



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



## تخمین و مدل‌سازی داده‌های تجربی نیروهای وارد بر پایه استوانه‌ای تحت اثر امواج تصادفی دریا توسط مدل‌های پارامتریک *ARMAX* و *TARMAX*

علیرضا مجتهدی  
دانشگاه تبریز

محمد علی لطف‌اللهی یقین  
دانشگاه تبریز

میر محمد اتفاق  
دانشگاه تبریز

[mojtahedi@tabrizu.ac.ir](mailto:mojtahedi@tabrizu.ac.ir)

[lotfollahi@tabrizu.ac.ir](mailto:lotfollahi@tabrizu.ac.ir)

[ettefagh@tabrizu.ac.ir](mailto:ettefagh@tabrizu.ac.ir)

### مقدمه

سازه‌های ساحلی و دریائی، سیستم‌هایی می‌باشند که علاوه بر تحمل بارهای مرده و سرویس، در طول زمان بهره برداری، در معرض دسته‌ای از نیروهای دینامیکی که به صورت متغیر زمانی بوده و عمدتاً ناشی از امواج دریائی می‌باشند، قرار دارند. در نتیجه عملکرد این امواج، اجزای تشکیل دهنده این سازه‌ها، تحت اثر دو نیروی غیر همراستا که یکی در جهت جریان و دیگری عمود بر جهت جریان (جانبی) می‌باشد، قرار می‌گیرند. این دو نیرو، به تبعیت طبیعت تصادفی موجهای نامنظم سطح دریا، بصورت اثراتی نامنظم و تصادفی روی سازه اعمال می‌شوند. یکی از روشهای تجربی بررسی ماهیت نیروها، انجام تستهای آزمایشگاهی در کانالهای موج ساز و بر روی پایه‌های استوانه‌ای می‌باشد. این پایه‌ها را می‌توان مشابه با المانهای سازه‌ای تشکیل دهنده یک سازه جکتی و همچنین پایه‌های اسکله در نظر گرفت. بررسی نیروهای وارده هم از جهت اهداف طراحی و هم از جهت پیگیری سلامت سازه حائز اهمیت می‌باشد. از سوی دیگر، شناخت نیروهای وارده از پیچیدگی خاصی برخوردار بوده و ارائه یک مدل دقیق ریاضی برای تخمین آن مشکل می‌باشد (کیوان، ۱۳۷۸).

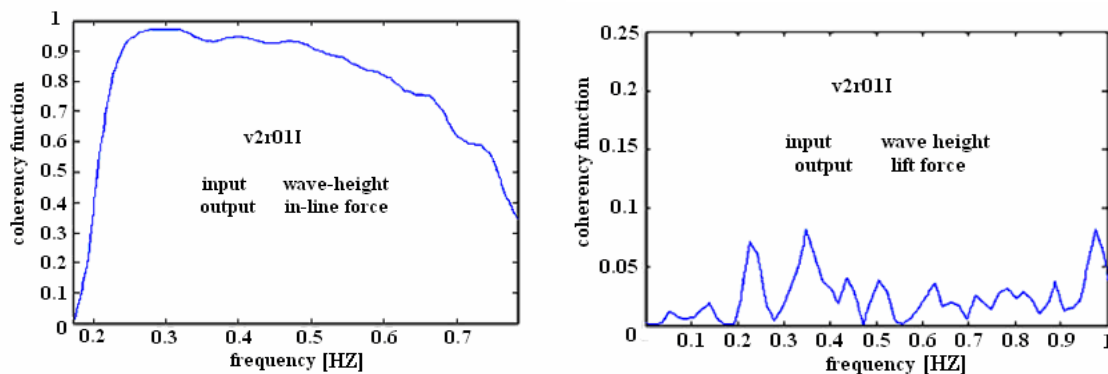
دو روش عمده برای مدل‌سازی سیگنالهای ارتعاشی اندازه گیری شده وجود دارد که شامل مدل‌های پارامتریک و غیر پارامتریک می‌گردد. روشهای غیر پارامتریک تاکنون مورد توجه بیشتری بوده‌اند، و بر اساس مدل‌های انرژی موج به صورت تابع همزمان فرکانسی و زمانی می‌باشند (Newland, 1993). *Statistical method* (Wu, 2007)، *Discrete FFT* (Horner, 1996 و Kearney, 2007)، *Cyclostationary* (Antoni et al, 2002)، *Wavelet* (Zhang, 2002 و Noubari, 2005) از جمله روشهای غیر پارامتریک مطرح می‌باشند. از طرف دیگر، روشهای پارامتریک، بر اساس مدل‌های سیگنال ارتعاشات، مزایای قابل شمارش فراوانی دارد (Thomas, Dubuisson, 1997) که می‌توان به این موارد اشاره نمود: ۱) فشردگی مدل، به گونه‌ای که اساساً بوسیله تعداد محدودی از پارامترها نمایش داده می‌شود، ۲) بهبود دقت مدل‌سازی، ۳) بهبود تحلیل نتایج، ۴) بهبود ردگیری دینامیک سیستم، ۵) قابلیت شبیه سازی و پیشگویی، ۶) انعطاف پذیری در تشخیص عیب، چرا که پارامترهای مدل مذکور قابل استفاده در دسته وسیعی از تکنیکهای عیب یابی می‌باشند. منابعی در ارتباط با گزارش استفاده از مدل پارامتریک مفروض این پژوهش، در ارتباط با بررسی نیروهای تصادفی واقع بر پایه‌های در معرض امواج، ارائه نشده است. لازم به توضیح است که شبکه عصبی (Lazarescu et al, 2004 و Thomas, Dubuisson, 1997) و مدل غیر خطی *ARMA* (Chen, Billings, 1989 و Billings, Tsang, 1989) دو مدل عمده مورد استفاده برای مدل‌سازی سیگنال ارتعاشی متغیر زمانی، در بین مدل‌های پارامتریک می‌باشند. با این وجود، این مدلها در مقایسه با مدل‌های پارامتریک خطی، دارای ساختار پیچیده‌ای می‌باشند که نیازمند داده فراوان و صرف زمان زیادی به منظور ساخت مدل می‌باشند.

در این مقاله، با استفاده از نظریه سیستم‌های دینامیکی و بکارگیری مدل‌های پارامتریک *ARMAX* و *TARMAX* به مدل‌سازی و شناسائی سیستم نیروهای طولی و عرضی وارد بر پایه‌های استوانه‌ای که از یکسری آزمایشات تجربی با مقیاس بزرگ تشکیل یافته‌اند، پرداخته شده و مبحث شناسائی سیستم و مدل‌های پارامتریک به عنوان روش جدیدی برای بررسی و پیش‌بینی این نیروهای تصادفی معرفی گردیده است. بدین منظور در بخشهای بعدی ابتدا به ماهیت این نیروهای تصادفی اشاره شده است. آنگاه ساختار مدل پارامتریک *TARMAX* که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است شرح داده شده است که به تبع آن، ساختار مدل *ARMAX* نیز که حالت خاصی از آن می‌باشد، قابل استخراج می‌باشد. سپس، کانال موجی که داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده، در آن جمع آوری شده است، معرفی گردیده است. نهایتاً مدل‌های پارامتریک *ARMAX* و *TARMAX* با بکارگیری یکسری از داده‌ها، برای تخمین سیگنالهای نیروهای طولی و عرضی بکار برده شده است. لازم به توضیح است که به منظور کاربرد مدل *ARMAX*، از نرم افزار *MATLAB* که بصورت آماده، آنرا ارائه نموده، استفاده شده است. ولی برای استفاده از مدل *TARMAX* ساختار آن، بصورت برنامه *m-file* مستقلاً تهیه شده است.

### هیدرودینامیک نیروهای واقع بر پایه استوانه‌ای ناشی از امواج

نیروهای طولی وارد در راستای جریان تقریباً از نوسانات سطح دریا تبعیت کرده و طبیعت تصادفی آنها مشابه امواج وارده می‌باشد، ولی نیروی جانبی تولید شده در عین متاثر بودن از امواج دریا، رفتاری متفاوت‌تر از نوسانات سطح آب از خود بروز می‌دهد. اگر پایه استوانه‌ای به صورت

سیستمی در نظر گرفته شود که داده‌های سری زمانی تغییرات امواج آب به عنوان ورودی و داده‌های مربوط به نیروها، خروجیهای حاصله باشند، در حوزه فرکانسی می‌توان با استفاده از تابع همبستگی<sup>۱</sup> خطی و غیر خطی بودن این سیستم را تخمین زد. در شکل (۱) تابع همبستگی (Ochi, 1990) ما بین طیفهای امواج آب و نیروهای طولی و همچنین عرضی حاصل از آن در حوزه فرکانس برای یکی از نمونه‌های آزمایشهای مذکور با قطر ۲۱۰ میلی متر نشان داده شده است. نزدیک بودن مقدار این تابع به عدد یک برای حالت نیروهای طولی، بیانگر خطی بودن سیستم در این وضعیت است. به علاوه عملکرد این تابع در شکل (۱) نشان دهنده غیر خطی بودن سیستم متشکل از نیروهای عرضی می‌باشد که مسئله غیر خطی بودن مذکور، موجب غیر ایستا گردیدن سیگنالهای مربوط به این نیروها می‌شود (Poulimenos, Fassois, 2006).



شکل ۱. تابع همبستگی. (a) سیستم با ورودی موج آب و خروجی نیروی طولی مؤثر بر پایه (b) سیستم با ورودی موج آب و خروجی نیروی عرضی

تحقیقات نشان می‌دهد که فرکانس نوسانات نیروی جانبی تقریباً دو برابر فرکانس امواج وارده است. از عوامل مؤثر بر نیروی جانبی، جدا شدن لایه مرزی آب در هنگام عبور موج از یک پایه استوانه‌ای است. در چنین شرایطی به دلیل تغییر در رژیم جریان آب، در پشت پایه، گردابه‌های نامتقارنی با تناوب خاص در طرفین آن تولید و باعث عدم تقارن در توزیع فشار در جهت جانبی شده و در نتیجه برآیند این فشارها موجب تولید یک نیروی جانبی تصادفی در امتداد عمود بر جهت انتشار موج می‌شود. این گردابه‌ها تا حدودی نیروهای طولی را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهند که البته این اثر در مقایسه با عملکرد امواج آب بسیار ناچیز می‌باشد (Sumer, Mutlu, 1998). از دید نظری، محاسبه نیروهای جانبی نسبت به نیروهای همراستای جریان از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. به طور معمول در تعیین نیروهای همراستا، از رابطه موريسن و با به کارگیری ضرایب مناسب درگ و اینرسی استفاده می‌شود (Morison et al, 1950).

برای تخمین هر چه دقیقتر این نیرو بایستی ضرایب هیدرودینامیکی دقیقاً تعیین شوند. به دلیل کم رنگ تر بودن تاثیر کمی نیروهای جانبی بر روی پایه‌ها از یکسو و پیچیدگی رفتاری آنها از سوی دیگر، تاکنون در رابطه با تعیین آنها فعالیت زیاد و موثری صورت نگرفته است. لیکن علیرغم ضعیف بودن این نیروها، با توجه به اینکه قابلیت ترکیب با نیروهای همراستا را دارند، موضوع کماکان مورد توجه محققان است. از طرف دیگر، به عنوان نتیجه ای از توانائی مدل مذکور، می‌توان از مدلسازی شناسائی سیستم داده‌های مربوط به این نیروها که به اجزا سازه دریائی اعمال می‌گردند به عنوان ابزاری مؤثر در اهداف عیب‌یابی سیستم سازه ای مورد نظر استفاده نمود.

### معرفی مدل TARMAX و روش تخمین پارامترهای آن

در این تحقیق برای نخستین بار، مدل FS-TARMAX به حالت  $DPE^T$  (تحول معین پارامترها)، به منظور مدلسازی نیروهای عرضی وارد بر پایه‌های استوانه‌ای واقع در معرض امواج آب، اعمال می‌گردد. روش تخمین مدل مذکور به صورتی که در ادامه ارائه می‌گردد، شرح داده شده است. لازم به توضیح است، مدل ARMAX که نیروهای مذکور توسط آن نیز بررسی و مدلسازی گردیده اند، حالت خاصی از مدل

1 Coherence

2 Deterministic Parameters Evolution

*TARMAX* می‌باشد که پارامترهای آن، برخلاف پارامترهای مدل *TARMAX* که متغیر زمانی می‌باشند، به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

ساختار *DPE* با در نظر گرفتن پارامترهای مدل *TARMA* به صورت تابع مطلق از زمان، متعلق به *FS* (زیر فضاهای تابعی) ویژه، حاصل می‌گردد. پارامترهای *AR* و *MA* همانند واریانس  $\sigma^2$  *innovations* همگی براساس *FS* که به صورت مناسبی مطابق تعاریف زیر گزینش شده است، بسط داده می‌شود:

$$\begin{aligned} F_{AR} &= \{G_{b_a(1)}[t], G_{b_a(2)}[t], \dots, G_{b_a(p_a)}[t]\} \\ F_{MA} &= \{G_{b_c(1)}[t], G_{b_c(2)}[t], \dots, G_{b_c(p_c)}[t]\} \\ F_{\sigma_e^2} &= \{G_{b_s(1)}[t], G_{b_s(2)}[t], \dots, G_{b_s(p_s)}[t]\} \end{aligned} \quad (1)$$

در این عبارات،  $F$  بیانگر زیر فضاهای تابعی کمیت نشان داده شده می‌باشد و  $G_j[t]$  یک سری از توابع پایه متعامد گزینش شده از یک خانواده توابع مناسب می‌باشد (نظیر *Chebyshev*, *trigonometric*, *Lengendre*,  $p_a$ ,  $p_c$  و  $p_s$  به ترتیب، ابعاد زیر فضاهای مربوط به *AR*، *MA* و واریانسها، می‌باشد. در حالیکه شاخصهای  $b_a(i)$  ( $i=1, \dots, p_a$ ),  $b_c(i)$  ( $i=1, \dots, p_c$ ) و  $b_s(i)$  ( $i=1, \dots, p_s$ ) بیانگر توابع اساسی ویژه متعلق به یک خانواده جداگانه که در هر زیر فضا مشتمل می‌گردند، می‌باشند. نمایش *AR*، *MA* و *innovations* برای یک مدل *FS-TARMA*  $(n_a, n_c)_{[p_a, p_c, p_s]}$  را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{cases} a_i[t] = \sum_{j=1}^{p_a} a_{i,j} G_{b_a(j)}[t] \\ c_i[t] = \sum_{j=1}^{p_c} c_{i,j} G_{b_c(j)}[t] \\ \sigma_e^2[t] = \sum_{j=1}^{p_s} s_j G_{b_s(j)}[t] \end{cases} \quad (2)$$

که به ترتیب  $a_{i,j}$ ،  $c_{i,j}$  و  $s_j$  بیانگر پارامترهای ثابت مرتبط با توابع زمانی *AR*، *MA* و واریانس *innovations* می‌باشند. مسئله تخمین پارامتر مدلهای *FS-TARMA* مشتمل بر تعیین  $\mathbf{v}$  و  $\mathbf{s}$  بردارهای ضریب تصویر پارامترهای *AR/MA* و واریانس *innovations* می‌باشد، که به ترتیب عبارتند از:

$$\begin{cases} \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^T & \mathbf{c}^T \end{bmatrix}^T_{(n_a \cdot p_a + n_c \cdot p_c) \times 1} \\ \mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 & \dots & s_{p_s} \end{bmatrix}^T_{p_s \times 1} \end{cases} \quad (3)$$

که در اینجا  $\mathbf{a}$  و  $\mathbf{c}$  به ترتیب بیانگر بردارهای ضریب تصویر پارامترهای متناظر با *AR* و *MA* می‌باشند و عبارتند:

$$\begin{cases} \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_{1,1} \dots a_{1,p_a} & \dots & a_{n_a,1} \dots a_{n_a,p_a} \end{bmatrix}^T_{n_a \cdot p_a \times 1} \\ \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{1,1} \dots c_{1,p_c} & \dots & c_{n_c,1} \dots c_{n_c,p_c} \end{bmatrix}^T_{n_c \cdot p_c \times 1} \end{cases} \quad (4)$$

با توجه به این نکته، مدل *FS-TARMA* را می‌توان با استفاده از عملگر *BACK-SHIFT*  $x[t-i]$  به صورت فشرده شده نوشت:



$$\begin{cases} A[\beta, t, \mathbf{a}] \cdot x[t] = C[\beta, t, \mathbf{c}] \cdot e[t, \mathbf{v}] \\ E[e^2[t, \mathbf{v}]] = \sigma_e^2[t, \mathbf{v}] \\ (E[.] \text{ denote expected value}) \end{cases} \quad (5)$$

که داریم:

$$\begin{cases} A[\beta, t, \mathbf{a}] = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i[t] \cdot \beta^i \\ C[\beta, t, \mathbf{c}] = 1 + \sum_{i=1}^{n_c} c_i[t] \cdot \beta^i \end{cases} \quad (6)$$

تخمین تابع پارامتر  $\mathbf{v}$  می‌تواند بر اساس یک معیار خطای پیش بینی (PE) مشتمل بر جمع مربعات خطای پیش بینی *one-step-ahead* مدل (مجموع باقیمانده مربعات) باشد، بدین معنا که:

$$\hat{\mathbf{v}} = \arg \min_{\mathbf{v}} \sum_{t=1}^N e^2[t, \mathbf{v}] \quad (7)$$

که  $\arg \min_{\mathbf{v}}$  بیانگر کمینه کردن می‌باشد. در حالت *FS-TARMA* باقیمانده  $e[t, \mathbf{v}]$  به طور غیر خطی به  $C$ ، بردار ضریب تصویر پارامترهای *MA* بستگی دارد که بیانگر این مطلب است که محاسبه تخمین گر خطای پیش بینی در معادله (7) با یک مسئله غیر مربعی که نیازمند یک کاربرد تکنیکهای بهینه سازی غیر خطی می‌باشد، همراه می‌گردد. یکی از تکنیکهای مذکور عبارت است از روشهای چند مرحله ای خطی که در این روشها مسئله غیر خطی مذکور به چند زیر مسئله تبدیل شده و از طریق تکنیکهای خطی، این مسائل قابل حل می‌باشند. این روشها، شامل استفاده از *FS-TAR* با مرتبه ای بالا  $(\infty)$  *FS-TAR* استخرج شده از *FS-TARMA* در معادله (5) که می‌تواند بوسیله پیش ضرب به  $C^{-1}[\beta, t, \mathbf{c}]$  بدست آید ("o" به عنوان عملگر ضرب پیچشی<sup>4</sup> در نظر گرفته می‌شود)، می‌باشد:

$$\begin{cases} C^{-1}[\beta, t, \mathbf{c}] \circ A[\beta, t, \mathbf{a}] \cdot x[t] = C^{-1}[\beta, t, \mathbf{c}] \circ C[\beta, t, \mathbf{c}] \cdot e[t, \mathbf{v}] \Leftrightarrow I[\beta, t, \mathbf{i}] \cdot x[t] = e[t, \mathbf{v}] \\ \Leftrightarrow x[t] + \sum_{r=1}^{\infty} i_r[t] \cdot x[t-r] = e[t, \mathbf{v}] \end{cases} \quad (8)$$

که:

$$I[\beta, t, \mathbf{i}] = C^{-1}[\beta, t, \mathbf{c}] \circ A[\beta, t, \mathbf{a}] = 1 + \sum_{r=1}^{\infty} i_r[t] \cdot \beta^r$$

در اینجا  $I[\beta, t, \mathbf{i}]$  بیانگر عملگر چند جمله ای تابع معکوس و  $i$  برداری مشتمل بر ضرایب تابع معکوس ضریب تصویر می‌باشند. به گونه ای که می‌توان از معادله (8) نتیجه گرفت، هر  $i_r[t]$  ( $F_{i_r[t]}$  در موارد زیر فضاهای تابعی چند جمله ای به ترتیب بوسیله عبارات زیر، براساس  $F_{MA}$  و  $F_{AR}$  که مربوط به زیر فضاهای تابعی *AR* و *MA* می‌باشند، ارتباط می‌یابند (Poulimenos, Fassois, 2006):

$$\begin{cases} F_{i_r[t]} = \begin{cases} F_{AR} \cup F_{MA} & r = 1 \\ \{G_0[t], \dots, G_{(r-1), \bar{b}_c + \bar{b}}[t]\} & r \geq 2 \end{cases} \\ \bar{b} = \max_{i,j} \{b_a(i), b_c(i)\}, \quad \bar{b}_c = \max_j \{b_c(i)\} \end{cases} \quad (9)$$

در اینجا  $\bar{b}$  و  $\bar{b}_c$  بیانگر شاخص بیشینه مرتبط با پایه توابع، به ترتیب برای مدل و بخش *MA* آن می‌باشند. اکنون در اینجا روش *2SLS*<sup>5</sup> برای تخمین پارامترها اعمال می‌گردد. این روش شامل سه مرحله به صورت زیر می‌باشد:

4 skew

5 Two Stage Least Square

مرحله ۱) تخمین تابع معکوس: یک مدل تابع معکوس، با مرتبه  $n_i$ ، بریده شده متناظر با مدل معادله (۸) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} I[\beta, t, i].x[t] = e[t, i] \Leftrightarrow \\ x[t] + \sum_{r=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{p_r} i_{r,j} \cdot G_{b_r(j)}[t].x[t-r] = e[t, i] \\ \Leftrightarrow x[t] = \Phi_i^T[t].i + e[t, i] \end{cases} \quad (10)$$

در اینجا،  $e[t, i]$  بیانگر باقیمانده مدل  $(PE)$ ، بردار شامل ضرایب تصویر پارامترهای تابع معکوس بریده شده و  $\Phi_i[t]$  تابع برازش برگشتی متناظر در زمان  $t$  می‌باشد، به این معنا که:

$$\begin{cases} i = \left[ i_{1,1} \dots i_{1,p_1} \mid \dots \mid i_{n_i,1} \dots i_{n_i,p_{n_i}} \right]^T \left( \sum_{r=1}^{n_i} p_r \right) \times 1 \\ \Phi_i[t] = \left[ -G_{b_1(1)}[t].x[t-1] \quad \dots \quad -G_{b_{n_i}(p_{n_i})}[t].x[t-n_i] \right]^T \left( \sum_{r=1}^{n_i} p_r \right) \times 1 \end{cases} \quad (11)$$

توابع پایه اشاره شده در بالا،  $G_{b_r(j)}[t]$  ( $j=1, \dots, p_r$ )، شامل زیر فضاهای تابعی تابع معکوس با مرتبه  $p_r$  ( $F_{i_r[t]}$ ) برای هر  $i_r[t]$  می‌باشند. از آنجائیکه باقیمانده های مدل  $(PE)$ ،  $e[t, i]$ ، به طور خطی به تابع  $i$  وابسته می‌باشد، کمینه کردن  $RSS$  به تخمینگر عادی مربع حداقل  $(OLS)$  زیر منجر می‌گردد:

$$\hat{i} = \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \Phi_i^T[t].\Phi_i[t] \right)^{-1} \cdot \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \Phi_i[t].x[t] \right) \quad (12)$$

با دنبال کردن این مطلب، تخمین باقیمانده های مدل را می‌توان به آسانی بدست آورد. مرحله ۲) تخمین ضریب تصویر پارامترهای  $AR/MA$ : مدل  $FS-TARMA$  معادله (۵) را می‌توان با جاگذاری مقادیر قبل، و نه جاری خطای پیش بینی  $e[t, v]$  با استفاده از  $e[t, \hat{i}]$  بدست آمده در مرحله قبلی، تقریب زد:

$$\begin{cases} A[\beta, t, a].x[t] = (C[\beta, t, c]-1).e[t, \hat{i}] + e[t, v] \\ \Leftrightarrow x[t] + \sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^{p_a} a_{i,j} \cdot G_{b_a(j)}[t].x[t-i] = \\ \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{p_c} c_{i,j} \cdot G_{b_c(j)}[t].e[t-i, \hat{i}] + e[t-1, v] \\ \Leftrightarrow x[t] = \Phi^T[t].v + e[t, v] \end{cases} \quad (13)$$

که در آن  $\Phi[t]$  بیانگر بردار برگشتی به شکل زیر می‌باشد:

$$\Phi[t] = \left[ \begin{array}{c} -G_{b_a(1)}[t].x[t-1] \quad \dots \quad -G_{b_a(p_a)}[t].x[t-n_a] \quad \dots \\ -G_{b_c(1)}[t].e[t-1, \hat{i}] \quad \dots \quad -G_{b_c(p_c)}[t].e[t-n_c, \hat{i}] \end{array} \right]^T_{(n_a \cdot p_a + n_c \cdot p_c) \times 1} \quad (14)$$

از آنجائیکه باقیمانده  $e[t, v]$  به طور خطی به ضریب  $AR/MA$  (ضریب تصویر پارامترهای  $v$ ) وابسته است تخمین بعدی را می‌توان توسط کمینه کردن  $RSS$  با استفاده از یک تخمینگر  $OLS$  بدست آورد.

مرحله ۳) تخمین متغیر (واریانس  $innovation$ ): توالی  $innovation$  (باقیمانده) را می‌توان بر اساس  $\mathbf{v}$  تخمین زده شده و عبارت مدل  $TARMA$ ، تخمین زد (معادله ۵)). واریانس آنرا می‌توان بوسیله بردارهای ضریب تصویر پارامترهای واریانس  $innovation$  ( $\hat{\mathbf{s}}$ ) به صورت زیر تخمین زد (Poulimenos, Fassois, 2003):

$$\hat{\mathbf{s}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left( \sum_{t=1}^N \mathbf{g}[t] \cdot \mathbf{g}^T[t] \right)^{-1} \cdot \left( \sum_{t=1}^N \mathbf{g}[t] \cdot |e[t, \hat{\mathbf{v}}]| \right) \quad (15)$$

که در آن:

$$\mathbf{g}[t] = \left[ G_{b_s(1)}[t] \quad G_{b_s(2)}[t] \quad \dots \quad G_{b_s(p_s)}[t] \right]_{p_s \times 1}^T$$

گام مهم دیگر، که بایستی در طی گامهای انجام شده فوق اجرا شود، انتخاب مرتبه پارامترها و همچنین بعد  $AR$ ،  $MA$ ، واریانس  $innovation$  و شاخصهای آنها می‌باشد. اخیراً، شماری از معیارهای انتخاب مرتبه مدل نظیر معیار اطلاعات  $Akaike/Bayesian$  ( $AIC/BIC$ ) و غیره در دسترس قرار گرفته اند.

در این مقاله، مبنای  $AIC$  (Poulimenos, Fassois, 2005 و Akaike, 1977) برای گزینش ساختار بهینه مدل‌های  $TARMA$  بکار برده شده است. افزون بر آن، هنگامیکه مدل بدست می‌آید، صحت آن نیز بررسی می‌گردد. گرچه این مسئله می‌تواند بر اساس مدل‌های مختلفی باشد، فرآیند صحت سنجی مرسوم، بر اساس آزمایش نمودن فرضیات اساسی، نظیر باقیمانده مدل ( $PE$ )، غیر وابسته (سفید بودن) و آزمایش گاوسی بودن می‌باشد. اما، به علت وابسته به زمان بودن باقیمانده، ممکن است آزمایشات مرسوم سفید بودن<sup>۷</sup> برای حالت متغیر زمانی، قابل کاربرد نباشد. بنابراین، می‌توان آزمایش دیگری بر اساس تعداد تغییرات علامت در سریهای  $e[t, \hat{\mathbf{v}}]$  اعمال نمود (Draper, Smith, 1998). بنابراین توسط این فرآیند پیشنهاد شده، مدل  $FS-TARMA$  با ساختار  $DPE$  و روش تخمین  $2SLS$ ، به عنوان بهترین روش برای مدل نمودن سیگنال‌های ارتعاشی تصادفی متغیر زمانی، شناخته می‌گردد. مدل  $TARMAX$  نیز که دارای یک ورودی به صورت زیر  $U(t)$  می‌باشد، قابل تبدیل از مدل  $TARMA$  است:

$$\begin{cases} A[\beta, t, \mathbf{a}] \cdot x[t] = C[\beta, t, \mathbf{c}] \cdot e[t, \mathbf{v}] + B[\beta, t, \mathbf{c}] \cdot u[t] \\ E[e^2[t, \mathbf{v}]] = \sigma_e^2[t, \mathbf{v}] \quad (E[\cdot] \text{ denote expected value}) \end{cases} \quad (16)$$

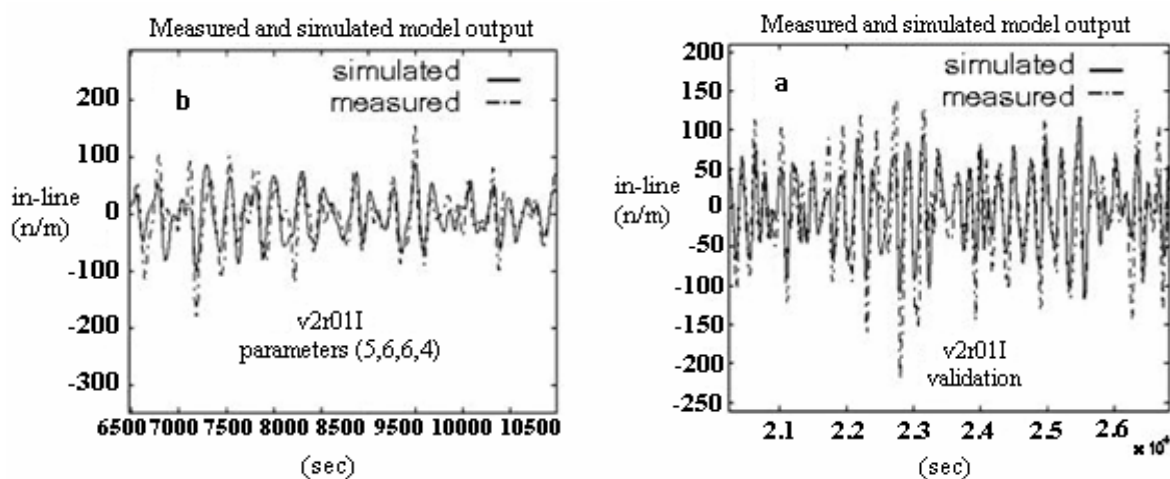
### مشخصات مربوط به داده‌ها

نتایج تجربی بکار گرفته شده در این مقاله با توجه به دقیق بودن داده‌ها، بر مبنای یکسری آزمایش‌های بارگذاری امواج آب واقع بر روی نمونه های پایه استوانه‌ای مدور به قطر ۲۱۰ میلی متر که در سال ۱۹۹۳ در کانال موج دلتای آزمایشگاه هیدرولیک دلفت انجام گرفت، بدست آمده است (Machwood, 1993).

این آزمایش‌های با مقیاس بزرگ در کانال موج دلتا، با طول ۲۵۰، عرض ۵ و ارتفاع ۷ متر و با متوسط عمق آب ۵ متر انجام شده‌اند. برای تولید امواج تصادفی در این آزمایش‌ها از طیف  $JONSWAP$  (پروژه مشترک موج دریای شمال) و با ارتفاع موج مشخصه ۱/۵ متر و پرپیک ۵/۹ ثانیه بهره گرفته شده است و موجهای تولید شده به صورت امواج تصادفی و همچنین دارای تاج طویل می‌باشند. نیروهای موثر توسط چندین حسگر که در ترازهای مختلفی روی بدنه پایه‌های استوانه‌ای تعبیه شده است، اندازه گیری شده‌اند. با توجه به اینکه با افزایش عمق آب، تاثیر امواج و نیروهای ناشی از آن با کاهش روبرو می‌شود و از طرف دیگر، در اثر تغییرات سطح آب و نوسان امواج ممکن است ترازهای بالای نمونه خارج از آب قرار گیرند، لذا نیروهای اندازه‌گیری شده توسط حسگری روی بدنه استوانه که در تراز ۱/۵ متری زیر سطح ساکن آب واقع شده است، مبنای بررسی در این مقاله قرار گرفته اند.

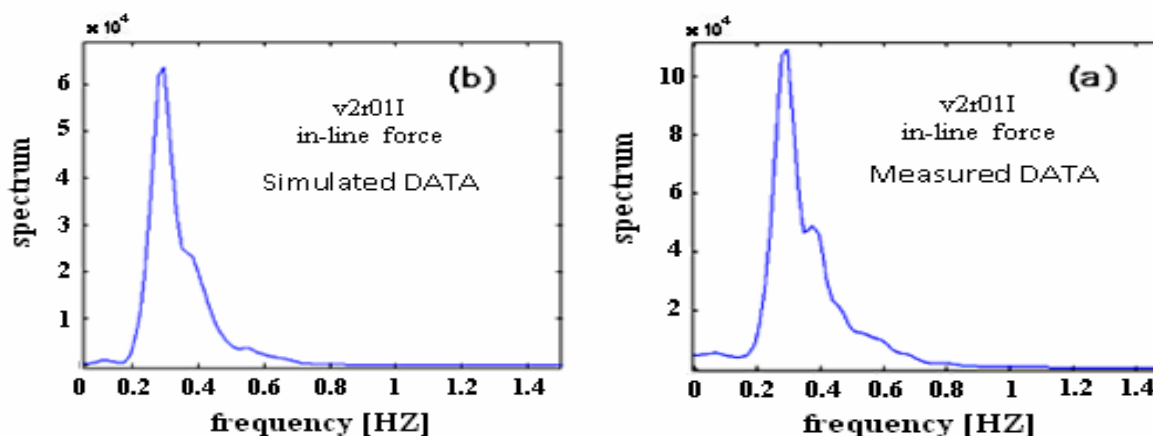
### بحث و نتایج

به منظور ایجاد مدل برای پیش‌بینی نیروهای طولی حاصل از امواج آب، داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته در ارتباط با نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۲۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. لازم به توضیح است که سطح بدنه این نمونه‌ها، دارای زبری نسبی معادل با  $K/D=0.038$  (نسبت ضخامت زبری سطحی به قطر استوانه) می‌باشد. داده‌های مورد استفاده، مقادیر سری زمانی تغییرات سطح آب و نیروهای حاصل از آنها بر روی پایه می‌باشند. به منظور ایجاد مدل و همچنین بررسی اعتبار عملکرد مدل *ARMAX* در پیش‌بینی و شبیه‌سازی نیروهای طولی، داده‌ها به دو قسمت که هر کدام دارای چهل و پنج هزار برداشت می‌باشند، تقسیم شده‌اند. با استفاده از بخش اول داده‌ها، عملیات ایجاد مدل شناسایی سیستم مابین سیگنال‌های ثبت شده مربوط به امواج آب و نیروهای طولی حاصل از آن، انجام گرفته است (Ljung, 2001). سپس، با استفاده از قسمت دوم داده‌های تجربی نوسانات سطح آب و بکارگیری مدل حاصل از مرحله اول، مقادیر نیروهای طولی پیش‌بینی گردیده و با مقادیر تجربی متناظر مقایسه شده‌اند. شکل (۲)، تصویر داده‌های سری زمانی نیروهای طولی حاصل از مدلسازی را (در دو مرحله ایجاد مدل و تأیید اعتبار عملکرد آن) در کنار داده‌های تجربی ثبت شده، نمایش می‌دهد. به منظور به تصویر کشیدن بهتر جزئیات، نمودارها در بازه کوچکتری از داده‌ها، ارائه شده‌اند.



شکل ۲. سیگنال‌های ثبتی و تخمین زده شده نیروی طولی ناشی از موج آب برای نمونه استوانه‌ای: (a) مدل ساخته شده توسط قسمت اول داده‌ها، (b) بررسی اعتبار مدلسازی توسط قسمت دوم داده‌ها

شکل (۳)، طیف‌های توان بدست آمده برای سری‌های زمانی نیروی طولی را درحوزه فرکانسی (داده‌های پیش‌بینی شده و همچنین تجربی ثبت شده)، به تصویر کشیده است (Ochi, 1990).



شکل ۳. طیف‌های توان داده‌های نیروی طولی برای نمونه استوانه‌ای زیر با قطر ۲۱۰/۰ متر در دو وضعیت (a) اندازه‌گیری شده و (b) مدلسازی شده



همانطوریکه در تصاویر مشاهده می‌شود، مدل به خوبی داده‌ها را در دو حوزه زمانی و فرکانسی پیش‌بینی نموده است. البته مشاهده می‌گردد که نیروهای پیش‌بینی شده توسط مدل، نسبت به داده‌های ثبت شده در طی آزمایشها، مقداری دست پایین تخمین زده شده‌اند. پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل، پارامترهای آن به صورت رابطه‌های زیر معرفی می‌شوند:

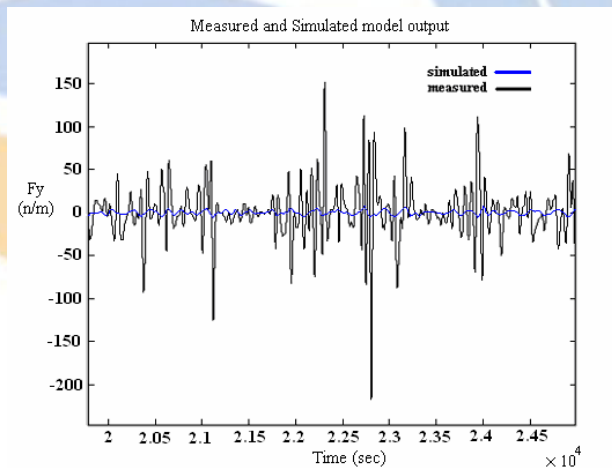
$$A(q) = 1 - 4.398q^{-1} + 7.77q^{-2} - 6.894q^{-3} + 3.07q^{-4} - 0.5504q^{-5}$$

$$B(q) = 13.26q^{-4} - 50.33q^{-5} + 75.46q^{-6} - 56.24q^{-7} + 21.21q^{-8} - 3.368q^{-9} \quad (17)$$

با استفاده از روش آماری  $MNS$  و توسط رابطه زیر، درصد خطای مدل‌سازی با استفاده از پنج آزمایش جداگانه مشابه، در حدود ۱۲٪ تخمین زده می‌شود:

$$MNS = \left( \frac{100}{N} \right) \sum_{i=1}^N \frac{f_{m_i} - f_{p_i}}{f_{m_i}} \quad (18)$$

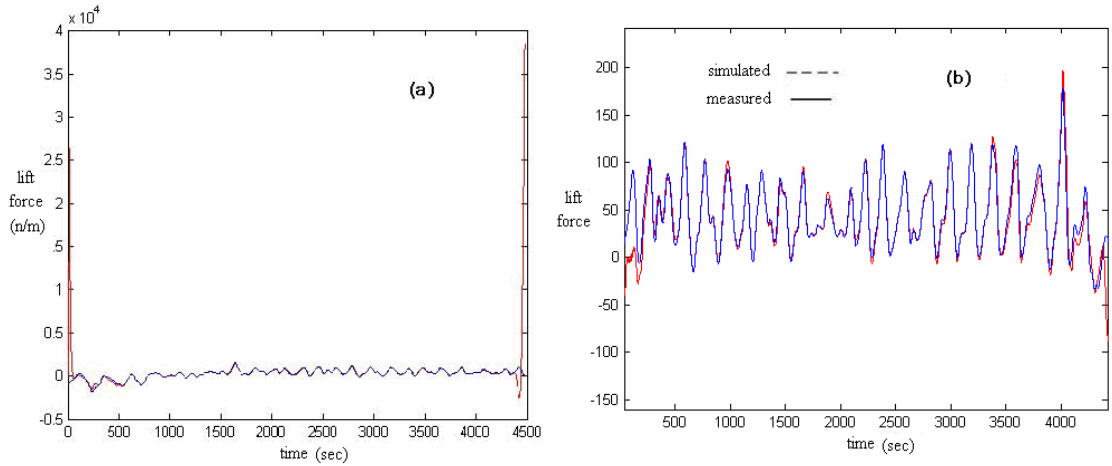
که در رابطه فوق،  $f_p$  و  $f_m$  به ترتیب مقادیر بیشینه در نوسانات سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشند. به منظور بررسی نحوه عملکرد مدل  $ARMAX$  در ارتباط با نیروهای عرضی متناظر واقع بر پایه (در راستای جانبی و عمود بر نیروهای طولی)، مطابق مراحل فوق الذکر، عمل گردیده است. در شکل (۴)، داده‌های نیروهای عرضی (ناشی از امواج آب) که با تلاش برای مدل‌سازی حاصل گردیده‌اند، در کنار داده‌های ثبت شده طی آزمایش (برای نمونه استوانه‌ای با قطر ۲۱۰ میلی‌متر) نشان داده شده‌اند. همانطوریکه مشاهده می‌شود، مدل  $ARMAX$  در این حالت عملکرد مناسبی ندارد. علت این پدیده به دلیل غیر ایستایی بودن سیگنال یا داده‌ها می‌باشد. لازم به توضیح است که مدل  $ARMAX$  فقط برای داده‌های ایستایی قابل کاربرد می‌باشد (Grenier, 1983). بنابراین در ادامه، نحوه کاربرد مدل جدید  $TARMAX$  (الگوریتم آن جهت بررسی سیگنالهایی از این دست، مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش ۳، تهیه گردیده است) در بررسی نیروهای عرضی متناظر با آزمایشات مذکور، شرح داده شده است.



شکل ۴. سیگنالهای اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده نیروی عرضی ناشی از موج آب برای نمونه زبر با قطر ۲۱۰/۰ متر

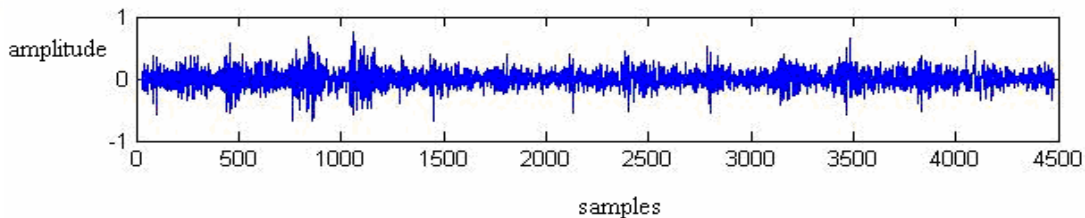
مطابق با آنچه که در ارتباط با نیروهای طولی شرح داده شد، داده‌های مربوط به نیروهای عرضی انتخاب گردیده‌اند. با این تفاوت که جهت مدل‌سازی و بررسی عملکرد آن، داده‌ها به دو بخش متشکل از چهار هزار و پانصد برداشت، تقسیم شده‌اند. تصاویری که در شکل (۵) ارائه شده‌اند، نشان دهنده عملکرد مدل  $TARMAX$  در ارتباط با مدل‌سازی نیروهای عرضی می‌باشند. در شکل (۵) تصویر داده‌های سری زمانی نیروهای عرضی حاصل از مدل‌سازی در کنار داده‌های تجربی ثبت شده، نشان داده شده است. در شکل (۵-ا) به منظور به تصویر کشیدن بهتر

جزئیات، نمودارها در بازه کوچکتری از داده‌ها، ارائه شده‌اند. در شکل (b-5) نیز داده‌ها در کل بازه مفروض، آورده شده‌اند. همانطوریکه در این شکل مشاهده می‌گردد، از نظر اعتبار سنجی مدل با روش  $OSPM^{10}$  در طول بازه به غیر از نقاط ابتدائی و انتهائی سیگنال قابل تأیید می‌باشد. ناپایداری سیگنال در ابتدا و انتهای آن، به مسئله گذرا بودن سیگنال در این ناحیه‌ها مربوط می‌شود (Poulimenos, Fassois, 2006).

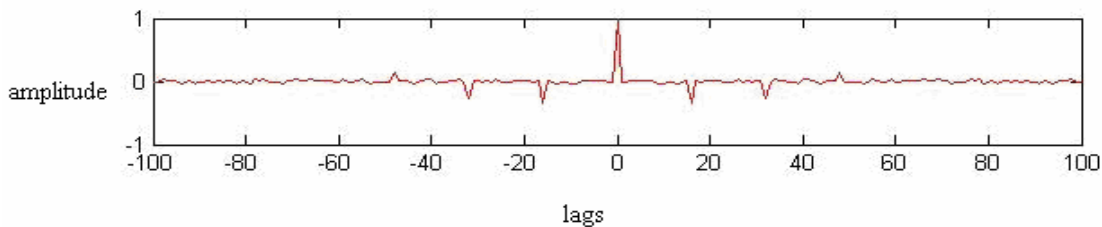


شکل ۵. سیگنالهای اندازه گیری شده و مدل سازی شده نیروی عرضی بر روی نمونه استوانه‌ای زیر با قطر ۲۱ متر: (a) نمایش بازه کامل سیگنال، (b) قسمتی از بازه سیگنال منعکس شده است.

در سه تصویر ۶، ۷ و ۸ نیز با روش همبستگی<sup>۱۱</sup> عملکرد مدل سازی بررسی گردیده است که با توجه به قسمت همبستگی، سفید بودن باقیمانده قابل مشاهده می‌باشد، بنابراین بدین طریق نیز معتبر بودن مدل سازی تأیید می‌گردد (Ljung, 2001). لازم به توضیح است که توابع پایه انتخاب شده برای مدل  $TARMAX$  از توابع مثلثاتی<sup>۱۲</sup> می‌باشد. همچنین مرتبه های مربوط به مدل مذکور برای قسمت های  $AR$ ،  $MA$ ،  $X$  و واریانس به ترتیب  $\rho_s$ ،  $\rho_x$ ،  $\rho_c$ ،  $\rho_a$  هستند و بر اساس روشهای بیان شده پیدا شده‌اند.

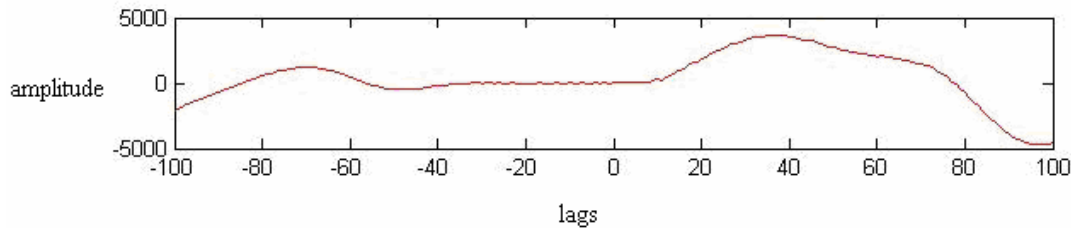


شکل ۶. نمایش باقیمانده  $e[t, v]$



- 10 One Step Ahead Prediction Method
- 11 correlation
- 12 triangular

شکل ۷. نمایش وابستگی  $e[t, \nu]$



شکل ۸. وابستگی متقابل<sup>۱۳</sup> ما بین ورودی  $u(t)$  و باقیمانده  $e[t, \nu]$

### نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از تئوری‌های نظریه شناسائی سیستم‌ها، به بررسی نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از برخورد نوسانات مشخص امواج آب با پایه استوانه ای شکل دارای ابعاد هندسی معین، پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از آنالیز طیفی و تابع *coherence*، مشاهده گردیده است که رابطه بین داده های نیروهای طولی و عرضی با داده های امواج آبی که آنها را به سازه اعمال می کند، به ترتیب خطی و غیر خطی می باشند. آنگاه قابلیت مدل پارامتری *ARMAX* و روش خطای پیش‌بینی و به دنبال آن سریهای تابعی مدل *TARMAX*، برای تخمین و مدلسازی سیگنالهای نیروهای هیدرودینامیکی واقع بر پایه استوانه‌ای در معرض امواج، مورد ارزیابی قرار گرفته است که با توجه به عملکرد مذکور نتایج به صورتی که در ادامه آمده است، حاصل شده‌اند.

تطابق مناسب بین سیگنال نیروهای طولی ناشی از امواج آب واقع بر پایه استوانه‌ای که توسط مدل *ARMAX* پیش‌بینی شده‌اند با داده‌های حاصل از اندازه‌گیریهای آزمایش، بیانگر قابلیت این روش در تخمین و پیش‌بینی این نیروها می‌باشد.

در عین حال، مشاهده شد که این مدل اندکی مقادیر این نیروها را نسبت به واقعیت، دست پایین تخمین می زند. بنابراین عملکرد این مدل دارای درصدی از خطا می‌باشد که می توان قسمتی از آن را به تاثیر عملکرد گردابه ها در نیروهای طولی که به صورت اثری غیر خطی نمود می‌نماید، نسبت داد.

با توجه به عملکرد این مدل برای نیروهای عرضی ناشی از امواج، مشاهده گردید که مدل *ARMAX* قابلیت مدلسازی و پیش‌بینی این نیروها را ندارد که علت این پدیده به *Non-stationary* بودن سیگنال مربوط به داده های نیروی عرضی نسبت داده شد که آن نیز از غیر خطی بودن سیستم مربوطه، نشأت می گیرد.

نهایتاً، مدل پارامتری *TARMAX* برای بررسی این نیروهای عرضی پیشنهاد گردیده و قابلیت آن در آنالیز و مدل نمودن سیگنالهای آن بررسی شده است همچنین با استفاده از نتایج حاصل، توانائی مدل *TARMAX* در انجام این هدف تأیید می گردد. بنابراین استفاده از قابلیت این مدل در شناسائی رفتار متفاوت نیروهای عرضی وارد بر اجزای استوانه ای در معرض امواج، پیشنهاد گردیده است.

### فهرست منابع

(۱) فرزاد، کیوان. بررسی تجربی نیروهای هیدرودینامیک وارد بر اعضای قائم سکوه‌های دریائی تحت تاثیر جریان و امواج تصادفی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۷۸.

D.E. Newland (1993), Random Vibration and Spectral and Wavelet Analysis, Addison-Wesley, Reading, MA.

G. Wu (2007), A real time statistical method for engine knock detection, SAE Technical Paper, 2007-01-1507.

T.G. Horner (1996), Knock Detection using spectral analysis techniques on a Texas instruments Tms320 Dsp, SAE Technical Paper, 960614.

M.J. Kearney-Delphi (2007), Knock signal conditioning using the discrete fourier transform and variable detection window length, SAE Technical Paper, 2007-01-1509.

## Archive of SID

- J. Antoni, J. Daniere, F. Guillet (2002), Effective vibration analysis of IC engines using cyclostationarity. Part I. A methodology for condition monitoring, *Journal of Sound and Vibration* 257 (5) p. 815–837.
- Z. Zhanga, E. Tomitab (2002), Knocking detection using wavelet instantaneous correlation method, *JSAE Review* 23 pages 443–449.
- H.A. Noubari, G.A. Dumont (2005), Towards an improved knock detection and quantification using wavelets and entropy-based noise compensation, *SAE Technical Paper*, 2005-01-2269.
- D. Lazarescu, V. Lazarescu, M. Ungureanu (2004), Knock detection based on SOM, in: *Seventh Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering*, Belgrade, Serbia and Montenegro, pp. 117–120.
- J.H. Thomas, B. Dubuisson, M.A. Dillies-Peltier (1997), Engine knock detection from vibration signals using pattern recognition, *Meccanica* 32 pages 431–439.
- S. Chen, S.A. Billings (1989), Representation of nonlinear systems: the NARMA model, *International Journal of Control* 49 (3) pages 1013–1032.
- S.A. Billings, K.M. Tsang (1989), Spectral analysis for non-linear systems. Part I: Parametric non-linear spectral analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing* 3, pp. 319–339.
- Ochi, M. K. (1990). *Apply probability and stochastic process in engineering and physics science*. John wily & sons, inc, New York.
- A.G. Poulimenos, S.D. Fassois (2006), Parametric time-domain methods for non-stationary random vibration modelling and analysis — A critical survey and comparison, *Mechanical Systems and Signal Processing* 20, pp.763–816.
- Sumer B. Mutlu, Fredsoe Jorgen (1998). *Hydrodynamics around cylindrical structures*. World Scientific.
- Morison, J.R., O'brien, M.P., Johnson, J.W (1950). *The force Exerted by surface wave on piles*. American Institute of Mining and Metallurgical Engineering. Yd. 189, pp.147-154.
- A.G. Poulimenos, S.D. Fassois (2003), Estimation and identification of non-stationary signals using functional series TARMA models, in: *Proceedings of the 13th IFAC Symposium on System Identification*, Rotterdam, The Netherlands, pp. 162–167.
- A.G. Poulimenos, S.D. Fassois (2005), On the estimation of non-stationary functional series TARMA models, in: *Proceedings of the 13<sup>th</sup> European Signal Processing Conference*, Antalya, Turkey.
- H. Akaike (1977), On entropy maximization principle, *Applications of Statistics*, pp. 27–41.
- N.R. Draper, H. Smith (1998), *Applied regression analysis*, third ed., Wiley, New York.
- Machwood, P.R 1993). *Wave and Current flows Around Circular Cylinders at large Scale*. Lip project 10D, pp. 27.
- Ljung, L (2001). *System Identification Toolbox for use with MATLAB*. Fifth Printing.
- Grenier, Y (1983). Time - dependent ARMA modeling of non-stationary signals. *IEEE Transactions on signal processing*, ASSP-31, pp. 899-911.

ICOPMAS



**Estimation and Modeling of Experimental Data of Forces being Applied to Cylindrical Support under Random Waves based on TARMAX and ARMAX Parametric Models**

*A. Mojtahedi, Tabriz University*

*M. A. LotfollahiYaghin, Tabriz University*

*M. Etefagh*

**Abstract**

Coastal and offshore structures are systems that are not only to bear dead and service loads during operation time, but also they are exposed to a band of dynamic forces which appear in the form of time variable and mainly originate from sea. As a result of such effects of sea waves, the structures' building blocks are under two forces, one in the direction of current and the other perpendicular to it (lateral). An experimental method for studying such forces is conducting laboratory tests in wave-making challenges on cylindrical supports. These supports can be taken similar to structural elements that form a wharf as well as berth supports. For the purpose of modeling the vibrational signals, there are two main methods which include parametric models and non-parametric models. Non-parametric model have drawn more attentions than parametric ones. These are based on wave energy and as a frequency and time function.

**Keywords:** *coastal structures, offshore structures, load, dynamic forces*