# بررسی تاثیر هیدروالاستیسیته در مدل سازی عددی کوبش

**محمد سعید سیف[۱]*،سیروس زمانی راد[۲]**

[۱]استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu
[۲]کارشناسی ارشد سازه کشتی، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرکهای دریایی، دانشگاه صنعتی شریف؛ zamanirad1@yahoo.com

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۷/۱۶
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۰۷/۳۰

*کلمات کلیدی:*
کوبش
هیدروالاستیسیته
بهینه سازی سازه
اندرکنش سازه و سیال
سازه کشتی

**چکیده**

در تحقیق حاضر پدیده کوبش جهت بررسی تاثیر هیدروالاستیسیته در حین برخورد به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. کوبش با دو دیدگاه سازه صلب و الاستیک (اثر هیدروالاستیسیته) مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به سرعت بالای برخورد شناور با سطح آب در هنگام وقوع پدیده کوبش، اثرات اینرسی و سینماتیکی ورق حین برخورد کاملا مشهود است. با بررسی نتایج ملاحظه شد که در تحلیل کوبش منظور کردن اثر هیدروالاستیسیته به خصوص در سرعت‌های بالا موجب کاهش تغییرشکل‌ها و تنش‌های محاسبه شده در سازه در مقایسه با تحلیل شبه استاتیکی می‌شود. تاثیر هیدروالاستیسیته در مدل سازی کوبش با بررسی شرایط مختلف از جمله مشخصات ورق، زاویه گوه با سطح آب، شرایط مرزی و سرعت برخورد مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج برای ورق فولادی و آلمینیومی نشان داد که چگالی ورق و جرم افزوده در تحلیل هیدروالاستیک تاثیر به سزایی دارند. در نهایت تاثیر هیدروالاستیسیته در طراحی یک شناور تندرو نمونه مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد اعمال هیدروالاستیسیته در طراحی مستقیم، موجب کاهش ضخامت ورق کف می شود.

# The effect of hydroelasticity in numerical modeling of slamming

**Mohammad saeid seif[1] *, Sirus zamani rad[2]**

*[1]Professor, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles;seif@sharif.edu*
*[2]MSC Ship Structure, Center of Excellence in Hydrodynamic and Dynamic of Marine Vehicles; zamanirad1@yahoo.com*

**ARTICLE INFO**

*Article History:*
Received: 2 Jun. 2013
Accepted: 8 Oct. 2013
Available online: 22 Oct. 2013

*Keywords:*
Slamming
Hydroelasticity
Structural optimization
Fluid solid interaction
Ship structure

**ABSTRACT**

In the present study the slamming problem is simulated by numerical methods for investigating the hydroelastic effect during the slamming process. Slamming with two viewpoints of rigid and elastic structures (hydroelastic effect) had been modeled. Due to high impact speed of slamming, inertial and kinematic effects are quite evident in hydroelastic model. The results showed that considering hydroelastic effect especially in high impact speeds reduces the structural deformations and stresses in comparison with statically analysis. The effect of hydroelasticity is studied as a function of different parameters such as boundary condition, plate properties, wedge dead rise angle and impact velocity. Comparison of results for aluminum and steel plate showed that plate density and added mass has a determinant role in hydroelasticity. Finally hydroelasticity effect investigated for one high speed craft and observed that in direct design hydroelasticity effect reduces the plate thickness.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]

**۱- مقدمه**

در طراحی یک شناور از روش های نیمه تجربی طراحی نظیر دستورات ارائه شده توسط موسسات رده بندی استفاده می‌شود، در روش های ارائه شده توسط موسسات رده بندی برای طراحی سازه از بارهای طراحی استاتیکی و گسترده استفاده می شود. به این روش ها، روش های غیرمستقیم طراحی اطلاق می شود. هرچند این روش‌ها هزینه و زمان طراحی را کاهش می دهند، اما سازه طراحی شده بهینه نیست. لذا در سالهای اخیر تلاش های بسیار زیادی در زمینه گسترش روشهای طراحی مستقیم ارائه شده است. پدیده کوبش[1] نیز که یکی از مهمترین فاکتورهای طراحی شناور می باشد در کانون این تحقیقات قرار دارد. اعمال اثرات هیدروالاستیسیته در تحلیل کوبش از جمله نکاتی است که هنوز به شکل دقیق بررسی نشده است. با توجه به این نکات نیاز است تا تحقیق جامعی در زمینه تاثیرات هیدروالاستیسیته در حل و تفاوت‌های آن با حل استاتیکی با نگرش کاربردی در طراحی انجام گیرد.

فالتینسن با انجام آزمایش برخورد ورق آلمینیومی و فولادی با سطح آب اثرات هیدروالاستیسیته[2] را مورد بررسی قرار داد[۱]، وی در سال ۲۰۰۰ نیز با بررسی هیدروالاستیسیته به روش تحلیلی و تجربی بیان نمود که در فشارهای بزرگ کوبش نمی توان از مقدار حداکثر فشار برای محاسبه توزیع تنش روی سازه استفاده نمود و باید تاثیر هیدروالاستیسیته در حل منظور شود. همچنین تاثیر هیدروالاستیسیته با کاهش زاویه برخورد، افزایش سرعت برخورد و افزایش بالاترین دوره طبیعی محلی سازه افزایش می‌یابد [۲]. برژنیتسکی در سال ۲۰۰۱ درآزمایشگاه سازه کشتی در دانشگاه دلف برخورد تیر با سطح آب را در شرایط مختلف مدل سازی کرد. و با توجه به نسبت دوره طبیعی سازه به دوره بار نواحی ملزم به تحلیل هیدروالاستیک را ارائه نمود[۳]. بین سال های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ تحقیقات جامعی روی اندرکنش سازه و سیال توسط استینیوس و همکارانش در موسسه‌ی تحقیقاتی رویال انجام گرفت[۴]،[۵]،[۶]. کین و باترا تاثیر هیدروالاستیسیته در کوبش پانل های ساندوپچی را مورد بررسی قرار داد و بیان نمود که هیدروالاستیسیته تاثیر قابل ملاحظه ای در تغییرشکل ورق و نیروهای هیدرودینامیکی دارد[۷]. کوین برخورد گوه با سطح آب و تاثیر هیدروالاستیسیته در محاسبه مودهای طبیعی سازه را بررسی نمود. وی نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت ورق و زاویه برخورد تاثیر هیدروالاستیسیته کاهش می‌یابد. در این تحقیق نتایج با حل تئوری و تجربی نیز مقایسه شده است[۸]. پانکیرولی و همکاران نیز برخورد ورق آلمینیومی و کامپوزیتی با سطح آب را به روش عددی با استفاده از کوپل اف.ای.ام[3] و اس.پی.اچ[4] مدل سازی نمود و نشان داده شد که بیش از یک مد طبیعی در تغییر شکل سازه مدل هیدروالاستیک تاثیرگذار است. در این تحقیق نتایج عددی با نتایج تجربی نیز مقایسه شد[۹]. هنبینگ لودر سال ۲۰۱۲ برخورد یک بخش از بدنه شناور با سطح آب را به روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار داد در مدل سازی عددی وی تاثیر تغییرشکل سازه در تغییرات فشار اعمال نشد اما با این وجود انطباق مناسبی بین نتایج حل تجربی و عددی حاصل شد[۱۰].

در ادامه پدیده کوبش به دو روش مختلف در نرم افزار انسیس[5] شبیه سازی می‌شود و سازه‌ی شناور تحت این نیروها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در روش اول یا روش شبه استاتیکی فشار کوبش با روش دینامیک سیالات محاسباتی، روی سازه صلب محاسبه می‌شود و به صورت استاتیکی در زمان‌های مختلف برخورد به سازه اعمال می‌شود. در این روش علاوه بر نادیده گرفتن ماهیت دینامیکی پدیده کوبش تاثیر تغییر شکل سازه روی توزیع فشار نیز منظور نمی‌شود. در روش دوم پدیده کوبش با در نظرگرفتن تاثیر هیدروالاستیسیته مدل سازی می‌شود. در نهایت تنش ها و تغییر شکل های سازه‌ی شناور در این دو روش با هم مقایسه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در تحلیل های عددی فرضیات از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند که حساسیت این مساله با پیچیده تر شدن مدل افزایش می‌یابد. سطح آزاد آب، اثرات توربولانسی، جت آب اطراف بدنه و در کنار این موارد تغییر شکل لحظه به لحظه سازه بر پیچیده تر شدن مساله می‌افزاید. دمپینگ از مهمترین فرضیات در مدل سازی هیدروالاستیسیته است که در کارهای مشابه پیشین بررسی نشده و در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. سعی بر این است تا با انجام این تحلیل ها بتوان تاثیر هیدروالاستیسیته در پدیده کوبش را به شکل کامل بررسی نمود.

**۲.شبیه سازی کوبش با در نظر گرفتن اثرهیدروالاستیسیته**

از نکات حائز اهمیت در بحث هیدروالاستیسیته اثر میرایی سازه می‌باشد، بدین منظور پیش از بیان شبیه سازی برخورد گوه الاستیک با سطح آب لازم است تا مقدمه‌ای درباره‌ی این موضوع بیان شود. به طور کلی انرژی ارتعاشی در یک حجم از ماده زمانی که به صورت دوره ای تغییرشکل یابد تلف می‌شود [۱۱،۱۲]. طیف وسیعی از مکانیسم های مرتبط با بازسازی داخلی میکرو و یا ماکروساختارها اعم ازاثرات شبکه کریستالی به مقیاس مولکولی وجود داردکه باعث میرایی می‌شوند[۱۳]. در کار حاضر میرایی با استفاده از مدل رایلی[6] که در رابطه(۱) بیان شده است شبیه سازی شده است [۱۴].

$$c = \alpha[M] + \beta[K] \qquad (1)$$

در این رابطه $M$ ماتریس جرم و $K$ ماتریس سختی می باشد، به همین ترتیب $\alpha$ دمپینگ جرم و $\beta$ دمپینگ سختی یا سازه



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

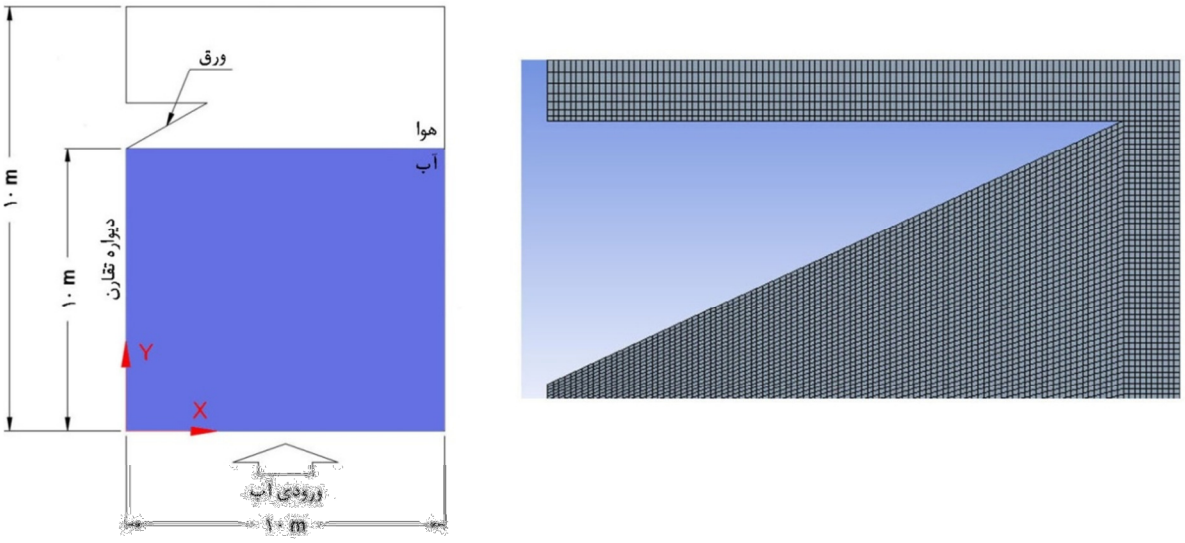
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]

می‌باشد. مقادیر $\alpha$ و $\beta$ عموما به طور مستقیم مشخص نیست. اما با استفاده از فاکتور دمپینگ $\xi_{mr}$ به شکل رابطه۲ قابل محاسبه می‌باشد. فاکتور دمپینگ در واقع نسبت میرایی واقعی به میرایی بحرانی برای حالت خاصی از ارتعاش است[۱۴].

$$\xi_{mr} = \frac{\alpha}{2\omega_r} + \frac{\beta\omega_r}{2} \qquad (۲)$$

در این رابطه $\omega_r$ فرکانس طبیعی چرخشی سازه می باشد. در بسیاری از مسائل عملی مقدار $\alpha$ (یا دمپینگ جرم) که میرایی اصطکاکی را نشان می‌دهد در نظر گرفته نمی‌شود $(\alpha = 0)$. در نتیجه فاکتور $\beta$ از رابطه۲ با داشتن مقدار $\xi_{mr}$ و $\omega_r$ قابل محاسبه می‌باشد. باید توجه داشت که تنها یک مقدار $\beta$ در مدل قابل اعمال می‌باشد پس جهت محاسبه هرچه دقیق تر $\beta$ باید از فرکانس غالب استفاده نمود، بنابراین فرکانس طبیعی ورق در محاسبات منظور شده است. در ادامه به تاریخچه ای از کارهای انجام شده در زمینه دمپینگ آلمینیوم اشاره می‌شود.

زای و همکاران در سال ۱۹۹۸ به روش تجربی ضریب اتلاف[۷] را برای سه سری مختلف آلمینیوم در محدوده ۰/۲×۱۰e-۳تا۱×۱۰e-۳ محاسبه نمود و بیان کرد که اطلاعات کمی درباره میرایی سری های تجاری آلمینیوم وجود دارد. [۱۵]. وایت و والکر نیز محدوده۵×۱۰e-۵تا۷×۱۰e-۳ را برای ضریب اتلاف آلمینیوم ارائه نمود[۱۶]. مقدار دقیق ۱×۱۰e-۴نیز توسط برانک محاسبه شد [۱۷]. میرایی کل برای یک سازه به طور قابل توجهی از میرایی ماده تشکیل دهنده سازه بزرگتر می‌باشد [۱۷و۱۸]. ناشیف و همکاران مقدار دمپینگ ورق نازک آلمینیومی را با تکیه بر نتایج تجربی ۰/۰۰۴ و برای ورق بال هواپیما ۰/۰۴ محاسبه نمود واضح است که این مقادیر از میرایی ذاتی آلمینیوم ۵ تا ۸۰۰ برابر بیشتر است[۱۹]. مقادیر ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۸ توسط کلارکسن و فورد [۲۰] و ۰/۰۱۷توسط مید[۱۸] برای ضریب اتلاف آلمینیوم ارائه شد. برای مدل سازی ورق های آلمینیومی بدنه هواپیما مقدار ضریب اتلاف ۲ تا ۳۶۰ مرتبه از این مقادیر بزرگتر است[۱۳]. در کار حاضر مقدار ضریب اتلاف ۰/۰۸ درنظر گرفته شده است این مقدار بعد از انجام تست های مختلف به روش سعی و خطا انتخاب شده است. مقادیر کوچکتر از ضریب اتلاف انتخابی موجب متوقف شدن حل با خطا شد، مقادیر بزرگتر نیز موجب کاهش تغییرشکل ها شد. واضح که این مقدار از ضریب اتلاف طبیعی آلمینیوم بیشتر است که علت این مساله تاثیر بالای جرم افزوده آب در مسائل اندرکنش سازه و آب می‌باشد. با توجه به شرایط پیچیده تحلیل هیدروالاستیک لازم است تا مدل حاضر با نتایج منبعی معتبر اعتبارسنجی شود. برای این منظور از نتایج ارائه شده توسط استنیوس استفاده می‌شود[۶]. در این مقاله برخورد گوه با فرض اثر هیدروالاستیسیته در نرم افزار ال.اس.داینا[۸] انجام شده. با توجه به اینکه در اینجا اثرات محلی کوبش مورد بررسی قرار می‌گیرد، مساله به صورت دو بعدی (پلین استرین[۹]) مدل سازی می شود. جهت مدل سازی سیال یک حجم آب به ابعاد ۱۰×۱۰ متر در زیر گوه و یک حجم هوا به ابعاد ۵×۱۰ در بالای گوه در نظر گرفته شده. از نکات بسیار مهم در مورد مدل عدم تاثیر دیواره های حوزه حل روی گوه می‌باشد برای خنثی کردن تاثیر دیواره ها در حل باید این دیواره ها از دیواره های گوه به اندازه کافی دور باشند. نسبت بیان شده جهت محقق شدن این منظور ۸ برابر نیم عرض مدل می‌باشد که در مدل سازی حاضر رعایت شده است[۲۱].

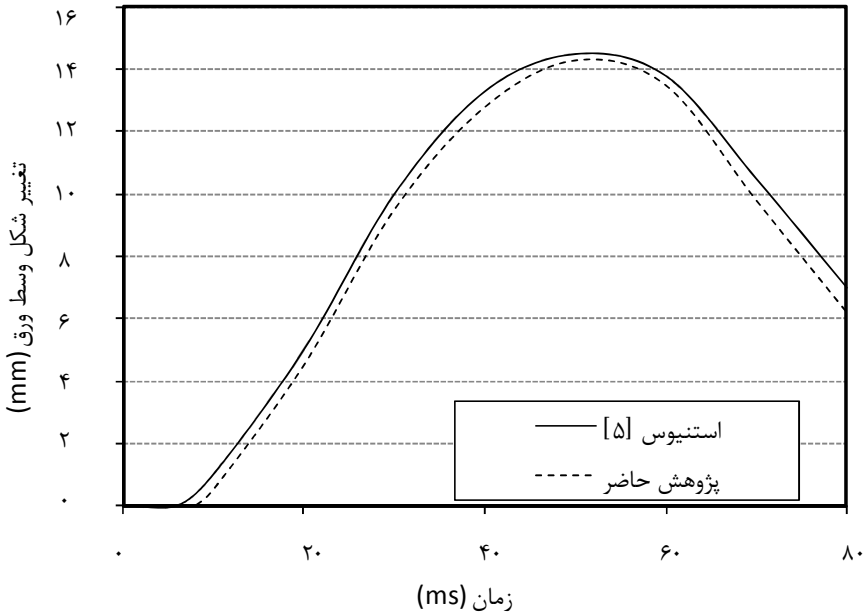



**شکل۱. شبکه بندی اطراف گوه(سمت راست)، حوزه حل مدل(سمت چپ)**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]




**شکل ۲- تغییرشکل وسط ورق در جهت خارج صفحه برحسب زمان (سرعت برخورد گوه با سطح آب ۶ متر بر ثانیه، زاویه گوه ۳۰ درجه)**

جهت کاهش حجم محاسبات مقطع عرضی گوه نسبت به محور عمودی متقارن فرض شده است. با ورود آب با سرعت ثابت از دیواره پایینی مدل، سطح آب با همان سرعت به سمت گوه حرکت می کند(شکل۱). شبکه بندی از نوع سازمان یافته چهاروجهی انتخاب شده است که در اطراف گوه ریز و با دور شدن از آن به صورت یکنواخت بزرگ می شود در شکل۱ نمایی از شبکه بندی نشان داده شد.

جهت مدل سازی سازه گوه از یک ردیف المان ورق در بعد سوم به طول ۰/۹۵۱ متراستفاده شده است. سختی خمشی ورق برابر با ۷۰۰۷ کیلونیوتن بر متر می‌باشد ورق از جنس آلمینیوم و با المان شل[۱۰] شبیه سازی شده است. باید به این نکته اشاره نمود که در مدل سازی حاضر مصالح خطی فرض شده است. رابطه سختی خمشی ورق به شکل رابطه ۳ بیان می شود. در این رابطه $E$ مدول الاستیسیته ورق، $\nu$ نسبت پواسون و $t$ ضخامت ورق می‌باشد [۲].

$$D=\frac{E\times t^3}{12\times(1-\nu^2)} \qquad (۳)$$

شرایط مرزی اعمال شده روی دو سر ورق از نوع گیردار می‌باشد. زاویه برخورد گوه با سطح آب ۳۰ درجه و سرعت برخورد گوه ثابت و برابر ۶ m/s می‌باشد. در شکل۲ نمودار تغییر شکل وسط ورق بر حسب زمان نشان داده شده است و با نتایج استنیوس مقایسه شده است، که انطباق مناسبی بین نتایج مشاهده می‌شود. اختلاف ناچیز بین نتایج را می‌توان ناشی از نحوه مدل سازی دمپینگ دانست، که در کار استنیوس اشاره‌ای به آن نشده است.

مطابق شکل۲ حداکثر تغییرشکل ورق در لحظه ۵۲ میلی ثانیه اتفاق می‌افتد، در این لحظه تمام ورق وارد آب شده و فشار روی کل ورق توزیع می‌شود. از این لحظه به بعد فشار وارده و در نتیجه تغییرشکل ورق کاهش می‌یابد. در این شرایط برخورد همچنان با همان سرعت ۶ متر بر ثانیه ادامه دارد اما با توجه به عبور سطح آزاد از گوه، فشار روی ورق کاهش می‌یابد. می‌دانیم فشار روی گوه در هر لحظه در محل برخورد سطح آزاد با بدنه اتفاق می‌افتد. در شکل۳ توزیع تنش وون مایزز برحسب پاسکال و وضعیت سطح آزاد آب در لحظات مختلف برخورد گوه نمایش داده شده است. معیار وون مایزز جهت نمایش هرچه بهتر حداکثر تنش های ناشی از برخورد در ورق انتخاب شده است. با توجه به اعمال شرایط گیردار به دو انتهای ورق، در طول برخورد حداکثر تنش در دو انتهای ورق اتفاق می‌افتد. توزیع تنش نیز تا لحظه ۵۲ میلی ثانیه افزایش می‌یابد اما بعد از این لحظه همانند تغییر شکل، کاهش می‌یابد.

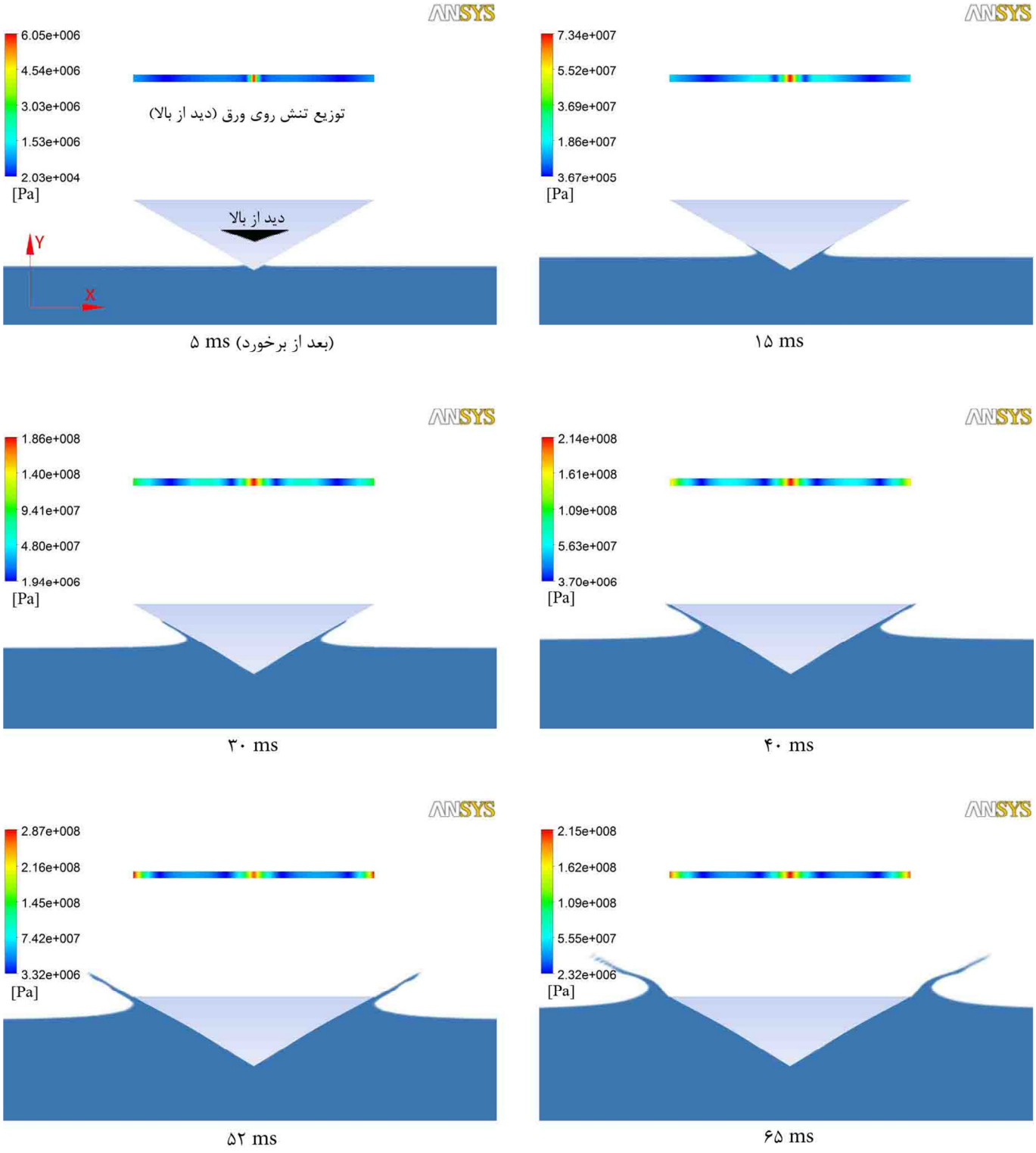
## ۳.بررسی تاثیر هیدروالاستیسیته در کوبش

جهت بررسی تاثیر هیدروالاستیسیته در کوبش، نتایج برخورد یک گوه صلب و یک گوه الاستیک با هم مقایسه می‌شود. لازم است ابتدا روی فشارهای وارد به گوه در برخورد گوه صلب و الاستیک بحث شود. در شکل۴ توزیع فشار در سه نقطه به فاصله مساوی روی گوه، برای گوه با زاویه ۳۰ درجه با سرعت برخورد ۶ متر بر ثانیه برای این دو حل نمایش داده شده است. با توجه به ثابت بودن سرعت در طول برخورد نقاط در فواصل زمانی مساوی وارد آب شده‌اند. نتایج مربوط به برخورد گوه صلب و گوه الاستیک به اختصار به ترتیب با عبارت صلب و هیدروالاستیک نمایش داده شده است.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]

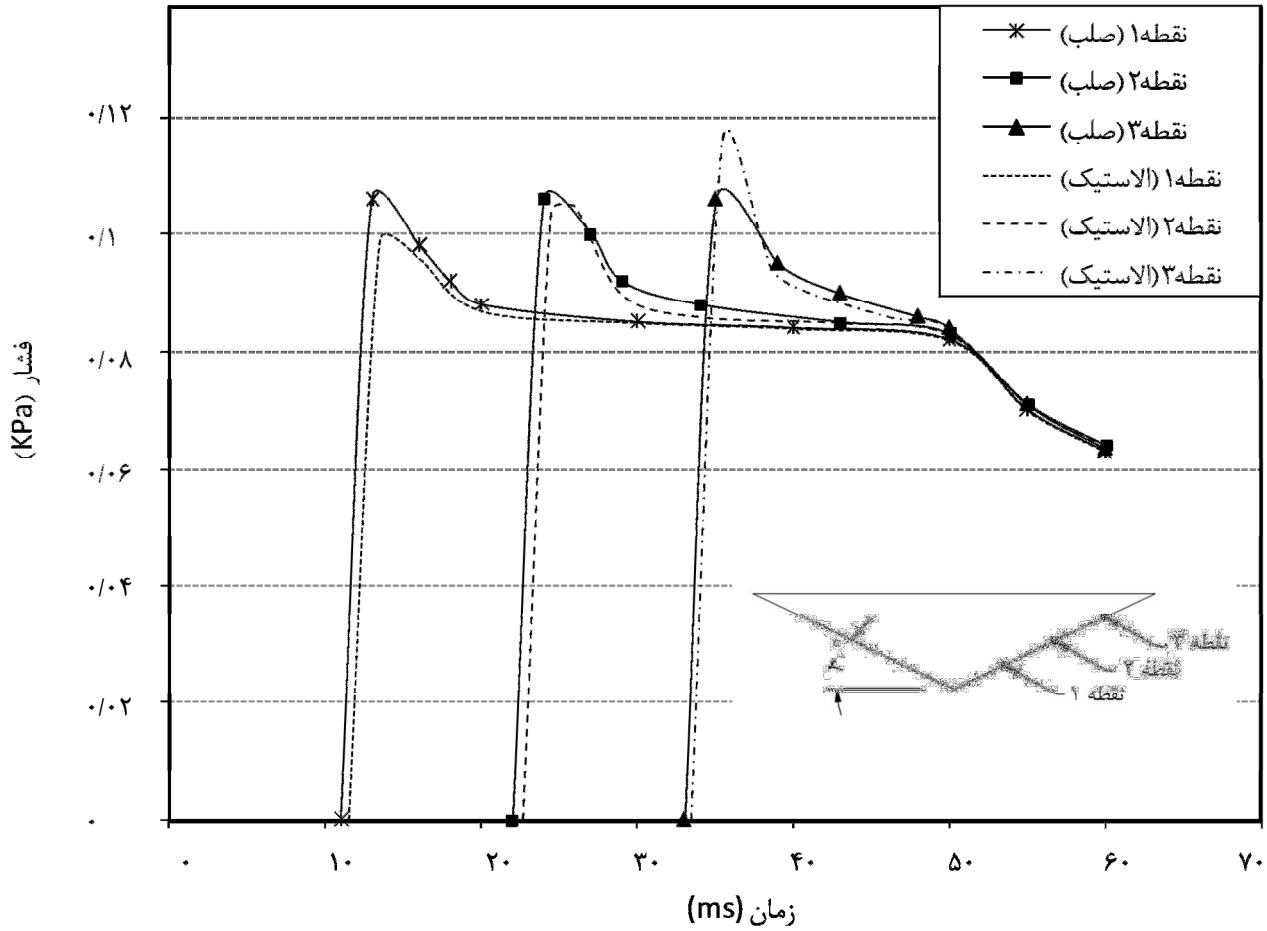



**شکل۳- تغییرات سطح آزاد آب و تنش وون مایزز در لحظات مختلف برخوردگوه الاستیک با سطح آب(سرعت برخورد گوه با سطح آب ۶ متر بر ثانیه، زاویه گوه ۳۰ درجه)**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

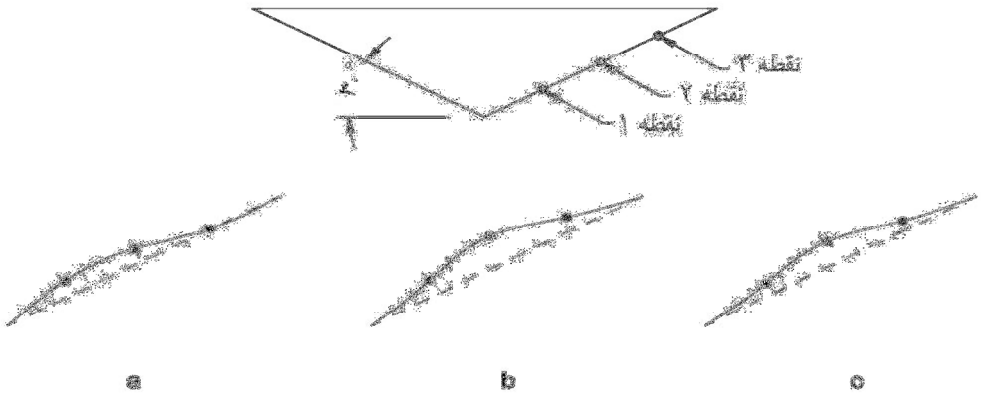
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]




**شکل۴- تاریخچه زمانی فشار روی گوه برای گوه صلب و الاستیک در نقاط ۲،۱ و۳ (سرعت برخورد گوه با سطح آب ۶ متر بر ثانیه، زاویه گوه ۳۰ درجه)**

با توجه به اعمال هیدروالاستیسیته، تغییرشکل در حین برخورد در محاسبات منظور می‌گردد، این مساله موجب اعمال تاثیر تغییر زاویه موضعی ورق در لحظات مختلف برخورد می‌شود. در حالی که در برخورد گوه صلب در تمام مدت برخورد شکل گوه تغییر نمی‌کند. در شکل۵ تغییرشکل گوه الاستیک در سه مرحله از حل a,b,c که به ترتیب مربوط به لحظات آغازی، میانی و پایانی حل می‌باشد نمایش داده شده است.خط تیره حالت تغییرشکل یافته ورق و خط چین حالت قبل از برخورد ورق را نمایش می‌دهد.

مطابق شکل۵ اگر در زمان وقوع حداکثر فشار روی نقطه یک ورق شکلی همانند حالت a داشته باشد با توجه به حالت a مشاهده می‌شود زاویه موضعی برخورد گوه در این نقطه افزایش یافته است(این مقدار در بیشترین تغییر شکل ورق به دو درجه می‌رسد). پس انتظار می‌رود در این شرایط فشار وارد به گوه در حالت صلب بیشتر از الاستیک باشد اما با توجه به اینکه در لحظات اولیه برخورد تغییر شکل ها کوچکتر می‌باشد اختلاف کمی بین دو حل مشاهده می‌شود(شکل۴).




**شکل۵-شماتیک تغییرشکل ورق در سه مرحله از حل (a: لحظات آغازی حل، b: لحظات میانی حل و c: لحظات پایانی حل**



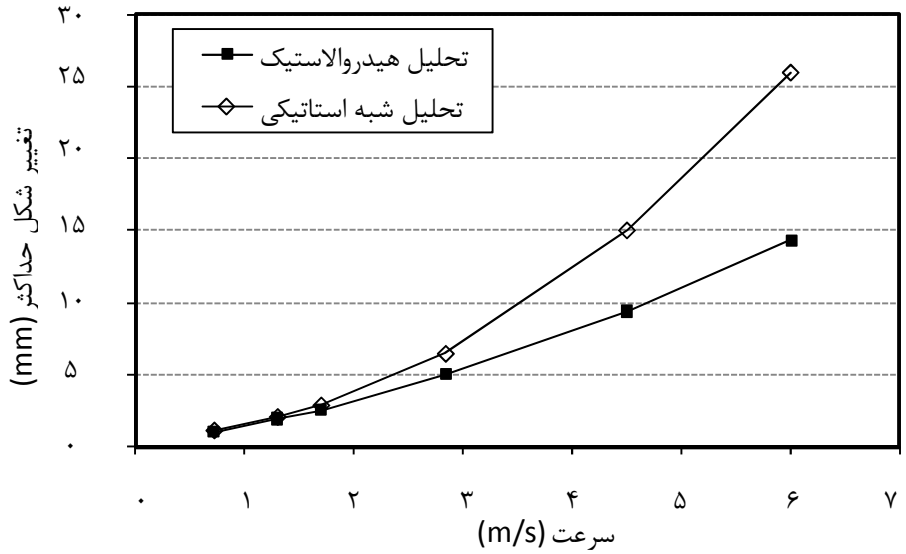
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]

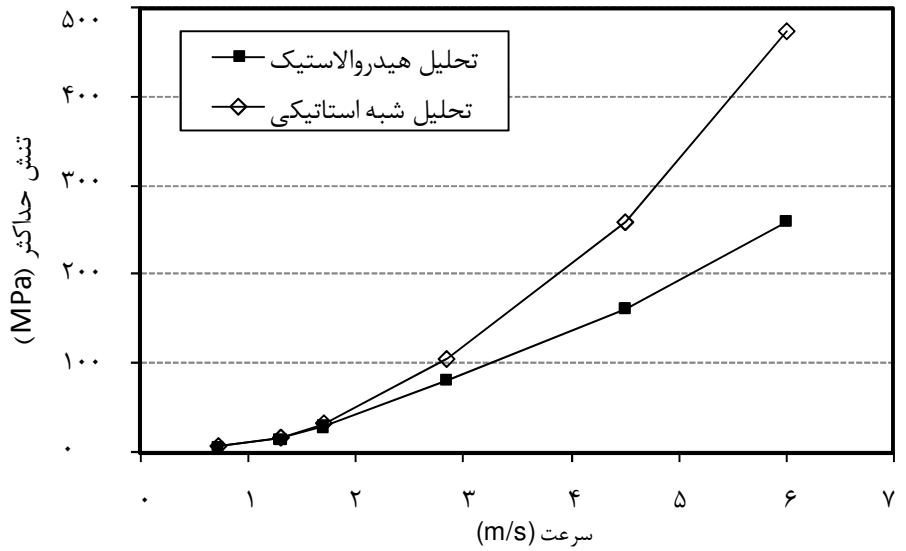
برای نقطه دو نیز مطابق شکل۵ با درنظرگرفتن حالت b برای تغییرشکل ورق، زاویه این نقطه تقریبا ثابت می‌ماند پس فشار وارده به گوه در دو حل تقریبا برابر می‌باشد(شکل۴). در نهایت در نقطه سه با توجه به اینکه زاویه برخورد کاهش یافته است(حالتc) فشار محاسبه شده در حل هیدروالاستیک بیشتر می‌باشد(شکل۴). به علت وقوع بزرگترین تغییرشکل ها در این لحظات بیشترین اختلاف بین دو حل نیز در این نقطه مشاهده می‌شود.

با استفاده از امکانات نرم افزار بعد از شبیه سازی برخورد گوه صلب با سطح آب می‌توان فشارهای به دست آمده روی گوه را روی سازه به شکل شبه استاتیکی اعمال نمود. در ادامه نتایج مختلف حاصله از برخورد گوه صلب و الاستیک مقایسه و بررسی می‌شود. در نمودار شکل۶ حداکثر تغییرشکل برای گوه با زاویه برخورد ۳۰ درجه در سرعت های متفاوت نمایش داده شده است. با توجه به شکل۶ مشاهده می‌شود در سرعت های پایین برخورد نتایج حل شبه استاتیکی و هیدروالاستیک مقادیر نزدیک تری را نشان می‌دهند اما در سرعت های بالا تفاوت این دو حل افزایش می‌یابد. در حالی که در همین شرایط فشارهای روی گوه در دو حل اختلاف کمتری دارند. این مساله را می توان ناشی از ماهیت حل دینامیکی دانست.

در نمودار شکل۷ حداکثر تنش ها(بر اساس معیار وون مایزز) برای گوه با زاویه ۳۰ درجه در سرعت‌های متفاوت نمایش داده شده است، اختلاف تنش‌ها نیز همانند تغییرشکل‌ها با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. با توجه به این نتایج باید تاکید نمود که در نظر نگرفتن اثر هیدروالاستیسیته در طراحی باعث فاصله گرفتن از طراحی بهینه سازه می‌شود.




**شکل۶ -تغییر شکل حداکثر برای تحلیل استاتیکی و هیدروالاستیک در سرعت های مختلف برخورد(زاویه گوه ۳۰ درجه)**




**شکل۷ -تنش حداکثر برای تحلیل استاتیکی و هیدروالاستیک در سرعت های مختلف برخورد(زاویه گوه ۳۰ درجه)**



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]

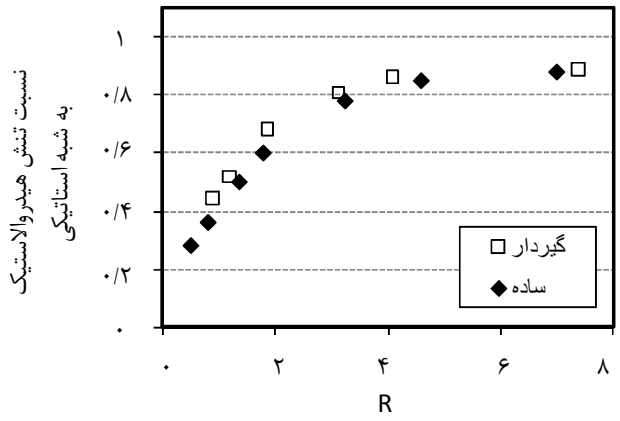
برای بررسی هرچه بهتر تفاوت های نتایج حاصل از حل هیدروالاستیک و شبه استاتیکی، فاکتور بی بعد R به صورت زیر تعریف می‌شود[۵].

$$R = \frac{T_{LP}}{T_{NP}} \qquad (۴)$$

در این رابطه $T_{LP}$ عبارت است از مدت زمان اعمال بار دینامیکی به سازه و $T_{NP}$ نیز پریود طبیعی می باشد که با اتکای به تئوری واگنر و تئوری تیرها رابطه۴ به شکل زیر قابل بیان است[۵].

$$R = 4\left(\frac{\mu_{NP}}{\pi}\right)^2 \times \frac{\tan\beta}{V}\sqrt{\frac{D}{\pi\rho_w b^3}} \qquad (۵)$$

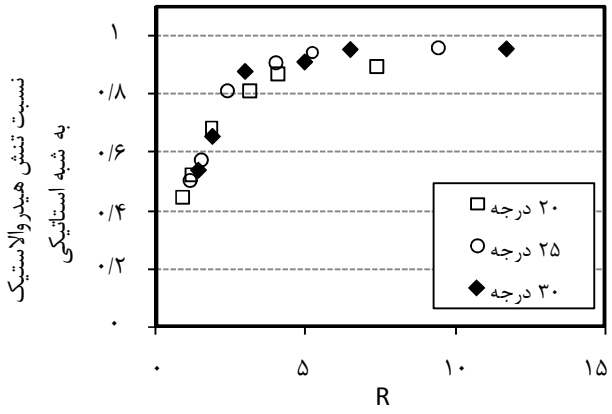
$\mu_{NP}$ فاکتور شرایط مرزی(در شرایط مرزی ساد $\mu_{NP} = \pi$ و برای شرایط مرزی گیردار۴/۷۳ = $\mu_{NP}$)، $\beta$ زاویه گوه (ورق)، سرعت برخورد گوه با سطح آب، $D$ سختی خمشی ورق و b طول ورق می‌باشد.




**شکل ۸ - نسبت تنش وون مایزز در حل هیدروالاستیک به شبه استاتیکی بر حسب فاکتور R در زاویه های مختلف گوه**

در نمودار شکل۸ نسبت تنش ها در حل هیدروالاستیک به شبه استاتیکی بر حسب فاکتور R در زاویه های مختلف گوه نمایش داده شده. همانطور که ملاحظه می شود تاثیر هیدروالاستیسیته در R های کوچکتر از ۵ مشهودتر است. اما در R های بزرگتر از ۵ این تاثیرکاهش می‌یابد. از دیدگاه فیزیکی می‌توان اینگونه بیان نمود که فاکتور R با افزایش استحکام سازه و دوره بار وارده به سازه، افزایش می‌یابد پس تاثیر هیدروالاستیسیته با افزایش استحکام سازه و دوره بارگذاری کاهش می‌یابد. نسبت تنش های سازه در حل استاتیکی و الاستیک به عنوان مثال برای زاویه ۲۰ درجه در R های کوچک تا ۰/۵ و در R های بزرگ در حدود ۰/۹می‌باشد.

در نمودار شکل۹ نسبت تنش های حل الاستیک به شبه استاتیکی برای شرایط تکیه گاهی گیردار و ساده در زاویه برخورد ۲۰ درجه نمایش داده شده است. نسبت تنش ها در شرایط تکیه گاهی ساده از شرایط تکیه گاهی گیردار در Rهای یکسان مقدار کمتری می‌باشد. پس می‌توان این چنین بیان نمود که تاثیر هیدروالاستیسیته در شرایط تکیه گاهی ساده برای ورق اهمیت بیشتری نسبت به شرایط مرزی گیردار دارد. لذا شرایط مرزی اعمالی به ورق در نتایج تاثیر به سزایی دارد.




**شکل ۹ - نسبت تنش وون مایزز حل هیدروالاستیک به شبه استاتیکی بر حسب فاکتور R برای شرایط مرزی ساده و گیردار(زاویه گوه ۲۰ درجه)**

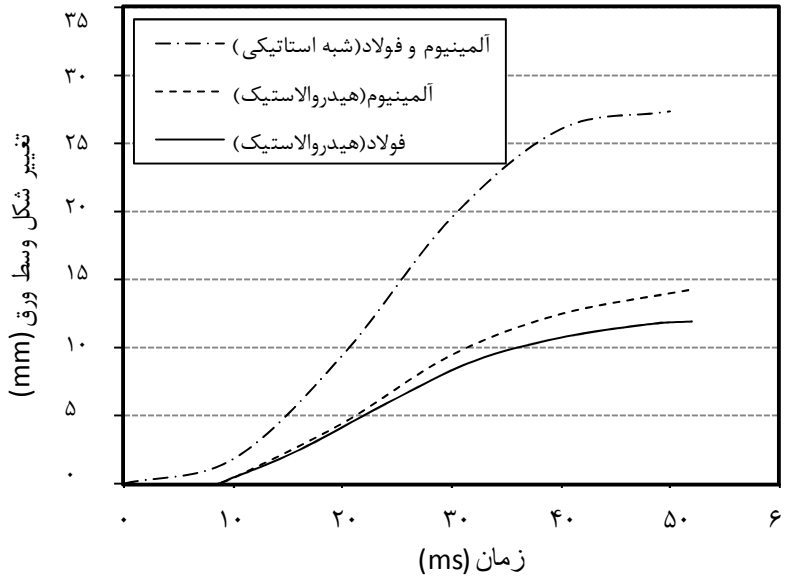
جهت بررسی تاثیر چگالی ورق و جرم افزوده آب در پدیده هیدروالاستیسیته برخورد یک گوه با همان زاویه ۳۰ درجه و همان سختی خمشی از جنس آلمینیوم با ضخامت ۱۰/۱۸ میلی متر که در بخش قبل انجام شد، برای یک ورق از جنس فولاد انجام می‌گیرد. با استفاده از رابطه۳ ضخامت ورق فولادی برای سختی خمشی ۷۰۰۷ کیلونیوتن بر متر برابر ۷/۲۵ میلی متر محاسبه می‌شود.

در شکل۱۰ نتایج حاصل از تحلیل شبه استاتیکی و هیدروالاستیک برای ورق آلمینیومی و فولادی نمایش داده شده است. با توجه به سختی خمشی برابر نتایج یکسانی برای ورق آلمینیومی و فولادی در تحلیل شبه استاتیکی حاصل شده است، بنابراین یک نمودار برای نمایش نتایج شبه استاتیکی استفاده شده است. اما در حالت هیدروالاستیک اختلاف نتایج کاملا مشهود است، تغییر شکل های به دست آمده برای این دو ورق در لحظات اولیه حل تقریبا برابر می‌باشد اما در لحظات بعد از ۰/۰۳ ثانیه تغییرشکل ها دچار اختلاف می‌شود این مساله به دلیل اختلاف چگالی این دو ورق (نسبت چگالی فولاد به آلمینیوم برابر ۳/۷ می باشد) و تاثیر جرم افزوده آب می‌باشد که در تحلیل شبه استاتیکی قابل بررسی نیست. مقدار جرم افزوده آب در مقایسه با جرم ورق مقدار قابل توجهی می‌باشد که برای سازه مورد تحلیل جرم ورق در حدود ۴ درصد جرم افزوده آب می‌باشد.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]




**شکل ۱۰- تاریخچه زمانی تغییرشکل وسط ورق برای ورق آلمینیومی و فولادی(سرعت برخورد گوه با سطح آب ۶ متر بر ثانیه، زاویه گوه ۳۰ درجه)**

## ۴. تاثیر هیدروالاستیسیته در طراحی شناور

با توجه به بررسی های انجام شده در بخش های قبل می‌توان این گونه بیان نمود که اعمال هیدروالاستیسیته در تحلیل کوبش موجب طراحی بهینه می‌شود. لذا در این بخش تاثیر هیدروالاستیسیته در طراحی یک شناور مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول۱ مشخصات شناور مورد نظر نمایش داده شده است.

**جدول۱-مشخصات اصلی شناور مورد نظر**

| | |
|---|---|
| جابجایی(وزن) | ۵۲ ton |
| طول | ۲۵m |
| عرض | ۵/۵m |
| آبخور | ۱/۲m |
| سرعت | ۵۰knot |

این شناور آلومینیومی بر اساس روابط موسسه رده بندی DNV طراحی شده است. فشار کوبش محاسبه شده برای این شناور بر اساس آیین نامه DNV ، ۱۴۶ کیلونیوتن بر متر مربع محاسبه شده است. که با استفاده از این فشار و بر اساس رابطه۶ مقدار ضخامت ورق کف ۶/۵ میلیمتر محاسبه می شود. در این رابطه $k_r$ و $k_a$ به ترتیب ضریب انحنا و منظری ورق، s فاصله بین تقویت کننده های طولی، $P_{sl}$ فشار کوبش و $\sigma_{sl}$ تنش حدی طراحی می‌باشد[۲۲].

$$t = \frac{22.4 k_r k_a s \sqrt{P_{sl}}}{\sqrt{\sigma_{sl}}} \qquad (۶)$$

جهت بررسی تاثیر هیدروالاستیسیته در طراحی شناور فوق در این بخش دو گوه مطابق با سازه شناور موردنظر مطابق با شرایط مدل سازی که در قبل بیان شد به دو روش شبه استاتیکی و هیدروالاستیک مورد تحلیل قرار می‌گیرد. ورق بین تیر مرکزی و یک تیر طولی(مطابق شکل۱۱) برای تحلیل مدل سازی می‌شود. شرایط اعمال شده به دو سر ورق در محل تیر مرکزی و تیر طولی از نوع گیردار و در محل تقویت کننده های طولی از نوع ساده می‌باشد (شکل۱۱). جهت محاسبه سرعت عمودی برخورد شناور با سطح آب از رابطه واگنر(رابطه۷) استفاده می‌شود[۲۳].

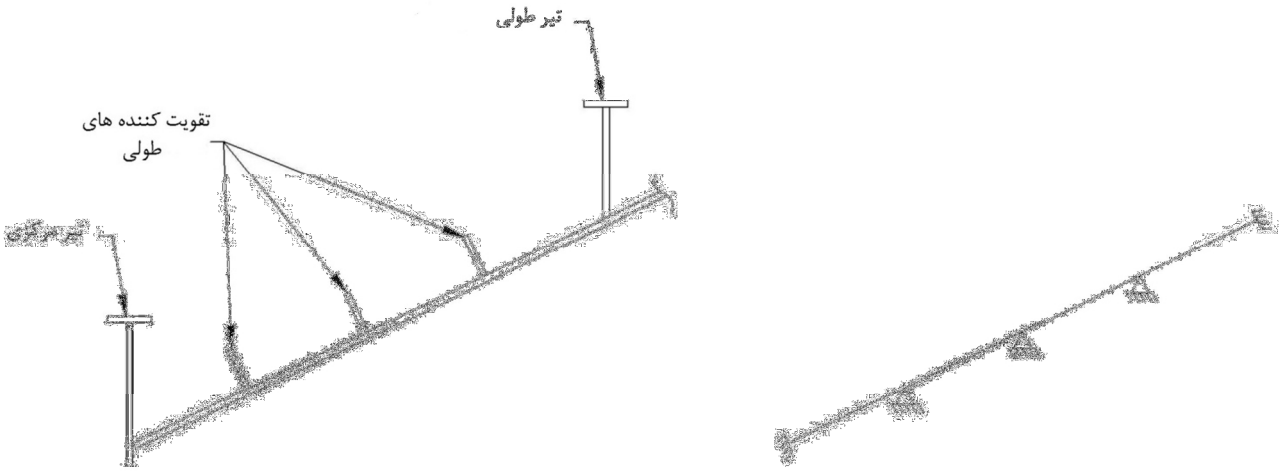
$$P_{sl} = 0.5 \rho_w \left( \frac{\pi V}{2 \tan \beta} \right)^2 \qquad (۷)$$

در این رابطه $P_{sl}$ فشار کوبش، $\rho_w$ چگالی آب، V سرعت عمودی برخورد شناور با سطح آب و $\beta$ زاویه ورق(گوه) با سطح آب می‌باشد. با قرار دادن فشار کوبش محاسبه شده از آیین نامه در رابطه۶ سرعت عمودی برخورد شناور با سطح آب ۵ m/s محاسبه می‌شود.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]




**شکل ۱۱- شرایط مرزی اعمالی به مدل عددی (سمت راست)، شماتیک ساختمان کف شناور(سمت چپ)**

در جدول۲ مقدار حداکثر تنش ثبت شده بر اساس معیار وون مایزز در تحلیل شبه استاتیکی و هیدروالاستیک در زمان‌های مختلف برخورد نمایش داده شده است. می‌دانیم حداکثر فشار که در محل برخورد آب با بدنه اتفاق می‌افتد در لحظات مختلف روی گوه جابجا می‌شود، در نتیجه این فشار در لحظات مختلف در محل اعمال شرایط تکیه گاهی یا دهانه آزاد ورق وارد می‌شود. لذا در جدول۲ سعی شده که نتایج در لحظات وقوع حداکثر تنش ثبت شوند.

اختلاف تنش، بین دو حالت در لحظات مختلف تغیر می‌کند که در زمان وقوع ماکزیمم تنش یعنی ۵۰ میلی ثانیه به حداکثر می‌رسد.

**جدول۲- حداکثر تنش وون مایزز در لحظات مختلف برخورد برای تحلیل شبه استاتیکی و هیدروالاستیک**

| زمان(ms) | تنش شبه استاتیکی(Mpa) | تنش هیدروالاستیک(Mpa) |
|---|---|---|
| ۱۰ | ۶۰/۳ | ۵۵/۹ |
| ۲۰ | ۶۹/۶ | ۵۸/۶ |
| ۳۰ | ۷۴/۷ | ۶۰/۲ |
| ۴۰ | ۶۲/۵ | ۵۵/۴ |
| ۵۰ | ۸۰/۷ | ۶۳ |
| ۶۰ | ۷۲/۴ | ۵۹/۵ |

با توجه به نتایج حاصله، رابطه۶ (رابطه محاسبه ضخامت ورق) جهت اعمال هیدروالاستیسیته در طراحی شناور به شکل رابطه۸ اصلاح می‌شود.

$$t = \frac{22.4 k_r s \sqrt{P_{sl}}}{\sqrt{\gamma_{hyd} \sigma_{sl}}} \qquad (۸)$$

در واقع $\gamma_{hyd}$ عبارت است از نسبت تنش ماکزیمم در حل شبه استاتیکی به هیدروالاستیک که در غالب یک ضریب اطمینان به تنش حدی طراحی اعمال می‌شود. که مقدار این ضریب برای شناور مورد نظر با توجه به نسبت بین تنش ها در زمان وقوع حداکثر تنش یعنی ۵۰ میلی ثانیه،۱/۲۸ محاسبه می‌شود. با محاسبه مجدد ضخامت ورق بر اساس رابطه۷ مقدار ضخامت ورق۱۲ درصد کاهش می‌یابد و برابر ۵/۷میلیمتر محاسبه می‌شود.

## ۵.نتیجه گیری

در کار حاضر با اتکای به روش های عددی برخورد شناور با سطح آب با درنظر گرفتن اثر هیدروالاستیسیته در حل مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حاصل از برخورد گوه صلب مقایسه شد. بررسی جامعی روی نتایج حاصل از این دو حل مثل فشارها تغییرشکل ها و تنش ها انجام گرفت. در فشارهای وارده به گوه در این دو حل تفاوت کمی مشاهده شد اما نتایج برای تغییرشکل ها و تنش‌ها برای تحلیل شبه‌استاتیکی و هیدروالاستیک اختلاف زیادی داشت. به عنوان مثال در نتایج حاصله تا مقدار ۰/۶ برای نسبت تغییر شکل‌های این دو حل به دست آمد. در طول یک برخورد حداکثر اختلاف بین نتایج تحلیل هیدروالاستیک و شبه استاتیکی در لحظه وقوع حداکثر فشار روی بدنه(لحظه خیسی کامل) اتفاق می‌افتد. بعد از بررسی نتایج در سرعت‌ها و زوایای مختلف برخورد بیان شد که با افزایش سرعت و کاهش زاویه برخورد تاثیر هیدروالاستیسیته در نتایج افزایش می‌یابد. با بررسی تاثیر شرایط مرزی در حل بیان شد که با افزایش گیرداری ورق تاثیر



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]

هیدروالاستیسیته کاهش می‌یابد. در تحلیل‌های شبه‌استاتیکی نتایج یکسانی برای مواد مختلف با سختی خمشی و شرایط بارگذاری یکسان حاصل می‌شود در حالی که در تحلیل هیدروالاستیک اثر جنس سازه در نتایج کاملا مشهود است. با توجه به بزرگ بودن مقدار جرم افزوده آب در مقایسه با جرم ورق، جرم افزوده آب تاثیر به سزایی در نتایج دارد. این مساله تنها با اعمال هیدروالاستیسیته در حل قابل بررسی می‌باشد. در سرعت‌های بالای برخورد تفاوت نتایج برای حل صلب و الاستیک به شدت افزایش می‌یابد. باید توجه داشت نیاز به شناورهای سرعت بالا روز به روز افزایش می‌یابد و مساله بهینه سازی وزن شناور در این شرایط جایگاه ویژه‌ای دارد به همین دلیل برای دست یابی به این هدف، در طراحی شناور باید از شیوه‌های دقیق تحلیل استفاده نمود که منظور کردن اثرات هیدروالاستیسیته در حل یکی از این روش‌ها می‌باشد.

## کلید واژگان

1. Slamming
2. Hydroelasticity
3. Finite element method(FEM)
4. Smoothed particle hydrodynamics(SPH)
5. ANSYS
6. Rayleigh
7. Loss factor
8. LS-DYNA
9. Plane strain
10. Shell

## .مراجع


1. Faltinsen OM, Kvalsvold J, Aarsnes JV (1997) *Wave impact on a horizontal elastic plate*, J Mar SciTechnol 2(2):87–100
2. Faltinsen OM, *Hydroelastic slamming*, Journal of Marine Science and Technology, J Mar SciTechnol (2000) 5:49–65
3. A Bereznitski. *Slmming: the role of hydroelacticity*, Int. Shipbuild. Progr., 48, no. 4 (2001) pp. 333-351
4. Stenius, I., Rosén, A. and Kuttenkeuler, J., *Explicit FE-modeling of fluid–structure interaction in hull–water impacts*
5. Stenius, I, *Finite element modeling of hydroelasticity in hull-water impacts*, KTH (Sweden) Center for Naval Architecture, 2006
6. Stenius, I., Rosen, A. and Kuttenkeuler, J., *Hydroelastic interaction in panel-water impacts of high-speed craft*, Ocean Engineering, 2010
7. Qin, Z. and Batra, RC., (2008), *Local slamming impact of sandwich composite hulls*, International Journal of Solids and Structures.
8. Kevin J Maki,Donghee Lee, Armin W Troesch, Nickolas Vlahopoulos, *Hydroelastic impact of a wedge-shaped body*, Ocean Engineering38 (2011)621–629
9. R Panciroli, S Abrate, G Minak, AZucchelli. *A Hydroelasticity in water-entry problems: Comparison between experimental and SPH results*, International Journal of Composite Structures 94 (2012) 532–539
10.HanbingLuo, Hui Wang, C GuedesSoares, *Numerical and experimental study of hydrodynamic impact and elastic response of one free-drop wedge with stiffened panels*, Ocean Engineering40(2012)1–14
11.Nashif AD, Jones DIG, Henderson JP, *Vibration damping*, Wiley; 1985
12.Lazan BJ, *Damping of materials and members in structural mechanics*, Pergamon Press; 1968
13. Thomas G, et al, *The vibratory damping of large high-speed catamarans*, Marine structures, 2008. 21(1):p.22-1
14. C Cai, H Zheng, MS Khan and KC Hung, *Modeling of material damping properties in ANSYS*. Defense Systems Division, Institute of High Performance Computing 89C Science Park Drive, Singapore Science Park I, Singapore 118261
15.Xie CY, Schaller R, Jaquerod C, *High damping capacity after precipitation in some commercial aluminum alloys*, Mater SciEng 1998;A252:78–84
16. White RG, Walker JG, *Noise and vibration*, Ellis Horwood Limited; 1986
17. Beranek LL, Ver IL, *Noise and vibration control engineering*: principles and applications, Wiley; 1992
18. Mead DJ. *Prediction of the structural damping of a vibrating stiffened plate*, In: Proceedings of AGARDconference damping effects in aerospace structures, 1979. p. 10–39
19.Ungar EE. *The status of engineering knowledge concerning the damping of built-up structures*, J Sound Vib1973; 26(1):141–54.
20. Clarkson BL, Ford RD, *The response of a typical aircraft structure to jet noise*, J R Aeronaut Soc 1962;66:31–40
21.Seif, M.S., Mousavirad, S.M., Saddathoseini, S.H.and Bertman, V., *Numerical Modeling of 2-D Water Impact in One Degree of Freedom*, Sínt. Tecnol, v.2 n.2 Valdivia nov. 2005
22. DET NORSKE VERITAS, *Rule for classification of high speed, light craft and naval surface craft*, January 2005
23. Wagner, H., (1932) *ÜberStoss- und GleitvorgängeanderOverflache von Flüssigkeiten*, Z Angew Math Mech12:193–235
24. ANSYS manual, 2010


[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-09-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1392.9.17.9.1 ]