

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1402.9.1.8.3](https://doi.org/10.24767/131.1402.9.1.8.3)

درصد همانندی: ۱٪

## تعیین تابع تبدیل سیستم موج‌ساز یک حوضچه کشش

سیدجلیل اثنی عشری<sup>۱</sup>، حسن فروزانی<sup>۲</sup>، امیرحسین نیک‌سرشت<sup>۳</sup>

milad78d@gmail.com

hforouzani@mut.ac.ir

nikser@sutech.ac.ir

<sup>۱</sup> دانشجوی ارشد مهندسی مکانیک، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

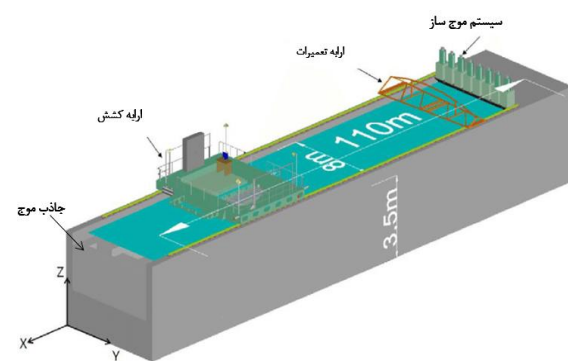
### چکیده

تعیین تابع تبدیل سیستم موج‌ساز در حوضچه‌های کشش یکی از مهم‌ترین ملزومات محاسبات سیستم موج‌ساز حوضچه‌های کشش است. در این تحقیق یک سیستم موج‌ساز حوضچه کشش جهت تعیین تابعی مناسب و با ورودی‌های مشخص تحلیل و ارزیابی شده است. در ابتدا پس از بررسی منابع علمی و داده برداری‌های اولیه با استفاده از معادله‌های اعتبارسنجی معتبر، محاسبات به صورت تئوری انجام شده و با اعتبارسنجی داده‌های حاصل، آزمایش‌های آزمایشگاهی در حوضچه انجام شده است. به منظور کاهش خطاهای موجود و اطمینان از اطلاعات ثبت‌شده، آزمایش‌ها با تکرار چندباره صورت گرفته است. در پایان با تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و مقایسه با نتایج تئوری، یک تابع تبدیل برای سیستم موج‌ساز حوضچه کشش استخراج شده است.

**واژه‌های کلیدی:** موج‌ساز، حوضچه کشش، ارتفاع موج، طول موج، استروک، سرعت موج، موج نگار.

## ۱. مقدمه

امروزه مراکز تحقیقاتی پیشرفته علوم دریایی از آزمایشگاه‌های حوضچه کشش با تجهیزات مناسب بهره می‌برند. در این آزمایشگاه‌ها، برای شبیه‌سازی شرایط دریایی تجهیزات متعددی وجود دارد. به‌عنوان مثال برای تولید امواج و جریان مصنوعی در یک کانال طویل از مولد موج در یکی از دو انتهای آن و برای جلوگیری از انعکاس امواج و در نتیجه جلوگیری از تولید امواج نامطلوب برگشتی، از یک جاذب موج (شکل ۱) در انتهای دیگر استفاده می‌شود.



شکل ۱. جانمایی کلی یک حوضچه کشش [۱]

## ۱-۱. مروری بر تحقیقات پیشین

با توجه به تعداد محدود حوضچه‌های کشش صنعتی در سراسر دنیا، تحقیقات معدودی در این زمینه انجام شده و طبیعتاً نتایج محدودی نیز از این تحقیقات در مجامع علمی ارائه شده است. از این رو سابقه تحقیقاتی چندانی در این زمینه در دسترس نبوده است.

در سال ۲۰۱۲ انبرسوز و پسندیده به‌وسیله تولید امواج کاملاً غیرخطی در کانال‌های محاسباتی با موج‌ساز نوع پیستونی و فلپ شکل، نتایج تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی تجزیه و تحلیل و مقایسه کردند. در این تحقیق معادلات ناپایدار دوبعدی ناویر-استوکس با روش حجم - سیال برای پوشش سطح آزاد در نظر گرفته شده و طیف گسترده‌ای از امواج که توسط موج‌سازهای پیستونی و فلپ شکل برای حوضچه‌هایی با عمق متوسط و عمیق ایجاد شده، در این تحقیق بررسی شده است [۲].

ویلیام فینگان و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲ با شبیه‌سازی عددی امواج خطی آب و برهم‌کنش، ساختار موج را بررسی و تحلیل کردند. در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی امواج خطی آب عمیق و امواج خطی برای حالت عمق محدود با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است [۳].

ایگور روژیچ و همکاران در سال ۲۰۱۸، تحقیقی با عنوان «رویکرد جدید برای معادله موج‌ساز نوع فلپ شکل با حد شکست موج» ارائه کرده و نشان دادند که محدودیت‌های نظریه موج‌ساز کلاسیک، به ارائه یک نظریه جدید منجر می‌شود. رابطه ارائه شده در این تحقیق می‌تواند به‌طور مستقیم عملکرد امواج منظم و امواج شکسته را بر اساس نوع فلپ پیش‌بینی کند [۴].

در سال ۲۰۲۲ مینگ هی و عباس خیر درباره یک روش نظری برای تولید امواج منفرد با استفاده از موج‌سازهای نوع پیستونی و اعتبارسنجی هیدرودینامیکی تحقیقاتی انجام داده‌اند. در این پژوهش، تئوری و محدودیت‌های موج‌سازهای عمومی ارائه شده و بر اساس آن‌ها یک مدل هیدرودینامیکی (SPH) برای شبیه‌سازی تولید موج منفرد بیان شده است. اعتبارسنجی این روش نیز با بازتولید آزمایش‌های موجود و مقایسه نتایج حاصل انجام شده است [۵].

اخیراً جی ژانگ و همکاران، پژوهشی در زمینه میزان افزایش امواج نامنظم ناشی از شتاب دادن جریان متوالی بر روی یک نوار غوطه‌ور، انجام داده‌اند. در این تحقیق نتایج تجربی امواج نامنظم با ارتفاع زیاد ارائه شده است. این امواج روی یک نوار دوزنقه‌ای غوطه‌ور با حضور یک جریان پس‌زمینه در یک کانال موج منتشر شده‌اند. همچنین پدیده غیرتعدالی (NEP) ناشی از تغییرات قابل توجه عمق آب و میانگین سرعت جریان افقی نیز بررسی شده است. ایشان نشان دادند که یک جریان متوالی شتاب‌دهنده می‌تواند غیر گاوسی بودن حالت دریا و بزرگی وسعت فضای غیرتعدالی را افزایش دهد [۶].

## ۱-۲. اهمیت موضوع

مهم‌ترین نقطه قوت هر سیستم موج‌ساز، دقیق و تنظیم بودن سیستم کنترل آن جهت ارسال داده‌های موردنیاز کاربر و اجرای آن توسط موج‌ساز در حوضچه کشش است. طراحی یک سیستم موج‌ساز مطلوب، با توجه به مأموریت و امکانات حوضچه صورت می‌گیرد. از آنجا که تحلیل امواج منظم از طریق روابط ریاضی ساده‌تر است، پس برای تولید امواج توسط دستگاه موج‌ساز، معمولاً امواج از نوع منظم در نظر گرفته می‌شود، سپس امواج نامنظم از ترکیب این گونه امواج ایجاد می‌شود. معیارهای سنجش امواج تولیدشده (داده‌های خروجی سیستم موج‌ساز) معمولاً پارامترهای ارتفاع موج، طول موج، دوره تناوب موج و عمق آب است. در نتیجه برای اینکه سیستم موج‌ساز امواج موردنظر را تولید کند، باید داده‌های ورودی در اتاق کنترل و داده‌های دریافت شده توسط سیستم موج‌ساز طوری انتخاب شود که پارامترهای گفته‌شده به‌عنوان داده‌های خروجی تلقی شود. بر این اساس با توجه به داده‌های ورودی می‌توان به دو روش داده‌های خروجی را استخراج کرد:

۱. با استفاده از روابط تحلیلی؛

۲. با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی.

به‌طور کلی سیستم‌های موج‌ساز در انواع مختلف هوایی، گوه‌ای<sup>۱</sup>، پیستونی<sup>۳</sup> و لولایی<sup>۴</sup> طراحی و ساخته می‌شوند. اما متداول‌ترین نوع آن، سیستم‌های موج‌ساز از نوع پیستونی و لولایی است [۷]. در این تحقیق سیستم موج‌ساز مورد استفاده، از نوع لولایی است. در موج‌ساز لولایی رابطه بین حرکات و جابه‌جایی موج‌ساز و امواج به‌دست آمده ناشی از حرکات موج‌ساز را می‌توان از معادله هنری هاولاک به‌دست آورد [۴].

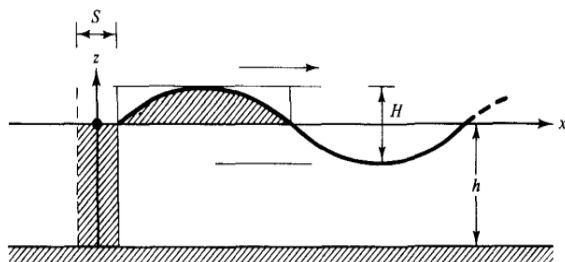
$$\frac{H}{S} = 4 \left( \frac{\sinh kh}{kh} \right) \frac{kh \sinh kh - \cosh kh + 1}{\sinh 2kh + 2kh} \quad (1)$$

که در این رابطه  $H$  ارتفاع موج،  $S$  میزان جابه‌جایی صفحه موج‌ساز (پدل)،  $h$  عمق آب حوضچه و  $k$  عدد موج است. در شکل ۲ نمایی از این پارامترها نشان داده شده است.

در معادله (۱) حداکثر ارتفاع موج، قبل از شکست تعریف شده است. به‌عبارت‌دیگر در این معادله نسبت ارتفاع موج به طول موج ( $H/\lambda$ ) باید کمتر مساوی  $0.1$  باشد، تا از شکست و تیزی موج جلوگیری شود. اما مشکل آنجا نمایان می‌شود که این معادله بی‌بعد تابع عدد موج ( $k$ ) است، در حالی که موج‌ساز در عمل توسط فرکانس پدل ( $f$ ) کنترل می‌شود. ارتباط این پارامترها را می‌توان توسط رابطه پراکندگی موج ضمنی بیان کرد [۹].

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $g$  شتاب گرانش است. بنابراین ارتفاع موج تولیدشده را نمی‌توان مستقیماً براساس پارامترهای تنظیم موج‌ساز (مرکز حرکت پدل، عمق آب و فرکانس) پیش‌بینی کرد. به‌عبارت‌دیگر با اندازه‌گیری طول موج و حل رابطه ۲ و تعیین عدد موج برای فرکانس و عمق معین، ارتفاع موج با رابطه اصلی مشخص می‌شود.



شکل ۲. تئوری موج‌ساز [۸]

## ۲. روش‌های استخراج داده‌های خروجی

### ۲-۱. روش تحلیلی

در این روش ابتدا باید پارامترهای نهایی موردنیاز برای ورود به سیستم کنترل موج‌ساز حوضچه کشش مشخص شود. پس از مشخص شدن این مهم، بایستی محاسبات تئوری به نحوی انجام شود که در پایان بتوان پس از استخراج اطلاعات و نمودارها، تناسب مشخصی میان پارامترهای نهایی و ورودی حال حاضر سیستم کنترل موج‌ساز برقرار ساخت. پس از مشخص شدن پارامترهای ورودی سیستم کنترل، لازم است

فرکانس ورودی محدود به مقادیر بین ۰/۱ تا ۳ بوده و میزان جابه‌جایی پدل موج‌ساز نیز محدود به مقدار ۱ تا ۲۴۵ میلی‌متر است.

#### محدودیت شکست موج

زمانی که فرکانس خطی افزایش پیدا کند، بالتبع احتمال بروز پدیده شکست موج نیز افزایش می‌یابد. از این رو محدودیت جدیدی به نام  $H/\lambda$  پدیدار می‌شود. برای جلوگیری از بروز پدیده شکست، مقدار عددی این پارامتر باید کمتر از ۰/۱ باشد. با تنظیم مقدار استروک می‌توان این محدودیت را اعمال کرد.

#### طول موج

به بیانی ساده، در فیزیک طول موج را دوره مکانی یک موج متناوب تعریف می‌کنند. در واقع طول موج فاصله مکانی از یک قله موج تا قله دیگر است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، واضح است که امواج با فرکانس بالا، طول موج کوتاه‌تر و امواج با فرکانس پایین، طول موج بلندتری خواهند داشت. طول موج تنها فاصله بین دو قله یا دو دره در یک موج متناوب است و معیاری برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی نیست.

#### سرعت انتشار موج

سرعت انتشار موج بیانگر سرعت انتشار اختلال موج در طول جابه‌جایی است [۱۰]. سرعت انتشار موج هم به نوع موج و هم به محیط انتشار آن بستگی دارد. سرعت انتشار موج با طول موج رابطه مستقیم و با دوره تناوب رابطه عکس دارد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس، سرعت انتشار موج کاهش می‌یابد.

در شکل ۵ ارتفاع نسبی (نسبت ارتفاع موج به جابه‌جایی صفحه موج‌ساز) که یک پارامتر بی‌بعد است، بر حسب فرکانس ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که چگونه یک منحنی موج‌ساز با افزایش عمق نسبی گسترش می‌یابد. واضح است که با رسیدن به حداکثر شیب موج، نسبت ارتفاع

همخوانی اطلاعات ورودی سیستم کنترل با پدل موج‌ساز بررسی شود. با توجه به اینکه دو پارامتر ورودی سیستم شامل فرکانس خطی و استروک<sup>۵</sup> یا میزان جابه‌جایی پدل است، می‌توان پس از انجام چند آزمایش تجربی و اندازه‌گیری دامنه حرکت فلپ، تطابق اطلاعات ورودی در سیستم کنترل موج‌ساز و میزان حرکت رفت و برگشت پدل را بررسی کرد. در خصوص حوضچه مورد نظر، پس از انجام چندین آزمایش مشخص شد که تطابق خوبی بین اطلاعات ورودی در سیستم کنترل موج‌ساز و دامنه حرکت پدل وجود داشته و نیازی به استفاده از ضریب تصحیح در این پارامتر وجود ندارد. در مورد آزمایش پارامتر فرکانس، با توجه به اینکه عدد ورودی متناظر با این پارامتر معادل با تعداد رفت و برگشت فلپ موج‌ساز در یک ثانیه است، سعی شده برای آزمایش تطبیق، از اعداد ۰/۲، ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ استفاده شود.

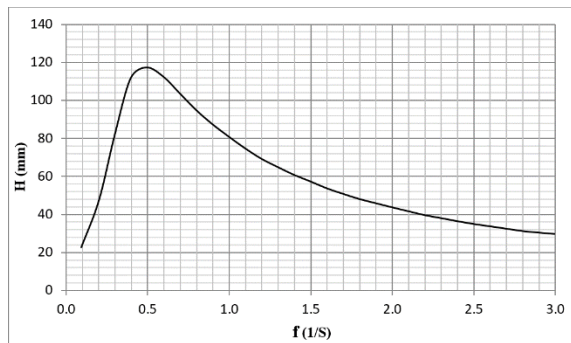
پس از وارد کردن مقادیر با استروک‌های مختلف مقایسه آن با یک زمان‌سنج مشخص انجام شد و خوشبختانه در این پارامتر هم نیاز به ضریب اصلاح نبود. پس از انجام آزمایش‌ها و اطمینان از تطابق مقادیر ورودی با عملکرد موج‌ساز، لازم است که پارامترهای مورد نیاز جهت تبدیل پارامترهای ورودی فعلی به دو یا سه پارامتر معتبر تعیین شوند. رایج‌ترین و منطقی‌ترین پارامترهای ورودی مناسب برای سیستم کنترل موج‌ساز عبارت‌اند از:

- ارتفاع موج؛
- دوره تناوب موج؛
- طول موج.

#### محدودیت سیستم کنترل موج‌ساز

طراحی سیستم کنترل موج‌ساز حوضچه کشش مورد نظر طوری است که محدودیت‌های خاصی دارد. به‌عنوان مثال نمی‌توان مقدار فرکانس خطی و استروک را به‌صورت دلخواه وارد کرد. به زبان ساده‌تر در این سیستم کنترل، حاصل ضرب دو عدد ورودی فرکانس خطی و استروک باید کمتر مساوی ۸۸ باشد. همچنین پارامترهای ورودی به سیستم کنترل موج‌ساز نیز محدودیت‌هایی دارند. به‌عنوان مثال مقدار

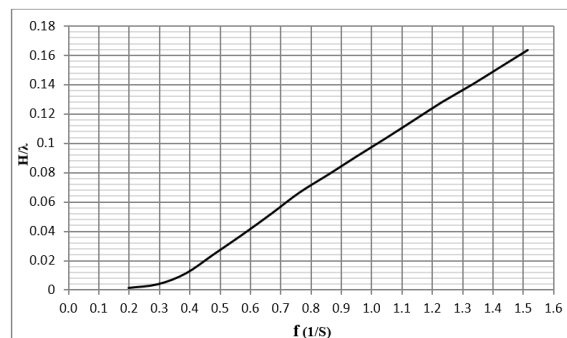
کدام فرکانس و با چه میزان اختلافی نسبت به شکل ۶ ایجاد شده است.



شکل ۶. تغییرات ارتفاع موج برحسب فرکانس

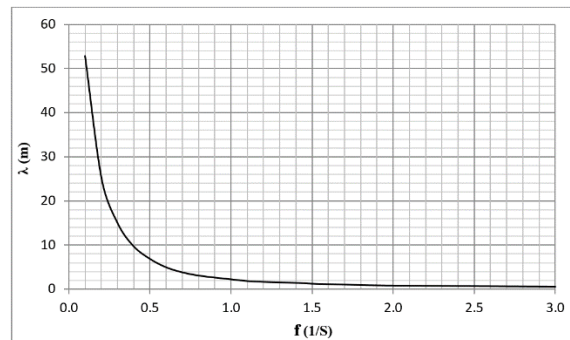
#### نسبت ارتفاع موج به طول موج ( $H/\lambda$ )

با اطلاع از نسبت ارتفاع موج به طول موج می‌توان دسته‌بندی امواج ایجادشده را تشخیص داد، همچنین برای جلوگیری از پدیده شکست موج در اعداد بالاتر از  $0/1$  پیشگیری‌های لازم را انجام داد. با توجه به شکل ۷ مشخص است که از فرکانس  $1/1$  به بعد شکست موج رخ خواهد داد، بنابراین در فرکانس‌های بیش از این مقدار، محاسبات بی‌اعتبار است. از طرف دیگر با توجه به نمودار دسته‌بندی امواج (شکل ۸) امواج حاصل در دسته‌بندی امواج خطی قرار می‌گیرند. در ادامه با توجه به افزایش بیش‌ازحد مجاز در فرکانس‌های  $1/1$  تا  $1/5$ ، باید با کاهش میزان جابه‌جایی پدل موج‌ساز به میزان  $30\%$  درصد، از شکست موج در این فرکانس‌ها جلوگیری کرد. تأثیر کاهش مقدار استروک با ضریب  $0/7$  در شکل ۹ ارائه شده است.

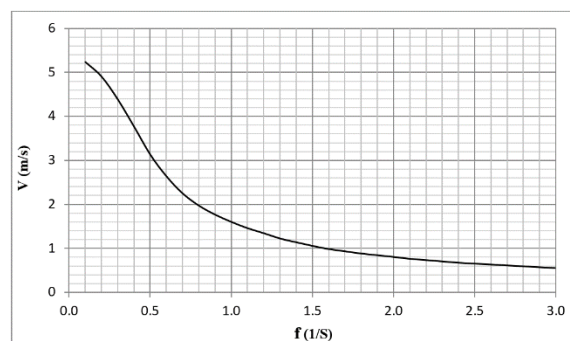


شکل ۷.  $H/\lambda$  برحسب فرکانس بدون اعمال ضریب  $0/7$

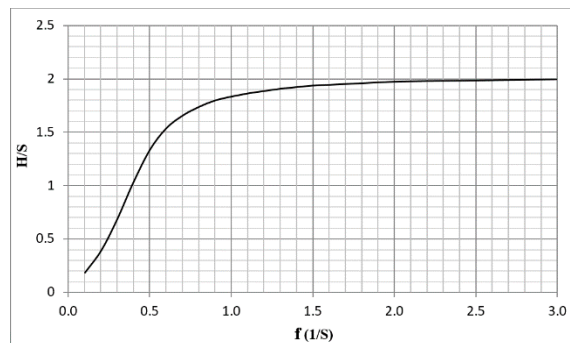
موج به حرکت پارویی شروع به کاهش می‌کند. همچنین با افزایش تعداد موج، طول موج کوتاه‌تر شده و در نتیجه ارتفاع موج کاهش یافته یا روند افزایشی از بین می‌رود.



شکل ۳. طول موج برحسب فرکانس



شکل ۴. سرعت انتشار موج برحسب فرکانس



شکل ۵. تغییرات ارتفاع نسبی برحسب فرکانس

#### ارتفاع موج

با استفاده از معادله ۱ می‌توان به یکی از مهم‌ترین پارامترهای هدف، یعنی ارتفاع موج دست یافت. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین ارتفاع موج خروجی از معادله ۱ در فرکانس  $0/5$  تولید می‌شود، پس از آن روند صعودی خود را از دست داده و به تدریج ارتفاع موج کاهش می‌یابد. حال باید دید در آزمایش‌های تجربی، بیشترین ارتفاع موج در



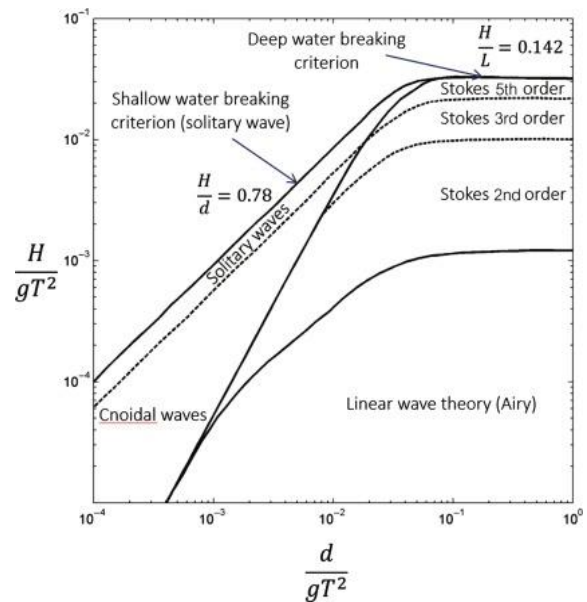
شکل ۱۱. کانال آب آزمایشگاه

### سیستم موج‌نگار

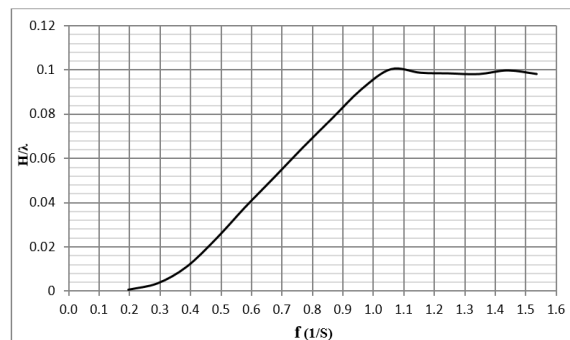
سیستم موج‌نگار حوضچه کشش (شکل ۱۲)، شامل ۲ سری حسگر موج است که از دو نقطه با فاصله محدود داده‌برداری را انجام می‌دهند. این داده‌ها پس از دریافت از طریق حسگرها به وسیله تجهیزات سیستم موج‌نگار به سمت رایانه کاربر ارسال می‌شود. کاربر نیز با نرم‌افزار سیستم موج‌نگار که ام ۲ نام دارد، داده‌ها را ارزیابی می‌کند. در ابتدا پس از اطمینان از اتصال حسگرها به سیستم و اطمینان از قابلیت داده‌برداری آن‌ها، باید فرایند کالیبره کردن انجام شود.



شکل ۱۲. حسگر سیستم موج‌نگار



شکل ۸. منحنی مشخصه دسته‌بندی امواج [۱۱]



شکل ۹. H/lambda برحسب فرکانس با اعمال ضریب ۰٫۷

### ۲-۲. آزمایش‌های تجربی

با توجه به مشخصات هندسی حوضچه کشش (طول ۱۵۰ متر و عمق ۳ متر - شکل ۱۱)، انجام دادن این آزمایش‌ها به دلیل ساکن شدن آب برای انجام آزمایش بعدی، بسیار زمان‌بر است. از طرف دیگر کالیبره کردن سیستم موج‌نگار در دو نوبت از روز، نیز بر زمان‌بر بودن آزمایش‌ها می‌افزاید. از این رو برای افزایش سرعت آزمایش و رعایت اصول کار با موج‌ساز، از امواج با فرکانس پایین و با محدودیت مشخص، استفاده شده و آزمایش‌ها تا فرکانسی انجام شده که امواج از حالت تعادل و نظم خارج نشوند.

### کالیبره کردن سیستم موج‌نگار

هدف از کالیبره کردن، ایجاد نظامی مؤثر به منظور کنترل صحت و دقت دستگاه‌های آزمون، وسایل اندازه‌گیری و همه تجهیزات است که عملکرد آن‌ها بر کیفیت فرایند تأثیرگذار است. با توجه به اینکه سیستم موج‌نگار به صورت پایه‌ای از اعداد بی‌بعد استفاده می‌کند، عمل کالیبراسیون و تبدیل اعداد بی‌بعد به اعداد متریک بسیار مهم است. عمل کالیبراسیون به این صورت انجام می‌شود که با یک وسیله اندازه‌گیری مطمئن مانند یک خط‌کش چوبی و به صورت حداقل یک سانتی‌متر در هر مرحله، حسگرهای سیستم موج‌نگار توسط کالیبراتور به داخل آب فرو برده شده و عدد بی‌بعد خروجی نرم‌افزار ثبت می‌شود. سپس با روش بیان شده در فایل راهنمای نرم‌افزار این اعداد بی‌بعد به سیستم متریک تبدیل می‌شود.

### انجام آزمایش

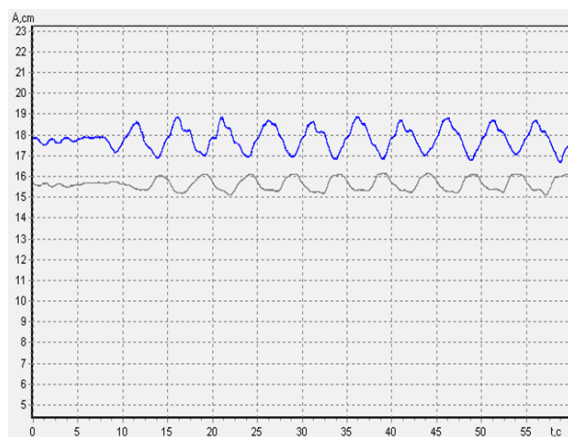
پس از انجام کالیبراسیون سیستم موج‌نگار و اطمینان از عملکرد آن، حسگرها در محل مورد تأیید و مناسب قرار می‌گیرند. فاصله حسگر اول نسبت به سیستم موج‌ساز تقریباً ۱۰ متر (حدود سه برابر عمق کانال) و فاصله حسگر دوم نسبت به سیستم موج‌ساز حدود ۲۳ متر است. در انجام آزمایش اول با فرکانس ۰/۱ هیچ داده‌ای توسط سیستم موج‌نگار ثبت نشد و به همین دلیل آزمایش‌ها از فرکانس ۰/۲ شروع شده و هر آزمایش بین دو تا چهار بار تکرار شده است.

### نتایج آزمایش

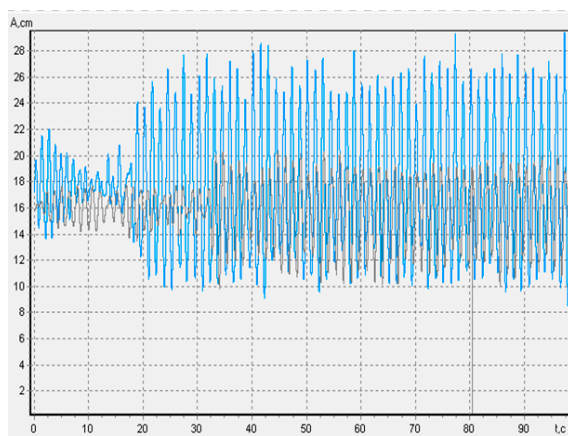
پس از انجام آزمایش، نتایج هر آزمایش شامل مشخصات موج ثبت‌شده به وسیله موج‌نگار با فرکانس‌های ۰/۲ تا ۱/۵ همراه با میزان استروک ورودی کامل، همچنین ورودی ۷۰٪ استروک دریافت و ثبت شده است. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ چند نمونه از نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. حسگر رنگ روشن در فاصله نزدیک‌تر و حسگر رنگ تیره در فاصله دورتر قرار دارد.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ارتفاع امواج ثبت‌شده توسط سیستم موج‌نگار به‌طور میانگین بین ۱۷ تا ۱۹ سانتی‌متر است. بنابراین ارتفاع امواج در فرکانس ۰/۲ و استروک ۲۴۵ برابر ۲ سانتی‌متر است.

اما در شکل ۱۴ ارتفاع امواج ثبت‌شده به وسیله سیستم موج‌نگار به‌طور میانگین بین ۱۰ تا ۲۶/۸ سانتی‌متر است. بنابراین ارتفاع امواج در فرکانس ۰/۷ و استروک ۱۲۶ میلی‌متر برابر با ۱۶/۸ سانتی‌متر است و در شکل ۱۵ نیز ارتفاع امواج ثبت‌شده توسط سیستم موج‌نگار به شکل میانگین بین ۱۵ تا ۲۵ سانتی‌متر است. بنابراین ارتفاع امواج در فرکانس ۱/۲ و استروک ۵۵، برابر ۱۰ سانتی‌متر است.



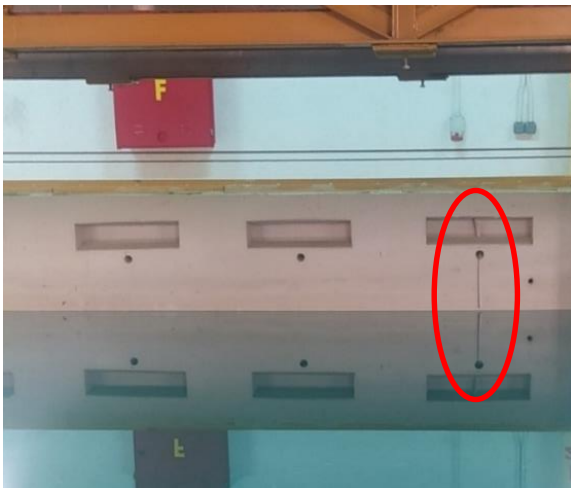
شکل ۱۳. آزمایش شماره ۱ با فرکانس ۰/۲ و استروک ۲۴۵



شکل ۱۴. آزمایش شماره ۶ با فرکانس ۰/۷ و استروک ۱۲۶

بعد کاهش ارتفاع موج آغاز شده، به طوری که در فاصله ۹۰ متری کاهش ارتفاع موج به میزان ۲۵٪ ثبت شده است. از این رو با توجه به کاهش ارتفاع بیش از ده درصد از فاصله ۶۰ متری به بعد، آزمایش در این نواحی بی اعتبار است.

در فرکانس ۱/۲ (جدول ۳) نیز رفتار موج مانند حالت اول بوده و تا فاصله ۶۰ متری ارتفاع یکسانی برای موج ثبت شده است و تا فاصله ۹۰ متری نیز کاهش قابل قبولی داشته است. بنابراین در این حالت نیز آزمایش‌ها از فاصله ۹۰ متری به بعد بی اعتبار است.



شکل ۱۶. استفاده از چوب معیار در دیواره حوضچه کشش

جدول ۱. نتایج آزمایش چوب معیار با فرکانس ۰/۵

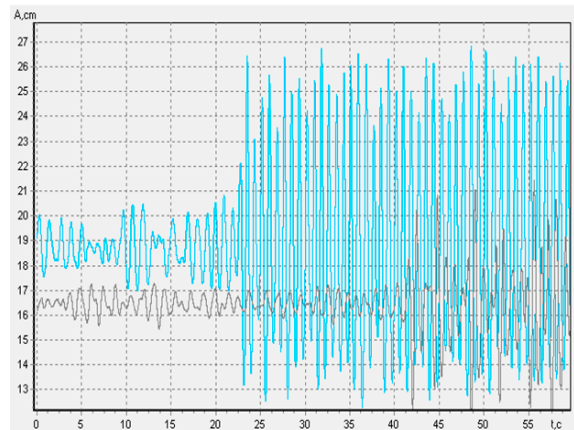
۹۰	۶۰	۴۰	۳۰	۱۰	فاصله از موج ساز (m)
۴	۵	۵	۵	۵	سطح خیس چوب (cm)
۸	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	ارتفاع تقریبی امواج (cm)

جدول ۲. نتایج آزمایش چوب معیار با فرکانس ۰/۷

۹۰	۶۰	۴۰	۳۰	۱۰	فاصله از موج ساز (m)
۶	۷	۸	۸	۸	سطح خیس چوب (cm)
۱۲	۱۴	۱۶	۱۶	۱۶	ارتفاع تقریبی امواج (cm)

جدول ۳. نتایج آزمایش چوب معیار با فرکانس ۱/۲

۹۰	۶۰	۴۰	۳۰	۱۰	فاصله از موج ساز (m)
۴	۵	۵	۵	۵	سطح خیس چوب (cm)
۸	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	ارتفاع تقریبی امواج (cm)



شکل ۱۵. آزمایش شماره ۱۱ با فرکانس ۱/۲ و استروک ۵۵

### ابهام در آزمایش

همان‌طور که مشاهده می‌شود حسگر رنگ روشن‌نظم خوب و ارتفاع امواج مناسبی دارد. اما حسگر دوم که با فاصله حدود ۱۳ متری از حسگر اول قرار دارد گاهی از نظم خارج شده و ارتفاع امواج غیرمنطقی ارائه می‌دهد.

### رفع ابهام به وسیله آزمایش سطح خیس

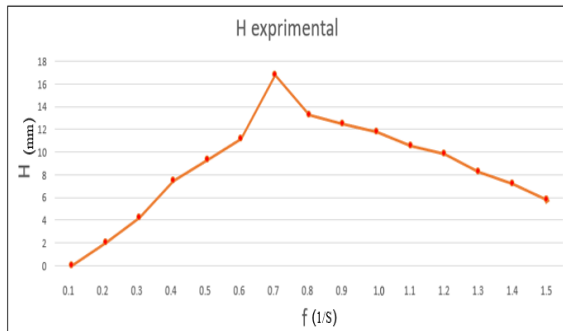
شاید بتوان گفت ساده‌ترین وسیله برای سنجش میزان ارتفاع امواج در طول کانال آب استفاده از چوب معیار است؛ بنابراین با استفاده از تعدادی چوب معیار، اعتبار امواج تولیدشده با سیستم موج‌ساز بررسی شده است. چوب‌ها در فواصل ۵ متری از یکدیگر روی دیواره حوضچه مماس بر سطح آب قرار دارند (شکل ۱۶). همچنین این آزمایش می‌تواند بیانگر دقت سیستم موج‌نگار نیز باشد. کاهش ارتفاع موج حداکثر تا ۱۰ درصد معتبر است. آزمایش‌ها در سه فرکانس متفاوت ۰/۵، ۰/۷ و ۱/۲ انجام شده است.

با توجه به جدول ۱ در فرکانس ۰/۵ ارتفاع موج از ابتدا تا فاصله ۶۰ متری سیستم موج‌ساز یکسان بوده اما در فاصله ۹۰ متری حدود ۲۰٪ کاهش ارتفاع مشاهده می‌شود که به عبارتی برابر با کاهش ۲ سانتی‌متری ارتفاع موج است. با توجه به کاهش ارتفاع ۲۰ درصدی موج در فاصله ۹۰ متری از موج‌ساز، آزمایش در این ناحیه بی اعتبار است.

در فرکانس ۰/۷ (جدول ۲) ارتفاع موج از ابتدا تا فاصله ۴۰ متری سیستم موج‌ساز یکسان است اما از فاصله ۶۰ متری به

## آزمایش مجدد

خروجی در نرم‌افزار موج‌نگار است. واضح است که بیشترین ارتفاع موج در فرکانس ۰/۷ ایجاد شده است.



شکل ۱۹. ارتفاع موج تجربی برحسب فرکانس

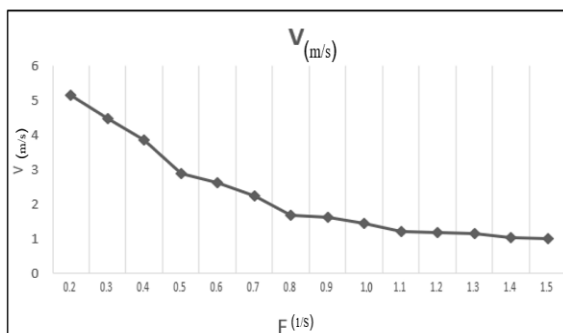
## سرعت انتشار موج آزمایشگاهی

با توجه به فاصله زمانی امواج بین حس‌گرهای موج‌نگار در هر آزمایش با فرکانس‌های متفاوت و فاصله طولی میان دو حس‌گر موج‌نگار می‌توان سرعت انتشار موج را محاسبه کرد.

$$c_w = \frac{L}{t} \quad (3)$$

که  $L$  بیانگر فاصله طولی میان حس‌گرهای موج‌نگار برحسب متر و  $t$  بیانگر فاصله زمانی میان دو حس‌گر موج‌نگار برحسب ثانیه است. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود با افزایش

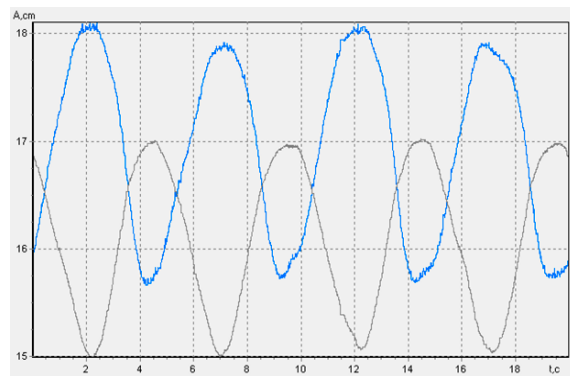
فرکانس، سرعت موج روندی کاهشی دارد. بنابراین می‌توان گفت که سرعت انتشار موج با فرکانس و استروک رابطه عکس دارد.



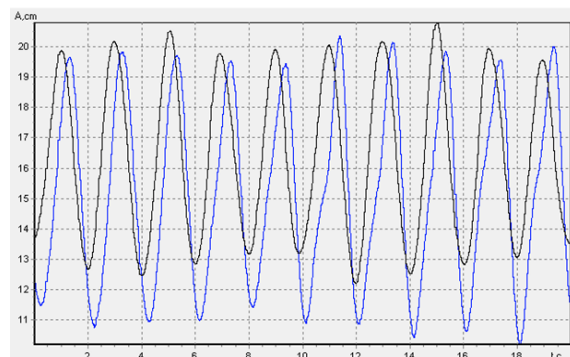
شکل ۲۰. سرعت انتشار موج تجربی برحسب فرکانس

با توجه به نتایج آزمایش چوب معیار، آزمایش‌های امواج دوباره با قرارگیری سیستم موج‌نگار در فاصله ۴۰ متری از سیستم موج‌ساز انجام شده است. در شکل ۱۷ و ۱۸ دو نمونه از نتایج حاصل ارائه شده است.

در شکل ۱۷ نتایج آزمایش مجدد فرکانس ۰/۲ با استروک ۲۴۵ و در شکل ۱۸ نتایج آزمایش مجدد فرکانس ۰/۴ با استروک ۱۷۶ با نتایج مشابه آزمایش‌های قبلی (از لحاظ ارتفاع موج) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات محسوسی در ارتفاع امواج نسبت به فاصله ده متری با حسگر رنگ روشن دیده نمی‌شود و طبیعتاً فرضیه اشکال در حسگر دورتر صحیح به نظر می‌رسد. بنابراین از حسگر دورتر فقط برای محاسبه طول موج و سرعت موج استفاده شده است.



شکل ۱۷. آزمایش مجدد شماره ۱ با فرکانس ۰/۲ و استروک ۲۴۵



شکل ۱۸. آزمایش مجدد شماره ۴ با فرکانس ۰/۵ و استروک ۱۷۶

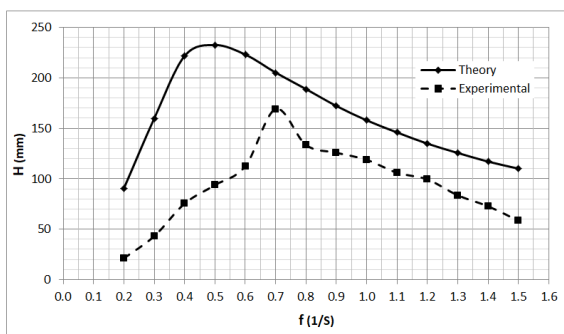
## ارتفاع موج آزمایشگاهی

ارتفاع موج ارائه شده در شکل ۱۹، حاصل از میانگین‌گیری از ارتفاع امواج خروجی در هر فرکانس با استفاده از داده‌های

### ۳. تجزیه و تحلیل یافته‌ها

#### ۳-۱. ارتفاع موج

ارتفاع موج حاصل از محاسبات تحلیلی و ارتفاع موج حاصل از آزمایش‌های تجربی در فرکانس‌های ۰/۲ تا ۱/۵ در شکل ۲۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هیچ فرکانسی ارتفاع امواج سیستم موج‌ساز با محاسبات تحلیلی برخورد نداشته و به‌طور میانگین با یک فاصله تقریباً ۲۵ درصدی و تفاوت در فرکانس متناظر با بیشترین ارتفاع موج در تعقیب روند بوده است. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ایرادات سیستم موج‌ساز باشد که در ادامه بیان خواهد شد. بنابراین نمی‌توان از روابط ریاضی به‌عنوان تابع انتقال استفاده کرد و لازم است که تابع انتقال این سیستم موج‌ساز استخراج شود. همان‌طور که گفته شد هر دو نمودار روند تقریباً یکسانی را طی می‌کنند و به‌منظور تعیین تابع انتقال، عملکرد سیستم موج‌ساز به سه بازه ۰/۲ تا ۰/۴، ۰/۵ تا ۰/۷ و در آخر ۰/۸ تا ۱/۵ تقسیم شده است.



شکل ۲۳. مقایسه نسبت طول موج به میزان ۱/۲ جابه‌جایی پدل

#### ۳-۲. سرعت انتشار موج

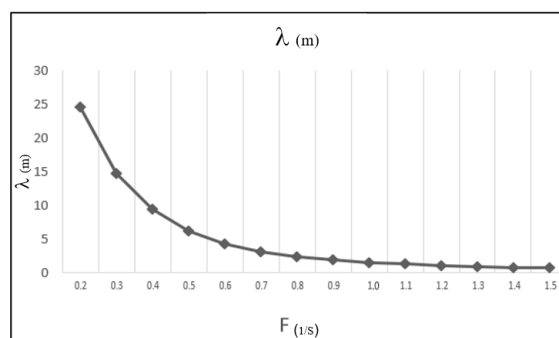
شکل ۲۴ سرعت انتشار امواج حاصل از محاسبات تحلیلی و آزمایش‌های تجربی در فرکانس‌های ۰/۲ تا ۱/۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های تجربی و تحلیلی از تطابق مناسبی برخوردار بوده و هر دو یک روند نزولی را در پیش گرفته‌اند. این موضوع می‌تواند بیانگر دقیق بودن نسبی آزمایش‌ها و عدم ایجاد مشکل در سرعت امواج تولیدشده به‌وسیله سیستم موج‌ساز باشد.

### طول موج آزمایشگاهی

با تعیین فاصله میان دو حس گر موج‌نگار و فاصله زمانی بین دو حس گر موج‌نگار و داده‌های خروجی امواج می‌توان طول موج را نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\lambda = c_w \times T \quad (4)$$

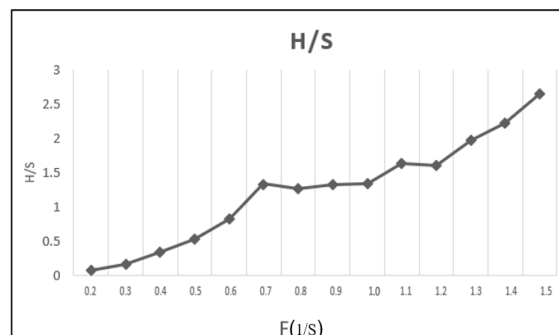
که  $c_w$  سرعت انتشار موج و  $T$  دوره تناوب موج است. در شکل ۲۱ تغییرات طول موج برحسب فرکانس سیستم موج‌ساز نشان داده شده است. همان‌طور که از قبل نیز قابل پیش‌بینی بود، میزان طول موج با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱. طول موج تجربی برحسب فرکانس

### نسبت ارتفاع موج به استروک آزمایشگاهی (H/S)

نسبت ارتفاع موج به استروک یا میزان جابه‌جایی پدل، یکی از مهم‌ترین پارامترهای سیستم موج‌ساز است که موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. مهم‌ترین ویژگی این پارامتر بی‌بعد بودن آن است که برای تجزیه و تحلیل و مقایسه بسیار مؤثر است. در شکل ۲۲ نسبت ارتفاع موج به استروک برحسب فرکانس ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نسبت با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد.



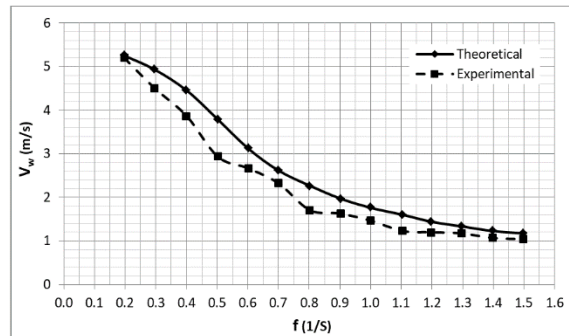
شکل ۲۲. نسبت طول موج به میزان ۱/۲ جابه‌جایی پدل برحسب فرکانس

محاسبات تئوری و آزمایش‌های تجربی در فرکانس‌های ۰/۲ تا ۱/۵ نشان داده شده است. واضح است که در بعضی نقاط تفاوت نسبتاً زیادی بین داده‌های تجربی و محاسباتی وجود دارد. این عدم تطابق در نتایج تجربی و تحلیلی ممکن است ناشی از خطاها و معایب سیستم موج‌ساز باشد. در کل اگر از فرکانس‌های بالای ۱/۵ صرف‌نظر کنیم، می‌توان برای تطبیق داده‌های نظری با تجربی، آن‌ها را به دو یا سه قسمت تقسیم کرد تا در نهایت بتوان با ضریب خطای معقولی، یک معادله نهایی از آن استخراج کرد. در واقع می‌توان با اعمال ضریب در روابط تئوری، نتایج آن را به نقاط آزمایشگاهی نزدیک کرد.

با تقسیم داده‌ها به دو قسمت ۰/۲ تا ۰/۶ با ضریب اصلاح ۰/۳۵ و ۰/۷ تا ۱/۲ با ضریب اصلاح ۰/۷۵ تقریباً می‌توان این محدوده را پوشش داد (شکل ۲۷). اگر برای فرکانس ۰/۶ تا ۰/۷ نیز یک نسبت متفاوت یعنی ۰/۵۵ در نظر گرفته شود، نتیجه به صورت شکل ۲۸ خواهد بود.

با اینکه با اعمال ضریب اصلاح در روابط تئوری، نتایج تئوری به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شده و تطابق خوبی بین آن‌ها برقرار می‌شود، اما برای دستیابی به یک تطابق دقیق‌تر، می‌توان از یک برازش ۶ منحنی استفاده کرد تا با داده‌های تجربی بیشترین تطابق و کمترین خطا را داشته باشد. در واقع با علم بر وجود ایراداتی در سیستم موج‌ساز، پوشش‌دهی اشکالات را هدف قرار داده‌ایم. همان‌طور که در شکل ۲۹ مشاهده می‌شود، برازش منحنی با استفاده از یک تابع درجه ۵ در مقایسه با نمودار تجربی با رگرسیون<sup>۷</sup> ۰/۹۸ انجام شده است. معادله این منحنی در رابطه ۵ بیان شده است.

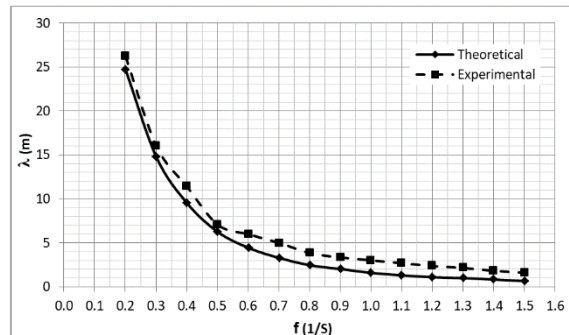
همان‌طور که گفته شد عدم تطابق در نتایج تجربی و تحلیلی می‌تواند ناشی از خطاها و معایب سیستم موج‌ساز باشد. بنابراین برای پوشش‌دهی معایب سیستم می‌توان از رابطه ۵ استفاده کرد تا بتوان امواجی با خواص مشخص در حوضچه کنش ایجاد کرد. در نهایت برای اطمینان بیشتر، مقدار خطای رابطه (۵) در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۲۴. مقایسه سرعت موج بر حسب فرکانس

### ۳-۳. طول موج

فاصله طولی بین دو نقطه یکسان از امواج از دیگر پارامترهای مهم و دریافتی از داده‌های نظری و تجربی است که تحلیل آن در روند ایجاد یک معادله مشخص برای سیستم موج‌ساز کارایی بسزایی دارد. شکل ۲۵ طول موج حاصل از محاسبات تئوری و آزمایش‌های تجربی در فرکانس‌های ۰/۲ تا ۱/۵ را نشان می‌دهد. در این شکل نیز تطابق داده‌های تجربی و تحلیلی بسیار مناسب است و داده‌های هر دو روش با افزایش فرکانس رفتار کاهشی یکسانی را بروز می‌دهند.



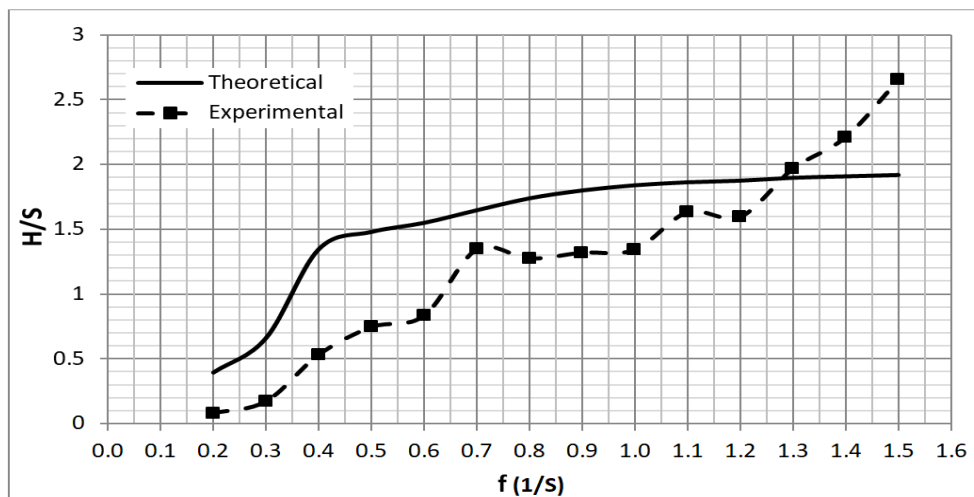
شکل ۲۵. طول موج تجربی و تحلیلی

### ۳-۴. نسبت ارتفاع موج به جابه‌جایی صفحه موج‌ساز (H/S)

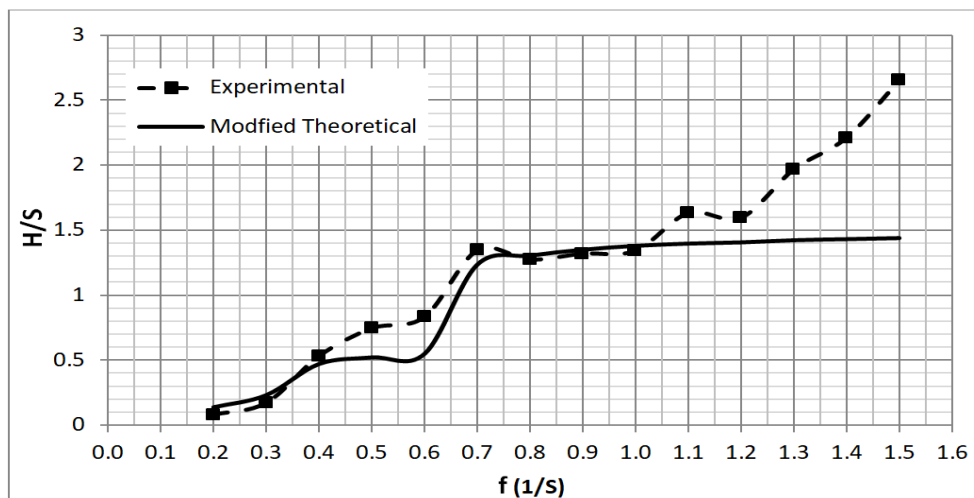
مقایسه و تجزیه و تحلیل این پارامتر می‌تواند کمک شایانی در رسیدن به هدف نهایی تحقیق کند، زیرا با بی‌بعدسازی نسبت ارتفاع موج به جابه‌جایی صفحه موج‌ساز، دیگر نگران تغییر میزان استروک در محاسبات تئوری نیستیم و با تغییر آن ارتفاع موج هم به همان نسبت تغییر می‌کند.

مزیت اصلی این پارامتر بی‌بعد بودن آن است. در شکل ۲۶ نسبت ارتفاع موج به میزان جابه‌جایی پدل موج‌ساز حاصل از

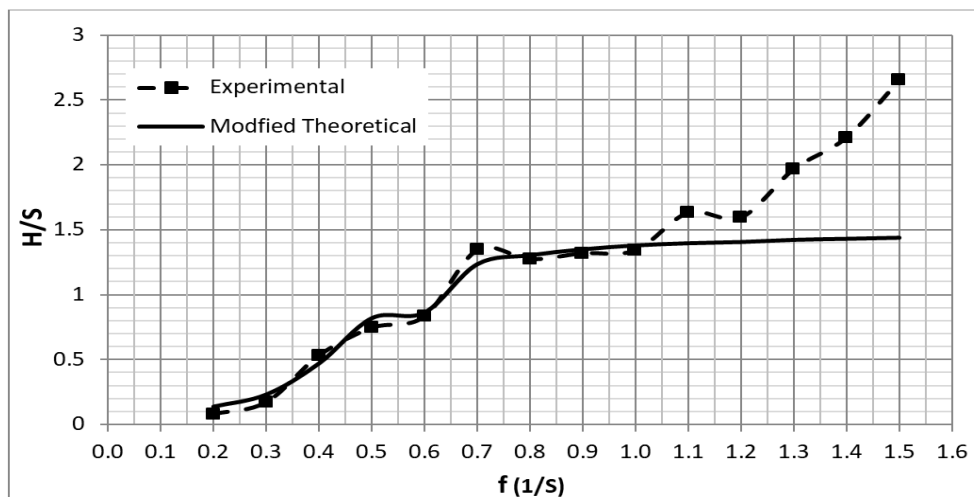
در نهایت می‌توان گفت که با توجه به خطای نسبتاً کم و مناسب معادله یادشده، می‌توان با استفاده از این معادله داده‌های موردنیاز (ورودی‌های سیستم کنترل موج‌ساز) را برای خروجی‌های مناسب استخراج کرد.



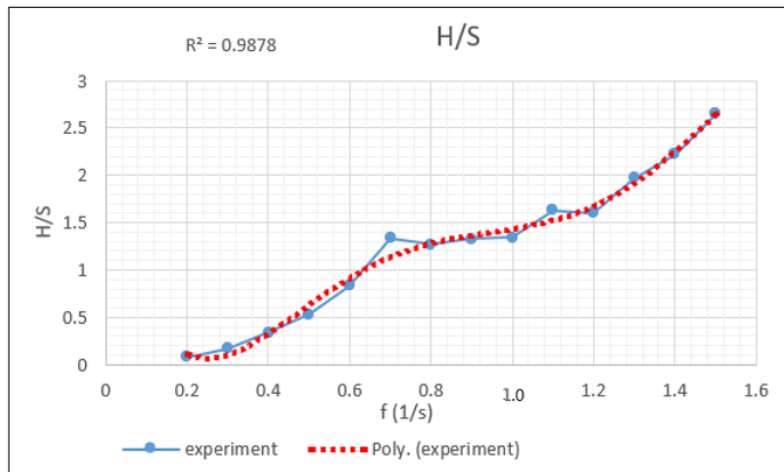
شکل ۲۶. مقایسه نسبت طول موج به میزان  $1/2$  جابه‌جایی پدل برحسب فرکانس



شکل ۲۷. نسبت طول موج به میزان  $1/2$  جابه‌جایی پدل برحسب فرکانس با اعمال دو ضریب اصلاح



شکل ۲۸. نسبت طول موج به میزان  $1/2$  جابه‌جایی پدل برحسب فرکانس با اعمال سه ضریب اصلاح



شکل ۲۹. نسبت طول موج به میزان ۱/۲ جابه‌جایی پدل و برازش منحنی متناسب برحسب فرکانس

$$\frac{H}{S} = -8.4991 \left(\frac{1}{T}\right)^5 + 41.359 \left(\frac{1}{T}\right)^4 - 73.056 \left(\frac{1}{T}\right)^3 + 57.101 \left(\frac{1}{T}\right)^2 - 17.272 \left(\frac{1}{T}\right) + 1.802 \quad (5)$$

جدول ۴. جدول تعیین خطای برازش منحنی

H/S curve fit	h/s exp – h/s curve	(h/s exp – h/s curve) <sup>2</sup>
۰/۱۱۰۶۴۷	۰/۰۲۹۰۱۰	۰/۰۰۰۸۴۲
۰/۱۰۱۳۳	۰/۰۷۰۰۹۵	۰/۰۰۴۹۱۳
۰/۰۳۲۵۵	۰/۰۱۵۳۷۰	۰/۰۰۰۲۳۶
۰/۶۲۸۵۹	۰/۱۰۰۱۸۰	۰/۰۱۰۰۳۶
۰/۹۱۴۳	۰/۰۸۴۷۰۰	۰/۰۰۷۱۱۸
۱/۱۳۴۷	۰/۱۹۸۵۹۹	۰/۰۳۹۴۴۲
۱/۲۸۰۰۹	۰/۰۰۷۳۰۰	۰/۰۰۵۳۳
۱/۳۶۸۷	۰/۰۴۱۱۶۰	۰/۰۰۱۷۳
۱/۴۳۴۹	۰/۰۹۳۹۰۰	۰/۰۸۸۳۴
۱/۵۲۳۳	۰/۱۱۰۳۳	۰/۰۱۲۱۰۷
۱/۶۷۳۸	۰/۰۷۳۸۰۰	۰/۰۰۵۴۴۸
۱/۹۱۵۴۶	۰/۵۹۰۳۸۰	۰/۰۰۳۴۸۶
۲/۲۴۸۰۳	۰/۰۲۵۸۰۰	۰/۰۰۰۶۶۶
۲/۶۴۷۱۶.	۰/۰۰۲۵۸۶	۰/۰۰۰۸۱۴

- جای‌گیری سیستم موج‌نگار در نقاط مختلف برای استخراج بهترین داده؛
- مشخص کردن محدوده معتبر امواج ارسالی به‌وسیله سیستم موج‌ساز؛
- انجام آزمایش‌های متعدد آزمایشگاهی و تجربی برای دریافت داده‌های موردنظر به‌وسیله نرم‌افزار سیستم موج‌نگار به‌وسیله حس‌گرهای موج در فاصله‌های مختلف؛

#### ۴. نتیجه‌گیری

- از مهم‌ترین نتایج و دست‌آوردهای این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- انجام محاسبات نظری بر پایه اطلاعات ورودی و دریافتی از آزمایشگاه و سیستم موج‌ساز کانال‌آب؛

## مراجع

- [1] Han BW, Seo J, Lee SJ, Seol DM, Rhee SH. Uncertainty assessment for a towed underwater stereo PIV system by uniform flow measurement. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2018 Sep 1;10(5):596-608.
- [2] Anbarsooz M, Passandideh-Fard M, Moghiman M. Fully nonlinear viscous wave generation in numerical wave tanks. *Ocean Engineering*. 2013 Feb 1;59:73-85.
- [3] Finnegan W, Goggins J. Numerical simulation of linear water waves and wave-structure interaction. *Ocean Engineering*. 2012 Apr 1;43:23-31.
- [4] Krvavica N, Ružić I, Ožanić N. New approach to flap-type wavemaker equation with wave breaking limit. *Coastal engineering journal*. 2018 Jan 2;60(1):69-78.
- [5] He M, Khayyer A, Gao X, Xu W, Liu B. Theoretical method for generating solitary waves using plunger-type wavemakers and its Smoothed Particle Hydrodynamics validation. *Applied Ocean Research*. 2021 Jan 1;106:102414.
- [6] Zhang J, Ma Y, Tan T, Dong G, Benoit M. Enhanced extreme wave statistics of irregular waves due to accelerating following current over a submerged bar. *Journal of Fluid Mechanics*. 2023 Jan;954:A50.
- [7] امیرحسین طبعی. طراحی و ساخت یک کانال دوبعدی دارای مولد موج ساز با شیب ساحل متغیر و یک سیستم تبدیل انرژی امواج دریا [پایان نامه کارشناسی ارشد]. دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، دانشکده محیط زیست و انرژی؛ ۱۳۸۸.
- [8] Galvin CJ. Wave-height prediction for wave generators in shallow water. *Coastal Engineering Research Center*; 1964.
- [9] Dean RG, Dalrymple RA. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. world scientific publishing company; 1991 Jan 23.
- [10] Warbletoncouncil. Wave propagation speed factor [Internet]. 2023 updated[2024 oct23; cited 2023 Jun 22] available from: <https://fa.warbletoncouncil.org/velocidad-propagacion-onda-15817#menu-11>
- [11] Kühn and Fischer. Validity of different wave theories. 2001.

## پی نوشتها

1. Pneumatic type
2. Plunger type
3. Piston type
4. Paddle or Flap type
5. Stroke
6. Curve fit
7. Regression

- استخراج و جمع بندی داده های آزمایشگاهی و بررسی ایرادات سیستم موج ساز؛
  - تطبیق داده های تجربی با داده های نظری و برقراری یک نسبت تقریبی میان آنها؛
  - استفاده از برازش منحنی برای استخراج بهترین معادله و معرفی تابع تبدیل سیستم موج ساز.
- در این تحقیق علاوه بر تعیین تابع تبدیل سیستم موج ساز، سعی شده ایرادات طراحی و ساخت سیستم موج ساز نیز بررسی شود. در کل به دلیل وجود ایرادات و اشکالات یادشده سیستم موج ساز نمی تواند، تمام توان ارسالی از طرف موتورها را به آب انتقال داده و به عبارتی راندمان سیستم پایین است. با توجه به شکل ۳۰ به چند مورد از این ایرادات با هدف رفع آنها در آینده، اشاره می شود:
- از اساسی ترین اشکال سیستم موج ساز می توان به وجود فاصله ای قابل توجه میان کف کانال و لولای فلپ موج ساز اشاره کرد؛
  - وجود فاصله میان فلپ موج ساز و دیواره های کانال آب که باعث کاهش راندمان می شود؛
  - خطی نبودن حرکت فلپ های سیستم موج ساز در یک راستا؛
  - کاستی در تجهیزات یا معیوب بودن تجهیزات موردنظر برای انجام آزمایش های سیستم موج نگار؛
  - ایزوله نبودن فضای پشت موج ساز برای جلوگیری از تداخل امواج.



شکل ۳۰. فاصله کف کانال تا پدل موج ساز و فاصله جانبی فلپ پایین تا دیوار کانال