

بررسی تطابق نتایج روش‌های مختلف برای پایداری دینامیکی ورق با توزیع‌های متفاوت نانولوله‌ها تحت شرایط مختلف

یوسف ملک زاده^۱، عبدالرسول رنجبران^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز، واحد بین المللی.

^۲ استادیار دانشگاه شیراز، ایران.

نام نویسنده مسئول:

یوسف ملک زاده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و مادی و همچنین، ضریب سختی فنر پیچشی بر تطابق نمودار اندرکنش پایداری دینامیکی بر اساس معادله پیشنهادی و نتایج بدست آمده برای پایداری دینامیکی ورق مرکب تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با شرایط تکیه‌گاهی الاستیک سخت می باشد. بدین منظور در مطالعه حاضر اثرات نسبت ضخامت به طول، نسبت طول به عرض، زاویه مورب ورق، کسر حجمی و آرایش مختلف نانولوله‌های کربنی در جهت ضخامت ورق بر تغییرات فرکانس طبیعی ورق و همچنین آستانه ناپایداری دینامیکی ورق بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش درصد کمی نانولوله کربنی می تواند آستانه ناپایداری ورق را به طور قابل ملاحظه ای افزایش دهد. همچنین، مشاهده شد که ورق های مرکب با توزیع X شکل نانولوله ها در جهت ضخامت دارای سفتی بیشتری نسبت به ورق های مرکب با دیگر توزیع ها می باشد. علاوه براین ها، ملاحظه گردید که افزایش ضرایب سفتی فنرهای پیچشی در مرزهای ورق باعث افزایش آستانه ناپایداری ورق می شود. در ادامه، نتایج با نتایج یک رابطه پیشنهادی برای تعیین آستانه ناپایداری مقایسه و صحت رابطه فوق نیز تایید گردید.

واژگان کلیدی: پایداری دینامیکی، نانو لوله کربنی، آستانه ناپایداری، ورق مرکب.

مقدمه

پایداری دینامیکی یکی از مباحث مهم در رشته های علوم و مهندسی می باشد. در این مبحث، مساله پایداری و ارتعاش آزاد سازه به طور همزمان در نظر گرفته می شود و اثر متقابل نیرو و فرکانس روی یکدیگر مورد بررسی قرار می گیرد. انجام محاسبات پایداری دینامیکی به روش سنتی کاری دشوار، وقت گیر و خسته کننده است. همچنین محققان [۱] نشان داده اند که انجام محاسبات پایداری دینامیکی را می توان به صورت ترکیب ساده ای از پایداری و ارتعاش آزاد بیان کرد. بر اساس این روش، کافی است که پایداری سازه و ارتعاش آزاد آن به تنهایی انجام شده و نتایج به کمک رابطه پیشنهادی با هم ترکیب شده و به پایداری دینامیکی منجر شود. با توجه به اهمیت ورق های مرکب تقویت شده با نانو لوله های کربنی در صنعت، در این مطالعه به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و مادی و همچنین، ضریب سختی فبر پیچشی بر تطابق نمودار اندرکنش پایداری دینامیکی بر اساس معادله پیشنهادی و نتایج بدست آمده برای پایداری دینامیکی ورق مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی با شرایط تکیه گاهی الاستیک سخت پرداخته شده است.

پوسته و پلیت: بطور کلی اجزا سازه ای که یک بعدشان در قیاس با دیگر ابعادشان کوچک است و توانایی تحمل بارهای عرضی را دارند، پوسته و پلیت می نامند. در این، اگر اجزا سازه ای انحنای اولیه (بدون اعمال بار خارجی) نداشته باشند، پلیت نامیده می شوند. کاربرد پلیت ها در صنعت نسبت به پوسته ها بسیار بیشتر است چرا که هزینه تولید پوسته ها بسیار بیشتر از هزینه تولید پلیت ها می باشد. همچنین پلیت ها به عنوان اجزای سازه ای، کاربردهای فراوانی در مهندسی مکانیک و عمران دارند که از آن جمله می توان به کاربرد آنها در ساختمان ها، سازه های مهندسی، سازه های پوسته ای، راکتورها، مخازن، صنایع نظامی، سازه های فضایی و غیره اشاره کرد.

نانو لوله های کربنی: پیشرفت های فراوان در پردازش های رایانه با قدرت و سرعت بالا، محققان را به استفاده از مواد جدید برای اجزای سازه ها که دارای خواص مکانیکی و حرارتی بالا همراه با وزن کم باشند، تشویق نموده است. مواد مرکب سنتی، یا مواد هدفمند مدرج ساخته شده از ترکیب فلز و سرامیک یا ترکیب مواد دیگر در سال های اخیر کاربرد فراوانی داشته است. غالباً مواد مرکب سنتی برای بهبود خواص مکانیکی خود نیاز به درصد بالایی از الیاف معدنی دارند (در حدود ۱۰ درصد وزن آن ها). با کشف نانولوله ها در سال ۱۹۹۱ مشخص شد نانولوله های کربنی خواص مکانیکی و الکتریکی بهتری نسبت به الیاف کربنی دارند. لذا در سال های اخیر از نانولوله های کربنی بجای الیاف کربنی با اندازه میکرو در جهت دستیابی به مواد با چگالی کمتر و مقاومت و مدول الاستیسته بیشتر، استفاده های بسیاری شده است. از آنجایی که این مواد مرکب پیشرفته فقط شامل درصد کمی از نانو لوله ها می باشند (۵-۲ درصد وزنی)، برای استفاده موثرتر از این مواد تقویت کننده، شن [۲] در سال ۲۰۰۹ توزیع هدفمند مدرج آنها را پیشنهاد داد و نشان داد که رفتار غیر خطی خمشی ورق های مرکب تقویت شده با در نظر گرفتن توزیع هدفمند مدرج نانو لوله ها بطور قابل توجهی بهبود پیدا می کند.

تئوری های سه بعدی و دو بعدی: در مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی ورق ها و پوسته ها تحت بارهای مکانیکی و ترمو مکانیکی از تئوری های مختلفی استفاده می شود. بطور کلی می توان این تئوری ها را به دو دسته تئوری سه بعدی الاستیسیته و تئورهای دوبعدی تقسیم بندی نمود. تئوری سه بعدی الاستیسیته یک تئوری دقیق است و در این تئوری کرنش های برشی عرضی و همچنین کرنش عمودی در جهت ضخامت ورق را بدون هیچ پیش فرضی برای نحوه تغییرات آنها در نظر می گیرد. در نتیجه معادلات دارای کمترین فرضیات بوده ولی حل تحلیلی معادلات این تئوری بجز در حالات ساده دشوار یا امکان پذیر نیست. بنابراین محققان برای کاهش حجم محاسبات و امکان دسترسی به جواب تحلیلی، تئوری ها دو بعدی را پیشنهاد داده اند. این تئوری ها براساس نسبت ضخامت به کوچکترین بعد درون صفحه ای سازه به چند دسته تئوری کلاسیک، تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، تئوری برشی مرتبه بالا و غیره تقسیم می شوند. تئوری کلاسیک ساده ترین و در عین حال پرکاربردترین نوع تئوری دوبعدی است که با صرف نظر کردن از مؤلفه های تغییر شکل برشی و کرنش عمود بر صفحه بدست می آید و برای سازه های نازک (سازه هایی که نسبت ضخامت به کوچکترین بعد درون صفحه ای آن ها از ۰/۰۵ کمتر است) مورد استفاده قرار می گیرد [۳]. هنگامیکه این نسبت ضخامت بیش از ۰/۰۵ باشد، فرض نادیده گرفتن اثرات تغییر شکل های برشی در جهت ضخامت صحیح نمی باشد. برای اصلاح تئوری کلاسیک، در تحلیل سازه های نسبتاً ضخیم، تئوری های مختلفی بر اساس در نظر گرفتن

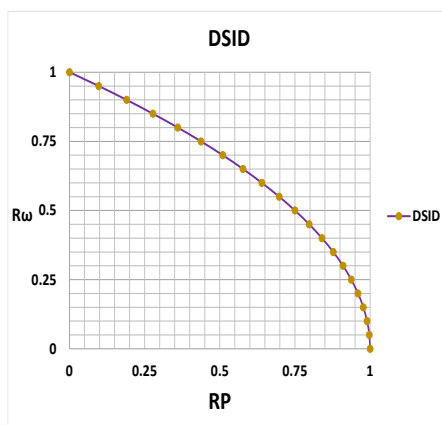
پیش فرض هایی برای تغییرات جابجایی ها بر حسب متغیرهای مکانی در جهت ضخامت شده است. در این تئوری ها، جابجایی های درون صفحه ای نقاط ورق به صورت تابعی معلوم از متغیر مادی در راستای ضخامت (مانند توابع چندجمله ای، توابع هندسی و غیره) با ضرائب نامشخص فرض می شود. یکی از ساده ترین تئوری های دو بعدی که اثرات تغییر شکل های برشی عرضی را در نظر می گیرد، تئوری برشی مرتبه اول است. در این تئوری، جابه جایی های درون صفحه ای به صورت توابع خطی از متغیر مکانی در جهت ضخامت در نظر گرفته می شود [۴]. برای بررسی رفتار کلی سازه ها مانند بدست آوردن جابجایی های عرضی، فرکانس های ارتعاشی، بار بحرانی کمانش، نیروها و گشتاورهای منتجه تئوری دو بعدی مناسب بوده و دارای دقت کافی می باشند و علاوه بر آن حجم محاسبات را به شدت کاهش می دهند. اما این تئوری ها برای ارائه دقیق توزیع تنش در جهت ضخامت و همچنین زمانی که صفحات دارای تمرکز تنش ناشی از اعمال بار متمرکز هستند و یا برای بررسی دقیق رفتار سازه مناسب نمی باشند. در چنین حالتی به دلیل توانمندی تئوری سه بعدی الاستیسته در تجزیه و تحلیل سازه با شرایط تکیه گاهی دلخواه، انواع بارگذاری و هر نوع شرایط هندسی از این تئوری می بایست استفاده شود.

فرم کلی معادلات پایداری دینامیکی:

با توجه به اصول پایداری دینامیکی، معادلات مرتبط با پایداری دینامیکی ستون و همچنین فرم بسته جواب مسئله پایداری دینامیکی ستون، فرم کلی معادلات پایداری دینامیکی در معادله شماره ۱. بیان شده است. شکل کلی معادله نیز در شکل شماره ۱. نشان داده شده است [۵].

$$R_{\omega}^2 + R_p = 1$$

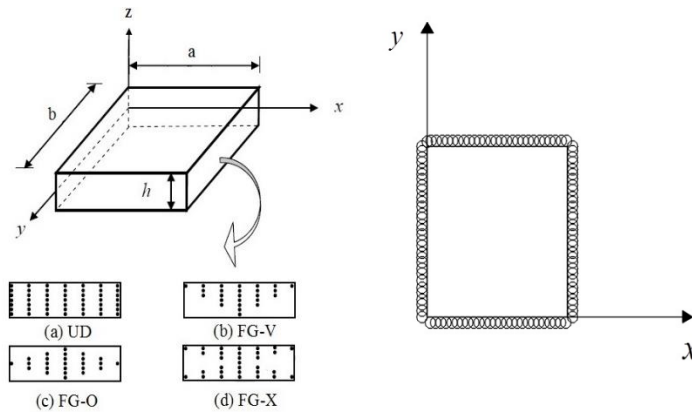
معادله شماره ۱.



شکل شماره ۱. نمودار اندرکنش پایداری

شروط اصلی

همچنین در این مطالعه در بررسی نتایج فاز زمینه، ماده مرکب PMMA می باشد. در تمامی نمودارها برای شرط تکیه گاهی از حرکت درون صفحه ای مرزها جلوگیری شده و اصطلاحاً شرط مرزی سخت (غیرقابل حرکت در جهت درون صفحه ای) در نظر گرفته شده است، (شکل (شماره ۲)). در این مطالعه از این جهت تکیه گاه را در فنر در نظر گرفتیم تا تغییرات شرایط مرزی را به خوبی بتوانیم نمایش دهیم. هدف ما از بدست آوردن پایداری حرارتی با شرایط گوناگون می باشد، که در ابتدا نشان دهیم که حجم محاسبات به شیوه سنتی بسیار زیاد بوده و همچنین بسیار وقت گیر و هزینه بر است در صورتی که با فرمول پیشنهادی حجم محاسبات کاهش یافته و محاسبات بدون وابستگی به نوع مواد یا بارگذاری قابل محاسبه می باشد.



شکل شماره ۲- نحوه توزیع نانولوله ها و شرایط تکیه گاهی الاستیک چرخشی

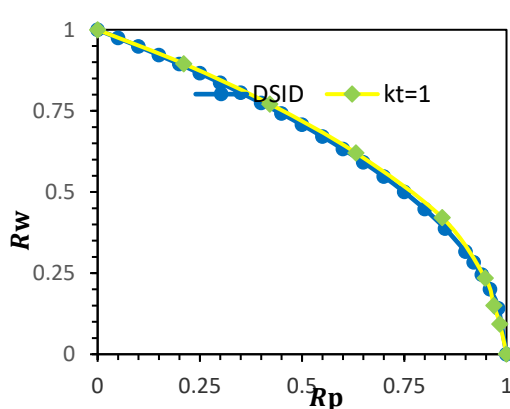
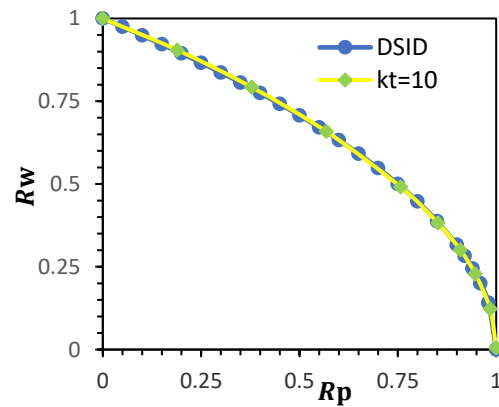
بررسی تطابق نتایج دو روش برای پایداری دینامیکی ورق با توزیع های متفاوت نانولوله ها تحت شرایط

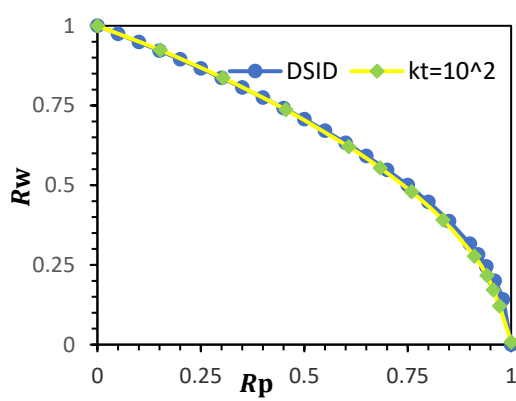
مختلف

در این بخش، تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و مادی و همچنین، ضریب سختی فنر پیچشی بر تطابق نمودار اندرکنش پایداری دینامیکی بر اساس معادله پیشنهادی و نتایج بدست آمده برای پایداری دینامیکی ورق مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی با شرایط تکیه گاهی الاستیک سخت پرداخته شده است.

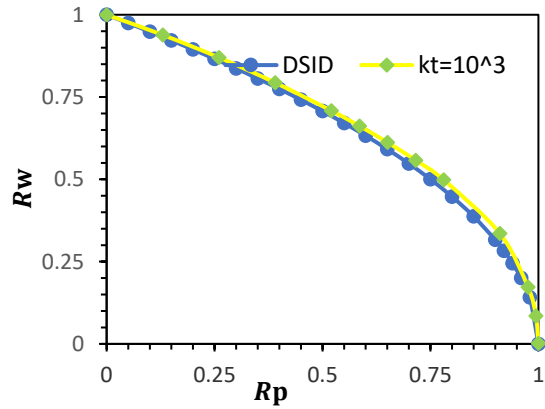
تاثیر ضریب سختی فنر پیچشی: در ابتدا تاثیر ضریب سختی فنر پیچشی K_ϕ برای ورق های مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی برای توزیع های گوناگون نانولوله در جهت ضخامت ورق بررسی شده است. در شکل های شماره ۳- (الف)-(ز) نتایج برای ورق با توزیع یکنواخت نانو لوله های کربنی (UD)، نمایش داده شده است.

در شکل های شماره ۴- (الف)-(ز) تاثیر ضریب سختی فنر پیچشی برای ورق با توزیع ν شکل (FG-V)، که یک توزیع نامتقارن بوده و سبب ایجاد کوپلینگ بین تغییر شکل خمشی و درون صفحه ای می گردد، بر روی انطباق دو منحنی نمایش داده شده است. یعنی در این حالت درآیه های سفتی B_{ij} مخالف صفر هستند.

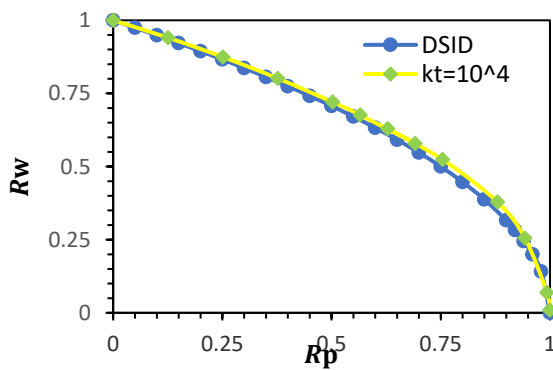
(ب) توزیع یکنواخت ($K_\phi = 10^1$)(الف) توزیع یکنواخت ($K_\phi = 10^0$)



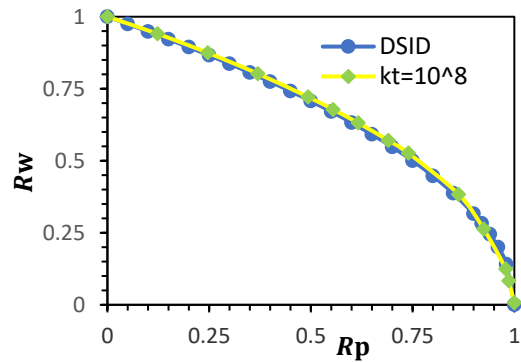
(د) توزیع یکنواخت ($K_\phi = 10^3$)



(ج) توزیع یکنواخت ($K_\phi = 10^2$)



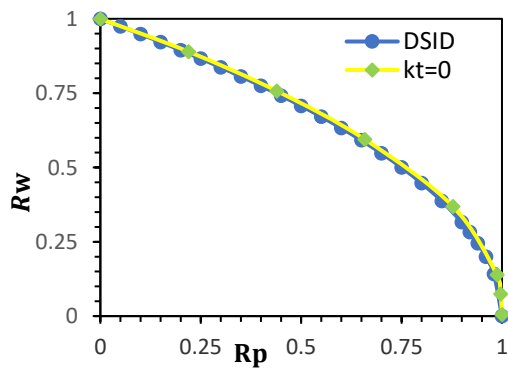
(ز) توزیع یکنواخت ($K_\phi = 10^8$)



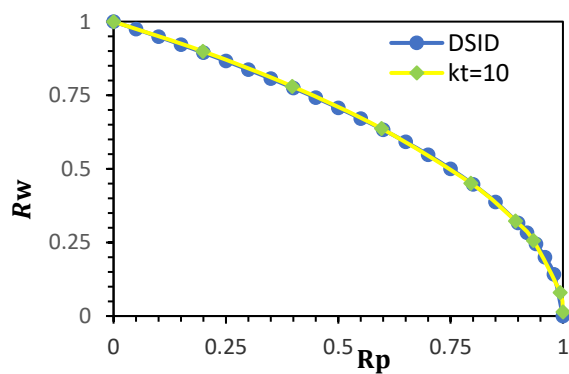
(ه) توزیع یکنواخت ($K_\phi = 10^4$)

شکل شماره ۳- (الف)-(ز) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی

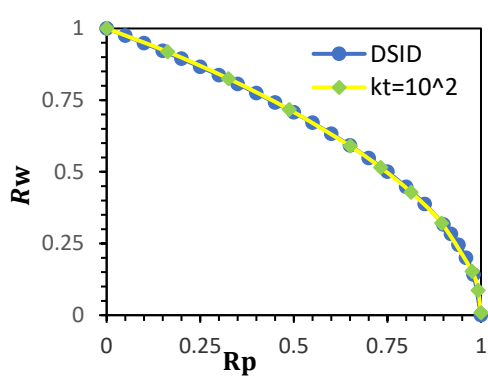
مرکب تقویت شده با توزیع یکنواخت نانولوله های کربنی و مقادیر مختلف K_ϕ .



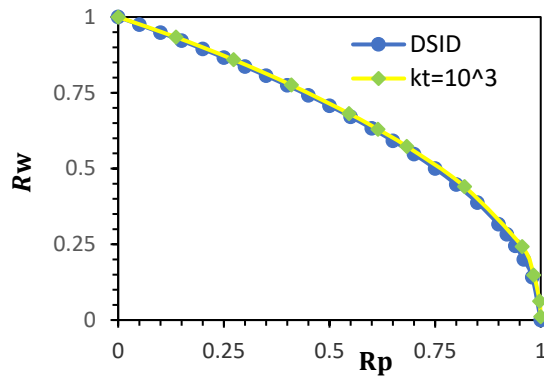
(ب) توزیع v شکل ($K_\phi = 10^1$)



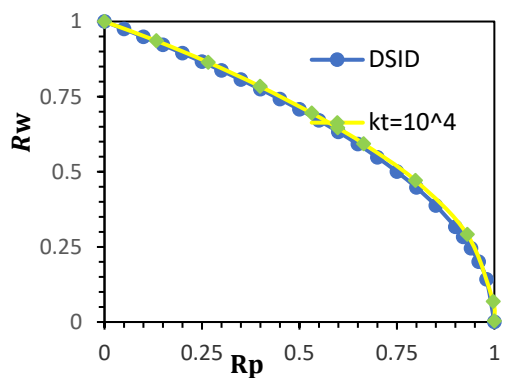
(الف) توزیع v شکل ($K_\phi = 10^0$)



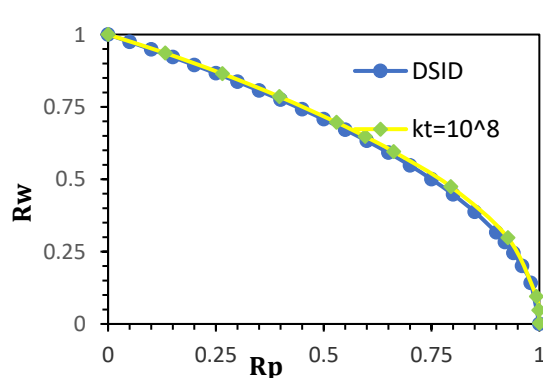
(د) توزیع v شکل ($K_\phi = 10^3$)



(ج) توزیع v شکل ($K_\phi = 10^2$)



(ز) توزیع v شکل ($K_\phi = 10^8$)



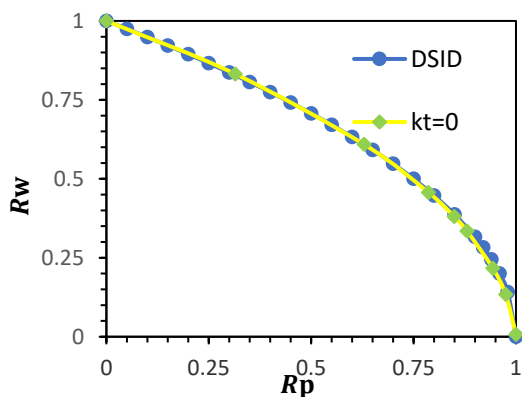
(ه) توزیع v شکل ($K_\phi = 10^4$)

شکل شماره ۴- (الف)-(ز) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی

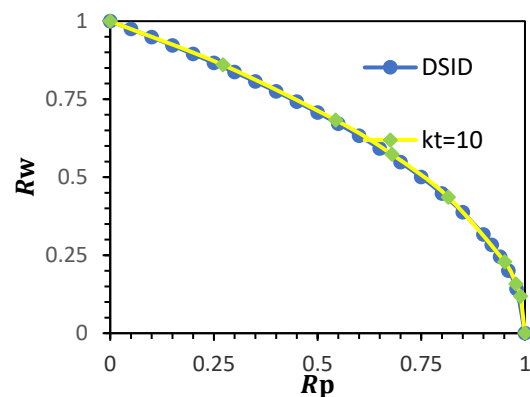
مرکب تقویت شده با توزیع v شکل نانولوله های کربنی و مقادیر مختلف K_ϕ .

مقایسه نتایج دو روش برای ورق مرکب با توزیع O شکل نانولوله های کربنی (FG-O)، که یک توزیع متقارن با کمترین

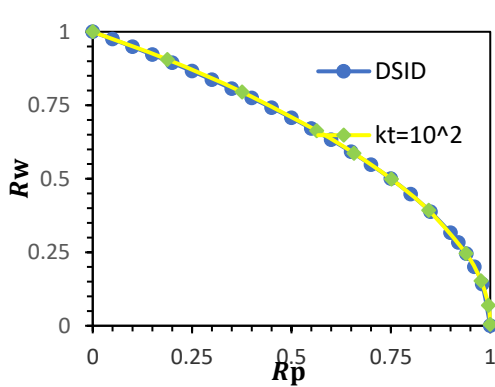
سفتی است، در شکل شماره ۵- (الف)-(ز) انجام شده است.



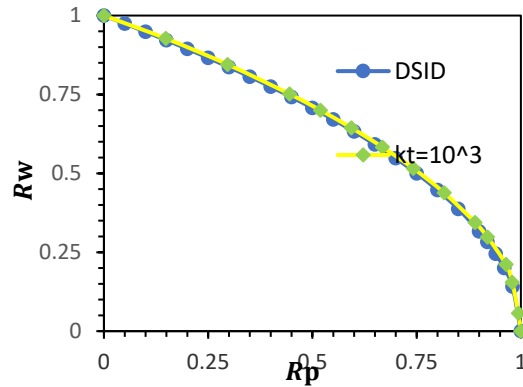
(ب) توزیع o شکل ($K_\phi = 10^1$)



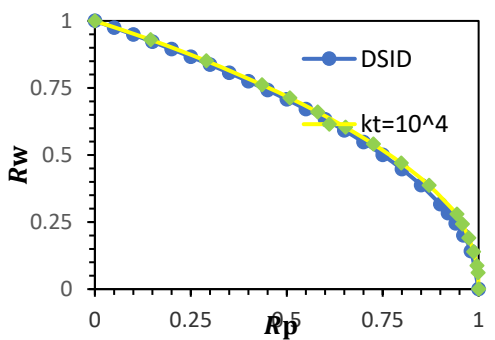
(الف) توزیع o شکل ($K_\phi = 10^0$)



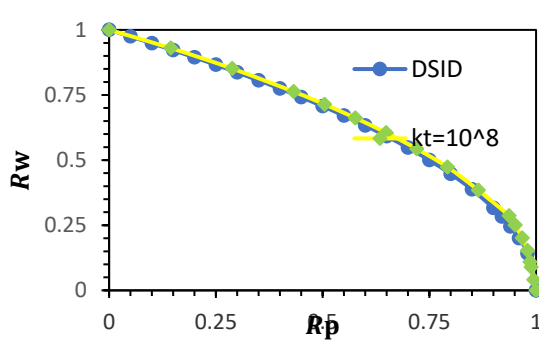
(د) توزیع θ شکل ($K_\varphi = 10^3$)



(ج) توزیع θ شکل ($K_\varphi = 10^2$)



(ز) توزیع θ شکل ($K_\varphi = 10^8$)



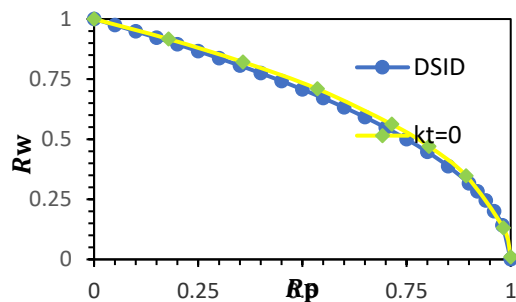
(ه) توزیع θ شکل ($K_\varphi = 10^4$)

شکل شماره ۵- (الف)-(ز) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی

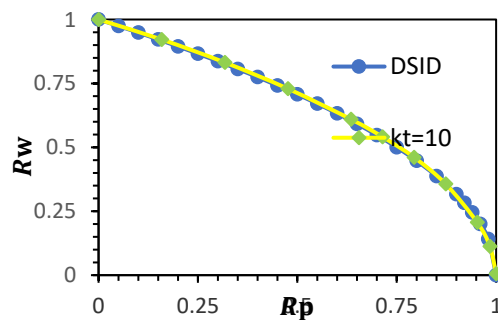
مرکب تقویت شده با توزیع θ شکل نانولوله های کربنی و مقادیر مختلف K_φ .

در شکل شماره ۶- (الف)-(ز) نتایج دو روش برای ورق مرکب با توزیع X شکل نانو لوله های کربنی (FG-X)، که یک توزیع

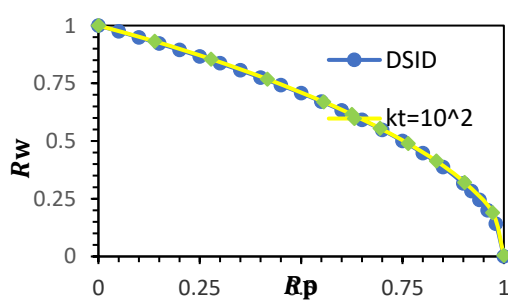
متقارن با بیشترین سفتی است، مقایسه شده است.



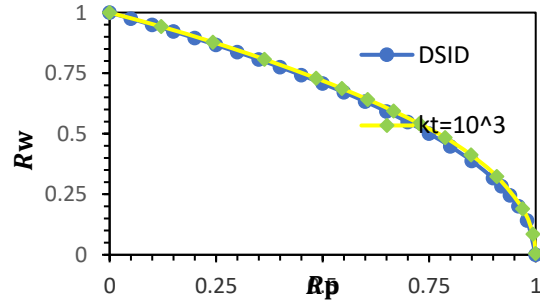
(ب) توزیع x شکل ($K_\varphi = 10^1$)



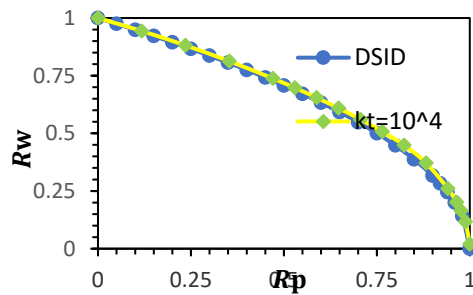
(الف) توزیع x شکل ($K_\varphi = 10^0$)



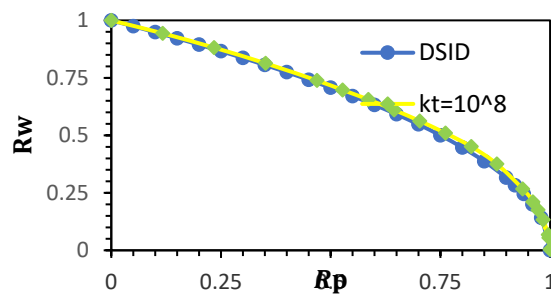
(د) توزیع x شکل ($K_\phi = 10^3$)



(ج) توزیع x شکل ($K_\phi = 10^2$)



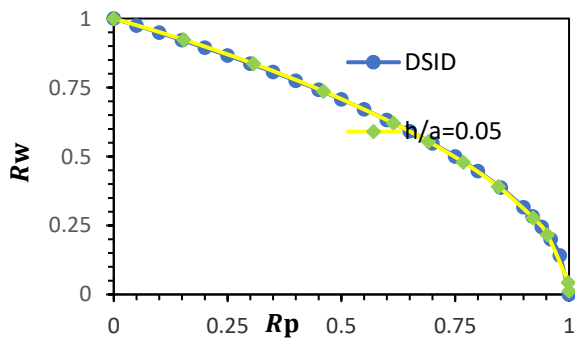
(ز) توزیع x شکل ($K_\phi = 10^8$)



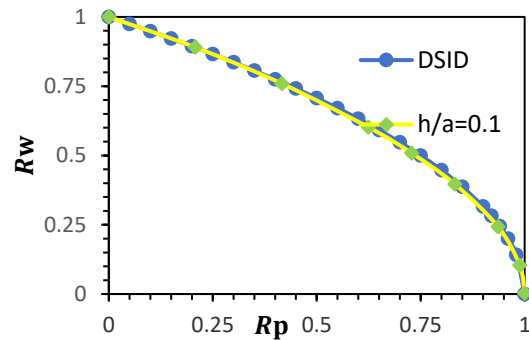
(ه) توزیع x شکل ($K_\phi = 10^4$)

شکل شماره ۶- (الف)-(ز) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی

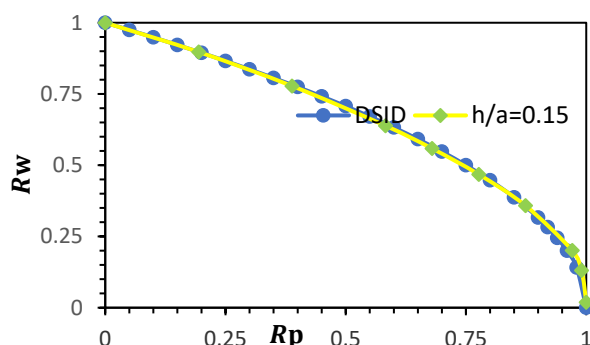
مرکب تقویت شده با توزیع x شکل نانولوله های کربنی و مقادیر مختلف K_ϕ .



(ب) توزیع یکنواخت ($h/a=0.1$)



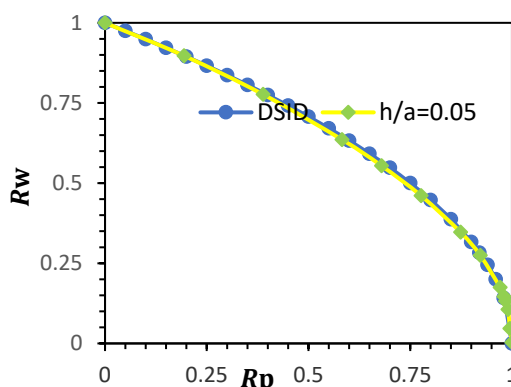
(الف) توزیع یکنواخت ($h/a=0.05$)



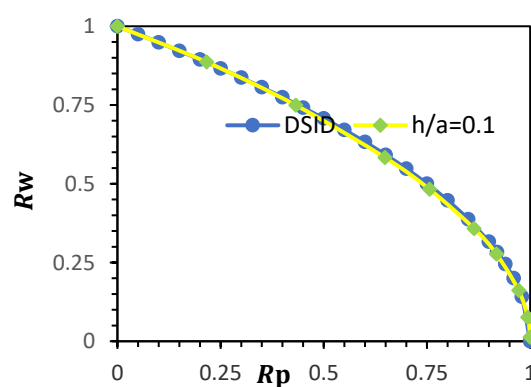
(ج) توزیع یکنواخت ($h/a=0.15$)

شکل شماره ۷- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع یکنواخت نانولوله های کربنی و نسبت ضخامت به عرض های (h/a) مختلف.

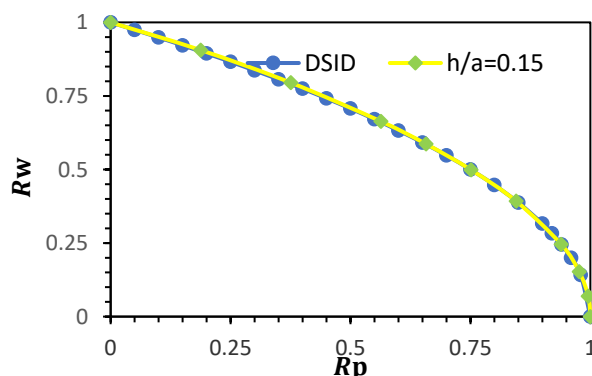
تأثیر ضخامت به عرض های مختلف : تأثیر ضخامت به عرض های مختلف بر روی انطباق نتایج دو روش برای ورق های مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی با توزیع های گوناگون نانولوله در جهت ضخامت ورق در شکل های ۸ الی ۱۰ بررسی شده است. برای هر توزیع نانولوله، نتایج برای سه نسبت مختلف ضخامت به عرض ورق مقایسه شده است که شامل ورق های نسبتاً نازک تا نسبتاً ضخیم می گردد.



(ب) توزیع O شکل ($h/a=0.1$)

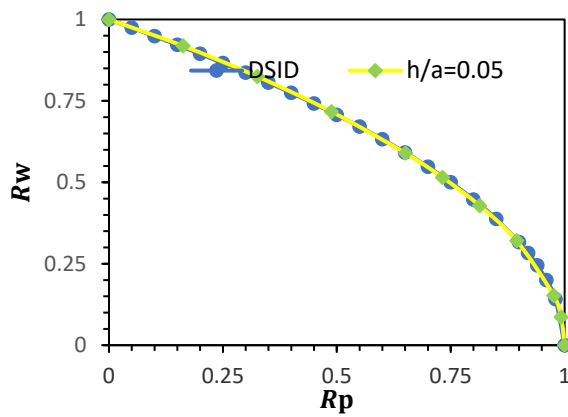


(الف) توزیع O شکل ($h/a=0.05$)

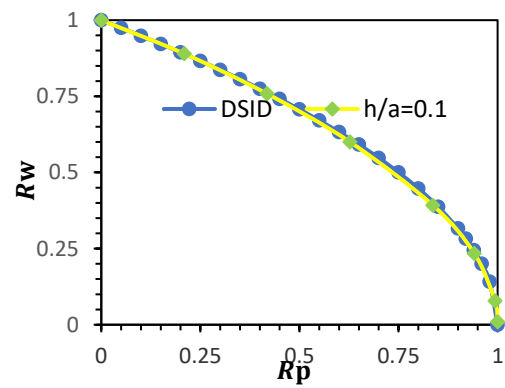


(ج) توزیع O شکل ($h/a=0.15$)

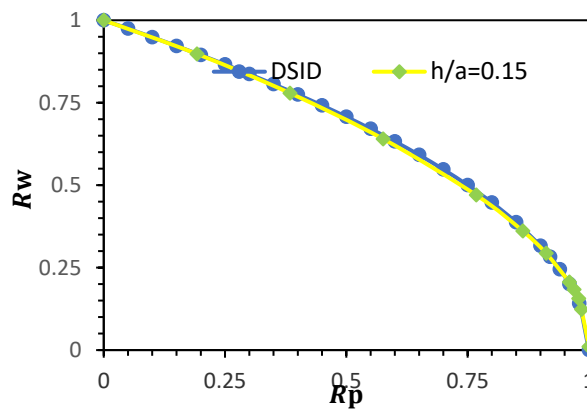
شکل شماره ۸- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع O شکل نانولوله های کربنی و نسبت ضخامت به عرض های مختلف (h/a).



(ب) توزیع v شکل ($h/a=0.1$)

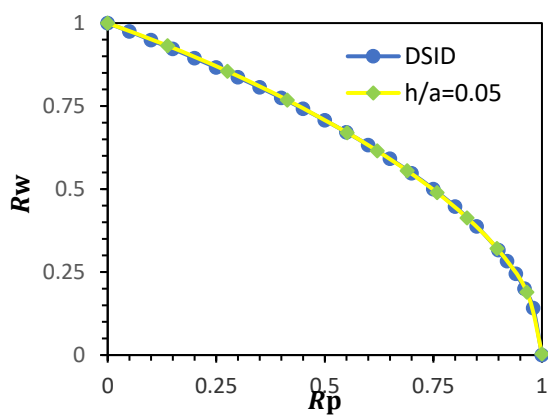


(الف) توزیع v شکل ($h/a=0.05$)

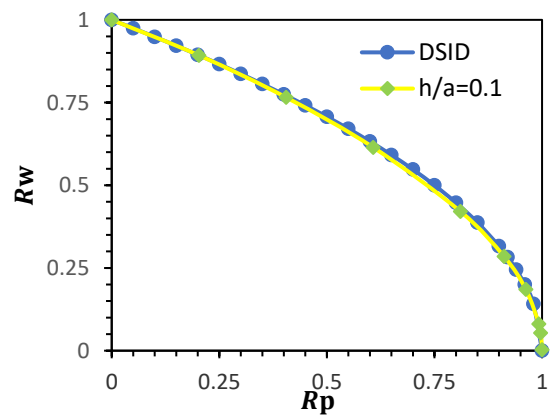


(ج) توزیع v شکل ($h/a=0.15$)

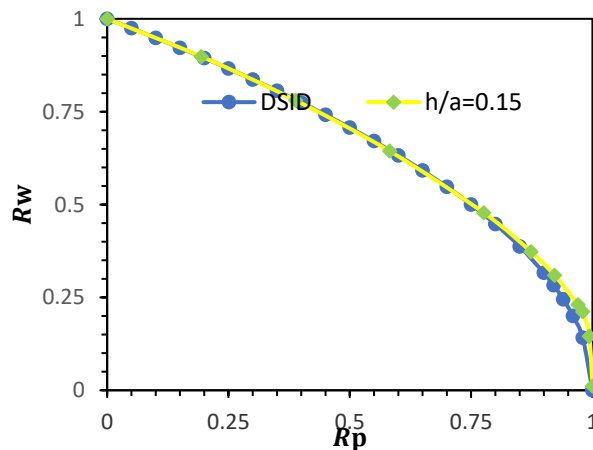
شکل شماره ۹- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع v شکل نانولوله های کربنی و نسبت ضخامت به عرض های مختلف (h/a).



(ب) توزیع x شکل ($h/a=0.1$)



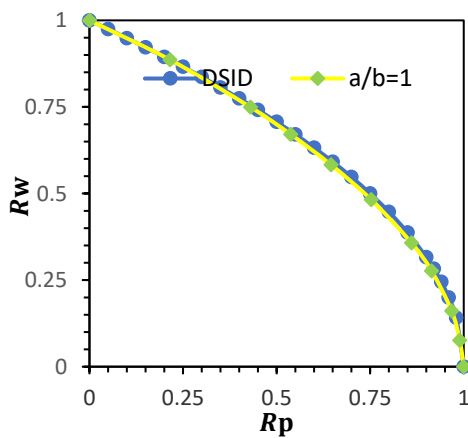
(الف) توزیع x شکل ($h/a=0.05$)



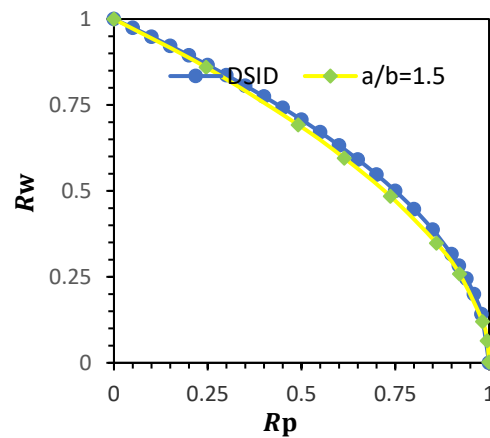
(ج) توزیع x شکل ($h/a = 0.15$)

شکل شماره ۱۰- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع x شکل نانولوله های کربنی و نسبت ضخامت به عرض های مختلف (h/a).

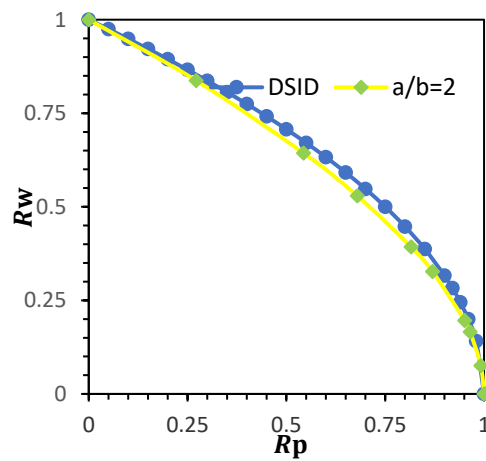
تأثیر طول به عرض های مختلف : تأثیر طول به عرض های مختلف بر روی انطباق نتایج دو روش برای ورق های مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی برای توزیع های مختلف نانولوله در جهت ضخامت ورق در شکل های ۱۱ الی ۱۴ نمایش داده شده است. نتایج برای سه نسبت طول به عرض ورق نشان داده شده است.



(ب) توزیع یکنواخت ($a/b=1.5$)

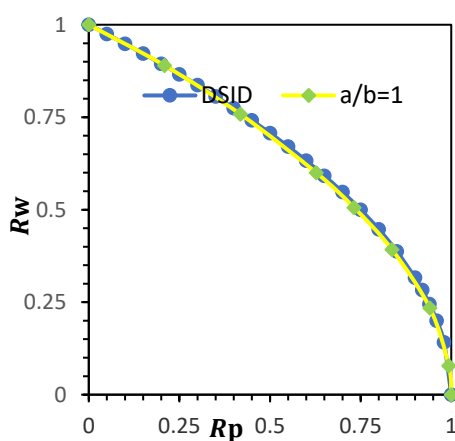


(الف) توزیع یکنواخت ($a/b=1$)

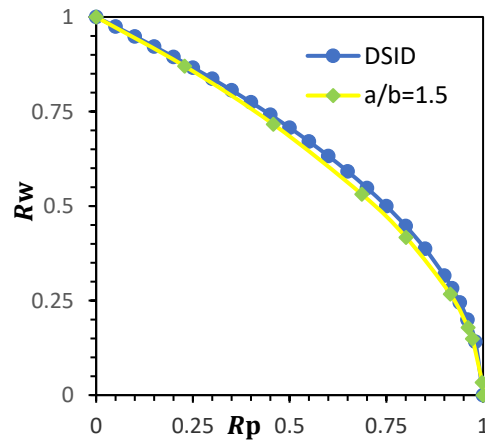


(ج) توزیع یکنواخت ($a/b=2$)

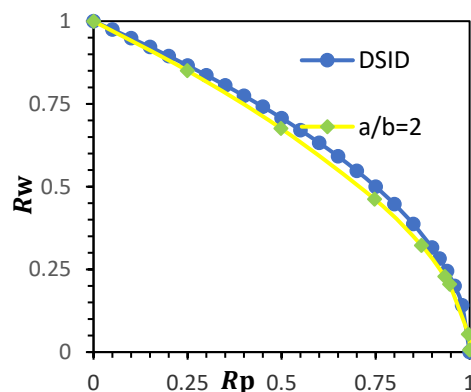
شکل شماره ۱۱- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع یکنواخت نانولوله های کربنی و نسبت طول به عرض های (a/b) مختلف.



(ب) توزیع ۰ شکل ($a/b=1.5$)

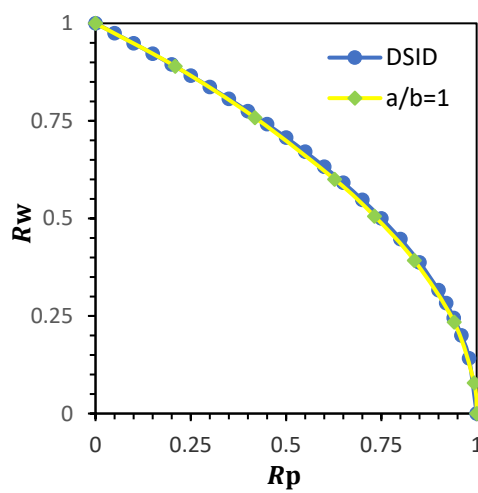


(الف) توزیع ۰ شکل ($a/b=1$)

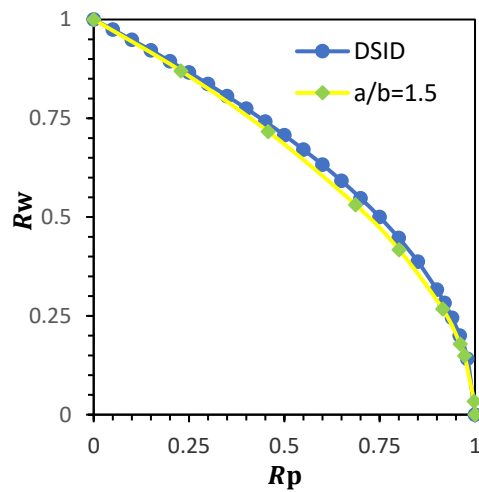


(ج) توزیع ۰ شکل ($a/b=2$)

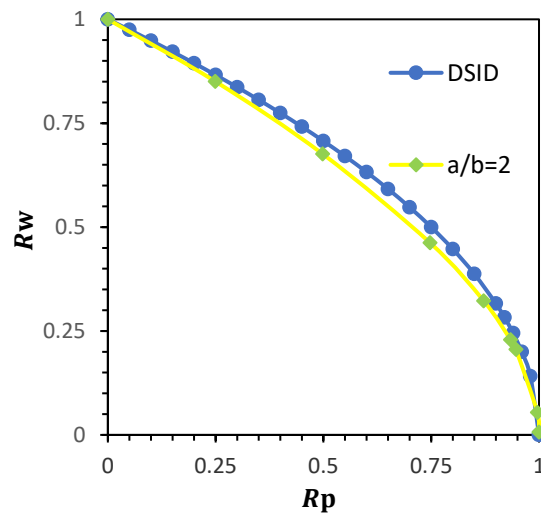
شکل شماره ۱۲- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع ۰ شکل نانولوله های کربنی و نسبت طول به عرض های (a/b) مختلف.



(ب) توزیع v شکل $(a/b=1.5)$

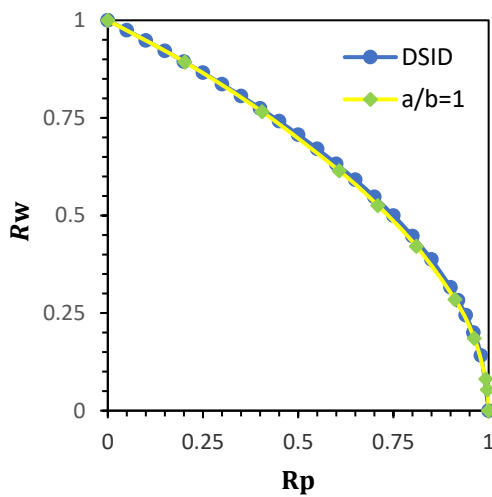


(الف) توزیع v شکل $(a/b=1)$

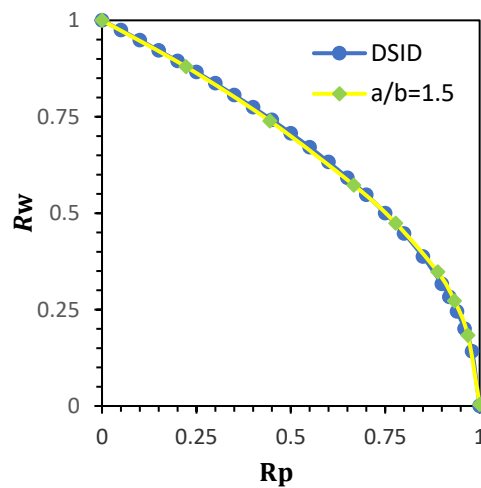


(ج) توزیع v شکل $(a/b=2)$

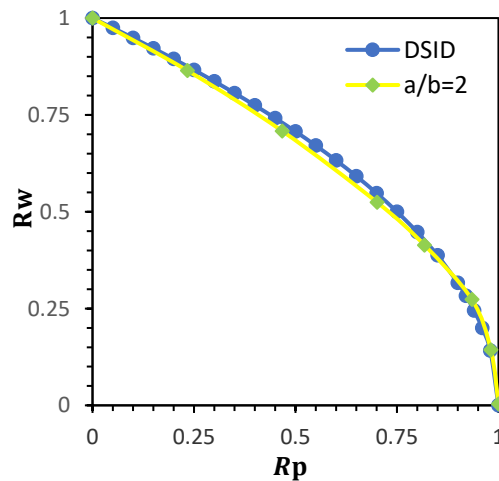
شکل شماره ۱۳- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع v شکل نانولوله های کربنی و نسبت طول به عرض های (a/b) مختلف.



(ب) توزیع x شکل $(a/b=1.5)$



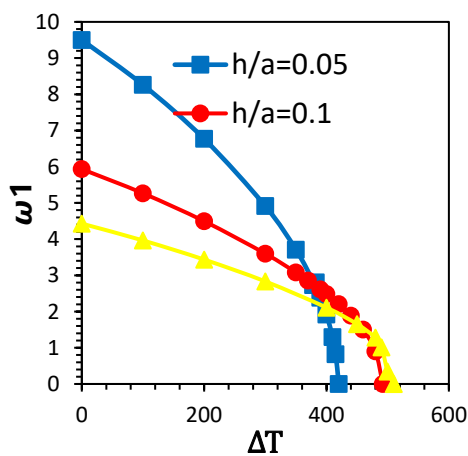
(الف) توزیع x شکل $(a/b=1)$



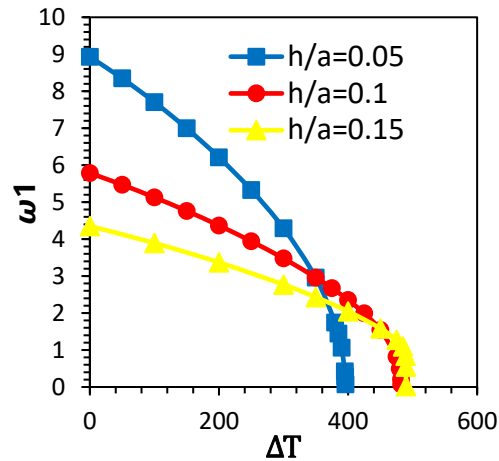
(ج) توزیع x شکل $(a/b=2)$

شکل شماره ۱۴- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مستطیلی مرکب تقویت شده با توزیع x شکل نانولوله های کربنی و نسبت طول به عرض های (a/b) مختلف.

اثر افزایش ضخامت بر روی تغییرات فرکانس ورق: اثر افزایش ضخامت بر روی تغییرات فرکانس ورق مورب کاملاً گیردار بر حسب تغییرات دما در شکل (۱۵) نشان داده شده است. نتایج برای سه نسبت مختلف ضخامت به عرض ارائه شده است. از اینجا به بعد، کلیه مطالعات پارامتری برای ورق با زاویه ۳۰ درجه انجام شده است. مشاهده می شود که با افزایش دما، فرکانس بی بعد شده در هر سه حالت ورق نازک تا نسبتاً ضخیم کاهش می یابد.



(ب) توزیع یکنواخت



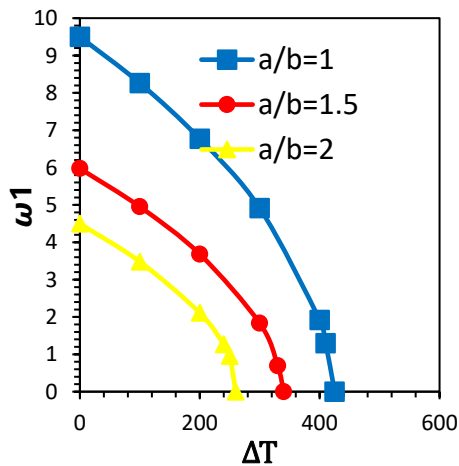
(الف) توزیع x شکل

شکل شماره ۱۵- (الف)-(ب). تغییرات فرکانس بی بعد شده ($\tilde{\omega}_i = \omega_i b^2 \sqrt{\rho h / D}$) بر حسب افزایش

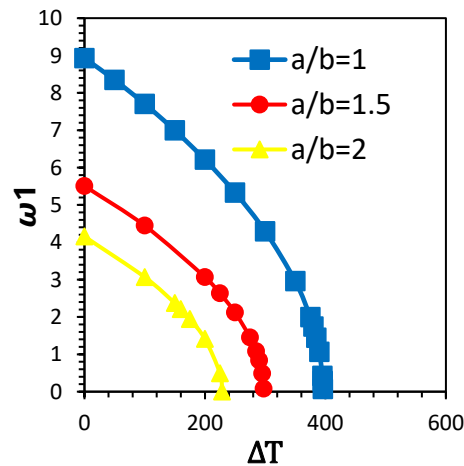
دما برای ورق مورب کاملاً گیردار مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی با ضخامت های متفاوت

نسبت طول به عرض ورق : در ادامه اثر نسبت طول به عرض ورق بر تغییرات فرکانس بی بعد ورق بر حسب افزایش دما در **Error! Reference source not found.** بررسی شده است. نمودارها برای چهار توزیع مختلف نانولوله ها با درصد

حجمی ۰/۱۲ ($V_{CNT}^* = 0.12$) رسم شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش نسبت طول به عرض، فرکانس های بی بعد ورق کاهش می یابد. این به دلیل کاهش سفتی ورق با افزایش طول آن می باشد.



(الف) توزیع یکنواخت



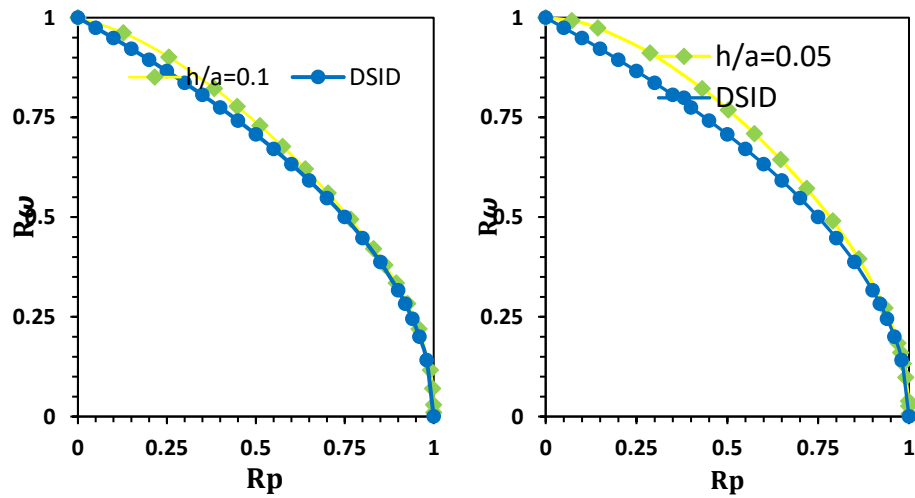
(د) توزیع x شکل

شکل شماره ۱۵- (الف)-(ب). تغییرات فرکانس بی بعد شده بر اثر افزایش دما برای نسبت طول به عرض متفاوت ورق مورب کاملاً گیردار مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی

در ادامه، تاثیر پارامترهای مختلف هندسی بر تطابق نمودار اندرکنش پایداری دینامیکی بر اساس معادله پیشنهادی و نتایج بدست آمده برای پایداری دینامیکی ورق مورب مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی با شرایط تکیه گاهی کاملاً گیردار پرداخته شده است.

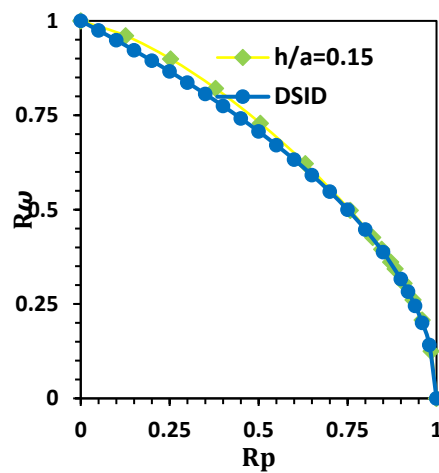
تغییرات ضخامت به عرض های مختلف : تغییرات ضخامت به عرض های مختلف بر روی انطباق نتایج دو روش برای ورق های مورب مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی با توزیع های گوناگون نانولوله در جهت ضخامت ورق در شکل های ۱۶ الی

۱۷ بررسی شده است. برای هر توزیع نانولوله، نتایج برای سه نسبت مختلف ضخامت به عرض ورق مقایسه شده است که شامل ورق های نسبتاً نازک تا نسبتاً ضخیم می گردد.



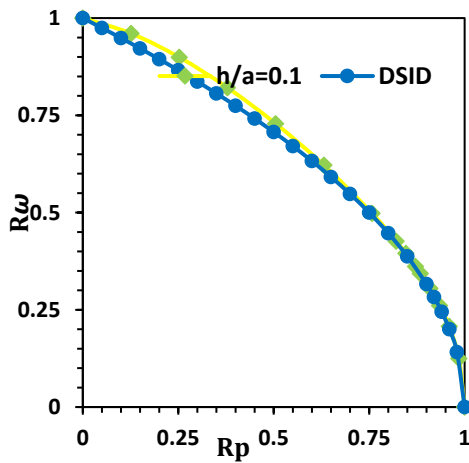
(ب) توزیع یکنواخت ($h/a=0.1$)

(الف) توزیع یکنواخت ($h/a=0.05$)

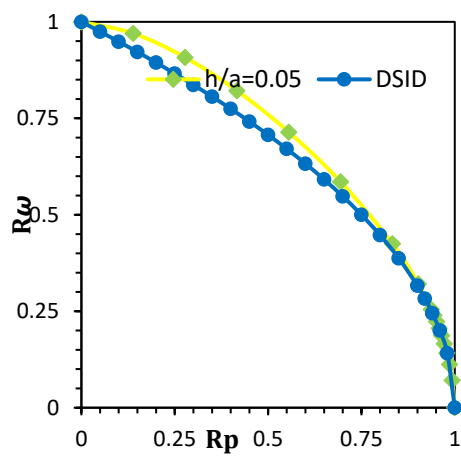


(ج) توزیع یکنواخت ($h/a=0.15$)

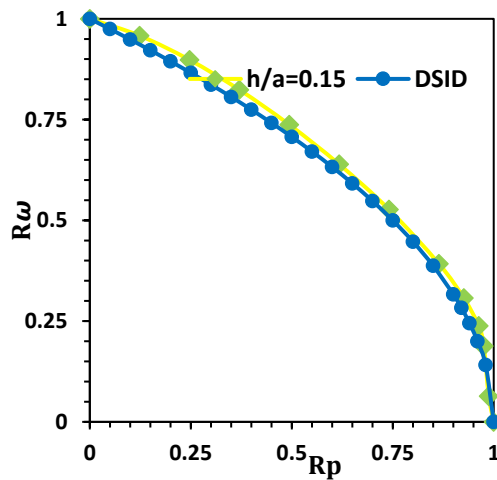
شکل شماره ۱۶- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مورب مرکب تقویت شده با توزیع یکنواخت نانولوله های کربنی نسبت ضخامت به عرض های (h/a) مختلف با تکیه گاه کاملاً گیردار



(ب) توزیع x شکل $h/a=0.1$



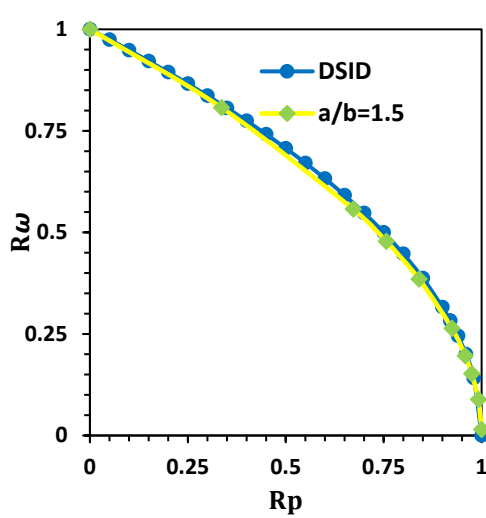
(الف) توزیع x شکل $h/a=0.05$



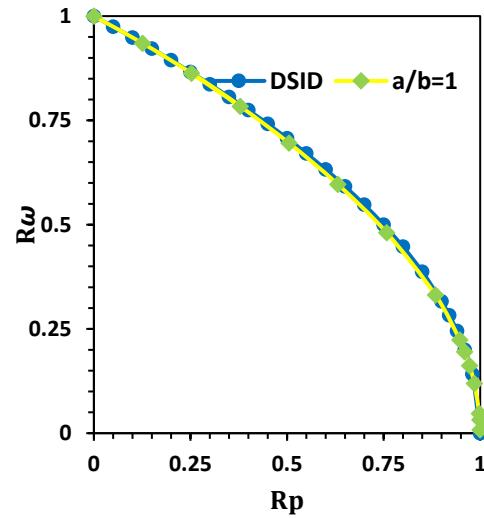
(ج) توزیع x شکل $h/a=0.15$

شکل شماره ۱۷- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مورب مرکب تقویت شده با توزیع x شکل نانولوله های کربنی نسبت ضخامت به عرض های (h/a) مختلف با تکیه گاه کاملاً گیردار

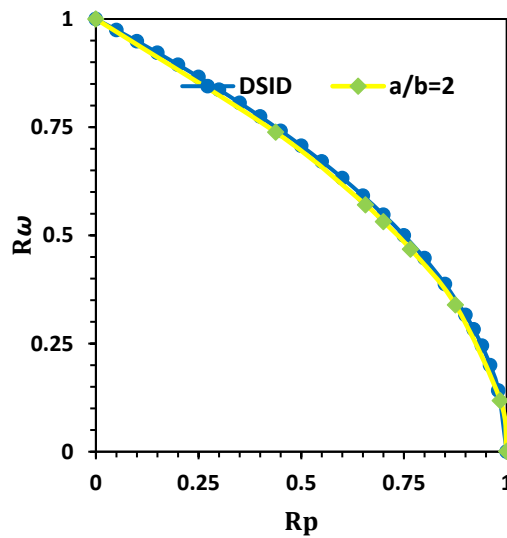
تاثیر طول به عرض های مختلف : تاثیر طول به عرض های مختلف برای ورق های مورب مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی برای توزیع های گوناگون نانولوله در جهت ضخامت ورق بررسی شده است. در شکل های ۱۸ الی ۱۹ نتایج برای ورق با توزیع یکنواخت (UD) و توزیع X شکل (FG-X)، نمایش داده شده است.



(ب) توزیع یکنواخت $a/b=1.5$

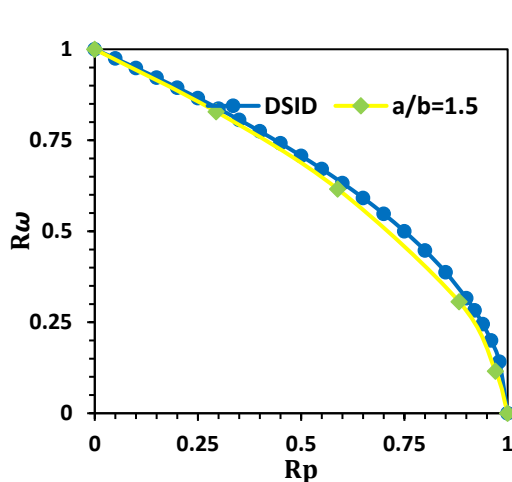


(الف) توزیع یکنواخت $a/b=1$

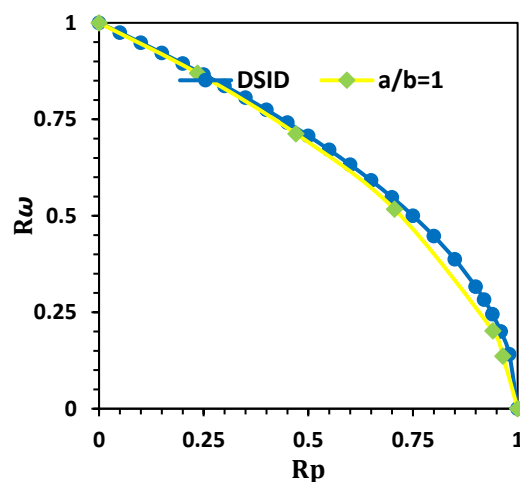


(ج) توزیع یکنواخت $a/b=2$

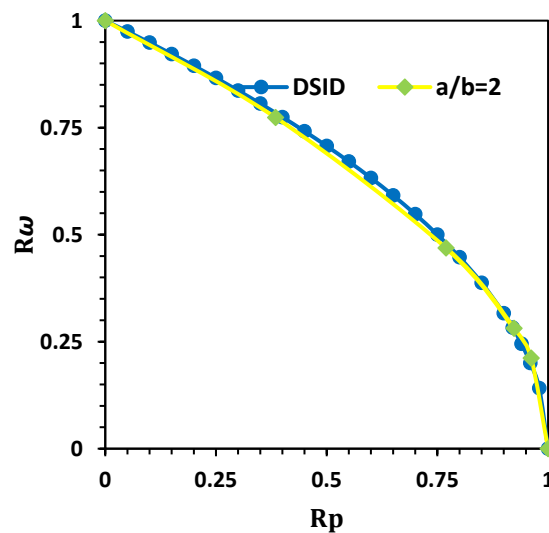
شکل شماره ۱۸- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مورب مرکب تقویت شده با توزیع یکنواخت نانولوله های کربنی و نسبت طول به عرض های (a/b) مختلف با تکیه گاه کاملاً گیردار



(ب) توزیع x شکل $(a/b=1.5)$



(الف) توزیع x شکل $(a/b=1)$



(ج) توزیع x شکل $(a/b=2)$

شکل شماره ۱۹- (الف)-(ج) مقایسه نمودار های بی بعد شده پایداری دینامیکی با معادله پیشنهادی برای ورق مورب مرکب تقویت شده با توزیع x شکل نانولوله های کربنی و نسبت طول به عرض های (a/b) مختلف با تکیه گاه کاملاً گیردار

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر تاثیر پارامترهای هندسی، مادی و شرایط مرزی بر روی تغییرات فرکانس اصلی بر حسب افزایش دما و در نتیجه ناپایداری ورق های مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی با مرزهای مقید شده به صورت الاستیک بررسی گردید. بر اساس موضوعات مطرح شده در این مطالعه، می توان به نتایج زیر اشاره نمود:

۱. ارتباط فرکانس طبیعی و بار کمانشی در پایداری دینامیکی سازه ها مهم است.
۲. نشان داده شد که ورق های مرکب با توزیع X شکل و V شکل نانولوله های کربنی به ترتیب دارای بیشترین و کمترین فرکانس اصلی می باشند.
۳. افزایش دما سبب کاهش فرکانس طبیعی ورق های مرکب می گردد.
۴. افزایش سختی فنر پیچشی در مرزها سبب افزایش فرکانس طبیعی و بار کمانشی ورق مرکب می گردد.

۵. با دقت در شکل دیاگرام های اندر کنش فرکانس و بار و با استفاده از نتایج تحلیلی موجود، معادله بسته بسیار ساده ای برای دیاگرام کشف گردید. این معادله اول به صورت منطقی گسترش یافت و سپس با مقایسه با نتایج موجود در فرهنگ علمی صحت آن تأیید گردید.

استفاده از معادله پیشنهاد شده، محاسبه پایداری دینامیکی را ده ها بار نسبت به روش های موجود آسان تر و در نتیجه به همین نسبت ارزاتر می نماید. دقت نتایج هم به مراتب بیشتر از نتایج روش های مرسوم می باشد.

منابع و مراجع

- [1] A. Ranjbarana, H. Roustaa, M. Ranjbaran, M. Ranjbaran. (2013). Dynamic stability of cracked columns; the stiffness reduction method. *Scientia Iranica, A* 20 (1), 57-64.
- [2] Shen, H.-S. (2009). Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments. *Composite Structures*, Vol. 91, pp. 9-19.
- [3] Karami, G., & Malekzadeh, P. (2003). Application of a new differential quadrature methodology for free vibration analysis of plates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 56(6), 847-868.
- [4] Liew, K. M. Xiang, Y and Wang, C. M. (1993). vibration of skew plate based on mindlin shear deformation plate theory. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 168(1), 39-69.
- [۵] ملک زاده، یوسف. بررسی پایداری دینامیکی ورق های مورب ساخته شده از مواد مرکب تقویت شده با نانولوله های کربنی به صورت هدفمند مدرج. پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- سازه. دانشگاه شیراز، واحد بین الملل. شهریور ۱۳۹۷.