



بررسی عددی و تجربی استحکام سازه‌ای کف پهپاد آب‌نشین هنگام برخورد با سطح آب

محمدصادق شاهسوند^{۱*} و حسین گل پرور^۲

^۱ پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^۲ استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

چکیده

در این مقاله شبیه‌سازی تئوری و تجربی استحکام سازه کف پهپاد آب‌نشین در فاز فرود بر روی سطح آب مورد مطالعه قرار گرفته است. در طراحی پرنده آب‌نشین محاسبه مقاومت سازه‌ای در مقابل ضربه حاصل از سطح آب به آن دارای اهمیت ویژه می‌باشد. در ابتدا برخورد کف پهپاد با سطح آب با استفاده از روش المان محدود، شبیه‌سازی عددی تداخل سازه با سیال (تحلیل دوفازی) شده است. سپس با انجام یک مطالعه تجربی با سرعت متغیر نتایج حاصل از حل عددی و آزمایش تجربی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. از مقایسه نتایج و نمودارهای به‌دست‌آمده از روش عددی با آزمایش تجربی مشاهده گردید که پرتاب سقوط آزاد پرنده بر سطح آب می‌تواند شبیه‌سازی بحرانی‌ترین حالت برای فرود باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع نزول و سرعت وسیله هنگام برخورد با سطح آب، بیشترین گردادیان کرنش را در راستای محور عمود بر کف پرنده آب‌نشین و کمترین تغییرات را در راستای محور مماس با سطح آب به وجود می‌آورد. مطابق داده‌های حاصل از معیارهای گسیختگی تسای هیل و تسای وو برای حل عددی و آزمایش تجربی، مقادیر تنش و استحکام سازه کف پرنده در محدوده مجاز طراحی قرار دارند.

کلمات کلیدی: پهپاد آب‌نشین، روش المان محدود، تداخل دوفازی، استحکام سازه‌ای، آزمایش تجربی.

Experimental and Numerical Investigation of Water Impact on Hull of Seaplane UAV

M. S. Shahsavand^{1*}, H. Golparvar²

¹ Researcher, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

² Aerospace University Complex, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, theoretical and experimental simulations of the UAV hull's structural strength in the landing phase on the water surface have been studied. In the seaplane design, calculating the strength of the hull structure against impact from the water surface is of special importance. Initially, the hull was numerically simulated using the finite element method, the interaction of the structure with the fluid (two-phase). Then, by performing an experimental study with variable speed, the results of numerical solution and experimental method are compared and evaluated. Comparing the results and graphs obtained from the numerical method with experimental experiments, it has been observed that throwing the seaplane free fall on the water surface can be a simulation of the most critical state for landing. The results show that increasing the descent height and velocity of the device when colliding with the water surface, causes the highest strain gradient along the axis perpendicular to the floor of the waterfowl and the least changes along the axis tangential to the water surface. According to the data obtained from the Tsai Hill and Tsai Wu rupture criteria for numerical solution and experimental testing, the values of stress and strength of the seaplane hull structure are within the allowable design range.

Keywords: Seaplane UAV; Finite Element Method; Two-Phase Interference; Structural Strength; The Experimental Test.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۳۵۸۷۵۶۴۲۴

آدرس پست الکترونیک: msshahsavand@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

در این مقاله بررسی اثر برخورد پهپاد آب‌نشین با سطح آب مورد مطالعه است. احتمال وقوع این پدیده زمانی است که هنگام فرود، فضای مناسب برای نشست روی سطح آب موجود نباشد. در این حالت خلبان با خاموش کردن موتور به صورت دستی و ایجاد حالت واماندگی در نزدیک‌ترین فاصله از سطح آب، اقدام به کوبیدن کف پرنده آب‌نشین با سطح آب می‌کند [۲۰۱]. بدین منظور برای شبیه‌سازی این حالت و بررسی اثرات این ضربه روی بدنه پرنده آب‌نشین، از روش محاسبات عددی به کمک نرم‌افزارهای حل عددی و آزمایش‌های تجربی به وسیله ساخت مدل کامپوزیتی و نصب کرنش‌سنج، مقایسه نتایج و مشخص کردن درصد خطای بین آن‌ها صورت گرفته است.

خسروی در سال ۲۰۰۳ نوشته است که شناورهای پرنده از لحاظ دسته‌بندی جزء دسته شناورهای اثر سطحی هستند. این شناور به علت پرواز در نزدیکی سطح همیشه در معرض برخورد با سطح آب است؛ بنابراین طراحی سازه این نوع شناور، علاوه بر بارهای معمول و متداول که متأثر از ظرفیت آن‌ها و نیز نحوه استفاده از آن‌ها است، شامل بارهای ناشی از برخورد شناور به سطح آب و اثرات متقابل سازه و آب در اثر بارهای دینامیکی ایجاد شده است. در این مقاله نیروهای وارد بر کف شناور و توزیع فشار ناشی از برخورد شناور به سطح آب هنگام فرود محاسبه شده است. با توجه به پیچیدگی پدیده فیزیکی فوق از تئوری ون-کارمن و تئوری هواپیمای آب‌نشین استفاده شده، روش جدید و ساده‌ای برای محاسبه نیروهای اسلیمینگ^۱ و فشار وارده بر کف شناور پیشنهاد شده است. مقایسه نتایج این روش با استاندارد بارگذاری هیدرودینامیکی و روش‌های عددی، دقت مناسب و مفید بودن این روش را در حل این‌گونه مسائل، مورد تأیید قرار داده است [۳]. لئوناردو و همکارانش در سال ۲۰۰۳، به بررسی نیروی تأثیرگذار هیدرودینامیکی وارد بر یک جسم صلب، در طول پدیده ورود آب پرداخته‌اند [۵]. برنارد و همکارانش در سال ۲۰۰۵ با روش حل عددی و آزمایش تجربی، برخورد چند مدل آزمایشگاهی با سطح آب را بررسی کرده‌اند [۸]. کری در سال ۲۰۱۱ فشارهای حاصل از برخورد

کف شناور به آب را بر اساس تئوری واگنر در آزمایشات تجربی بررسی نموده است [۹]. ایزابل در سال ۲۰۱۳ در ابتدا حضور پهپادها در آب و بازیابی آن‌ها را امکان‌سنجی کرده و سپس به بررسی ورود وسیله با قسمت دماغه به آب و نیروهای وارد بر آن پرداخته است [۶]. سانتورو و همکاران در سال ۲۰۱۴، فشار کوبنده را به‌عنوان موضوعی مهم برای تقویت پوسته و طراحی بدنه شناور از طریق اندازه‌گیری فشارهای ضربه‌ای روی مدل مقیاس‌بندی شده در امواج منظم ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها با بازرسی بصری جریان سیال هنگام پیچ و هیو^۲ با استفاده از روش ژائو و فالتینسن به تجزیه و تحلیل نتایج در حوزه زمان و فرکانس پرداخته‌اند [۴]. حسون و همکارانش در سال ۲۰۱۷، به بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر کف شناورهای کامپوزیتی هنگام برخورد سخت با سطح آب پرداخته‌اند [۷]. یان و همکاران در سال ۲۰۱۸، به بررسی بارهای ضربه‌ای وارد به زیردریایی بدون سرنشین از طریق روش المان محدود و مقایسه آن با نتایج آزمایش‌های تجربی پرداخته‌اند [۱۰]. مطالعه کارهای مشابه پیرامون موضوع این مقاله نشان می‌دهد که بیشتر آزمایش‌های تجربی به صورت کنترل شده و حالتی غیر از سقوط آزاد مورد آزمون قرار گرفته است که در این مقاله بررسی تجربی و تئوری دوفازی حالت سقوط آزاد، به‌عنوان نوآوری در نظر گرفته شده است. سناریو انجام آزمایش‌ها، نحوه کالیبراسیون کرنش‌سنج‌ها، شبیه‌سازی عددی به صورت سه‌بعدی، ساخت ابزارآلات موردنیاز و مدل مورد آزمون در این ابعاد جهت آزمایش تجربی و داده‌برداری از کرنش‌سنج‌های نصب شده به صورت آنالاین و مستقیم، تشریح گردیده است. مقایسه نتایج و نمودارهای به‌دست‌آمده از روش عددی و آزمایش تجربی نشان می‌دهد که پرتاب سقوط آزاد پرنده بر سطح آب می‌تواند شبیه‌سازی بحرانی‌ترین حالت برای فرود باشد؛ همچنین افزایش ارتفاع نزول و سرعت وسیله هنگام برخورد با سطح آب، بیشترین گرادیان کرنش را در راستای محور عمود بر کف پرنده آب‌نشین و کمترین تغییرات را در راستای محور مماس با سطح آب به وجود می‌آورد؛ همچنین مقادیر حاصل برای معیارهای گسیختگی تسای هیل و تسای وو در محدوده مجاز طراحی قرار دارند.

² Pitch & Heave¹ Slamming

مواد همسانگرد (ایزوتروپیک^۳) موادی هستند که مشخصات مکانیکی آن در یک نقطه مشخص از ماده، مستقل از راستای آن نقطه باشد. در غیر این صورت ماده‌ای غیرهمسانگرد (ارتوتروپیک^۴) خواهد بود.

جدول ۲- مشخصات مواد ارتوتروپ در حل عددی [۱۱]

ρ	E_1	E_2	ν	G_{12}	G_{13}	G_{23}
۲۰۰۰	$5e^{10}$	$5e^{10}$	۰.۲۵۴	$4/6e^9$	$4/6e^9$	$4/6e^9$

همچنین برای استفاده از معادلات شوک، مقدار سرعت C_0 برای هوا و آب به ترتیب $333/15$ و 1500 متر بر ثانیه بوده و ضرایب S و γ برای آنها صفر خواهد بود.

در بخش بعدی یک فرآیند حل دینامیک گسسته^۵ را تعریف می‌کنیم که برای آن مدت زمان تقریبی ۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. سپس نوع خروجی‌های مورد نیاز مانند تنش‌ها، کرنش‌ها و معیارهای گسیختگی را به همراه تنظیمات بررسی تک‌به‌تک لایه‌ها برای فرآیند انتخاب می‌شود. در قسمت برهم‌کنش‌ها نوع تماس سازه و سیال مشخص و شرط وجود اصطکاکی ناچیز برای آن لحاظ می‌شود که در قسمت رفتار تماسی ضریب اصطکاک $0/01$ و در قسمت رفتار طبیعی یک برخورد سخت تعریف می‌شود.

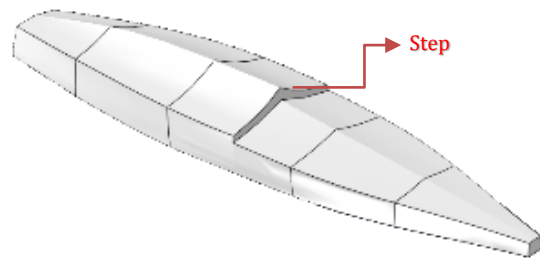
مهم‌ترین تنظیمات مربوط به حل این مسئله در قسمت تعریف شرایط مرزی مشخص می‌شود. جایی که در آن ابتدا از بخش ایجاد نیروها، گرانش زمین را که $9/81(m/s^2)$ در خلاف جهت محور y است را برای کل مجموعه در نظر گرفته شده است. سپس در بخش شرایط مرزی ابتدا سرعت دیواره‌ها در راستای محورهای اصلی x ، y ، z بسته شده و برای فاز اوپلری هم یک بخش با یک متر ارتفاع کمتر از ارتفاع کلی محیط تعریف گردیده و تمام سرعت‌ها برای سطح و کف محیط آب بسته می‌شود. این کار باعث می‌شود، آب در یک محدوده معین تصور شود و بتوان پاشش قطرات آب را

³ Isotropic
⁴ Orthotropic
⁵ Dynamic Explicit

۲- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی مسئله برخورد با سطح آب نیاز به یک مدل کامپوزیتی تغییر شکل‌پذیر و استفاده از کوپل معادلات اوپلری-لاگرانژی داریم که لاگرانژین برای توصیف تغییر شکل مدل موردنظر و اوپلری برای تغییر شکل سطح آب است.

بعد از انتخاب مدل در نرم‌افزار آباکوس، جهت ساخت یک محیط دوفازی یک مکعب رسم شده و ویژگی‌های سیال آب را برای آن در نظر گرفته شده است. مدل اولیه و اصلاح شده در شکل ۱ نمایش داده شده است و چند تکه بودن صفحات و باز بودن قسمت‌های کوچک در کناره‌ها در آن اصلاح گردیده است.



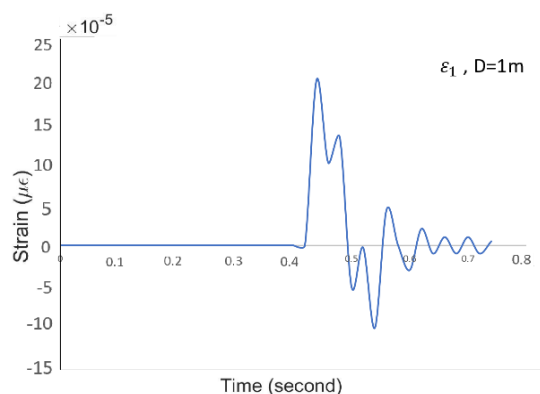
شکل ۱- مدل اصلاح شده در آباکوس

این مدل آب‌نشین به‌منظور انجام آزمایش برای اهداف مختلف با استفاده از مواد کامپوزیتی ساخته شده تا وزن آن کاهش و مقاومت آن افزایش یابد. موادی که در مدل واقعی استفاده شده در تحلیل عددی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات مواد بر طبق جداول ۱ و ۲ دسته‌بندی شده است که در آن ρ چگالی ماده، E مدول الاستیسیته، G مدول برشی، ν ضریب پواسون و β ضریب انبساط است [۱۱].

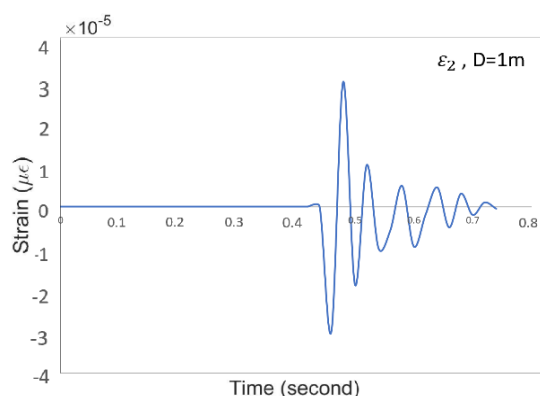
جدول ۱- مشخصات مواد ایزوتروپ در حل عددی

مواد	ρ (kg/m ³)	β	E (Pa)	ν
هوا	۱/۰۲	۰/۰۰۰۱	--	--
آب	۱۰۰۰	۰/۰۰۱	--	--
فوم	۴۰	--	$7/1e^6$	۰/۴
چوب	۴۰۰	--	$8e^9$	۰/۳

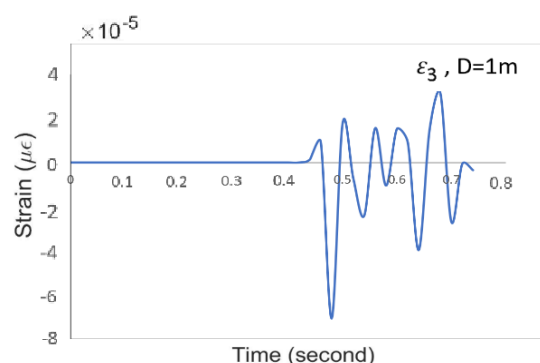
تا ۱۰ آورده شده است که محور اول عمود بر کف آب‌نشین، محور دوم مماس با سطح آب و محور سوم نیمساز دو محور



شکل ۲- نمودار تغییرات کرنش محور اول در رهایش از ارتفاع ۱ متر



شکل ۳- نمودار تغییرات کرنش محور دوم در رهایش از ارتفاع ۱ متر



شکل ۴- نمودار تغییرات کرنش محور سوم در رهایش از ارتفاع ۱ متر

در صورت ریز بودن مش‌بندی مشاهده کرد. سپس سطح آب بدون موج تصور می‌شود؛ همچنین در قسمت بعدی از تنظیمات این بخش، فاز آب و فاز هوا از یکدیگر جدا گردیده تا آن بخش‌هایی که ماده آب و ماده هوا برای آن تعریف شده در یکدیگر ورود نکنند.

در مرحله آخر مش‌بندی روی هر دو قسمت مدل کامپوزیتی و محیط اوپلری انجام داده شده است که در صورت درشت بودن مش، نفوذ مدل در آب به‌درستی صورت نمی‌گیرد و اگر هم بیش از اندازه مش‌بندی ریز باشد، تحلیل دچار خطا می‌شود و سیستم توانایی حل آن را ندارد. مقادیر تعریف شده برای شبکه‌بندی محیط اوپلری و لاگرانژی با توجه به تحلیل دینامیکی مسئله، به‌شدت بر زمان حل تأثیر داشته و با شبکه‌بندی صحیح می‌توان زمان حل را بهینه‌سازی کرد. برای مثال مش ۰/۰۱ برای مدل کامپوزیتی و ۰/۱ برای فاز اوپلری انتخاب شده است تا تغییر شکل‌ها محسوس باشد، ولی اگر پاشش آب به‌صورت کاملاً نزدیک به واقعیت بخواهد مشاهده شود، بازهم باید برای کوچک کردن شبکه‌بندی اقدام کرد.

۱-۲- نتایج تحلیل عددی

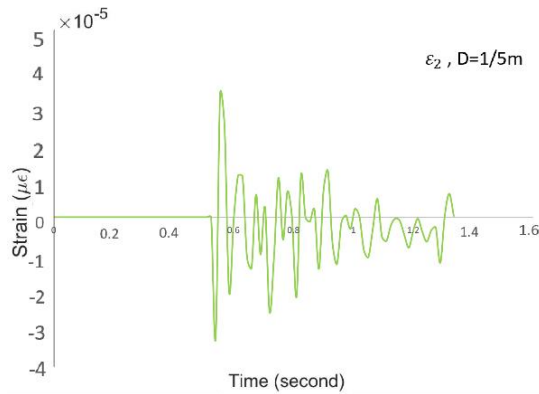
در این مرحله بعد از اتمام حل مسئله باید خروجی‌های مدنظر مورد تحلیل قرار گیرد که در این مقاله یافتن مکان بیشینه تنش بوجود آمده در قسمت کف آب‌نشین (جهت نصب کرنش سنج‌ها) و بررسی معیارهای گسیختگی کامپوزیت‌ها مدنظر بوده است که تسای هیل و تسای وو^۶ است. مطابق نتایج بدست آمده، بیشترین تنش در قسمت میانی پله (استپ^۷) مشخص شده در شکل ۱ مشاهده گردید که مبنای نصب کرنش‌سنج‌ها در آزمایش تجربی جهت مقایسه نیز قرار گرفته است؛ همچنین برای مشاهده نتایج در این نقطه باید ابتدا کرنش یا سایر خروجی‌های تعریف شده در محورهای مختصات موردنظر انتخاب شده و بعد از انتخاب المان مورد نظر، رسم دیاگرام‌های مختلف صورت گیرد. در این مقاله نتایج مقادیر کرنش‌ها در ارتفاع‌های ۱، ۱/۵، ۲ متر برحسب زمان و به تفکیک محورها در شکل‌های شماره ۲

^۶ Tsai-Heel & Tsai-Wu

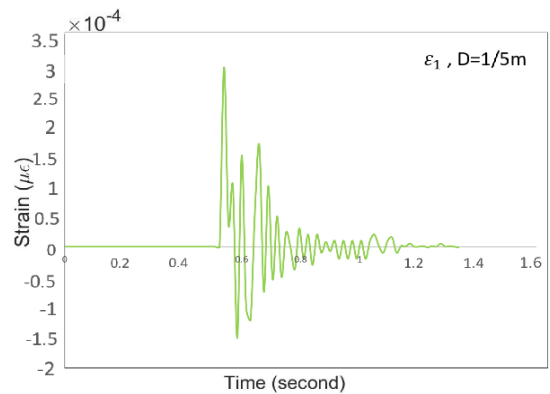
^۷ Step

برخورد مدل با سطح آب در آباکوس از ارتفاع ۲ متر نشان داده شده است.

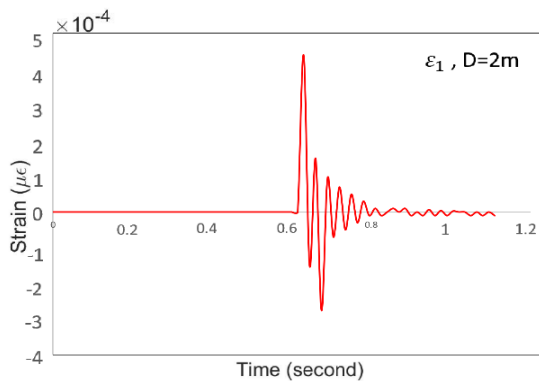
بوده و مقادیر منفی و مثبت، نشان دهنده ایجاد کشش و فشار در آن نقطه است؛ همچنین در شکل شماره ۱۱ لحظه



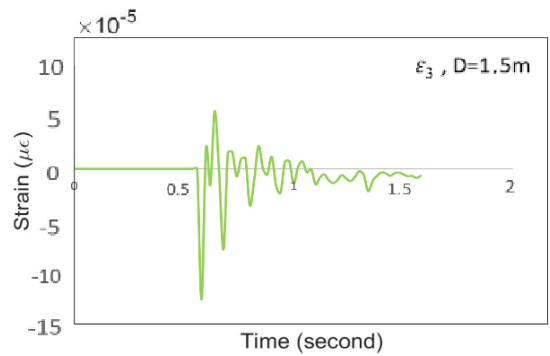
شکل ۶- نمودار تغییرات کرنش محور دوم در رهایش از ارتفاع ۱/۵ متر



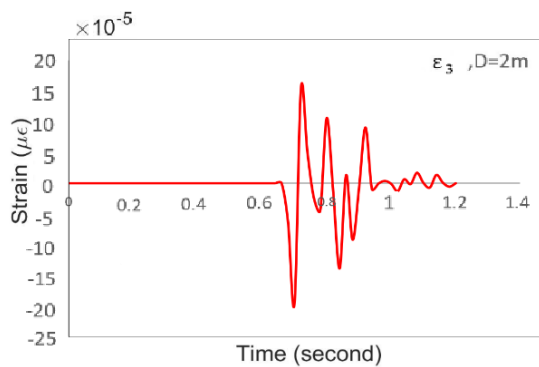
شکل ۵- نمودار تغییرات کرنش محور اول در رهایش از ارتفاع ۱/۵ متر



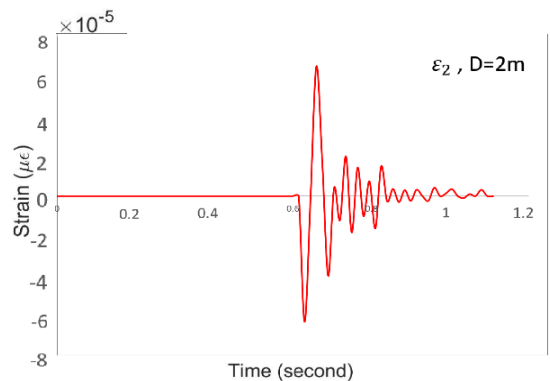
شکل ۸- نمودار تغییرات کرنش محور اول در رهایش از ارتفاع ۲ متر



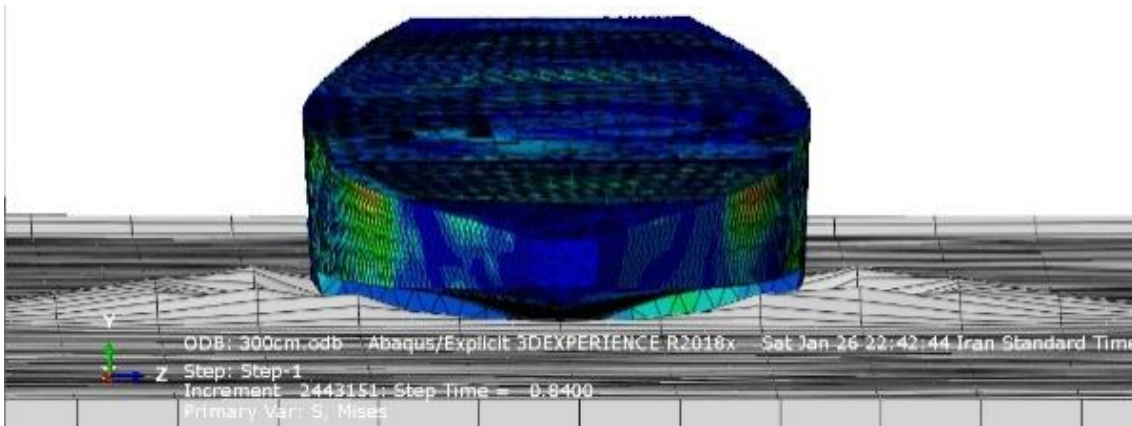
شکل ۷- نمودار تغییرات کرنش محور سوم در رهایش از ارتفاع ۱/۵ متر



شکل ۱۰- نمودار تغییرات کرنش محور سوم در رهایش از ارتفاع ۲ متر



شکل ۹- نمودار تغییرات کرنش محور دوم در رهایش از ارتفاع ۲ متر



شکل ۱۱- لحظه برخورد مدل با سطح آب در آباکوس در ارتفاع ۲ متر از سطح آب



شکل ۱۳- قالب کامپوزیتی قسمت کفی آبنشین

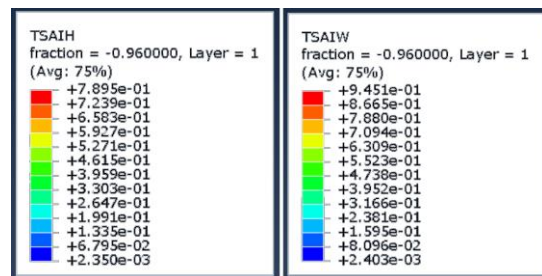
همان‌گونه که در شکل شماره ۱۲ مشخص شده، نتایج حاصل از اندازه‌گیری معیارهای گسیختگی مواد کامپوزیتی در نرم‌افزار در محدوده مجاز کمتر از ۱ قرار داشته و شکست اتفاق نخواهد افتاد.

۳- آزمایش تجربی

برای انجام این آزمایش، شرایط و ابزارهایی لازم است که مهم‌ترین آن‌ها ساخت مدل کامپوزیتی است که مورد آزمون قرار می‌گیرد. به وجود آوردن این مدل شامل، مراحل بعضاً طولانی و هزینه‌بر بوده که بعد ساخت قالب کامپوزیتی، مدل مورد نظر در آن ایجاد می‌شود. در شکل‌های شماره ۱۳ و ۱۴ قالب کامپوزیتی و مدل ساخته شده در آن به روش وکیوم بگ^۸ نشان داده شده است.

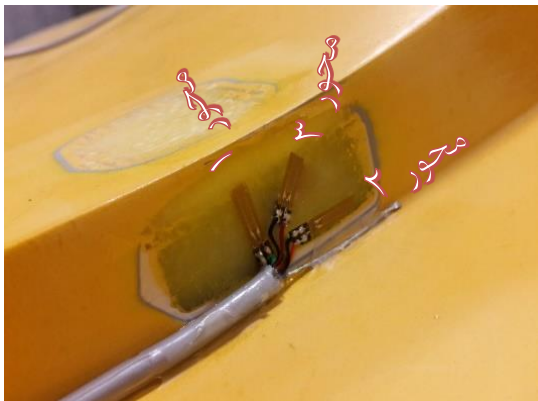


شکل ۱۴- ساخت مدل کامپوزیتی با روش وکیوم بگ



شکل ۱۲- معیار گسیختگی تسای هیل و تسای وو در ارتفاع ۲ متر

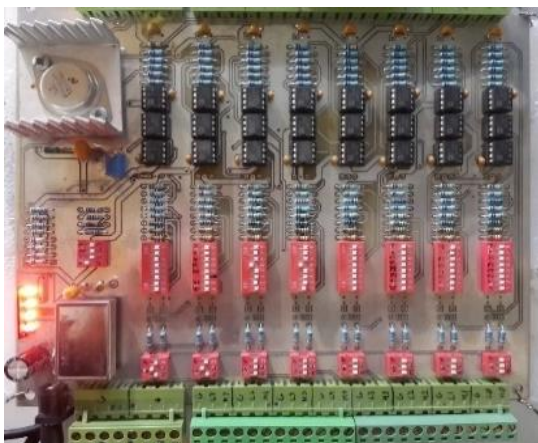
^۸ Vacuum Bag



شکل ۱۵- محل نصب کرنش سنج‌ها



شکل ۱۶- محل نصب زاویه سنج



شکل ۱۷- برد تقویت کننده

مکانیزم عملکردی این دستگاه این گونه است که دارای دو فک هلالی شکل بوده و مابین آن‌ها در سمت بالایی قطعه‌ای فلزی قرار گرفته که وقتی در حالت قفل است،

برای بررسی میزان تغییر شکل و به دست آوردن نیروهای وارد شده به مدل موردنظر از کرنش‌سنج استفاده می‌شود که دارای انواع مختلفی بسته به جنس مدل مورد آزمایش است. به دلیل اینکه هال^۹ آبنشین از جنس کامپوزیت است، باید از دسته مخصوصی از کرنش‌سنج‌ها روی آن استفاده کرد که مشخصات آن در ادامه آورده شده است. سری بی اف ال ای مخصوص کامپوزیت‌ها بوده که خود دارای مدل‌های مختلفی است که در این مدل، طول کرنش‌سنج ۵ میلی‌متر، گنج فکتور^{۱۰} ۲/۰۹ درصد و مقدار مقاومت ۱۲۰ اهم است.

محل نصب کرنش‌سنج‌ها مطابق شکل ۱۵ در این پروژه با توجه به تعیین نقاط بحرانی مشخص شده در آزمایش تحلیلی معین گردید که نتایج آزمون‌ها نشان می‌داد، بیشترین تغییر شکل در قسمت داخلی پله استپ هال اتفاق می‌افتد؛ همچنین به دلیل عدم وجود امکاناتی همچون ریل‌های کنترل‌کننده زاویه قرارگیری مدل، از یک حس‌گر زاویه‌سنج آنالوگ (شکل ۱۶) استفاده شده است که میزان انحراف از محورهای مختصات را نشان می‌داد که خود آن قادر به اندازه‌گیری شتاب نیز بود. این حس‌گر تنها برای اطمینان از تراز بودن مدل قبل از رهاش در مدل نصب گردید.

برای داده‌برداری از کرنش‌سنج‌ها و زاویه سنج نصب شده، یک تبدیل‌کننده آنالوگ به دیجیتال استفاده گردیده و چون در مبدل مورد استفاده، تأمین‌کننده ولتاژ موردنیاز موجود نبود، یک برد تقویت‌کننده (شکل ۱۷) نیز بهره‌مورد استفاده قرار گرفت. این برد تقویت‌کننده امکان تنظیم بهره (گین^{۱۱}) به صورت دستی را داشته و می‌توان از کانال‌های مختلف آن برای مبدل خروجی گرفت.

با پیش‌بینی‌های انجام شده نسبت به نیاز برای تأمین وسیله‌ای که بتواند رهاسازی را با حداقل ایجاد تغییرات در لحظه رهاش انجام دهد، طراحی یک گیره رهاساز انجام گرفت که در شکل شماره ۱۹ نشان داده شده است.

^۹ Hull

^{۱۰} Gauge Factor

^{۱۱} Gain



شکل ۲۰- لحظه برخورد مدل با سطح آب

۳-۱- نتایج آزمایش تجربی

پس از ثبت داده‌ها و جمع‌آوری کلی اطلاعات مرحله تجزیه و تحلیل آن‌ها قرار دارد که در اولین قدم با کد نویسی انجام گرفته در متلب داده‌های هر مرحله که متشکل از ۵ ردیف داده زمان، شتاب و اطلاعات کرنش‌سنج‌ها جداسازی شده و تبدیل واحد گردیده است. حس‌گرها توانایی اندازه‌گیری مقدار کرنش برحسب میلی ولت را دارا هستند، ولی واحد اندازه‌گیری کرنش $\mu\epsilon$ است که توسط رابطه زیر تبدیل می‌شود. رابطه ۱ در حالت کلی و صرف‌نظر کردن از دما و مقاومت سیم به‌علت ناچیز بودن مقادیر است.

$$\epsilon = \frac{4 \Delta e}{KAE} \quad (1)$$

در آن Δe مقدار ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج، K میزان گنج فکتور درج شده در دستورالعمل کرنش‌سنج، A میزان بهره برد تقویت‌کننده و E مقدار ولتاژ دو سر کرنش-سنج (به‌میزان ۶ ولت) است.

بعد از تبدیل اعداد از میلی ولت به میکرو استرین، نمودارها مطابق اشکال ۲۱ تا ۲۹ برحسب زمان به تفکیک ارتفاع مدل از سطح آب رسم گردید. لازم به ذکر است، شماره کرنش‌سنج‌ها مطابق محوری است که در آن راستا نصب شده‌اند.

با استفاده از رابطه ۲ می‌توان بین تنش و کرنش در کامپوزیت‌ها ارتباط برقرار کرد. به علت همراستایی محورهای مواد با محورهای هندسی، نیازی به استفاده از ماتریس انتقال نبوده و کرنش‌های بدست آمده توسط این روابط به تنش تبدیل شده و سپس تنش‌های حاصل در رابطه کنترل معیار گسیختگی کامپوزیت‌ها قرار می‌گیرد. Q_{ij} سختی‌های کاهش یافته است که براساس ثابت‌های مهندسی محاسبه می‌گردند.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_1 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

دوفک به آن قطعه فشار وارد نموده و باعث بسته بودن دهانه می‌شود. به‌محض آن‌که این مکانیزم به‌وسیله دو عملگر یا همان موتورهای قرار گرفته در دو طرف به سمت بالا کشیده می‌شود، فاصله بین دو فک خالی شده و ضمن باز شدن دهانه، مدل موردنظر با کمترین تغییرات زاویه‌ای و بدون وارد شدن ضربه رهاسازی می‌شود.

در شکل‌های شماره ۱۹ و ۲۰ مرحله تراز کردن مدل و لحظه برخورد مدل با سطح آب نشان داده شده است.



شکل ۱۸- اسلینگ^{۱۲} مخصوص آزمایش سقوط آزاد



شکل ۱۹- تراز کردن مدل

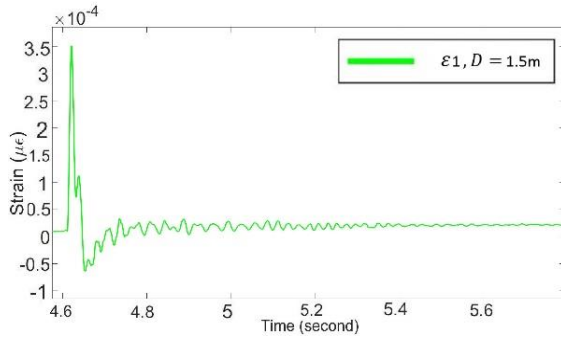
¹² Sling

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \quad (۵)$$

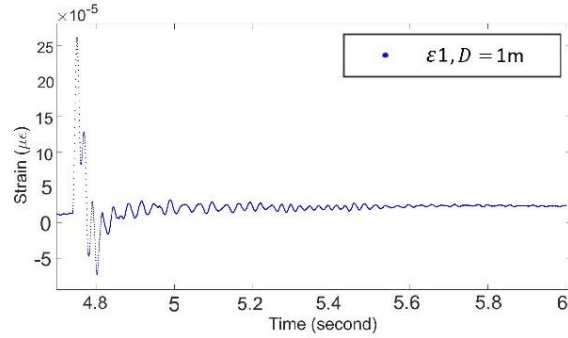
$$Q_{66} = G_{12} \quad (۶)$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \quad (۳)$$

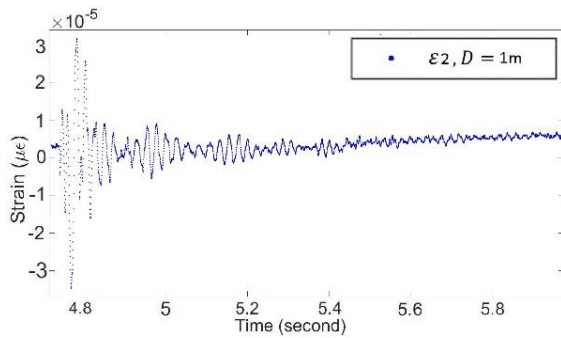
$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}} \quad (۴)$$



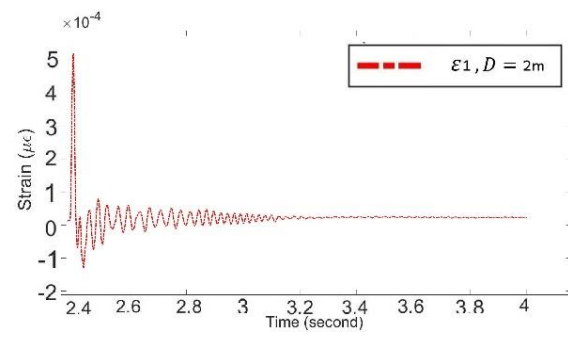
شکل ۲۲- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۱ در رهائش از ارتفاع ۱/۵ متر



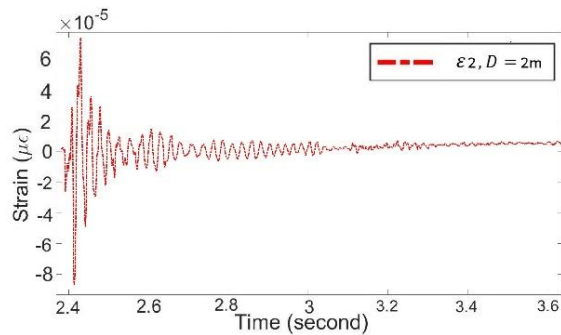
شکل ۲۱- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۱ در رهائش از ارتفاع ۱ متر



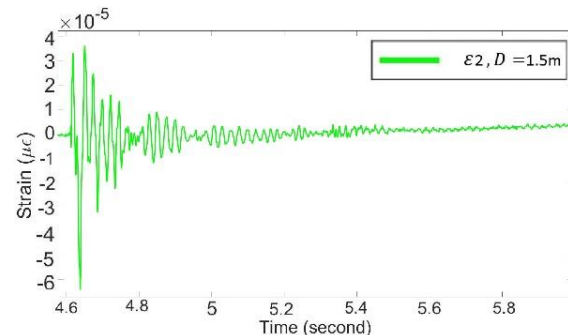
شکل ۲۴- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۲ در رهائش از ارتفاع ۱ متر



شکل ۲۳- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۱ در رهائش از ارتفاع ۲ متر



شکل ۲۶- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۲ در رهائش از ارتفاع ۲ متر



شکل ۲۵- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۲ در رهائش از ارتفاع ۱/۵ متر

بررسی جدول ۳ نشان می‌دهد که اعداد به دست آمده، در محدوده مجاز معیار گسیختگی تسای هیل قرار دارند. همچنین با استفاده از فرمول شماره ۸، درصد خطا جهت مقایسه نتایج عددی و تجربی در ارتفاع‌های مختلف محاسبه شده و نتایج در جدول شماره ۴ آمده است.

$$\text{درصد خطا} = \frac{\varepsilon_{EXP} - \varepsilon_{FEM}}{\varepsilon_{EXP}} \times 100 \quad (۸)$$

جدول ۳- کنترل معیار گسیختگی تسای هیل

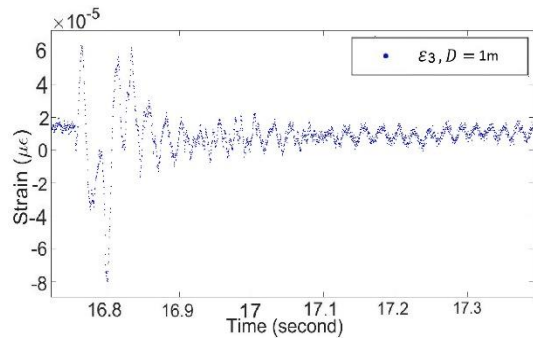
H(m)	۱	۱/۵	۲
TSAIH	۰/۸۱۲	۰/۸۶۳	۰/۹۷۶

جدول ۴- میزان درصد خطای روش تحلیلی و تجربی در ارتفاع‌های مختلف

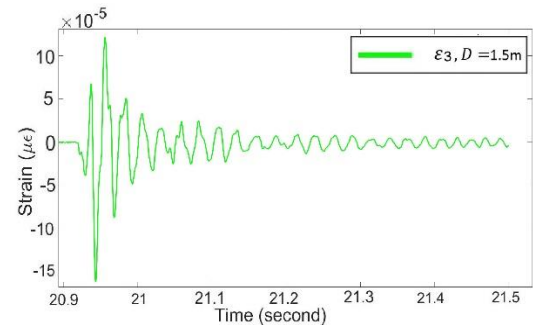
کرنش	ارتفاع رهایش (متر)		
	۱	۱/۵	۲
$\varepsilon_{1 EXP.} (\mu\epsilon)$	۲۶۲	۳۵۲	۵۱۹
$\varepsilon_{1 FEM} (\mu\epsilon)$	۲۰۵	۲۹۵	۴۴۰
درصد خطا	۲۱/۷۵	۱۶/۱۹	۱۵/۲۲
$\varepsilon_{2 EXP.} (\mu\epsilon)$	۳۳	۶۴	۸۹
$\varepsilon_{2 FEM} (\mu\epsilon)$	۳۱	۶۰	۶۹
درصد خطا	۶/۰۶	۶/۲۵	۲۲/۴۷
$\varepsilon_{3 EXP.} (\mu\epsilon)$	۸۰	۱۵۲	۲۴۵
$\varepsilon_{3 FEM} (\mu\epsilon)$	۶۷	۱۲۵	۲۰۳
درصد خطا	۱۶/۲۵	۱۷/۷۶	۱۷/۱۴

۵- نتیجه‌گیری

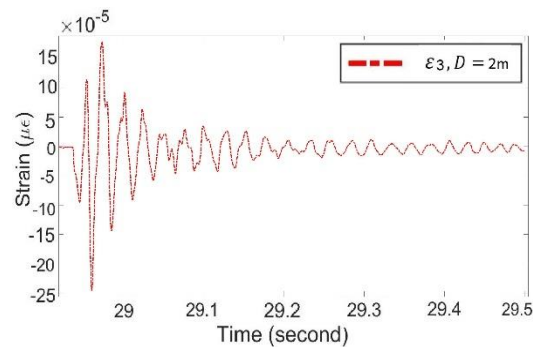
در مقدمه این مقاله، اهمیت مطالعه پدیده اسلیمینگ و لزوم انجام آزمایش‌های عددی و تجربی بیان گشت؛ همچنین در بخش دوم مراحل تحلیل نرم‌افزاری و انجام تنظیمات لازم در آن به همراه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار بیان گردیده است. سپس در بخش سوم نحوه ساخت مدل مورد نظر و سایر لوازم موردنیاز برای انجام آزمایش، به همراه داده‌های



شکل ۲۷- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۳ در رهایش از ارتفاع ۱ متر



شکل ۲۸- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۳ در رهایش از ارتفاع ۱/۵ متر



شکل ۲۹- نمودار پاسخ دینامیکی تجربی برخورد پرنده با سطح آب برای کرنش سنج ۳ در رهایش از ارتفاع ۲ متر

همچنین از رابطه ۷ جهت کنترل معیار گسیختگی تسای هیل استفاده می‌شود [۱۱].

$$I_F = \frac{\sigma_x^2}{X^2} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{X^2} + \frac{\sigma_y^2}{Y^2} + \frac{\tau_{xy}^2}{S^2} \quad (۷)$$

نتایج کنترل این معیار در ارتفاع‌های مختلف، مطابق جدول ۳ به دست آمده است.

اویلری از محیط شبکه‌بندی اویلری خارج شود از دامنه محاسباتی نیز خارج می‌گردد. ماده اویلری می‌تواند با ماده لاگرانژی در تماس باشد که به تماس اویلری-لاگرانژی معروف است. شبیه‌سازی‌هایی که از این نوع تماس استفاده می‌کنند، آنالیزهای کوپل اویلری-لاگرانژی نامیده می‌شوند. این ابزار قدرتمند این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان بسیاری از مسائل چند فازی از جمله تماس سازه با سیال را حل کرد.

چندین معادله حالت متفاوت برای بیان رفتار هیدرودینامیکی مواد در نرم‌افزار آباکوس وجود دارد. معادله حالت یک معادله پایه است که فشار را به‌صورت تابعی از چگالی و انرژی داخلی تعریف می‌کند. معادله بقای انرژی برابر افزایش در انرژی داخلی بر واحد جرم به نرخ کار ایجادشده با تنش‌ها و نرخ افزایش دما، قرار می‌گیرد. در غیاب هدایت گرمای رسانایی معادله انرژی را می‌توان به شکل رابطه ۹ نوشت:

$$\rho \frac{\partial E_m}{\partial t} = (p - p_{bv}) \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + s : \dot{\epsilon} + \rho \dot{Q} \quad (9)$$

که p تنش فشاری است که در جهت تراکم، مثبت تعریف می‌شود. E_m انرژی بر واحد جرم، ρ چگالی، p_{bv} تنش فشاری مربوط به لزجت حجمی، \dot{Q} نرخ گرما بر واحد حجم و s تانسور تنش می‌باشد که به‌صورت عددی در تانسور نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ ضرب شده است. فرض می‌شود که معادله حالت برای فشار به‌عنوان تابعی از چگالی و انرژی داخلی بر واحد جرم باشد:

$$p = f(\rho, E_m) \quad (10)$$

انرژی داخلی را می‌توان از معادله ۱۰ حذف کرد تا رابطه‌ای بین فشار و حجم یا عکس چگالی حاصل شود که معادله یکتایی وابسته به جنسی است که با معادله مدل حالت تعریف‌شده است. این رابطه یکتا به نام منحنی هوگونیوت شناخته می‌شود و بیانگر مکان هندسی حالت‌های فشار-حجم قابل حصول در پشت یک شوک می‌باشد. فشار هوگونیوت، تنها تابعی از چگالی می‌باشد و عموماً از ترسیم داده‌های تجربی حاصل می‌شود. همان‌طور که گفته شد برای بیان رفتار ماده اویلری از یک معادله حالت استفاده شده است. معادله حالت می-گرانزین برای انرژی خطی و شکل معمول آن به شکل رابطه ۱۱ است:

$$p - p_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (11)$$

استخراج شده توسط دستگاه‌های مخصوص بیان گردیده و در انتهای این بخش نیز، مقایسه بین روش عددی و تجربی صورت گرفته است. بعد از دسته‌بندی داده‌ها و رسم نمودارها در هر مرحله، با کد نویسی انجام شده توسط متلب، مقدار ماکزیمم نوسان کرنش‌ها در هر ارتفاع آورده شده است. از بررسی نتایج تئوری به‌دست‌آمده به‌وسیله نرم‌افزار با نتایج تجربی، قرار داشتن اعداد حاصل در محدوده مجاز معیار گسیختگی کامپوزیت‌ها مشاهده گردیده است؛ بنابراین پرتاب سقوط آزاد می‌تواند شبیه‌سازی مناسبی برای فرود پرنده بوده و افزایش ارتفاع نزول و سرعت وسیله هنگام برخورد با سطح آب، بیشترین گرادین کرنش را در راستای محور عمود بر کف پرنده آب‌نشین و کمترین تغییرات را در راستای محور مماس با سطح آب به وجود می‌آورد. از نوآوری‌های انجام شده در این مقاله می‌توان به بررسی تجربی و تئوری دو فازی حالت سقوط آزاد اشاره کرد؛ همچنین سناریو انجام آزمایش‌ها، نحوه کالیبراسیون کرنش‌سنج‌ها، شبیه‌سازی عددی به‌صورت سه‌بعدی، ساخت ابزارآلات موردنیاز و مدل مورد آزمون در این ابعاد جهت آزمایش تجربی و داده‌برداری از کرنش‌سنج‌های نصب شده به‌صورت آنالین و مستقیم، تشریح گردیده است.

۶- ضمیمه

در روش‌های آنالیز لاگرانژی، گره‌ها نسبت به ماده در جای خود ثابت هستند و المان همان‌طور که ماده تغییر شکل پیدا می‌کند دچار تغییر شکل می‌شوند. المان‌های لاگرانژین همواره صد درصد از یک ماده تشکیل شده‌اند؛ بنابراین شرایط مرزی ماده، منطبق بر محدوده المان است.

در روش آنالیز اویلری، برخلاف روش‌های لاگرانژی، گره‌ها در جای خود ثابت هستند و ماده در آن‌ها حرکت کرده یا تغییر شکل می‌دهد. المان‌های اویلری ممکن است که صد درصد از یک ماده تشکیل نشده باشند و ممکن است که از چندین ماده و یا کاملاً از فضای خالی تشکیل شده باشند. بنابراین شرایط مرزی هر ماده اویلری باید در هر بازه زمانی حل، محاسبه شود و مرز هر ماده مشخص شود. شبکه‌بندی اویلری معمولاً به شکل المان‌های مکعب مستطیل منظم هستند که باعث می‌شود درصد هر ماده و مرز آن در یک المان آسان‌تر مشخص گردد. اگر هر ماده

[۲] بررسی اثرات ناشی از ضربه در سازه‌های ساندویچی شامل نشست پرنده‌ها روی آب-سید مصطفی حسینی طباطبایی-مرکز نهاب دانشگاه جامع امام حسین(ع).

[۳] خسروی م (۱۳۸۵) محاسبه توزیع فشار زیر بدنه یک شناور پرنده هنگام فرود. هشتمین همایش صنایع دریایی.

[4] Santoro N, Begovic E, Bertorello C, Bove A, De Rosa S, Franco F (2014) Experimental study of the hydrodynamic loads on high speed planing craft. International Symposium on Dynamic Response and Failure of Composite Materials, DRaF.

[5] Pesce CP, Casetta L (2003) The free surface hydrodynamic impact problem: A brief review on asymptotic solutions and experiments with a hemisphere. 17th International Congress of Mechanical Engineering.

[6] Bird I (2013) hydrodynamic impact analysis and testing of an unmanded aerial. Embry-Riddle Aeronautical University.

[7] Hassoon OH, Tarfaouia M, El Malki Alaoui A (2017) An experimental investigation on dynamic response of composite panels subjected to hydroelastic impact loading at constant velocities. Eng Struct 153: 180-190.

[8] Peseux B, Gornet L, Donguy B (2017) Hydrodynamic impact: Numerical and experimental investigations. J Fluid Struct 21(3): 277-303

[9] Sell C (2011) Validation of seaplane impact load theory and structural analysis of the martin 270. B.S., University of New Orleans.

[10] Yan GX, Pan G, Shi Y, Chao LM, Zhang D (2018) Experimental and numerical investigation of water impact on air-launched AUVs. Ocean Eng 167:156-168

[۱۱] مکانیک سازه‌های مرکب-تألیف دکتر سید محسن محسنی شکیب-انتشارات دانشگاه امام حسین(ع).

[۱۲] عرفانیان م، مقیمان م (۱۳۹۴) مطالعه عددی و آزمایشگاهی مسئله ورود یک پرتابه به آب و بررسی اثر سرعت برخورد بر زمان و عمق جدایش حباب. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۶۰-۵۳(۲): ۱۵.

که در آن p_H و E_H به ترتیب فشار هوگونیوت و انرژی مخصوص بر واحد جرم بوده و تنها تابعی وابسته به چگالی می‌باشند. Γ نسبت گرانزین است که طبق رابطه ۱۲ تعریف می‌شود؛

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho} \quad (12)$$

که Γ_0 ثابت ماده و ρ_0 دانسیته مرجع می‌باشد. انرژی هوگونیوت با فشار از طریق رابطه ۱۳ به هم وابسته‌اند.

$$E_H = \frac{\rho H \eta}{2p_0} \quad (13)$$

در رابطه بالا، η کرنش تراکمی حجمی است و به صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود.

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (14)$$

با حذف Γ و E_H از رابطه بالا، رابطه ۱۵ حاصل می‌شود.

$$p = p_H \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (15)$$

معادله حالت و معادله انرژی معادلات کوپل شده‌ای برای فشار و انرژی داخلی ارائه می‌دهند. نرم‌افزار آباکوس به‌طور هم‌زمان هر یک از این معادلات را در هر نقطه از جسم با روش صریح حل می‌کند. رابطه معمول برای داده‌های هوگونیوت به صورت رابطه ۱۶ است.

$$p_H = \frac{p_0 C_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (16)$$

که C_0 و s رابطه خطی بین سرعت خطی شوک، U_s و سرعت مخصوص، U_p ، را با رابطه ۱۷ تعریف می‌کنند.

$$U_s = C_0 + sU_p \quad (17)$$

با فرضیات فوق، فرم هوگونیوت خطی $U_s - U_p$ طبق رابطه ۱۸ نوشته می‌شود.

$$p = \frac{p_0 C_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2}\right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \quad (18)$$

معادله حالت خطی می‌تواند برای مدل‌سازی جریان‌های آرام غیرقابل تراکم لزج و غیر لزج با معادلات حرکت ناویر-استوکس استفاده شود [۱۲].

۷- مراجع

[1] Federal Aviation Requirements (FAR), Part 23-473, 2001.