

طراحی سیستم تولید امواج نامنظم جهت آزمایشگاه دریایی

رضا فیروز کوهی^۱، محمد جواد کتابداری^۲

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
r.firoozkoohi@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
ketabdar@cic.aut.ac.ir

چکیده

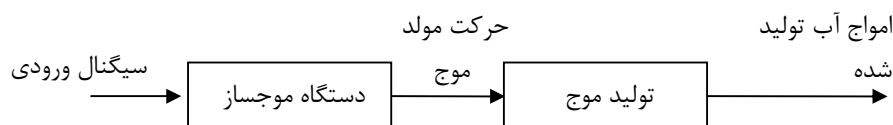
موج یکی از مهمترین و ناشناخته ترین پدیده های طبیعی در سطح دریاها و اقیانوسهاست که قادر است نیروهای عظیمی به کشتیها و سازه های دریایی وارد نماید. این امواج معمولا تحت اثر تنش برشی باد در فواصل دور از ساحل تشکیل و قادرند صدها کیلومتر مسافت تا رسیدن به ساحل طی نمایند. در چند دهه اخیر با توسعه روشهای عددی و سیستمهای کامپیوتری پیشرفتهای قابل توجهی در مدلسازی ریاضی و عددی این امواج حاصل گردیده است. اما به دلیل هزینه های هنگفت ساخت سازه های دریایی و کشتیها مدل تست در آزمایشگاه قبل از ساخت و اجرای این سازه ها اجتناب ناپذیر است. در این تحقیق به تشریح اصول طراحی یک سیستم تولید امواج نامنظم پرداخته شده است. در گام اول برای شبیه سازی سری نامنظم امواج از روش دامنه طیفی معین استفاده گردیده است. طیف ورودی هر طیف استاندارد مانند طیف پیرسون- موسکوویچ می تواند باشد. معمولا به علت اندرکنش غیر خطی صفحه موجساز و آب طیف ورودی و طیف خروجی با هم مطابقت ندارند. لذا برای اعمال تصحیح بر طیف ورودی تا رسیدن به میزان خطای مطلوب از اصول و مبانی پردازش سیگنالها استفاده شده که منجر به یک استراتژی کنترل بهینه گردیده است. میزان خطای مطلوب رسیدن به ضریب همبستگی ۰/۸۵ در نظر گرفته شد. این سیستم پس از طرح ساخته شده و در فلوم آزمایشگاه دریایی دانشگاه صنعتی شریف نصب و تست گردید. مقیاس مدل ۱/۱۰۰ در نظر گرفته شد. نمونه گیری از امواج، برای اولین بار توسط روش پردازش تصاویر صورت گرفت. نتایج نشان داد که این روش در مقایسه با روشهای متداول از پاسخ فرکانسی بالایی برخوردار است.

کلمات کلیدی: موج سازی، طیف ورودی، طیف خروجی، پردازش سیگنالها

۱ مقدمه

امروزه تست های پاسخ دینامیکی شناور در امواج عمدتا به دو روش انجام میشوند. یکی بر مبنای آزمایشهای میدانی در مقیاس یک به یک و دیگری در آزمایشگاه و روی مدل با مقیاس کوچکتر صورت می پذیرد. از

آنجا که انجام آزمایش در مقیاس واقعی بسیار پر هزینه است لذا رویکرد به سمت انجام کارهای آزمایشگاهی و مقیاس شده می باشد. امواج سطحی اقیانوسها که توسط باد تولید می شوند، اغلب فرآیندهای تصادفی هستند [1]. بنابراین نیروهای ناشی از امواج که بر سازه های دریایی اثر می گذارند نیز طبیعتی پیچیده دارند. اگر چه پیشرفتهای زیادی در محاسبات عددی حاصل شده است، اما همچنان تست رفتار یا پاسخ شناور در مقابل امواج در آزمایشگاه، راهی موثر برای حصول اطمینان از صحت طراحی است. برای تولید امواج در آزمایشگاه از موجساز استفاده می شود. در شکل ۱ دیاگرام باکس سیستم یک موجساز را نشان می دهد.



شکل ۱: دیاگرام باکس مولد موج

۲ سیستم کنترل و استراتژی کنترل بهینه

روشهای کنترل کلاسیک مانند استراتژی کنترل پی ای دی^{۲۰} روشهای تکراری و زمان بر محسوب می شوند. در این قسمت به بررسی مساله کنترل موجساز در جهت یافتن کنترلر بهینه پرداخته می شود. در واقع بدون فاصله گرفتن از کلیت مساله کنترل، مدلی برای کنترل بهینه موجساز ارائه می شود.

برای فرموله کردن مساله موجساز پارامترها و متغیرهای مورد استفاده به شرح ذیل معرفی می گردند:

x, y سریهای تصادفی به ترتیب، ورودی و خروجی موجساز

$\mathcal{E}(t)$: عدم قطعیت یک سیستم مولد موج

$S_{xx}(f), S_{yy}(f), S_{\mathcal{E}\mathcal{E}}(f)$: به ترتیب طیف انرژی برای جهت $x(t), y(t)$ و $\mathcal{E}(t)$

$h(t), H(f)$: به ترتیب پاسخ تابع ضربه و تابع تبدیل موجساز

\hat{h} و $\hat{H}(f)$: به ترتیب، پاسخ تابع ضربه و تابع تبدیل کنترلر

سریه‌های امواج سطحی را می‌توان توسط یک طیف قدرت مشخص کرد [2]. برای تولید امواج، یک مسئله مهم در آزمایش پاسخ شناور، تولید سریه‌های تصادفی در رایانه است به طوریکه سریه‌های تولید شده، که روی مدل اثر می‌گذارند، طیف قدرت مشابهی با طیف مطلوب داشته و اختلال قابل ملاحظه‌ای در طیف هدف بوجود نیاورند. با در دست داشتن طیف انرژی برای یک طیف موجود، $S_{xx}(f)$ ، و سریه‌های متناظر با آن توسط رابطه زیر تولید می‌شوند (دامنه طیفی معین):

$$x(t) = \sum_k \sqrt{2S_{xx}(f_k)\Delta f} \cos(f_k t + \varphi_k) \quad (1)$$

که در آن φ_k متغیری تصادفی متناظر با f_k با توزیع یکنواخت و $S_{xx}(f_k)$ طیف قدرت x است. در عمل سریه‌هایی که توسط رایانه بر مبنای یک طیف قدرت مطلوب تولید شده‌اند، پس از عبور از موجساز، به علت خواص تبدیل یا انتقال و عدم قطعیت‌های وسایل و ابزار، تغییر می‌یابند. آطن باعث می‌گردد که اغلب طیف قدرت اعمال شده بر مدل تا حد قابل ملاحظه‌ای از طیف هدف یا مطلوب فاصله داشته باشد.

یک موجساز واقعی ممکن است یکسری از سریه‌های تحریک ورودی را به یکسری نهایی با مقداری مشخصی از اختلال در طیف ایجاد کند. بنابراین به منظور ایجاد تطابق بین طیف مطلوب و طیف نیروی ایجاد شده طیف ورودی تا حد ممکن باید با توجه به یک استراتژی کنترل مناسب محاسبه شود.

۳ مشخصات طیف انتخابی

طیف موج پیرسون-مواسکویچ با رابطه ۲ بیان می‌گردد [2]:

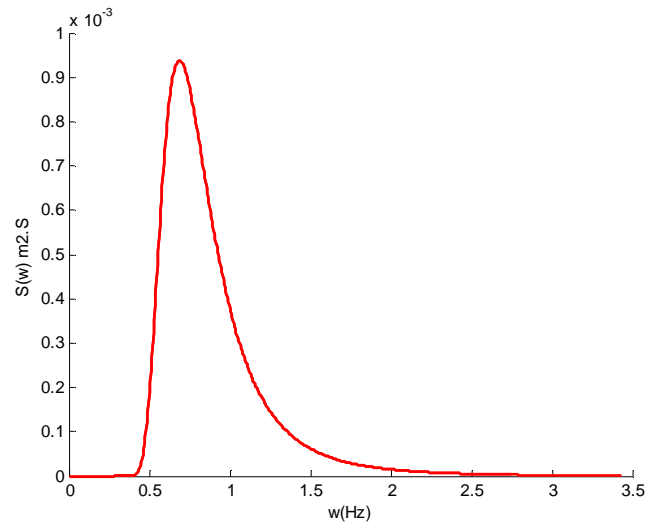
$$S(f) = \frac{0.0081g^2}{(2\pi)^4 f^{-5}} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \quad (2)$$

در این رابطه f فرکانس بر حسب هرتز و f_p فرکانس قله است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_p = \frac{0.14U}{g} \quad (3)$$

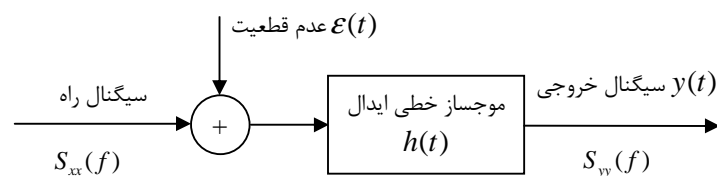
که در آن U سرعت در ارتفاع ۱۹٫۵ متر است. برای تولید موج در مقیاس آزمایشگاه یعنی مقیاس ۱/۱۰۰ ابتدا بایستی این طیف به طیفی در مقیاس ۱/۱۰۰ تبدیل شود. این تبدیل بر اساس قانون تشابه دینامیکی

فرود صورت می گیرد. بر طبق این قانون محدوده فرکانس ۱۰ برابر گسترده تر و مقیاس طول یک صدم برابر کوچکتر می شود. شکل ۲ طیف پیرسون- موسکو بیچ را در مقیاس ۱/۱۰۰ نشان می دهد.



شکل ۲: طیف موج پیرسون موسکو بیچ در مقیاس ۱/۱۰۰ با فرکانس قله ۰/۶۹

یک موجساز شامل رایانه، کنسول الکتریکی، سیستم داده برداری، سیستم هیدرولیکی یا سیستم موتور الکتریکی سروو است. به طور خلاصه، عملکرد اصلی یک مولد موج، انتقال یک سیگنال راه انداز به یکسری امواج اعمال شونده بر مدل است. اساساً، خطای اندازه گیری و هرگونه عدم قطعیت دیگر، عملکرد مولد موج را تحت تاثیر قرار می دهد. با توجه به تئوری کنترل همه خطاها و عدم قطعیت ها را می توان به صورت عدم قطعیت وارد شونده به یک سیستم خطی در نظر گرفت [3]. بنابراین یک مولد موج را می توان به صورت شکل ۳ توصیف کرد:



شکل ۴: مدل اصلی مولد موج در غیاب کنترلر

بنابراین، می توان موجساز را به صورت یک سیستم خطی که توسط عدم قطعیت $\mathcal{E}(t)$ آلوده شده، در نظر گرفت. رابطه بین ورودی و خروجی با توجه به شکل ۴ در حوزه زمان به صورت زیر است:

$$y = h^*(x + \mathcal{E}) \quad (۴)$$

که * عملگر کانولوشن است [4]. این عبارت دو فاکتور \mathcal{E}, h موثر در تغییر طیف ورودی را معرفی می کند

۴ کنترلر بهینه در حوزه فرکانس

فرض می شود، همانند شکل ۴، یک کنترلر بین سیگنال محرک و مولد موج قرار بگیرد و \hat{h} تابع پاسخ ضربه کنترلر باشد. بنابراین:

$$y = (\hat{h}^* x + \mathcal{E})^* h \quad (۵)$$

در عمل x, \mathcal{E} انرژی محدود هستند [4]. همچنین فرض می شود x, \mathcal{E} ناهمبستگی داشته باشند. بنابراین

$$r_{x\mathcal{E}}(t) = x(t)^* \mathcal{E}(-t) = 0 \quad (۶)$$

که $r_{x\mathcal{E}}(t)$ همبستگی ضربدری بین x, \mathcal{E} است.

حال بر طبق قاعده می توان نوشت [5]:

$$S_{xx}(f) = |H(f)|^2 |\hat{H}(f)|^2 S_{xx}(f) + |H(f)|^2 S_{\mathcal{E}\mathcal{E}} \quad (۷)$$

$$|\hat{H}(f)|^2 = \left| \frac{1}{|H(f)|^2} - \frac{S_{\mathcal{E}\mathcal{E}}}{S_{xx}} \right| \quad (۸)$$

بنابراین به جای وارد کردن مستقیم یک طیف هدف به رایانه، یک طیف از پیش پردازش شده را به عنوان ورودی می توان به سیستم داد.

$$In(f) = |\hat{H}(f)|^2 S_{xx}(f) \quad (۹)$$

از نظر تئوریک در این حالت خروجی یک مولد موج تحت تاثیر x بایستی مطابق طیف $S_{xx}(f)$ باشد. در

عمل هنوز مقداری عدم قطعیت یا خطا وجود دارد [6]. بدست آوردن $S_{\mathcal{E}\mathcal{E}}$ به صورت دقیق ممکن است

دشوار باشد. در نتیجه طیف نویز را به صورت زیر در نظر می گیریم.

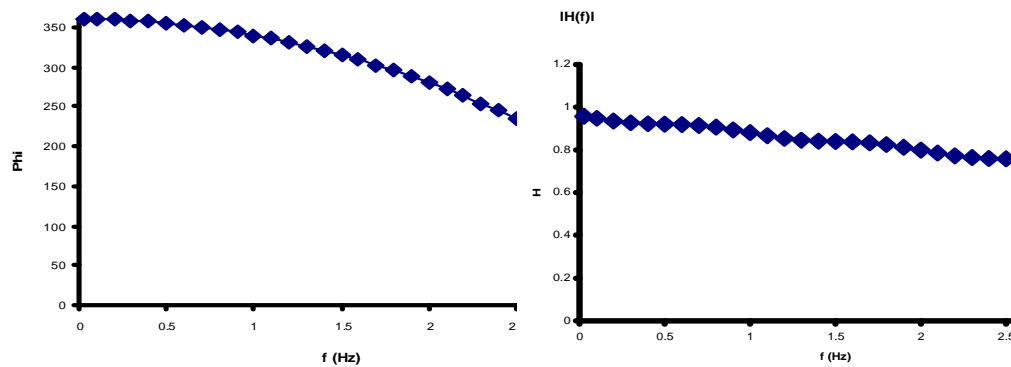
$$S_{\varepsilon\varepsilon}(f) = \sqrt{|S_{xx}^2(f) - S_{yy}^2(f)|} \quad (10)$$

۵ تابع تبدیل

برای انجام یک عمل بهینه سازی نیاز به یک تابع تبدیل داریم که می تواند با رابطه زیر بیان گردد.

$$H(f) = |H(f)|^{-j\varphi} \quad (11)$$

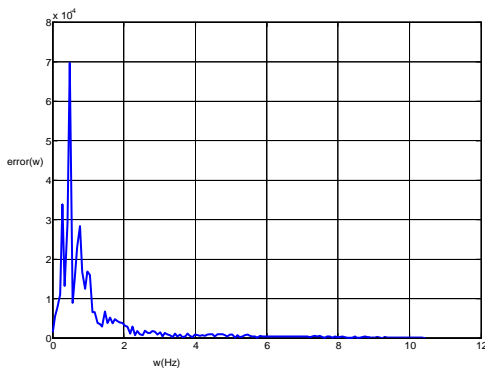
باشد. برای تعیین $H(f)$ دسته ای از امواج سیسنوسی با دامنه ثابت انتخاب و پاسخ فرکانسی سیستم بررسی می شود. به منظور تحریک مد انتقالی یا تبدیل کامل و فراگیر موجساز و اطمینان از دقت پردازش سیگنال، سیگنالهای تحریک در مدت زمانی طولانی در هر فرکانس اعمال می شوند. برای هر فرکانس برای $\Delta f = 0.1$ به مدت ۵ دقیقه این عمل تکرار می شود. باند فرکانس مورد بررسی از ۰ تا ۲/۵ هرتز است. یک پردازشگر سیگنال آنی داده ها را ثبت کرده و تابع تبدیل $H(f)$ بدست می آید (شکل ۵).



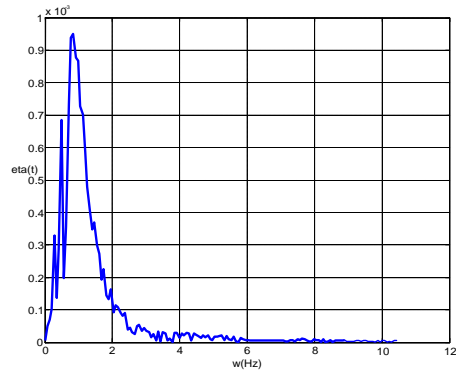
شکل ۵: دامنه (سمت راست) و فاز تابع تبدیل موجساز (سمت چپ)

۶ پروسه کنترل

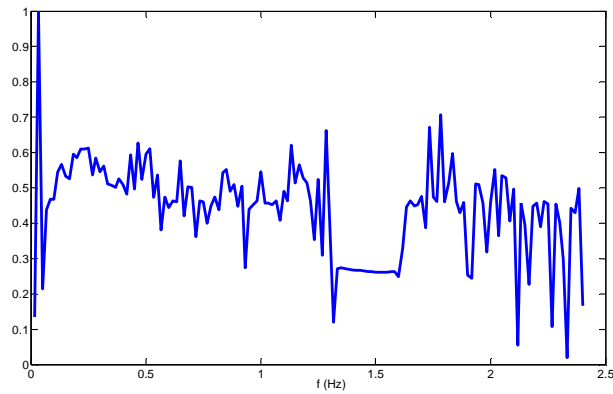
\hat{x} طیف اندازه گیری واقعی روی مدل در نظر گرفته می شود. مقدار تشابه الگویی میان $S_{\hat{x}\hat{x}}$ و S_{xx} بستگی به نظر کاربر دریایی دارد. در اینجا این معیارها همان ضریب همبستگی $Corr[S_{xx}, S_{\hat{x}\hat{x}}] \geq 0.85$ است. با استفاده از رابطه ۱۰ طیف خطا حاصل می گردد. اشکال ۶ و ۷ طیف خروجی و خطا را نشان می دهند. با استفاده از رابطه ۹ کنترلر مطابق شکل ۸ بدست می آید.



شکل ۷: طیف خطا

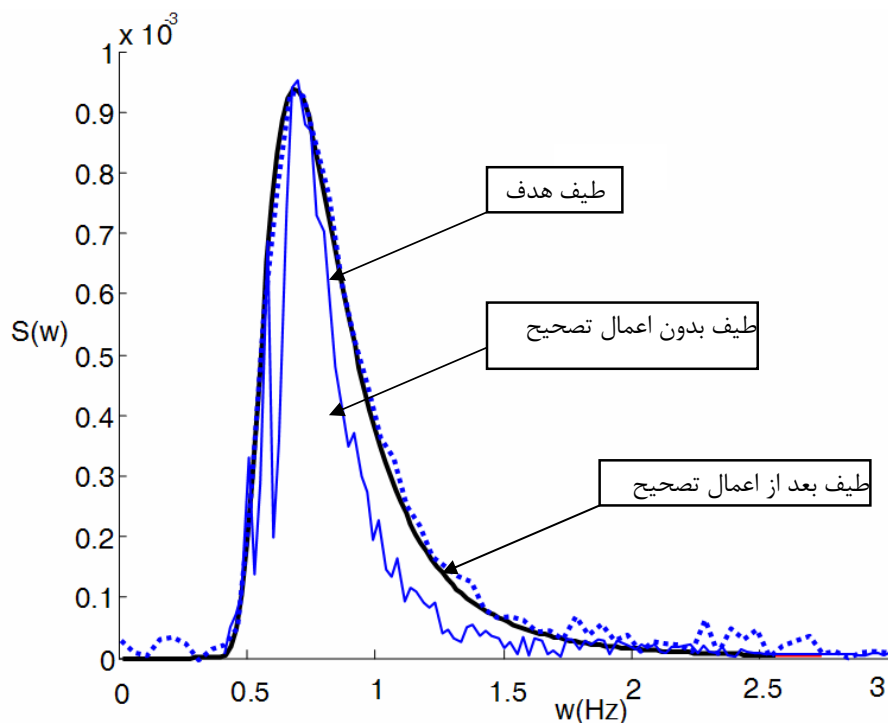


شکل ۶: طیف خروجی سیستم



شکل ۸: تابع تبدیل کنترلر

در شکل ۹ مقایسه ای بین طیفهای انرژی تولید شده در فلوم بدون اعمال کنترلر (خط باریکتر) و طیف بدست آمده پس از اعمال کنترلر (نقطه چین) مشاهده می شود. طیف هدف نیز برای مقایسه در شکل آمده است. با توجه به شکل همانطور که انتظار می رود طیف بدون تصحیح از سطح زیر منحنی یا انرژی کمتری برخوردار است.



شکل ۹: مقایسه ای بین طیفهای انرژی تولید شده در فلوم بدون اعمال کنترلر و طیف بدست آمده پس از اعمال

کنترلر در کنار طیف هدف

۷ نتیجه گیری

سیستم کنترلی جهت تولید امواج نامنظم در آزمایشگاه طراحی و ساخته شد. این سیستم با اخذ یک طیف ورودی ابتدا آنرا به یک سیگنال نامنظم تبدیل می نماید. سپس این سیگنال توسط سیستم DTA به صفحه موجساز داده می شود. صفحه ضمن تبعیت از سیگنال با حرکات خود موج آب را تولید می نماید. به علت اندرکنش غیر خطی صفحه صلب و آب معمولا موج تولید شده با سیگنال ورودی متفاوت است. چون مقایسه سیگنال ورودی با موج خروجی در بازه زمان مشکل است، این عمل باید در بازه فرکانس با مقایسه طیف ورودی و خروجی صورت گیرد. از مقایسه این دو ابتدا طیف خطا و در نهایت تابع تبدیل کنترلر بدست می آید. نتایج تحقیق نشان داد با اعمال این تابع تبدیل به طیف ورودی تطابق بسیار خوبی بین طیف ورودی و خروجی حاصل خواهد گردید. سیستم فوق در حال حاضر در فلوم دانشگاه صنعتی شریف نصب گردیده است که قادر است امواج نامنظم دو بعدی تولید نماید. این سیستم قابلیت ساخت و اجرا برای هر فلوم دیگر با هر ابعاد و عمق و حتی حوضچه های سه بعدی^{۲۱} را خواهد داشت

²¹ Basins

**Dean, R. G. Dalrymple, R. A., (1993): “Water wave mechanics for engineers and [١]
scientists” , Word Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.**

**Goda, Y., (1985): “Random Sea and design of maritime structures” Univ. of Tokyo [٢]
press.**

**Openheim, A., Schafer, R. W., (1984): "Digital signal processing, Prentice-Hall, [٣]
Englewood Cliffee", NJ, 1984.**

**Ellis,G., (2000): "Control system design guide, Academic press, New York", ISBN 0-12- [٤]
237456-7.**

**Shanmugan, K.S, and Breipohl, A.M., (1998): "Random signals – Detection, Estimation, [٥]
and Analysis" John Wiley and Sons, inc.**

**Funke, E. R. and Mansard, E. P. D., (1987): “A rationale for the use of the [٦]
deterministic approach to laboratory wave generation”, Proc. 22nd Cong. Int. Associated
for Hydraulic Res., pp. 153-195.**