

تعیین بسامد و مدهای ارتعاشی ورق‌های V شکل دارای خوردگی

پارسا ساکتی^۱، فرزاد شهابیان^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱، shahabf@um.ac.ir

چکیده

ورق‌های V شکل فولادی به دلیل وزن کم و مقاومت بالا در ساخت انواع سازه‌ها از جمله سقف و دیواره ساختمان‌ها، سوله‌ها، کشتی‌ها، تیرورق‌ها، آشیانه‌های هواپیما و خودروهای نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی رفتار ارتعاش آزاد این ورق‌ها در شناخت عملکرد واقعی سازه‌ها حائز اهمیت است. قرارگرفتن سازه‌ها در شرایط جوی نامناسب می‌تواند باعث بروز پدیده خوردگی شود. اثر خوردگی بر روی ویژگی‌های هندسی و مکانیکی سازه‌های فولادی می‌تواند منجر به وقوع آسیب‌های جدی از جمله تخریب بخشی از سازه و یا فروپاشی آن در گذر زمان شود. این پدیده، اهمیت بررسی و تحلیل سازه‌های دارای خوردگی را آشکار می‌سازد. به همین منظور در این پژوهش، بسامد و شکل مدهای مختلف ورق‌های V شکل دارای خوردگی یکنواخت، نواری و یا موضعی دارای شرایط مرزی گوناگون از جمله آزاد، مفصلی و گیردار با شدت‌های خوردگی ۲/۹۰، ۸/۹۰ و ۱۵/۷۰ درصد، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خوردگی به طور معمول موجب کاهش مقدار بسامد و تغییر در شکل مدهای ورق می‌شود. به عنوان مثال، برای ورقی به طول ۲ متر، عرض ۱ متر، ضخامت ۲۰ میلی‌متر، زاویه داخلی ۴۵ درجه و شرایط مرزی مفصلی، بسامد برای شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ به ترتیب ۹۰/۰۴، ۸۴/۷۶ و ۷۷/۴۵ (هرتز) شده است.

واژگان کلیدی

ورق V شکل، بسامد، مدهای ارتعاشی، خوردگی یکنواخت، خوردگی نواری، خوردگی موضعی

Determination of Frequency and Vibration Modes of Corroded V-Shaped Plates

P. Saketi, F. Shahabian

Abstract

V-shaped steel plates are utilized in the construction of various structures, including roofs and walls of buildings, warehouses, ships, beams and girders, airplane hangars, and military vehicles, due to their lightweight and high strength. Studying the free vibration behavior of these plates is significant for understanding the true performance of structures. Exposure to unfavorable weather conditions can lead to corrosion phenomena. The impact of corrosion on the geometric and mechanical properties of steel structures can result in severe damages, including partial destruction of the structure or its collapse over time. This phenomenon highlights the importance of examining and analyzing corroded structures. For this purpose, this research analyzes the frequencies and modes of various V-shaped plates with uniform, strip, or localized corrosion under different boundary conditions, including free, hinged, and fixed conditions, with corrosion intensities of 2.90%, 8.90%, and 15.70%, respectively. The finite element software Abaqus has been used for modeling and data analysis. The results indicate that corrosion typically leads to a reduction in frequency values and changes in the modes of the plates. For example, for a plate with a length of 2 meters, a width of 1 meter, a thickness of 20 millimeters, an internal angle of 45 degrees, and four-sided hinged boundary conditions, the frequencies for corrosion intensities of 2.90%, 8.90%, and 15.70% are 90.04, 84.76 and 77.45 (Hz), respectively.

Keywords

V-Shaped Plate, Frequency, Vibration Modes, Uniform Corrosion, Strip Corrosion, Localized Corrosion

ورق‌ها به دلیل بعضی از ویژگی‌های خود مانند وزن کم، شکل‌پذیری مناسب، مقاومت زیاد و جذب انرژی بالا در ساخت بسیاری از سازه‌ها از جمله تیورق‌ها، مخزن‌ها و منبع‌ها، خودروسازی، صنایع کشتی‌سازی و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از سوی دیگر خوردگی که پدیده بسیار شایع در فلزها می‌باشد، باعث تغییر ویژگی‌های مکانیکی و هندسی ماده می‌گردد که در گذر زمان باعث تغییر بسامد و مودهای ارتعاشی سازه می‌شود. بسامد در حقیقت به معنی تعداد رخ‌داد یک رویداد در زمان مشخص است که جزو خواص طبیعی هر سازه است. سازه مد نظر در آن به‌طور طبیعی با و یا بدون اعمال بار، ارتعاش می‌کند. سازه‌ها با توجه به عوامل مختلفی از جمله شرایط مرزی، مشخصات هندسی و مکانیکی می‌توانند بسامدهای مختلفی داشته باشند. در مجموع با توجه به نکته‌های زیر می‌توان بسامد و پاسخ سازه را کنترل کرد: الف- به کمک بسامد می‌توان حداکثر جابه‌جایی و نیروی اعمالی بر سیستم را برای طراحی به دست آورد. ب- به منظور کاهش بسامد می‌توان سختی سازه را کاهش و جرم آن را افزایش داد. پ- به کمک کاهش دامنه‌های اجباری می‌توان پاسخ سازه را در بسامد تشدید کم کرد.

در زمینه تعیین بسامد ورق‌ها پژوهش‌های گوناگونی انجام شده است. لیس^۱ در پژوهش خود با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش ریتز^۲، ارتعاش آزاد^۳ ورق‌های مستطیلی را مورد تحلیل و بررسی قرار داد [۱]. او با بررسی ۲۱ حالت مختلف برای ورق مستطیلی نتیجه گرفت که با تغییر در شرایط تکیه‌گاهی، ضریب پواسون و ابعاد ورق و همچنین این که ارتعاش متقارن باشد یا نامتقارن، بسامد ورق‌ها تغییر می‌کند.

یافته‌های پژوهش لیس^۱ [۱] توسط ساتیامورتی^۴ و افساتیادیس^۵ [۲] توسعه یافت و پاسخ بسامدهای طبیعی برای ورق‌های مستطیلی با دلبه ساده و گیردار با ترکیب چندین حالت مختلف در مودهای بالاتر مورد بررسی قرار گرفت. آیری^۶ و همکاران بر روی ارتعاش آزاد ورق‌های صلیبی، I و

ماتریک با لبه‌های گیردار و با استفاده از توابع گرین^۷، سری فوریه^۸ و روش ریتز بررسی‌هایی انجام دادند [۳]. آیری و همکاران با استفاده از روش ریتز، ارتعاش آزاد ورق‌های کنسولی زاویه‌دار را با زاویه‌ها، ضخامت و نسبت ابعادی مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۴]. یوسف و هرسکونیتز^۹ یک روش تقریبی برای تجزیه و تحلیل ورق‌های زاویه‌دار بر اساس نظریه^{۱۰} و لاسوف^{۱۱} ارائه دادند که در آن ورق زاویه‌دار همانند تیر در نظر گرفته شده و تحلیل می‌شود [۵].

دو^{۱۲} و همکاران ارتعاش آزاد دو ورق مستطیلی کوپل را با زاویه‌های گوناگون و شرایط مرزی کشسان مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۶]. ایشان روش خود را که بر اساس راه حل رایلی-ریتز^{۱۳} است روی چندین ورق با زاویه‌های مختلف از جمله ۹۰ درجه آزمایش و بسامد ۱۰ مود اول را با نتایج اجزای محدود مقایسه کردند.

شی^{۱۴} و همکاران ارتعاش آزاد ورق‌های زاویه‌دار با شرایط مرزی مختلف را مورد تحلیل نظری قرار دادند و نتایج حاصل را با روش اجزای محدود و آزمایش، مقایسه کردند [۷].

تراجکوسکی^{۱۵} و همکاران به تحلیل و بررسی درباره رفتار ورق‌های U و V شکل برای تعیین تغییر مکان بیشینه، پژوهشی به کمک نرم‌افزار ال پی-دینا^{۱۶} پرداختند [۸].

پیکانی و همکاران به وسیله نرم‌افزار آباکوس^{۱۷} تقویت ورق V شکل با استفاده از لایه‌هایی از جنس آلومینیوم، فوم سبک‌وزن و چوب بالسا^{۱۸} را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۹]. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد که آلومینیوم باعث کاهش تغییر مکان ورق V شکل می‌شود اما فوم سبک‌وزن و چوب بالسا تأثیر ناچیزی در این مورد دارند.

کونگ^{۱۹} و همکاران پژوهشی در زمینه ویژگی‌های مکانیکی فولاد نرم قبل و بعد از خوردگی انجام دادند [۱۰]. ایشان با آزمایش تسریع فرآیند خوردگی، مشاهده کردند که ویژگی‌های مکانیکی فولاد نظیر: مقاومت تسلیم و نهایی، کرنش نسبی و

⁷ Green's Functions

⁸ Fourier Series

⁹ Hersckonitz

¹⁰ Vlasof

¹¹ Du

¹² Rayleigh Ritz Method

¹³ Xie

¹⁴ Trajkovski

¹⁵ LP-Dyna

¹⁶ Abaqus

¹⁷ Balsa

¹⁸ Kong

¹ Lissa

² Ritz

³ Free Vibration

⁴ Sathyamoorthy

⁵ Efsthadiades

⁶ Irie

(کیلوگرم بر مترمکعب)، (ω) بسامد (رادیان بر ثانیه)، (D) صلیبت خمشی (نیوتن بر متر)، (K) صلیبت کششی (نیوتن بر مترمکعب) و (ν) ضریب پواسون از جمله متغیرهای مورد استفاده هستند. همچنین، محورهای مختصات محلی با x_i, y_i و z_i نشان داده شده است و $(i=1,2)$ می‌باشد. (u) ، (v) و (w) به ترتیب نشان‌دهنده تغییر مکان در امتداد طول، عرض و ضخامت هستند. در ادامه، چند پارامتر مهم به صورت زیر معرفی می‌شوند.

$$\xi_i = \frac{x_i}{L} \quad (5)$$

$$\eta_i = \frac{y_i}{B_i} \quad (6)$$

$$b_i = \frac{B_i}{L} \quad (7)$$

$$h_i = \frac{H}{L} \quad (8)$$

$$\lambda^2 = \frac{\rho h L^2 \omega^2}{D} \quad (9)$$

در رابطه‌های (5) الی (8) (ξ_i) ، (η_i) ، (h_i) و (b_i) مؤلفه‌های بدون بعدی هستند که مربوط به ابعاد ورق می‌باشند. در رابطه (9)، (λ) پارامتر ویژه‌ای است که با استفاده از آن می‌توان بسامد ورق را در ابعاد و ضخامت‌های مختلف به دست آورد.

$$f = \left(\frac{\lambda}{2\pi L} \right) \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (10)$$

در رابطه فوق، (f) بسامد ورق (هرتز) می‌باشد.

۳- راستی آزمایی

در پژوهش حاضر به منظور راستی آزمایی و مدل سازی در نرم افزار آباکوس از مقاله آیری و همکاران [۴] استفاده شده است. ویژگی‌های هندسی و مکانیکی ورق مورد استفاده در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. در جدول (۱) عرض ورق‌ها (B_1) و (B_2) ، ضخامت (H) و طول آن (L) می‌باشد. در جدول (۲) چگالی (ρ) ، ضریب کشسانی (E) و ضریب پواسون فولاد است که در شرایط مرزی ورق V شکل به صورت یک سرگیردار می‌باشد.

جدول ۱- ویژگی‌های هندسی ورق

B_1 (m)	B_2 (m)	H (m)	L (m)
۱	۰/۸۷	۰/۰۳	۱/۸۷

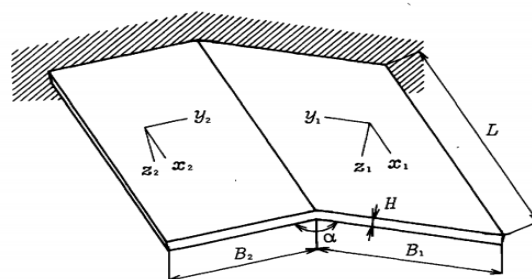
جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی ورق

ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)	ν
۷۸۰۰	$2/05 \times 10^{11}$	۰/۳

ضریب کشسانی در اثر وقوع خوردگی کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر به دلیل اهمیت زیاد تأثیر خوردگی بر ویژگی‌های مکانیکی ماده، اثر خوردگی‌های یکنواخت، نواری و موضعی بر روی بسامد ورق‌های V شکل فولادی با استفاده از نرم افزار آباکوس مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۲- تعیین بسامد ورق‌های V شکل

برای تحلیل ارتعاش آزاد به منظور تعیین بسامد ورق‌های V شکل باید معادله‌های حرکت با استفاده از یکی از روش‌های متعارف از جمله روش انرژی حل شود. در ادامه به کمک روش انرژی و با توجه به پژوهش آیری و همکاران [۴] بسامد یک ورق V شکل دارای شرایط مرزی یک طرف گیردار-سه طرف آزاد که در شکل (۱) نشان داده شده است، به دست می‌آید.



شکل ۱- نمایش مؤلفه‌های اساسی و محورهای مختصات ورق V شکل [۴]

بر پایه روش انرژی، رابطه‌های مربوط به انرژی‌های جنبشی و کرنشی به ترتیب در رابطه‌های (۱) و (۲) و صلیبت‌های خمشی و کششی به ترتیب در رابطه‌های (۳) و (۴) آورده شده است.

$$T = \frac{1}{2} \rho H \omega^2 \sum_{i=1}^2 \int_0^L \int_0^{B_i} (u^2 + v^2 + w^2) dx dy_i \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2} D \sum_{i=1}^2 \int_0^L \int_0^{B_i} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1-\nu}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dx dy_i + \frac{1}{2} K \sum_{i=1}^2 \int_0^L \int_0^{B_i} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy_i \quad (2)$$

$$D = \frac{EH}{(1-\nu^2)} \quad (3)$$

$$K = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

در رابطه‌های فوق، (L) طول ورق (متر)، $(B=B_1+B_2)$ عرض کلی (متر)، (H) ضخامت (متر)، (α) زاویه داخلی (درجه)، (E) ضریب کشسانی (نیوتن بر مترمربع)، (ρ) وزن مخصوص

شبکه‌بندی‌های گوناگون و تحلیل‌های متعدد، همگرایی در شبکه‌بندی ۱۶۰ میلی‌متر مناسب و قابل قبول است. داده‌های مربوط به همگرایی و تحلیل اجزای محدود به‌ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است.

قبل از انجام هرگونه تحلیل باید با توجه به شرایط مسئله با استفاده از روش آزمون و خطا به شبکه‌بندی مناسب دست یافت. برای این کار ابعاد جزء تغییر داده شد تا امکان همگرایی فراهم شود. به همین منظور از اجزایی با اندازه‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۶۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌متری استفاده شد. با بررسی

جدول ۳- بررسی همگرایی پاسخ با اندازه شبکه‌بندی گوناگون

اندازه شبکه‌بندی (mm)	۱۰۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۶۰	۱۰۰	۵۰
بسامد مود اول (Hz)	۱۱/۸۹	۲۲/۳۷	۲۲/۲۲	۲۲/۱۶	۲۲/۱۲	۲۲/۰۷	۲۲/۰۲

جدول ۴- مقایسه نتایج مدل تحلیلی مرجع با مدل اجزای محدود [۴]

شماره مود	نتایج مدل اجزای محدود (Hz)	نتایج مدل تحلیلی (Hz)	درصد خطا (%)
مود ۱	۲۲/۱۲	۲۲/۳۰	۰/۸۰
مود ۲	۴۴/۸۵	۴۵/۲۰	۰/۷۷
مود ۳	۸۱/۱۱	۸۱/۱۹	۰/۰۹
مود ۴	۹۶/۸۳	۹۷/۲۵	۰/۴۳
مود ۵	۱۵۰/۴۰	۱۵۵/۴۶	۳/۲۵

در فرآیند تحلیل و بررسی، مقدار ضریب کشسانی با توجه به جدول (۵) که حاصل پژوهش کونگ و همکاران [۱۰] است بر اساس عمر مفید سازه‌های فولادی و تغییرات محیطی و جوی در نظر گرفته شده است. برای مثال در شرایط واقعی برای رسیدن به خوردگی ۲/۹۰٪ در شهرهای پرجمعیت، حدود ۱۱ سال زمان لازم است.

۴- اثر خوردگی بر ویژگی‌های مکانیکی ورق‌ها

در این پژوهش، اثر خوردگی‌های یکنواخت، نواری و موضعی بر روی بسامد ورق‌های V شکل فولادی در شرایط مرزی گوناگون از جمله آزاد، مفصلی و گیردار، با ضخامت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر، طول‌های ۱، ۱/۵ و ۲ متر، عرض ۱ متر، زاویه‌های داخلی ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه با شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است.

جدول ۵- ویژگی‌های فولاد نرم در آزمایش تسریع خوردگی [۱۰]

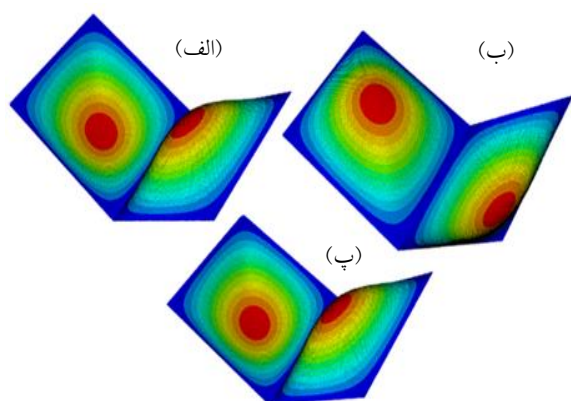
نام نمونه	مدت زمان خوردگی (h)	درصد خوردگی (%)	کشسانی (GPa)	ضریب تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	کرنش نسبی	کرنش گسیختگی
MX01	۰	۰	۲۰۹	۲۸۹	۴۳۳	۰/۳۴	۰/۳۹
MX02	۰	۰	۲۰۷	۲۹۰	۴۳۵	۰/۳۴	۰/۴۰
MX03	۰	۰	۲۰۴	۲۸۸	۴۳۴	۰/۳۵	۰/۴۱
MX11	۲/۹۰	۲/۹۰	۱۹۰	۲۷۶	۴۱۰	۰/۳۸	۰/۳۰
MX12	۱۴۴۰	۳/۰۰	۱۹۳	۲۷۲	۴۰۵	۰/۳۴	۰/۲۷
MX13	۲/۹۰	۲/۹۰	۱۹۶	۲۷۲	۴۱۰	۰/۳۳	۰/۳۴
MX21	۸/۹۰	۸/۹۰	۱۹۱	۲۷۱	۴۰۹	۰/۲۹	۰/۲۷
MX22	۲۸۸۰	۸/۷۰	۲۰۷	۲۷۴	۴۰۷	۰/۲۷	۰/۲۶
MX23	۹/۲۰	۹/۲۰	۲۰۹	۲۷۳	۴۱۱	۰/۳۰	۰/۲۸
MX31	۱۵/۵۰	۱۵/۵۰	۱۹۳	۲۸۶	۴۱۱	۰/۲۶	۰/۲۷
MX32	۴۳۲۰	۱۵/۴۰	۱۹۵	۲۷۰	۴۰۳	۰/۲۷	۰/۲۷
MX33	۱۵/۷۰	۱۵/۷۰	۱۸۶	۲۶۹	۴۰۷	۰/۲۹	۰/۲۹

۵- تعیین و بررسی تأثیر خوردگی یکنواخت بر بسامد

ورق‌های ۷ شکل

خوردگی یکنواخت یک فرآیند است که در آن خوردگی به صورت یکسان روی سطح ماده اتفاق می‌افتد. نام‌گذاری نمونه‌های تحلیل‌شده در بخش خوردگی یکنواخت به صورت P-At-UCr%-Th-CDEF انجام شده است که در آن (P) نشان‌دهنده ورق، (A) زاویه داخلی، (t) مقدار زاویه داخلی، (UC) خوردگی یکنواخت، حرف (r) شدت خوردگی، (T) ضخامت ورق ۷ شکل و (h) مقدار ضخامت است. E, D, C, و F نشان‌دهنده نوع شرایط مرزی در هر طرف ورق هستند. برای مثال P-A90-UC15.7%-T20-SSFF بیانگر ورق ۷ شکل با زاویه داخلی ۹۰ درجه، شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪، ضخامت ۲۰ میلی‌متر و شرایط مرزی دو طرف مفصلی-دو طرف آزاد است. در این بخش از پژوهش بسامد ورق‌های دارای خوردگی یکنواخت با شدت ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ برای ضخامت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر، زاویه‌های داخلی ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه، طول‌های ۱، ۱/۵ و ۲ متر و شرایط مرزی دو طرف مفصلی-دو طرف آزاد (SSFF)، دو طرف گیردار-دو طرف آزاد (CCFF) و چهار طرف مفصلی (SSSS) به‌دست آمده است. از بین تمامی ورق‌های مورد بررسی به‌دلیل نیاز به رعایت حجم مطالب، تنها داده‌های مربوط به ورق دارای کمترین بسامد در جدول (۶) آورده شده است. ورق ۷ شکل یادشده دارای طول و عرض ۱ متر، ضخامت ۱۰ میلی‌متر با خوردگی ۱۵/۷۰٪، شرایط مرزی (SSFF) و زاویه داخلی ۴۵ درجه است و مقدار آن برابر ۱۹/۰۲ (هرتز) می‌باشد که به‌ترتیب نسبت به حالت بدون خوردگی و شدت‌های

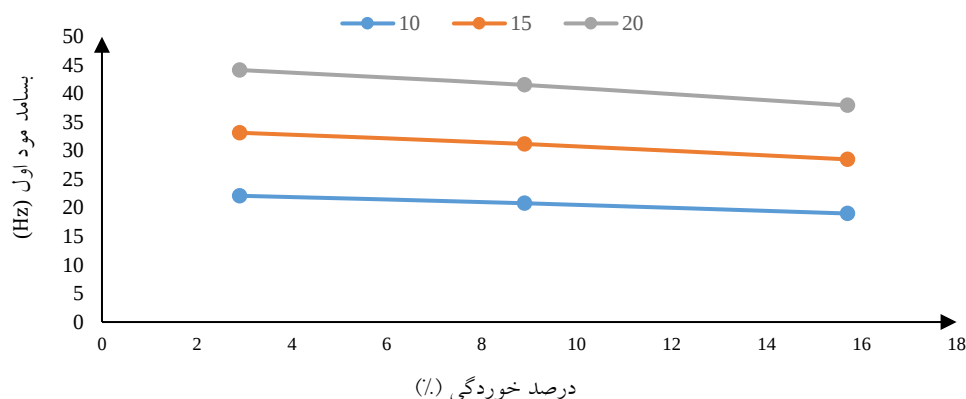
خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ مقدار بسامد ۷/۴۴٪، ۱۲/۹۲٪ و ۲۰/۴۲٪ کاهش می‌یابد. به‌منظور بررسی تأثیر شدت و موقعیت خوردگی یکنواخت بر شکل مود ورق ۷ شکل در شکل (۲) به‌عنوان نمونه شکل مود اول ورق‌های ۷ شکل دارای خوردگی یکنواخت با طول و عرض ۱ متر، شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪، ضخامت ۲۰ میلی‌متر، شرایط مرزی (SSSS) و زاویه‌های داخلی ۱۳۵ درجه نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳) اثر افزایش خوردگی یکنواخت بر بسامد مود اول ورق ۷ شکل به طول و عرض ۱ متر، زاویه داخلی ۴۵ درجه، با ضخامت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر و شرایط مرزی (SSFF) نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایش شکل مود اول ورق ۷ شکل دارای خوردگی یکنواخت با زاویه داخلی ۱۳۵ درجه و شرایط مرزی (SSSS)
(الف) P-A135-UC2.9%-T20-SSSS-M₁
(ب) P-A135-UC8.9%-T20-SSSS-M₁
(پ) P-A135-UC15.7%-T20-SSSS-M₁

جدول ۶- بسامد ورق ۷ شکل ۱ متری دارای خوردگی یکنواخت با شرایط مرزی (SSFF)

نام مدل بسامد (Hz)	P-A45-UC15.7% T20-SSFF	P-A45-UC8.9% T20-SSFF	P-A45-UC2.9% T20-SSFF	P-A45-UC15.7% T15-SSFF	P-A45-UC8.9% T15-SSFF	P-A45-UC2.9% T15-SSFF	P-A45-UC15.7% T10-SSFF	P-A45-UC8.9% T10-SSFF	P-A45-UC2.9% T10-SSFF
بسامد مود ۱	۳۷/۹۷	۴۱/۵۶	۴۴/۱۷	۲۸/۵۱	۳۱/۲۱	۳۳/۱۷	۱۹/۰۲	۲۰/۸۲	۲۲/۱۳
بسامد مود ۲	۵۹/۹۳	۶۵/۶۲	۶۹/۷۴	۴۴/۹۸	۴۹/۲۵	۵۲/۳۵	۳۰/۰۱	۳۲/۸۶	۳۴/۹۳
بسامد مود ۳	۶۲/۹۳	۶۸/۸۱	۷۳/۰۶	۴۷/۳۹	۵۱/۸۵	۵۵/۰۷	۳۱/۷۱	۳۴/۷۱	۳۶/۸۳
بسامد مود ۴	۸۰/۷۳	۸۸/۳۴	۹۳/۸۴	۶۰/۶۹	۶۶/۴۳	۷۰/۵۸	۴۰/۵۵	۴۴/۳۹	۴۷/۱۸
بسامد مود ۵	۱۴۳/۲۳	۱۵۶/۶۲	۱۶۶/۲۸	۱۰۷/۸۹	۱۱۸/۰۳	۱۲۵/۳۶	۷۲/۲۰	۷۹/۰۲	۸۳/۹۶
بسامد مود ۶	۱۵۲/۶۹	۱۶۶/۹۸	۱۷۷/۲۸	۱۱۴/۹۴	۱۲۵/۷۷	۱۳۳/۶۰	۷۶/۸۳	۸۴/۱۰	۸۹/۳۸
بسامد مود ۷	۱۵۵/۵۶	۱۷۰/۱۸	۱۸۰/۷۴	۱۱۷/۰۳	۱۲۸/۰۷	۱۳۵/۰۶	۷۸/۲۳	۸۵/۶۳	۹۱/۰۰
بسامد مود ۸	۱۸۲/۵۲	۱۹۹/۵۴	۲۱۱/۸۰	۱۳۷/۵۱	۱۵۰/۴۴	۱۵۹/۷۷	۹۲/۰۱	۱۰۰/۷۱	۱۰۷/۰۱
بسامد مود ۹	۱۹۴/۷۰	۲۱۳/۰۶	۲۲۶/۳۵	۱۴۶/۲۹	۱۶۰/۱۴	۱۷۰/۱۷	۹۷/۶۶	۱۰۶/۹۳	۱۱۳/۶۵
بسامد مود ۱۰	۲۲۰/۸۶	۲۴۱/۶۱	۲۵۶/۶۱	۱۶۶/۱۱	۱۸۱/۷۹	۱۹۳/۱۴	۱۱۰/۹۹	۱۲۱/۵۰	۱۲۹/۱۳



شکل ۳- اثر افزایش خوردگی یکنواخت بر بسامد مود اول ورق V شکل به طول و عرض ۱ متر، زاویه داخلی ۴۵ درجه، با ضخامت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر و شرایط مرزی (SSFF)

۶- تعیین و بررسی تأثیر خوردگی نواری بر بسامد

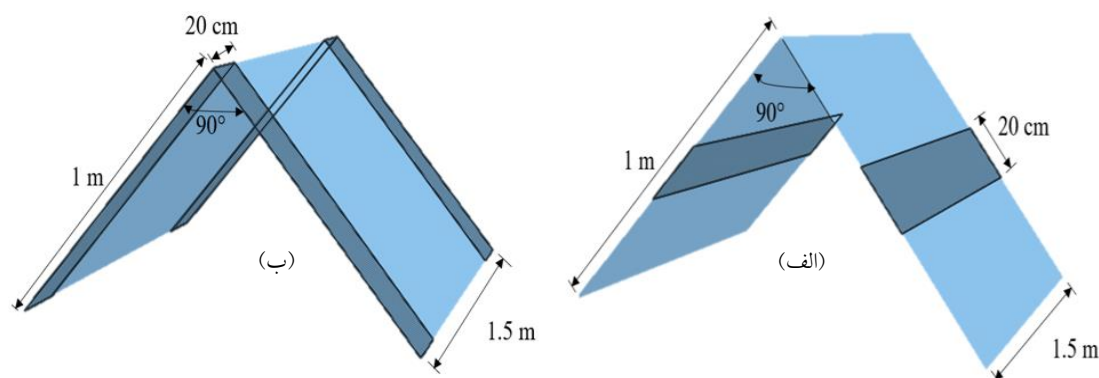
ورق‌های V شکل

به منظور تعیین بسامد ورق‌های V شکل دارای خوردگی نواری، ورقی به طول ۱/۵ متر، عرض ۱ متر، ضخامت ۱۵ میلی‌متر، زاویه داخلی ۹۰ درجه و شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی به صورت دو طرف مفصلی-دو طرف آزاد، دو طرف گیردار-دو طرف آزاد و چهار طرف مفصلی در نظر گرفته شده‌اند. بسامد ورق یادشده بدون خوردگی در شرایط مرزی دو طرف مفصلی-دو طرف آزاد برابر با ۳۶/۱۱ (هرتز) می‌باشد. برای شرایط مرزی دو طرف گیردار-دو طرف آزاد و چهار طرف مفصلی نیز بسامد به ترتیب برابر با ۵۶/۷۸ و ۵۲/۸۷ (هرتز) شده است. نام‌گذاری مدل‌ها به صورت P-A90-SCx%-CDEF-In می‌باشد. در این نام‌گذاری (P) نشان‌دهنده ورق، (A90) ورق با زاویه داخلی ۹۰ درجه، (SC)

خوردگی نواری، (x) شدت خوردگی، C، D، E و F نوع شرایط مرزی در هر طرف ورق، (I) و (n) به ترتیب نمایانگر الگوی خوردگی و شماره الگو می‌باشند. به عنوان مثال خوردگی P-A90-SC15.7%-SSSS-I2 بیانگر ورق V شکل با زاویه داخلی ۹۰ درجه، خوردگی نواری با شدت ۱۵/۷۰٪ در شرایط مرزی چهار طرف مفصلی (SSSS) و الگوی خوردگی نوع دوم است. زاویه داخلی و شکل هندسی ورق V شکل دارای الگوی خوردگی نواری مختلف در جدول (۷) ارائه شده است. خوردگی طولی و یا عرضی به صورت نواری و متقارن به عرض ۲۰ سانتی‌متر بر روی ورق V شکل اعمال شده است. در شکل (۴) برای درک بهتر، شکل هندسی ورق و موقعیت‌های مختلف خوردگی نواری نمایش داده شده است.

جدول ۷- ویژگی‌های هندسی الگوی خوردگی نواری در موقعیت‌های گوناگون

نوع الگوی خوردگی	زاویه داخلی ورق (°)	موقعیت الگوی خوردگی
I1	۹۰	پایین در راستای طول ورق
I2	۹۰	وسط در راستای طول ورق
I3	۹۰	بالا در راستای طول ورق
I4	۹۰	گوشه در راستای عرض ورق
I5	۹۰	وسط در راستای عرض ورق



شکل ۴- نمایش ابعاد هندسی ورق V شکل دارای خوردگی (الف) الگوی خوردگی I2 و (ب) الگوی خوردگی I4

در جدول (۸) بسامد ۱۰ مود اول ورق V شکل با ضخامت ۱۵ میلی متر دارای شدت های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪، زاویه داخلی ۹۰ درجه و شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) دارای الگوی خوردگی نواری I2 نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش شدت خوردگی در تمامی مودهای ورق V شکل، بسامد کاهش یافته است. بیش ترین و کم ترین درصد کاهش بسامد مود اول نسبت به حالت بدون خوردگی به ترتیب در مدل هایی به نام های (P-A90-SC15.7%-SSFF-I2) و (P-A90-SC2.9%-CCFF-I2) با بسامد ۳۲/۳۴ و ۵۵/۷۵ (هرتز) رخ داده است. در این الگو بیش ترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSFF)، (SSSS) و (CCFF) اتفاق افتاده است. در شکل (۵) تأثیر افزایش خوردگی نواری با الگوی I2 بر بسامد مود اول ورق V شکل به طول ۱/۵ و عرض ۱ متر، زاویه داخلی ۹۰ درجه، با ضخامت ۱۵ میلی متر و شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) نشان داده شده است.

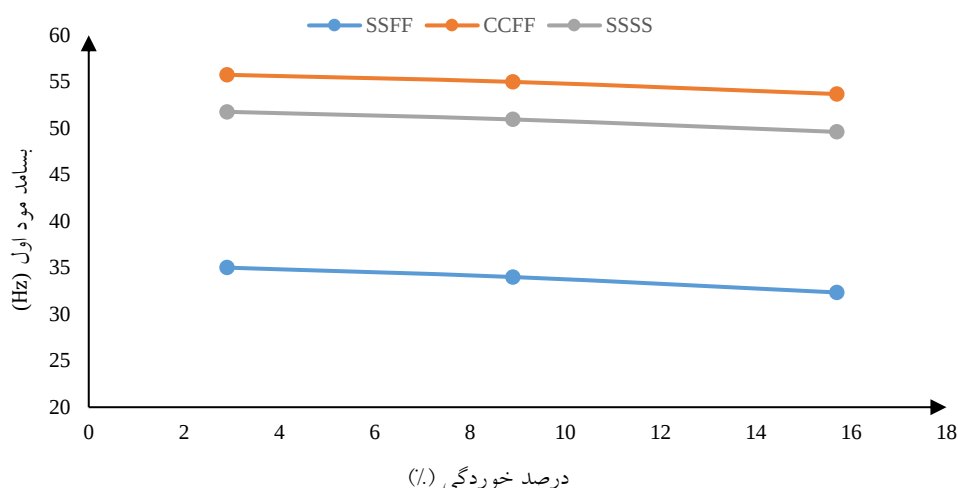
در جدول (۸) بسامد ۱۰ مود اول ورق V شکل با ضخامت ۱۵ میلی متر دارای شدت های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪، زاویه داخلی ۹۰ درجه و شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) دارای الگوی خوردگی نواری I3 نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش شدت خوردگی در تمامی مودهای ورق V شکل، بسامد کاهش یافته است. بیش ترین و کم ترین درصد کاهش بسامد مود اول نسبت به حالت بدون خوردگی به ترتیب در مدل هایی به نام های (P-A90-SC15.7%-SSSS-I3) و (P-A90-SC2.9%-SSFF-I3) با بسامد ۵۰/۹۰ و ۳۵/۹۵ (هرتز) رخ داده است. در این الگو بیش ترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) اتفاق افتاده است. در جدول (۹) بسامد ۱۰ مود اول ورق V شکل با ضخامت ۱۵ میلی متر دارای شدت های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪،

جدول ۸- بسامد ورق V شکل ۱/۵ متری دارای خوردگی نواری با الگوی خوردگی I3

نام مدل بسامد (Hz)	P-A90-SC2.9%-SSFF-I3	P-A90-SC8.9%-SSFF-I3	P-A90-SC15.7%-SSFF-I3	P-A90-SC2.9%-CCFF-I3	P-A90-SC8.9%-CCFF-I3	P-A90-SC15.7%-CCFF-I3	P-A90-SC2.9%-SSSS-I3	P-A90-SC8.9%-SSSS-I3	P-A90-SC15.7%-SSSS-I3
بسامد مود ۱	۳۵/۹۵	۳۵/۷۷	۳۵/۴۶	۵۶/۴۴	۵۶/۱۱	۵۵/۴۹	۵۲/۲۶	۵۱/۷۰	۵۰/۹۰
بسامد مود ۲	۴۷/۳۸	۴۶/۷۱	۴۵/۷۷	۶۵/۳۶	۶۴/۵۱	۶۳/۲۷	۶۸/۵۴	۶۷/۰۲	۶۵/۱۰
بسامد مود ۳	۵۵/۰۵	۵۳/۴۶	۵۱/۴۵	۸۰/۵۲	۷۸/۵۹	۷۶/۱۵	۱۰۰/۳۶	۹۹/۲۴	۹۷/۶۸
بسامد مود ۴	۶۴/۴۹	۶۲/۸۶	۶۰/۷۷	۸۷/۶۲	۸۵/۵۹	۸۲/۹۹	۱۱۲/۱۹	۱۱۰/۷۷	۱۰۸/۹۰
بسامد مود ۵	۸۳/۲۷	۸۱/۸۷	۷۹/۹۳	۹۶/۹۳	۹۵/۱۸	۹۲/۷۸	۱۶۰/۶۸	۱۵۸/۶۵	۱۵۵/۲۳
بسامد مود ۶	۹۶/۹۳	۹۵/۱۸	۹۲/۸۶	۱۱۴/۹۴	۱۱۲/۷۱	۱۱۰/۷۶	۱۸۱/۲۴	۱۷۹/۶۲	۱۷۷/۳۰
بسامد مود ۷	۱۴۳/۵۶	۱۴۱/۷۹	۱۳۸/۷۰	۱۵۷/۱۴	۱۵۴/۷۴	۱۵۱/۴۱	۱۹۰/۱۱	۱۸۸/۶۴	۱۸۶/۶۲
بسامد مود ۸	۱۴۷/۱۵	۱۴۵/۱۷	۱۴۲/۴۳	۱۷۰/۷۸	۱۶۸/۳۹	۱۶۵/۱۳	۱۹۶/۲۶	۱۹۳/۳۱	۱۸۹/۱۴
بسامد مود ۹	۱۵۶/۲۳	۱۵۴/۲۴	۱۵۰/۹۴	۱۸۱/۵۴	۱۷۹/۰۲	۱۷۴/۷۴	۲۰۸/۰۵	۲۰۵/۳۸	۲۰۱/۲۰
بسامد مود ۱۰	۱۵۷/۷۲	۱۵۵/۸۲	۱۵۳/۲۲	۱۹۲/۵۵	۱۸۹/۹۱	۱۸۵/۵۴	۲۳۹/۳۴	۲۳۶/۱۰	۲۳۱/۴۴

جدول ۹- بسامد ورق V شکل ۱/۵ متری دارای خوردگی نواری با الگوی خوردگی I2

نام مدل بسامد (Hz)	P-A90- SC2.9%- SSFF-I2	P-A90- SC8.9%- SSFF-I2	P-A90- SC15.7%- SSFF-I2	P-A90- SC2.9%- CCFF-I2	P-A90- SC8.9%- CCFF-I2	P-A90- SC15.7%- CCFF-I2	P-A90- SC2.9%- SSSS-I2	P-A90- SC8.9%- SSSS-I2	P-A90- SC15.7%- SSSS-I2
بسامد مود ۱	۳۵/۰۱	۳۴/۰۰	۳۲/۳۴	۵۵/۷۵	۵۴/۹۹	۵۳/۶۸	۵۱/۷۷	۵۰/۹۵	۴۹/۶۱
بسامد مود ۲	۴۷/۳۴	۴۶/۸۰	۴۵/۸۴	۶۵/۳۹	۶۴/۸۷	۶۳/۹۰	۶۸/۹۷	۶۸/۱۹	۶۶/۸۷
بسامد مود ۳	۵۵/۷۲	۵۴/۹۶	۵۳/۶۶	۸۱/۱۸	۸۰/۲۸	۷۸/۷۳	۹۹/۵۶	۹۸/۳۸	۹۶/۶۵
بسامد مود ۴	۶۵/۳۴	۶۴/۸۲	۶۳/۸۵	۸۸/۵۴	۸۷/۹۵	۸۶/۷۶	۱۱۱/۴۷	۱۱۰/۲۳	۱۰۸/۳۶
بسامد مود ۵	۸۳/۹۰	۸۳/۵۱	۸۲/۷۸	۹۷/۷۱	۹۷/۲۴	۹۶/۳۷	۱۶۱/۶۹	۱۶۰/۵۵	۱۵۸/۷۴
بسامد مود ۶	۹۷/۶۴	۹۷/۱۷	۹۶/۳۰	۱۱۵/۹۴	۱۱۵/۴۵	۱۱۴/۴۶	۱۷۸/۵۴	۱۷۷/۰۶	۱۷۲/۶۳
بسامد مود ۷	۱۴۴/۷۷	۱۴۴/۱۰	۱۴۲/۸۷	۱۵۷/۲۸	۱۵۵/۹۹	۱۵۴/۰۸	۱۸۶/۸۷	۱۸۴/۲۸	۱۸۰/۶۵
بسامد مود ۸	۱۴۶/۹۷	۱۴۵/۷۵	۱۴۳/۹۸	۱۷۰/۵۵	۱۶۹/۲۵	۱۶۷/۲۶	۱۹۷/۶۳	۱۹۶/۰۴	۱۹۳/۴۸
بسامد مود ۹	۱۵۷/۰۹	۱۵۵/۸۳	۱۵۳/۸۸	۱۸۲/۸۷	۱۸۱/۶۶	۱۷۹/۵۵	۲۰۸/۶۴	۲۰۸/۳۸	۲۰۳/۱۴
بسامد مود ۱۰	۱۵۷/۲۰	۱۵۵/۹۱	۱۵۴/۰۰	۱۹۳/۵۸	۱۹۱/۹۲	۱۸۹/۲۸	۲۳۹/۸۳	۲۳۷/۱۹	۲۳۳/۳۰



شکل ۵- اثر افزایش خوردگی نواری با الگوی I2 بر بسامد مود اول ورق V شکل به طول ۱/۵ و عرض ۱ متر، زاویه داخلی ۹۰ درجه، با ضخامت ۱۵ میلی متر و شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS)

رخ داده است. در این الگو بیشترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) اتفاق افتاده است. همچنین برای الگوی I5 بیشترین و کمترین درصد کاهش بسامد مود اول نسبت به حالت بدون خوردگی به ترتیب در مدل‌هایی به نام‌های (P-A90-SC15.7%-SSSS-I5) و (P-A90-SC2.9%-SSFF-I5) با بسامد ۵۱/۱۲ و ۳۵/۸۰ (هرتز) رخ داده است. در این الگو بیشترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSSS)، (CCFF) و (SSFF) اتفاق افتاده است.

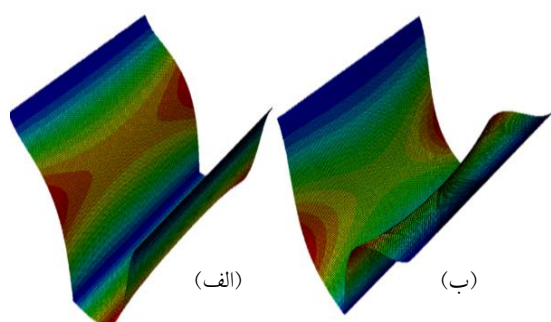
در جدول‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب بسامد ۱۰ مود اول ورق V شکل با ضخامت ۱۵ میلی متر دارای شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪، زاویه داخلی ۹۰ درجه و شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) دارای الگوی خوردگی نواری I4 و I5 نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش شدت خوردگی در تمامی مدهای ورق V شکل، بسامد کاهش یافته است. برای الگوی I4 بیشترین و کمترین درصد کاهش بسامد مود اول نسبت به حالت بدون خوردگی به ترتیب در مدل‌هایی به نام‌های (P-A90-SC15.7%-CCFF-I4) و (P-A90-SC2.9%-SSSS-I4) با بسامد ۵۳/۳۹ و ۵۲/۱۲ (هرتز)

جدول ۱۰- بسامد ورق V شکل ۱/۵ متری دارای خوردگی نواری با الگوی خوردگی I4

نام مدل بسامد (Hz)	P-A90- SC15.7%- SSSS-I4	P-A90- SC8.9%- SSSS-I4	P-A90- SC2.9%- SSSS-I4	P-A90- SC15.7%- CCFF-I4	P-A90- SC8.9%- CCFF-I4	P-A90- SC2.9%- CCFF-I4	P-A90- SC15.7%- SSFF-I4	P-A90- SC8.9%- SSFF-I4	P-A90- SC2.9%- SSFF-I4
بسامد مود ۱	۵۰/۵۷	۵۱/۴۲	۵۲/۱۲	۵۳/۳۹	۵۴/۵۷	۵۵/۴۸	۳۴/۰۶	۳۴/۷۵	۳۵/۳۰
بسامد مود ۲	۶۸/۰۲	۶۸/۸۴	۶۹/۴۷	۶۰/۶۸	۶۲/۵۷	۶۴/۰۱	۴۴/۸۸	۴۵/۹۲	۴۶/۷۱
بسامد مود ۳	۹۵/۹۲	۹۸/۲۶	۹۹/۸۴	۷۷/۱۹	۷۹/۱۹	۸۰/۶۵	۵۳/۳۷	۵۴/۵۵	۵۵/۴۶
بسامد مود ۴	۱۰۷/۸۰	۱۱۰/۲۱	۱۱۱/۸۶	۸۱/۰۷	۸۴/۱۱	۸۶/۴۰	۶۰/۶۳	۶۲/۵۲	۶۳/۹۵
بسامد مود ۵	۱۵۹/۰۰	۱۶۰/۵۵	۱۶۱/۶۶	۹۳/۸۹	۹۵/۴۶	۹۶/۶۵	۸۱/۴۳	۸۲/۴۵	۸۳/۲۲
بسامد مود ۶	۱۷۱/۶۸	۱۷۶/۵۵	۱۷۹/۶۰	۱۱۰/۶۲	۱۱۲/۷۵	۱۱۴/۴۲	۹۳/۸۲	۹۵/۳۹	۹۶/۵۸
بسامد مود ۷	۱۷۹/۹۷	۱۸۴/۹۵	۱۸۸/۰۹	۱۵۳/۶۶	۱۵۵/۷۵	۱۵۷/۲۱	۱۳۴/۰۷	۱۳۵/۰۵	۱۴۱/۸۱
بسامد مود ۸	۱۹۵/۵۷	۱۹۷/۱۴	۱۹۸/۲۵	۱۶۵/۹۹	۱۶۸/۴۹	۱۷۰/۲۸	۱۴۲/۷۰	۱۴۵/۹۷	۱۴۷/۱۱
بسامد مود ۹	۲۰۰/۲۰	۲۰۴/۵۶	۲۰۷/۶۱	۱۶۹/۸۳	۱۷۵/۶۴	۱۷۹/۴۸	۱۴۴/۳۲	۱۴۸/۳۷	۱۵۲/۴۸
بسامد مود ۱۰	۲۳۱/۴۹	۲۳۶/۰۶	۲۳۹/۲۴	۱۷۴/۶۵	۱۸۲/۳۲	۱۸۷/۸۰	۱۵۳/۵۹	۱۵۵/۶۸	۱۵۷/۱۳

جدول ۱۱- بسامد ورق V شکل ۱/۵ متری دارای خوردگی نواری با الگوی خوردگی I5

نام مدل بسامد (Hz)	P-A90- SC15.7%- SSSS-I5	P-A90- SC8.9%- SSSS-I5	P-A90- SC2.9%- SSSS-I5	P-A90- SC15.7%- CCFF-I5	P-A90- SC8.9%- CCFF-I5	P-A90- SC2.9%- CCFF-I5	P-A90- SC15.7%- SSFF-I5	P-A90- SC8.9%- SSFF-I5	P-A90- SC2.9%- SSFF-I5
بسامد مود ۱	۵۱/۱۲	۵۱/۷۶	۵۲/۱۹	۵۵/۵۵	۵۵/۹۶	۵۶/۲۹	۳۵/۳۴	۳۵/۵۹	۳۵/۸۰
بسامد مود ۲	۶۷/۵۱	۶۸/۴۲	۶۹/۱۲	۶۵/۵۶	۶۵/۸۵	۶۶/۰۴	۴۷/۲۸	۴۷/۵۸	۴۷/۸۲
بسامد مود ۳	۹۹/۱۸	۱۰۰/۱۱	۱۰۰/۸۲	۸۰/۷۸	۸۱/۴۱	۸۱/۹۰	۵۵/۵۳	۵۵/۹۴	۵۶/۲۷
بسامد مود ۴	۱۱۱/۲۴	۱۱۲/۱۹	۱۱۲/۹۱	۸۹/۲۱	۸۹/۴۳	۸۹/۶۱	۶۵/۵۱	۶۵/۷۷	۶۵/۹۹
بسامد مود ۵	۱۵۵/۹۳	۱۵۸/۳۸	۱۶۰/۱۹	۹۵/۵۸	۹۶/۸۳	۹۷/۶۵	۸۲/۰۷	۸۳/۱۷	۸۳/۸۷
بسامد مود ۶	۱۷۵/۷۳	۱۷۸/۵۶	۱۸۰/۴۵	۱۱۳/۳۱	۱۱۴/۷۸	۱۱۵/۸۰	۹۵/۵۱	۹۶/۷۶	۹۷/۵۸
بسامد مود ۷	۱۸۴/۰۸	۱۸۷/۰۱	۱۸۸/۹۸	۱۵۶/۶۰	۱۵۷/۸۹	۱۵۸/۸۰	۱۴۱/۹۱	۱۴۳/۱۹	۱۴۴/۱۳
بسامد مود ۸	۱۹۰/۴۸	۱۹۳/۶۶	۱۹۶/۰۱	۱۷۰/۰۵	۱۷۱/۳۶	۱۷۲/۲۸	۱۴۶/۲۳	۱۴۷/۴۸	۱۴۸/۳۶
بسامد مود ۹	۲۰۶/۳۱	۲۰۸/۱۹	۲۰۹/۵۹	۱۷۹/۶۲	۱۸۱/۳۶	۱۸۲/۶۰	۱۵۶/۵۲	۱۵۷/۶۵	۱۵۸/۰۲
بسامد مود ۱۰	۲۳۸/۲۳	۲۴۰/۰۶	۲۴۱/۴۳	۱۹۴/۳۴	۱۹۴/۷۹	۱۹۵/۱۳	۱۵۷/۱۷	۱۵۷/۸۱	۱۵۸/۷۱



شکل ۶- نمایش شکل مود اول ورق V شکل با زاویه داخلی ۹۰ درجه، شرایط مرزی (CCFF) و شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪
(الف) الگوی خوردگی I2 و (ب) الگوی خوردگی I4

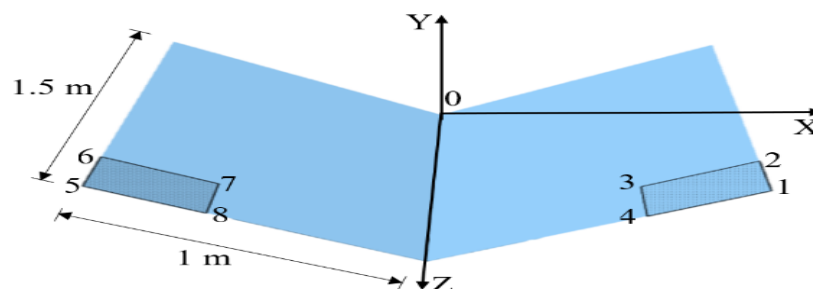
به منظور بررسی تأثیر شدت و موقعیت خوردگی نواری بر شکل مود ورق V شکل در شکل (۶)، شکل مود اول دو الگوی I2 و I4 در ورق V شکل دارای خوردگی نواری در شرایط مرزی (CCFF) با زاویه داخلی ۹۰ درجه و شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪ نشان داده شده است. مشخص می شود که با تغییر محل خوردگی، شکل مودهای ورق V شکل تغییر پیدا کرده است. همچنین این موضوع باعث تغییر جهت نیم موج های سینوسی در راستای طول و محیط ورق شده است.

۷- تعیین و بررسی تأثیر خوردگی موضعی بر بسامد

ورق‌های ۷ شکل

به منظور تعیین بسامد ورق‌های ۷ شکل دارای خوردگی موضعی، ورقی به طول ۱/۵ متر، عرض ۱ متر، ضخامت ۱۵ میلی‌متر، زاویه داخلی ۹۰ درجه و شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی به صورت دو طرف مفصلی-دو طرف آزاد، دو طرف گیردار-دو طرف آزاد و چهار طرف مفصلی در نظر گرفته شده‌اند. بسامد ورق‌های یادشده بدون خوردگی در شرایط مرزی دو طرف مفصلی-دو طرف آزاد برابر ۳۶/۱۱ (هرتز) می‌باشد. برای شرایط مرزی دوطرف گیردار-دوطرف آزاد و چهار طرف مفصلی نیز بسامد به ترتیب برابر ۵۶/۷۸ و ۵۲/۸۷ (هرتز) شده است. نام‌گذاری مدل‌ها به صورت $P-A90-LCx\%-CDEF-Kn$ می‌باشد. در این نام‌گذاری (P) نشان‌دهنده ورق، (A90) ورق با زاویه داخلی ۹۰ درجه، (LC) خوردگی موضعی، (x) شدت خوردگی، C, D, E و F نوع شرایط

مرزی در هر طرف ورق، (K) و (n) به ترتیب نمایانگر الگوی خوردگی و شماره الگو می‌باشند. به عنوان مثال $P-A90-LC15.7\%-SSFF-K8$ نشان‌دهنده ورق ۷ شکل با زاویه داخلی ۹۰ درجه، خوردگی موضعی با شدت ۱۵/۷۰٪ در شرایط مرزی دوطرف مفصلی-دو طرف آزاد و الگوی خوردگی نوع هشتم می‌باشد. ۹ الگوی خوردگی موضعی بررسی و معرفی شده است اما تنها داده‌های مربوط به دو الگو که دارای بیش‌ترین تأثیر و الگویی که کم‌ترین تأثیر را دارد آورده شده است. مختصات رأس‌های الگوهای خوردگی موضعی $K1$ تا $K9$ در جدول‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است. خوردگی به صورت موضعی و متقارن بر روی ورق ۷ شکل اعمال شده است. در شکل (۷) برای درک بهتر شکل هندسی ورق و موقعیت‌های مختلف خوردگی موضعی نمایش داده شده است.



شکل ۷- موقعیت مکانی رأس‌های الگوهای خوردگی موضعی

جدول ۱۲- موقعیت مکانی الگوهای خوردگی موضعی مستطیلی متقارن نسبت به محور مختصات کلی

الگوی خوردگی	X_1 (m)	Y_1 (m)	Z_1 (m)	X_2 (m)	Y_2 (m)	Z_2 (m)	X_3 (m)	Y_3 (m)	Z_3 (m)	X_4 (m)	Y_4 (m)	Z_4 (m)
LC1	۰/۷۰	۰/۷۰	۱/۵	۰/۷۰	۰/۷۰	۱/۲۵	۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵	۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۵
LC2	۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۵	۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۵
LC3	۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵	۰	۰	۱/۲۵	۰	۰	۱/۵
LC4	۰/۷۰	۰/۷۰	۱/۲۵	۰/۷۰	۰/۷۰	۱	۰/۴۷	۰/۴۷	۱	۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵
LC5	۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵	۰/۴۷	۰/۴۷	۱	۰/۲۳	۰/۲۳	۱	۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵
LC6	۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱/۲۵
LC7	۰/۷۰	۰/۷۰	۱	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۵	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۷۵	۰/۴۷	۰/۴۷	۱
LC8	۰/۴۷	۰/۴۷	۱	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۷۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۷۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۱
LC9	۰/۲۳	۰/۲۳	۱	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۷۵	۰	۰	۰/۷۵	۰	۰	۱

جدول ۱۳- موقعیت مکانی الگوهای خوردگی موضعی مستطیلی متقارن نسبت به محور مختصات کلی

الگوی خوردگی	X ₅ (m)	Y ₅ (m)	Z ₅ (m)	X ₆ (m)	Y ₆ (m)	Z ₆ (m)	X ₇ (m)	Y ₇ (m)	Z ₇ (m)	X ₈ (m)	Y ₈ (m)	Z ₈ (m)
LC1	-۰/۷۰	۰/۷۰	۱/۵	-۰/۷۰	۰/۷۰	۱/۲۵	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۵
LC2	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۵	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۵
LC3	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۵	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵	۰	۰	۱/۲۵	۰	۰	۱/۵
LC4	-۰/۷۰	۰/۷۰	۱/۲۵	-۰/۷۰	۰/۷۰	۱	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵
LC5	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱/۲۵	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵
LC6	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱/۲۵	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱/۲۵
LC7	-۰/۷۰	۰/۷۰	۱	-۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۵	-۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۷۵	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱
LC8	-۰/۴۷	۰/۴۷	۱	-۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۷۵	-۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۷۵	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱
LC9	-۰/۲۳	۰/۲۳	۱	-۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۷۵	۰	۰	۰/۷۵	۰	۰	۱

مقدار کاهش ۰/۳۹٪ می باشد. در این الگو بیشترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSSS)، (SSFF) و (CCFF) اتفاق افتاده است. در شکل (۸) تأثیر خوردگی موضعی در مقدار بسامد مود اول ورق V شکل با الگوی خوردگی K8 در شرایط مرزی (SSSS) نمایش داده شده است.

به منظور بررسی تأثیر شدت و موقعیت خوردگی موضعی بر شکل مود ورق V شکل در شکل های (۹) و (۱۰) بررسی تأثیر موقعیت و شدت خوردگی در شکل مود، شکل مود دوم و سوم دو الگوی K2 و K8 در ورق V شکل دارای خوردگی موضعی در شرایط مرزی (SSSS) با زاویه داخلی ۹۰ درجه و شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪ نشان داده شده است.

مطابق جدول (۱۴) الگوی خوردگی K2 در شرایط مرزی (SSFF) با شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪ بیشترین تأثیر در کاهش بسامد مود اول ورق به مقدار ۲/۴۹٪ و کمترین تأثیر در بسامد مود اول در شرایط مرزی (SSSS) با شدت خوردگی ۲/۹۰٪ با مقدار کاهش ۰/۱۳٪ می باشد. در این الگو بیشترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) اتفاق افتاده است.

مطابق جدول (۱۵) الگوی خوردگی K8 در شرایط مرزی (SSSS) با شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪ بیشترین تأثیر در کاهش بسامد مود اول ورق به مقدار ۲/۵۲٪ و کمترین تأثیر در بسامد مود اول در شرایط مرزی (CCFF) با شدت خوردگی ۲/۹۰٪ با

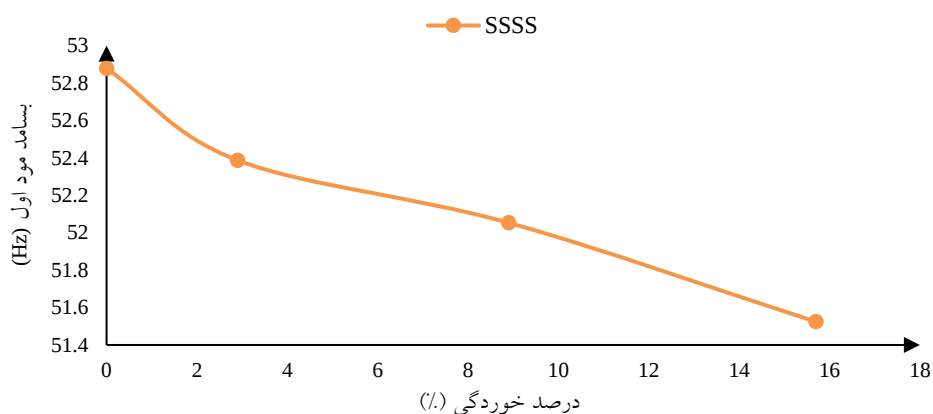
جدول ۱۴- بسامد ورق V شکل ۱/۵ متری دارای خوردگی موضعی با الگوی خوردگی K2

نام مدل بسامد (Hz)	P-A90-SC2.9%-SSFF-K2	P-A90-SC8.9%-SSFF-K2	P-A90-SC15.7%-SSFF-K2	P-A90-SC2.9%-CCFF-K2	P-A90-SC8.9%-CCFF-K2	P-A90-SC15.7%-CCFF-K2	P-A90-SC2.9%-SSSS-K2	P-A90-SC8.9%-SSSS-K2	P-A90-SC15.7%-SSSS-K2
بسامد مود ۱	۳۵/۸۰	۳۵/۵۶	۳۵/۲۱	۵۶/۴۹	۵۶/۳۲	۵۶/۰۵	۵۲/۸۰	۵۲/۷۴	۵۲/۶۵
بسامد مود ۲	۴۷/۷۴	۴۷/۵۶	۴۷/۲۸	۶۵/۸۸	۶۵/۷۴	۶۵/۵۰	۷۰/۰۸	۷۰/۰۱	۶۹/۹۰
بسامد مود ۳	۵۶/۴۷	۵۶/۳۰	۵۶/۰۳	۸۲/۲۵	۸۲/۱۱	۸۱/۸۷	۱۰۱/۲۶	۱۰۰/۹۸	۱۰۰/۵۳
بسامد مود ۴	۶۵/۸۳	۶۵/۶۹	۶۵/۴۴	۸۹/۶۱	۸۹/۲۰	۸۹/۰۱	۱۱۳/۳۲	۱۱۳/۰۲	۱۱۲/۵۳
بسامد مود ۵	۸۵/۰۳	۸۴/۹۱	۸۴/۷۷	۹۸/۸۷	۹۸/۸۰	۹۸/۶۹	۱۶۲/۵۷	۱۶۲/۲۸	۱۶۱/۸۸
بسامد مود ۶	۹۸/۸۰	۹۸/۷۳	۹۸/۶۲	۱۱۷/۳۱	۱۱۷/۲۲	۱۱۷/۰۹	۱۸۱/۹۰	۱۸۱/۰۲	۱۷۹/۶۳
بسامد مود ۷	۱۴۴/۹۲	۱۴۴/۴۴	۱۴۳/۳۷	۱۶۰/۰۴	۱۵۹/۸۹	۱۵۹/۷۰	۱۹۰/۴۸	۱۸۹/۵۷	۱۸۸/۱۳
بسامد مود ۸	۱۴۹/۷۰	۱۴۹/۵۰	۱۴۹/۲۷	۱۷۳/۵۵	۱۷۳/۳۸	۱۷۳/۱۷	۱۹۹/۱۵	۱۹۸/۸۴	۱۹۸/۴۲
بسامد مود ۹	۱۵۷/۵۸	۱۵۶/۸۶	۱۵۵/۷۵	۱۸۳/۵۱	۱۸۲/۷۶	۱۸۱/۲۶	۲۱۰/۳۱	۲۰۹/۶۰	۲۰۸/۶۲
بسامد مود ۱۰	۱۵۹/۹۶	۱۵۸/۸۶	۱۵۷/۶۱	۱۹۴/۳۷	۱۹۳/۵۴	۱۸۲/۳۶	۲۴۲/۰۲	۲۴۱/۲۳	۲۴۰/۱۳

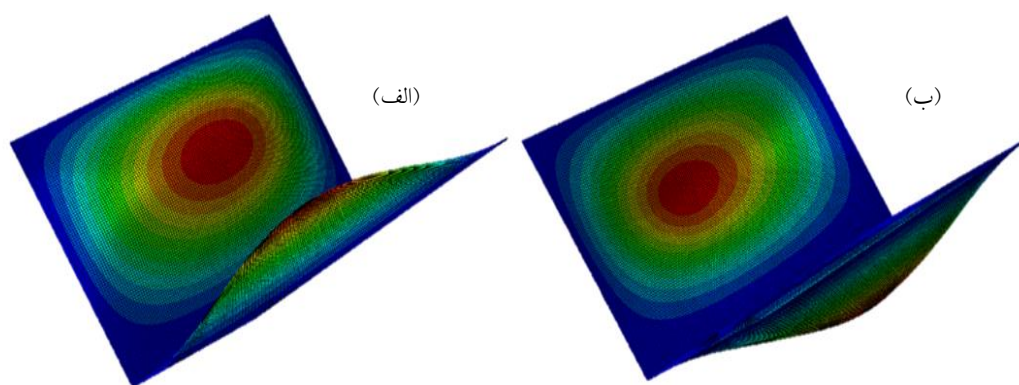


جدول ۱۵- بسامد ورق V شکل ۱/۵ متری دارای خوردگی موضعی با الگوی خوردگی K8

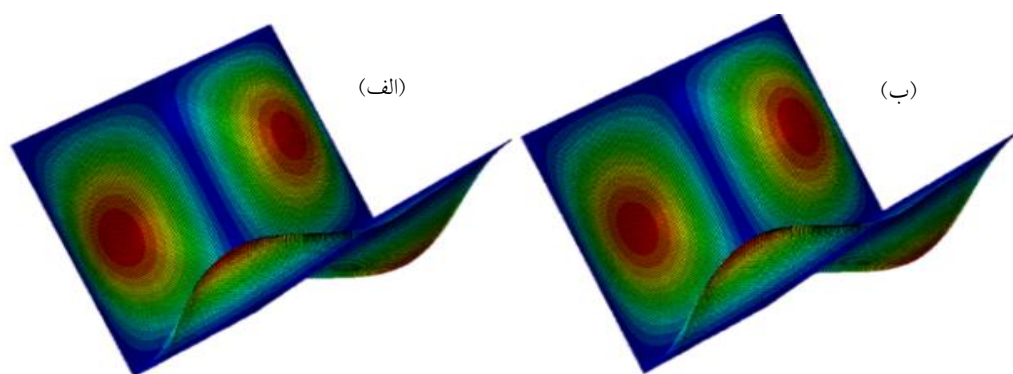
نام مدل بسامد (Hz)	P-A90- SC2.9%- SSFF- K8	P-A90- SC8.9%- SSFF- K8	P-A90- SC15.7%- SSFF- K8	P-A90- SC2.9%- CCFF- K8	P-A90- SC8.9%- CCFF- K8	P-A90- SC15.7%- CCFF- K8	P-A90- SC2.9%- SSSS-K8	P-A90- SC8.9%- SSSS-K8	P-A90- SC15.7%- SSSS-K8
بسامد مود ۱	۳۵/۸۶	۳۵/۶۸	۳۵/۴۳	۵۶/۵۶	۵۶/۴۳	۵۶/۲۴	۵۲/۳۸	۵۲/۰۵	۵۱/۵۴
بسامد مود ۲	۴۸/۰۶	۴۸/۰۲	۴۷/۹۷	۶۶/۲۱	۶۶/۱۷	۶۶/۱۰	۶۹/۶۷	۶۹/۴۰	۶۸/۹۶
بسامد مود ۳	۵۶/۵۳	۵۶/۴۰	۵۶/۲۲	۸۲/۳۴	۸۲/۲۳	۸۲/۰۶	۱۰۱/۲۷	۱۰۱/۰۰	۱۰۰/۶۴
بسامد مود ۴	۶۶/۱۶	۶۶/۱۱	۶۶/۰۵	۸۹/۸۴	۸۹/۷۰	۸۹/۶۳	۱۳۳/۳۴	۱۱۳/۰۷	۱۱۲/۶۵
بسامد مود ۵	۸۴/۲۵	۸۳/۸۳	۸۳/۱۸	۹۸/۲۲	۹۷/۸۳	۹۷/۲۱	۱۶۲/۲۱	۱۶۱/۶۲	۱۶۰/۶۷
بسامد مود ۶	۹۸/۱۵	۹۷/۷۶	۹۷/۱۴	۱۱۶/۶۱	۱۱۶/۲۲	۱۱۵/۵۹	۱۸۱/۹۴	۱۸۱/۱۴	۱۷۹/۹۰
بسامد مود ۷	۱۴۵/۰۹	۱۴۴/۷۹	۱۴۴/۳۰	۱۵۹/۰۲	۱۵۸/۴۶	۱۵۷/۶۱	۱۹۰/۵۰	۱۸۹/۶۹	۱۸۸/۴۴
بسامد مود ۸	۱۴۸/۵۹	۱۴۸/۰۵	۱۴۷/۲۳	۱۷۲/۴۵	۱۷۱/۸۶	۱۷۰/۹۵	۱۹۸/۴۸	۱۹۷/۷۱	۱۹۶/۴۷
بسامد مود ۹	۱۵۸/۱۷	۱۵۷/۹۴	۱۵۷/۵۲	۱۸۳/۷۶	۱۸۳/۳۶	۱۸۲/۷۲	۲۱۰/۳۱	۲۰۹/۶۰	۲۰۸/۶۵
بسامد مود ۱۰	۱۵۸/۹۴	۱۵۸/۳۸	۱۵۷/۶۵	۱۹۵/۲۴	۱۹۵/۰۲	۱۹۴/۷۳	۲۴۲/۰۲	۲۴۱/۲۶	۲۴۰/۲۲



شکل ۸- تأثیر خوردگی موضعی در مقدار بسامد مود اول ورق V شکل با الگوی خوردگی K8 در شرایط مرزی (SSSS)



شکل ۹- نمایش مود دوم ورق‌های V شکل با زاویه داخلی ۹۰ درجه، شرایط مرزی (SSSS) و شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪
الف) الگوی خوردگی K2 و ب) الگوی خوردگی K8



شکل ۱۰- نمایش مود سوم ورق‌های V شکل با زاویه داخلی ۹۰ درجه، شرایط مرزی (SSSS) و شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪
الف) الگوی خوردگی K2 و ب) الگوی خوردگی K8

۸- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از بررسی تأثیر ویژگی‌های هندسی، مکانیکی و شرایط مرزی گوناگون بر بسامد و شکل مود ورق‌های V شکل عبارت‌اند از:

الف- از بین تمامی مدل‌های ساخته شده از ورق‌های V شکل با طول‌های ۱، ۱/۵ و ۲ متر، بیش‌ترین بسامد مود اول مربوط به زاویه داخلی ۴۵ درجه در شرایط مرزی (SSSS) می‌باشد و کم‌ترین بسامد مود اول برای تمامی طول‌های یادشده با زاویه داخلی ۴۵ درجه و شرایط مرزی (SSFF) رخ می‌دهد.

ب- از مقایسه شکل مودهای مختلف ورق‌های V شکل مشخص می‌شود که در بعضی مودها به علت شرایط مرزی و تغییر دیگر شرایط هندسی، جهت نیم‌موج‌های سینوسی تغییر می‌یابد اما تعداد نیم‌موج‌های سینوسی ثابت باقی می‌ماند.

نتایج به دست آمده از بررسی خوردگی یکنواخت با شدت‌های ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ بر بسامد و شکل مود ورق‌های V شکل به شرح زیر هستند:

پ- در اثر افزایش شدت خوردگی یکنواخت از ۲/۹۰٪ به ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ در شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) بسامد ورق‌های V شکل کاهش می‌یابد. برای مثال، برای ورقی به طول و عرض ۱ متر، ضخامت ۱۰ میلی‌متر، زاویه داخلی ۴۵ درجه و شرایط مرزی (SSSS) بسامد برای شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ به ترتیب ۴۵/۲۱، ۴۲/۵۴ و ۳۸/۸۶ (هرتر) شده است.

ت- در ورق‌های V شکل با شرایط مرزی (SSFF) و (SSSS) با زاویه‌های داخلی ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه، با افزایش شدت خوردگی یکنواخت، تعداد نیم‌موج‌های سینوسی در راستاهای محوری و

محیطی ثابت باقی می‌ماند، در شرایط مرزی (SSFF) با زاویه داخلی ۴۵ درجه با شدت خوردگی ۲/۹۰٪ و در زاویه داخلی ۹۰ درجه با شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪ و ۸/۹۰٪ همچنین در شرایط مرزی (SSSS) در زاویه داخلی ۱۳۵ درجه برای شدت خوردگی ۸/۹۰٪ جهت نیم‌موج‌های سینوسی تغییر یافته است. نتایج به دست آمده از بررسی خوردگی نواری با الگوهای I1، I2، I3، I4 و I5 دارای شدت‌های خوردگی ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ بر بسامد و شکل مود ورق‌های V شکل به طول ۱/۵ متر، عرض ۱ متر، ضخامت ۱۵ میلی‌متر و با زاویه داخلی ۹۰ درجه به شرح زیر هستند:

ث- با بررسی مدل‌های خوردگی نواری در راستای طولی ورق، مشخص می‌شود که الگوی خوردگی I2 (وسط در راستای طول ورق) در شرایط مرزی (SSFF) با شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪ بیش‌ترین تأثیر را در کاهش بسامد به مقدار ۱۰/۴۴٪ دارد و کم‌ترین تأثیر در بسامد مود اول مربوط به الگوهای خوردگی I1 و I3 در شرایط مرزی (SSFF) با شدت خوردگی ۲/۹۰٪ با مقدار کاهش ۰/۴۴٪ می‌باشد.

ج- در الگوی خوردگی I4 (گوشه در راستای عرض ورق) در شرایط مرزی (CCFF) با شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪ بیش‌ترین تأثیر را در کاهش بسامد مود اول ورق به مقدار ۵/۹۷٪ دارد و کم‌ترین تأثیر در بسامد مربوط به الگوی خوردگی I5 (وسط در راستای عرض ورق) در شرایط مرزی (SSFF) با شدت خوردگی ۲/۹۰٪ با مقدار کاهش ۰/۸۵٪ می‌باشد.

چ- با تغییر محل خوردگی نواری، شکل مودهای ورق V شکل تغییر پیدا می‌کند و همچنین این موضوع باعث تغییر جهت نیم‌موج‌های سینوسی در راستای طول و محیط ورق می‌شود.

نتایج به دست آمده از بررسی خوردگی موضعی با الگوهای K1، K2، K3، K4، K5، K6، K7، K8 و K9 دارای شدت‌های ۲/۹۰٪، ۸/۹۰٪ و ۱۵/۷۰٪ بر بسامد و شکل مود ورق V شکل به طول ۱/۵ متر، عرض ۱ متر، ضخامت ۱۵ میلی‌متر و با زاویه داخلی ۹۰ درجه به شرح زیر هستند:

ح- در ورق‌های V شکل دارای خوردگی موضعی با الگوهای K1 تا K9 در شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) بسامد ۱۰ مود اول ورق‌های V شکل کاهش می‌یابد.

خ- در بین تمامی الگوهای خوردگی موضعی، الگوی K8 بیش‌ترین تأثیر را در شرایط مرزی (SSSS) با شدت خوردگی ۱۵/۷۰٪ در کاهش بسامد مود اول ورق به مقدار ۲/۵۲٪ دارد. در این الگو بیش‌ترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSSS)، (SSFF) و (CCFF) اتفاق می‌افتد.

د- در حالت خوردگی موضعی، الگوی K2 کم‌ترین تأثیر را در شرایط مرزی (SSSS) با شدت خوردگی ۲/۹۰٪ در کاهش بسامد مود اول ورق به مقدار ۰/۱۳٪ دارد. در این الگو بیش‌ترین تأثیر کاهش بسامد به ترتیب در شرایط مرزی (SSFF)، (CCFF) و (SSSS) اتفاق می‌افتد.

ذ- با توجه به تمامی الگوهای خوردگی موضعی که در موقعیت‌های مکانی گوناگونی قرار دارند و شرایط مرزی، شدت خوردگی و مساحت خوردگی یکسانی دارند، مشخص شد که با تغییر موقعیت خوردگی در بعضی از مودها جهت نیم‌موج‌های سینوسی تغییر پیدا می‌کند ولی تعداد نیم‌موج‌های طولی و محیطی ثابت باقی می‌ماند.

ر- پژوهش حاضر می‌تواند علاوه بر اهداف پژوهشی، کاربردهای صنعتی نیز داشته باشد. با در نظر گرفتن ساختار داخلی سازه از جمله طول، ضخامت، زاویه داخلی، شرایط مرزی و نرخ خوردگی با توجه به شرایط خاص محل اجرای پروژه، می‌توان ویژگی‌های دینامیکی سازه از جمله بسامد طبیعی آن را شناسایی نمود. این اطلاعات امکان ارزیابی میزان جابه‌جایی مجاز، عمر مفید سازه و ظرفیت آن در تحمل نیروهای وارده را فراهم می‌سازد. از این‌رو، یافته‌های مقاله نه تنها به لحاظ نظری دارای اهمیت هستند، بلکه می‌توانند در طراحی و تحلیل سازه‌های واقعی در صنعت نیز مورد استفاده قرار گیرند.

- [1] Leissa, A.W. (1973), "The Free Vibration of Rectangular Plates", Journal of Sound and Vibration, Vol. 31, No. 3, pp. 257-293.
- [2] Sathyamoorthy, M., and Efstathiades, G.J. (1982), "Natural Frequencies of Rectangular Plates", Journal of Sound and Vibration, Vol. 61, No. 4, pp. 440-413.
- [3] Irie, T., Yamada, G., and Narita, Y. (1978), "Free Vibration of Cross-Shaped, I-Shaped and L-Shaped Plates Clamped at All Edges", Journal of Sound and Vibration, Vol. 61, No. 4, pp. 571-583.
- [4] Irie, T., Yamada, G., and Kobayashi, Y. (1984), "Free Vibration of a Cantilever Folded Plate", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 76, No. 6, pp. 1743-1748.
- [5] Yoseph, P.B., and Hersckovitz, I. (1989), "Analysis of Folded Plate Structures", Thin-Walled Structures, Vol. 7, pp. 139-158.
- [6] Du, J., Li, W.L., Liu, Z., Yang, T., and Jin, G. (2011), "Free Vibration of Two Elastically Coupled Rectangular Plates with Uniform Elastic Boundary Restraints", Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, No. 4, pp. 788-804.
- [7] Xie, K., Xu, K., Dong, W., and Chen, M., (2023), "An analytic method for vibration analysis of non-uniformly coupled L-shaped plates with arbitrary boundary conditions", Thin-Walled Structures, 186, pp.110639.
- [8] Trajkovski, J., Kunc, R., and Prebil, I. (2016), "Blast Response of Centrally and Eccentrically Loaded Flat-, U-, and V-Shaped Armored Plates: Comparative Study", Shock Waves, Vol. 27, No. 4, pp. 583-591.
- [9] Peykani, A., Khosravi, M., Saeimi-Sadigh, M.A., and Mahmoodi-Kaleibar, M. (2013), "Dynamic Analysis and Design of V-Shape Plates under Blast Loading", Journal of Vibroengineering, Vol. 15, No. 2, pp. 971-978.
- [10] Kong, Z., Jin, Y., Golder, M.S.H., Hong, S., Wang, Y., Vu, Q.Y., Truong, V.H., Tao, Q., and Kim, S.E. (2022), "Experimental and Theoretical Study on Mechanical Properties of Mild Steel after Corrosion", Ocean Engineering, Vol. 246, pp. 110652.