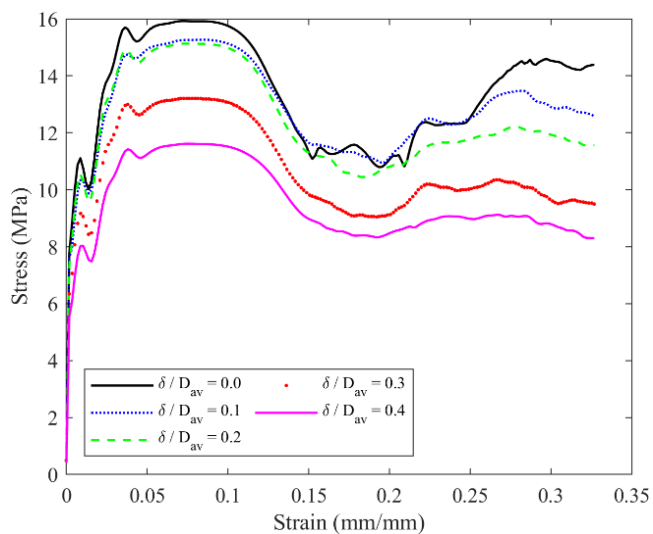
منحنی مدول الاستیک بدون بعد، E/E_{per} ، ساختار مشبک مورد بررسی بر حسب تغییرات قطر در نرخ کرنش‌های ۱۰۰۰ و ۵۰۰ بر ثانیه به ترتیب در شکل ۸ (الف) و (ب) به تصویر کشیده شده‌است. در این منحنی‌ها E_{per} مدول الاستیک ساختار بدون عیب است. همانگونه که دیده می‌شود با افزایش میزان عیب در ساختار مشبک، مقدار مدول الاستیک تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان دید که تاثیر تغییرات قطر بر مدول الاستیک با افزایش مقدار قطر متوسط پیوند افزایش می‌یابد. هنگامی که قطر پیوند افزایش می‌یابد، مقدار تنش در سطوح خارجی آن نیز افزایش یافته و سبب می‌گردد که مقدار تنش در محل تغییر قطر، به واسطه تمرکز تنش، افزایش قابل ملاحظه‌ای را تجربه نماید که منجر به کاهش سطح تنش و به دنبال آن کاهش مدول الاستیک شود.



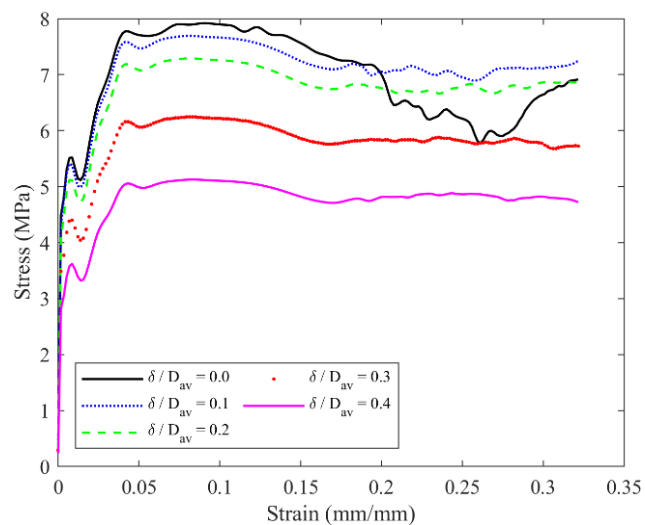
شکل ۸: منحنی مدول الاستیک بدون بعد بر حسب تغییرات قطر ساختار مشبک RD در نرخ کرنش الف) ۱۰۰۰ بر ثانیه، ب) ۵۰۰ بر ثانیه

۳-۳- بررسی تاثیر اعوجاج پیوند بر پاسخ مکانیکی

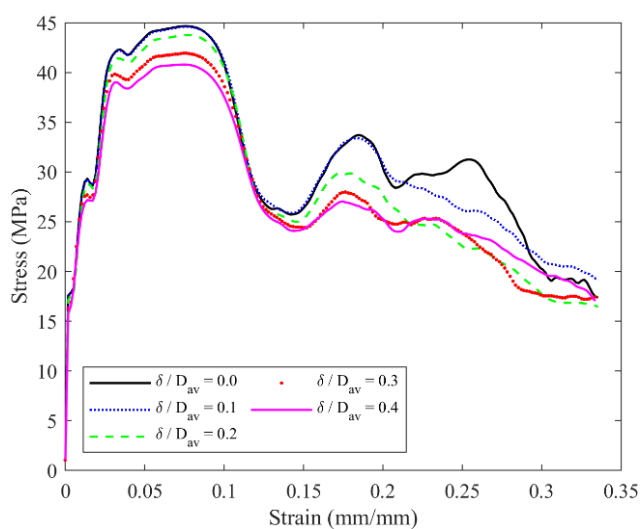
شکل های ۹ و ۱۰ به ترتیب تاثیر عیب ریزساختاری اعوجاج پیوندهای ساختار مشبک RD بر منحنی تنش-کرنش آن در نرخ کرنش های ۱۰۰۰ و ۵۰۰ بر ثانیه را نمایش می دهند. همانگونه که مشاهده می گردد، با افزایش میزان عیب اعوجاج پیوند، سطح تنش در منحنی تنش-کرنش کاهش می یابد. دلیل این امر تمرکز تنش در محل وجود اعوجاج است که سبب می شود تحمل بار سازه مورد نظر کاهش یابد. با مراجعه به منحنی تنش-کرنش این ساختار مشبک می توان دریافت که افزایش یا کاهش این عیب ریزساختاری تاثیر معناداری بر نوسانات منحنی تنش-کرنش نخواهد داشت. با این وجود افزایش مقدار قطر متوسط پیوند سبب افزایش میزان نوسانات منحنی تنش-کرنش در ناحیه غیرخطی می گردد. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود آنست که تاثیر نرخ کرنش بر پاسخ مکانیکی ساختار مشبک مورد مطالعه با افزایش میزان عیب افزایش می یابد. در این حالت با افزایش مقدار نرخ کرنش مقدار سطح تنش نیز افزایش می یابد.



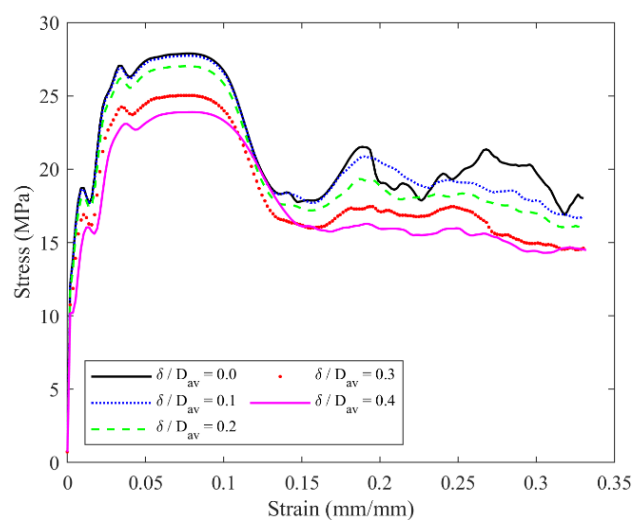
(ب)



(الف)



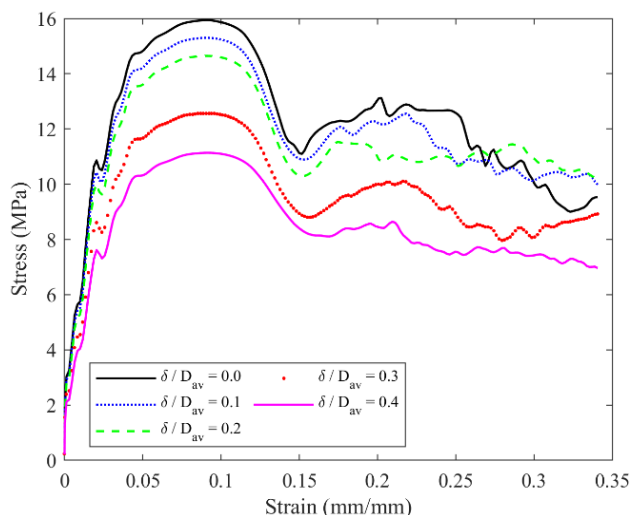
(د)



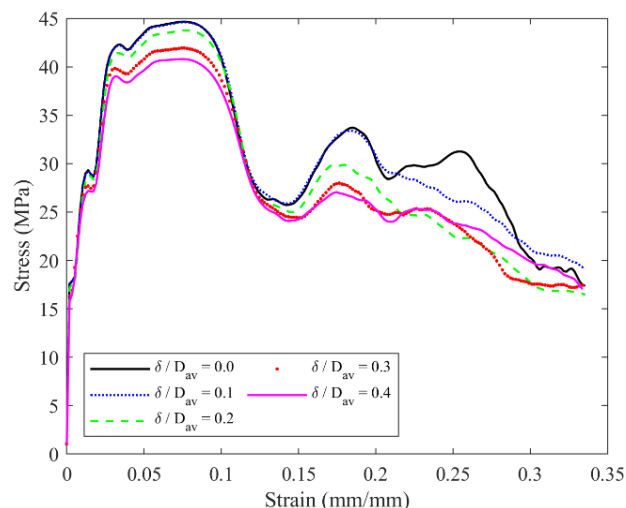
(ج)

شکل ۹: تاثیر عیب اعوجاج پیوند بر منحنی تنش-کرنش ساختار مشبک RD در نرخ کرنش ۱۰۰۰ بر ثانیه برای الف) $D_{av} = 0.4mm$ ، ب) $D_{av} = 0.5mm$ ،

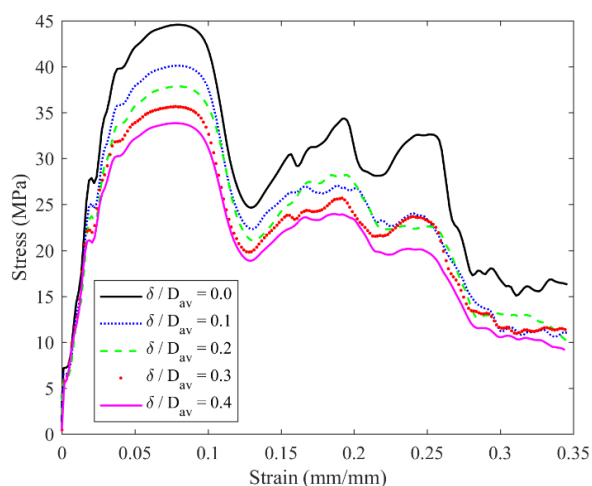
ج) $D_{av} = 0.6mm$ و د) $D_{av} = 0.7mm$



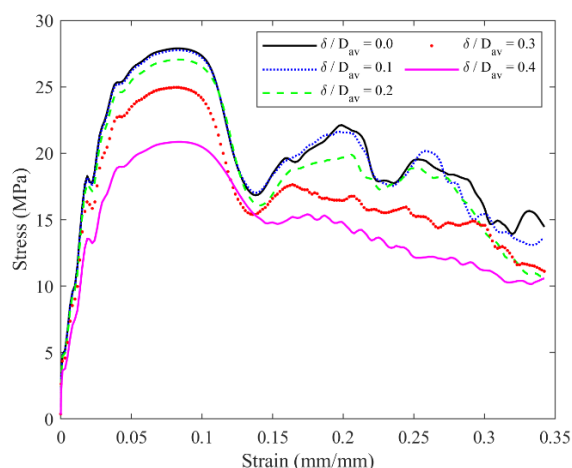
(ب)



(الف)



(د)

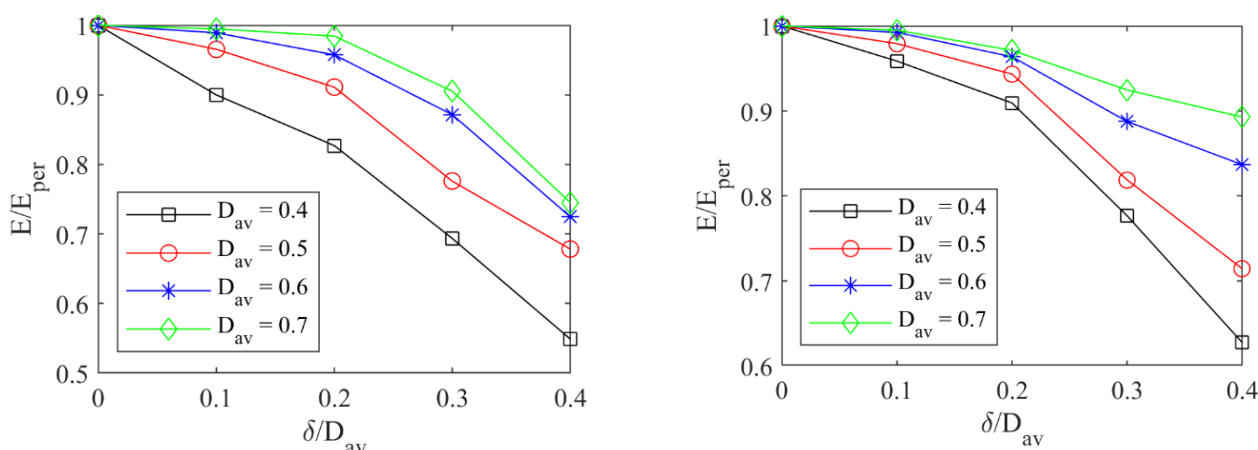


(ج)

شکل ۱۰: تاثیر عیب اعوجاج پیوند بر منحنی تنش-کرنش ساختار مشبک RD در نرخ کرنش ۵۰۰ بر ثانیه برای الف) $D_{av} = 0.4mm$ ، ب) $D_{av} = 0.5mm$ ،

ج) $D_{av} = 0.6mm$ و د) $D_{av} = 0.7mm$

تأثیرات عیب اعوجاج پیوند بر مدول الاستیک بدون بعد ساختار مشبک RD در نرخ کرنش‌های ۱۰۰۰ و ۵۰۰ بر ثانیه به ترتیب در شکل ۱۱ (الف) و (ب) به تصویر کشیده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد با افزایش مقدار اعوجاج پیوند، مدول الاستیک تقریباً تابعیت درجه دو کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان دید که تأثیرات اعوجاج پیوند بر مدول الاستیک در قطر متوسط کمتر، بیشتر است. دلیل این امر آنست که در مقادیر کمتر قطر متوسط، اعوجاج پیوند بیشتر مشهود بوده و سبب می‌گردد که تمرکز تنش در محل این تغییرات بیشتر خود را نشان دهد. بنابراین سطح تنش در داخل ساختار به ازای یک بار مشخص بیشتر بوده و سبب می‌شود که کرنش‌ها و جابجایی‌های محلی در داخل سازه ایجاد گردد که خود منجر به کاهش مدول الاستیک خواهد شد.



شکل ۱۱: منحنی مدول الاستیک بدون بعد بر حسب تغییرات اعوجاج پیوند ساختار مشبک RD در نرخ کرنش الف) ۱۰۰۰ بر ثانیه، ب) ۵۰۰ بر ثانیه

مقایسه نتایج به دست آمده در بخش قبل حاکی از آن است که با افزایش مقدار قطر متوسط پیوندهای ساختار مشبک تاثیر عیب ریزساختاری قطر متغیر پیوندها افزایش یافته و تاثیر عیب اعوجاج پیوند کاهش می‌یابد. همچنین در فرآیند تولید افزایشی ساختارهای مشبک، با افزایش مقدار قطر متوسط پیوندها، مقدار عیوب ریزساختاری نیز کاهش یافته و اثرات آن نیز در مقایسه با پاسخ کلی آن ساختار ناچیز خواهد بود [۵]. هرچند که در مدل حاضر عیوب ریزساختاری برای تمامی مقادیر قطر متوسط به صورت درصدی ثابت از قطر پیوند اعمال شده است، اما در عمل، افزایش قطر متوسط پیوندها می‌تواند به تغییرات ناچیزی در قطر منجر شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اثرات عیوب ریزساختاری قطر متغیر و اعوجاج پیوندها بر روی پاسخ مکانیکی ساختار مشبک در بارگذاری دینامیکی تنها در مقادیر اندک قطر متوسط حائز اهمیت است. اینکه تا چه قطری نیازی به اعمال اثرات این عیوب وجود ندارد بسته به روش تولید افزایشی مورد استفاده و پارامترهای ساخت می‌تواند متفاوت باشد و لازم است که ملزومات آن برای هر روش به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گیرند.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از تکنولوژی تولید افزایشی برای ساخت ساختارهای مشبک فلزی همواره به ایجاد برخی عیوب ریزساختاری، مانند قطر متغیر پیوندها، اعوجاج پیوند، تخلخل، تمرکز ماده در نزدیکی رئوس و انحراف از سطح مقطع طراحی شده، منجر می‌گردد که می‌تواند به شدت بر خواص مکانیکی آن اثرگذار باشند. مقاله حاضر به بررسی تاثیر دو عیب قطر متغیر و اعوجاج پیوند بر پاسخ مکانیکی ساختار مشبک دوازده سطحی متقارن می‌پردازد. برای این منظور، با در نظر گرفتن عیوب ریزساختاری، یک مدل اجزا محدود بر پایه المان تیر تیموشنکو سه‌بعدی توسعه داده می‌شود. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهند که:

- ۱) وجود هر دو نوع عیب ریزساختاری، سطح تنش در منحنی تنش-کرنش را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.
- ۲) افزایش عیب قطر متغیر به کاهش نوسانات منحنی تنش-کرنش در ناحیه غیرخطی منجر می‌شود در حالی که عیب اعوجاج پیوند تاثیر چندانی بر این پدیده ندارد.
- ۳) بررسی‌های انجام شده بر روی مدول الاستیک حاکی از آن است که افزایش تغییرات قطر در امتداد هر پیوند باعث می‌شود که مدول الاستیک تقریباً به صورت خطی کاهش یابد، این در حالی است که افزایش اعوجاج پیوند مدول الاستیک را با رابطه تقریباً درجه دو کاهش می‌دهد.
- ۴) با افزایش قطر متوسط پیوند، تاثیر عیب قطر متغیر افزایش می‌یابد در حالی که اثرات اعوجاج پیوند در قطر متوسط کمتر، بیشتر خواهد بود.

مراجع

- [1] Gibson LJ, Ashby MF (1999) Cellular Solids: Structure and Properties, Cambridge University Press.
- [2] Kolagar AM (2022) Additive Manufacturing of Nickel-Based Superalloy Gas Turbine Components. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 9(3): 38-45.
- [3] Bagheri-Bami A, Honarvar F (2022) Determination of the type of anisotropy and stiffness tensor in additive manufacturing polymer components by using ultrasonic waves. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 9(6): 36-48.
- [4] Gibson I, Rosen D, Stucker B (2014) Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York, Springer.
- [5] Echeta I, Feng X, Dutton B, Leach R, Piano S (2020) Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106(9): 2649-2668.
- [6] Xiao L, Song W, Wang C, Tang H, Fan Q, Liu N., Wang J (2017) Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron titanium alloy lattice structure manufactured using electron beam melting under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering* 100: 75-89.
- [7] Carraturo M, Alaimo G, Marconi S, Negrello E, Sgambitterra E, Maletta C, Auricchio F (2021) Experimental and Numerical Evaluation of Mechanical Properties of 3D-Printed Stainless Steel 316L Lattice Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance* 30(7): 5247-5251.
- [8] Amani Y, Dancette S, Delroisse P, Simar A, Maire E (2018) Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Acta Materialia* 159: 395-407.
- [9] Campoli G, Borleffs MS, Yavari SA, Wauthle R, Weinans H, Zadpoor AA, Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing, *Materials & Design* 49: 957-965.
- [10] Karamooz-Ravari MR, Kadkhodaei M, Badrossamay M, Rezaei R (2014) Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Mechanical Sciences* 88: 154-161.
- [11] Karamooz-Ravari MR, Esfahani SN, Andani MT, Kadkhodaei M, Ghaei A, Karaca H, Elahinia M (2016) On the effects of geometry, defects, and material asymmetry on the mechanical response of shape memory alloy cellular lattice structures. *Smart Materials and Structures* 25(2) 025008.
- [12] Karamooz-Ravari MR, Kadkhodaei M (2014) A Computationally Efficient Modeling Approach for Predicting Mechanical Behavior of Cellular Lattice Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance* 24(1): 245-252.
- [13] Liu L, Kamm P, García-Moreno F, Banhart J, Pasini D (2017) Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: the role of geometric defects induced by Selective Laser Melting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 107: 160-184.
- [14] Goodall R, Hernandez-Nava E, Jenkins SN, Sinclair L, Tyrwhitt-Jones E, Khodadadi MA, Ghadbeigi H (2019) The effects of defects and damage in the mechanical behavior of Ti6Al4V lattices. *Frontiers in Materials* 6: 117.
- [15] Lozanovski B, Leary M, Tran P, Shidid D, Qian M, Choong P, Brandt M (2019) Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures. *Materials & Design* 171:107671.
- [16] Lozanovski B, Downing D, Tran P, Shidid D, Qian M, Choong P, Brandt M, Leary M, A Monte Carlo simulation-based approach to realistic modelling of additively manufactured lattice structures. *Additive Manufacturing* 32:101092.
- [17] Alana M, Cutolo A, Probst G, de Galarreta SR, Van Hooreweder B (2020) Understanding elastic anisotropy in diamond based lattice structures produced by laser powder bed fusion: Effect of manufacturing deviations. *Materials & Design* 195: 108971.
- [18] Cao X, Jiang Y, Zhao T, Wang P, Wang Y, Chen Z, Li Y, Xiao D, Fang D (2020) Compression experiment and numerical evaluation on mechanical responses of the lattice structures with stochastic geometric defects originated from additive-manufacturing. *Composites Part B: Engineering* 194:108030.
- [19] Jiang P, Rifat M, Basu S (2020) Impact of Surface Roughness and Porosity on Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing-A Computational Study, *Procedia Manufacturing* 48: 781-789.
- [20] Radlof W, Benz C, Sander M (2021) Numerical and experimental investigations of additively manufactured lattice structures under quasi-static compression loading. *Material Design & Processing Communications* 3(3): e164.
- [21] Raghavendra S, Molinari A, Fontanari V, Dallago M, Luchin V, Zappini G, Benedetti M (2020) Effect of strut cross section and strut defect on tensile properties of cubic cellular structure. *Material Design & Processing Communications* 2(5): e118.

- [22] Maconachie T, Leary M, Lozanovski B, Zhang X, Qian M, Faruque O, Brandt M, SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design* 183: 108137.
- [23] Zhou J, Shrotriya P, Soboyejo WO (2004) On the deformation of aluminum lattice block structures: from struts to structures. *Mechanics of materials* 36(8): 723-737.
- [24] de Galarreta SR, Jeffers JR, Ghose S (2020) A validated finite element analysis procedure for porous structures. *Materials & Design* 189:108546.
- [25] Johnson GR, Cook WH (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering fracture mechanics* 21(1): 31-48.