

## ارائه روابطی بر مبنای مدل درختی M5 جهت برآورد حداکثر دامنه نسبی امواج عمود بر جهت جریان

جواد ظهیری<sup>۱\*</sup>، احمد جعفری<sup>۲</sup>

مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴

### چکیده

ارتعاشات ناشی از گردابه در سازه‌ها در بسیاری از مسایل مهندسی از قبیل ارتعاش در لوله‌های مبادله کننده و طراحی پل‌ها و سازه‌های هیدرولیکی اهمیت دارد. در این تحقیق جهت برآورد حداکثر دامنه نسبی امواج عمود بر جهت جریان از اطلاعات منابع معتبر موجود استفاده گردید. در این تحقیق عدد رینولدز، عدد فرود، شماره موج، نسبت فاصله طولی و عرضی به قطر پایه‌ها و نحوه چیدمان پایه‌ها به عنوان متغیرهای ورودی به مدل درختی M5 معرفی گردید. متغیر خروجی نیز نسبت دامنه موج به عمق جریان در نظر گرفته شد. پس از آموزش مدل درختی، دو ساختار متفاوت جهت دو آرایش موازی و زیگزاگی ارائه گردید که در آرایش موازی چهار و در آرایش زیگزاگی پنج معادله مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق عدد رینولدز که در معادلات گذشته در نظر گرفته نشده بود به عنوان یکی از متغیرهای تقسیم‌بندی در آرایش موازی به کار رفته و در معادلات ارائه شده نیز نقش مهمی بر روی دامنه نسبی امواج ایفا نموده است. جذر میانگین مربعات خطا در مدل درختی برابر ۰/۲۳ بوده که در مقایسه با سایر معادلات ارائه شده بین ۴۶ تا ۵۰ درصد کاهش داشته است. علاوه بر این دقت این مدل نیز برابر ۸۱ درصد بوده که به میزان ۱۸ تا ۳۸ درصد نسبت به معادلات سایر محققین بیشتر است. نسبت اختلاف مدل درختی نیز در بازه ۰/۵۲ تا ۰/۶۶ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده برآورد مناسب مدل از حداکثر دامنه نسبی امواج است.

واژه‌های کلیدی: گردابه، آرایش موازی و زیگزاگی، مدل درختی، نیروی نوسانی

<sup>۱\*</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ۰۹۱۶۶۵۳۱۸۹۶، j.zahiri@ramin.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ۰۹۱۳۱۲۶۱۳۵۰، jafary\_ahmad@yahoo.com

## مقدمه

قرارگیری هر مانعی در مسیر جریان باعث تغییر خصوصیات جریان شده و گردابه‌هایی را در پایین دست مانع ایجاد می‌کند. گردابه‌های ایجاد شده باعث اعمال نیروهای نوسانی به سازه می‌گردند. اگر فرکانس نیروی تناوبی ناشی از ورتکس موانع با فرکانس طبیعی نوسان امواج آب برابر گردد، حالت تشدید بوجود آمده و امواج با حداکثر دامنه بوجود می‌آیند. ارتعاشات ناشی از ورتکس در سازه‌ها در بسیاری از رشته‌های مهندسی مورد توجه قرار دارد، از جمله این موارد می‌توان به ارتعاش در لوله‌های مبادله کننده حرارت اشاره کرد. همچنین در مهندسی عمران این موضوع در طراحی پل‌ها و سازه‌های هیدرولیکی اهمیت پیدا می‌کند. در سازه‌های دریایی نیز ارتعاش ناشی از ورتکس، نوسان-هایی با دامنه وسیع را می‌تواند بوجود آورد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰). در گذشته با توجه به قدرت تخریب نیروهای وارد شده، همواره محققین به دنبال روش-هایی جهت کاهش و یا کنترل این نیروها بوده‌اند. امروزه با توجه به شناخت بهتر نیروهای نوسانی و ویژگی‌های ورتکس‌های ایجاد شده در اطراف سازه‌ها، روش‌هایی جهت استفاده از این نیروهای نوسانی ارائه شده است. (Barrero Gil et al. (2012) ارتعاشات ناشی از گردابه‌ها (VIV) را به عنوان یک منبع پتانسیل برای برداشت انرژی معرفی نمودند. بر همین اساس شناخت امواج ایجاد شده در اثر برخورد جریان با موانع و ویژگی‌های آن جهت کنترل ورتکس‌های ایجاد شده و استفاده از آن‌ها اهمیت فراوانی دارد. این امواج عمود بر جهت جریان بوده و حداکثر دامنه نسبی آن‌ها تحت تاثیر عوامل مختلفی از قبیل فاصله طولی و عرضی موانع، نحوه قرارگیری، ابعاد و تراکم موانع می‌باشد. تاکنون تحقیقات فراوانی بر روی حداکثر دامنه نسبی امواج عمود بر جهت جریان صورت گرفته و معادلات متعددی در این زمینه ارائه شده است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه سابقه زیادی داشته ولی بعد از تخریب پل Tacoma Narrows که به دلیل پدیده تشدید صورت گرفت، میزان علاقه‌مندی محققین به این موضوع افزایش یافت ( Zima &

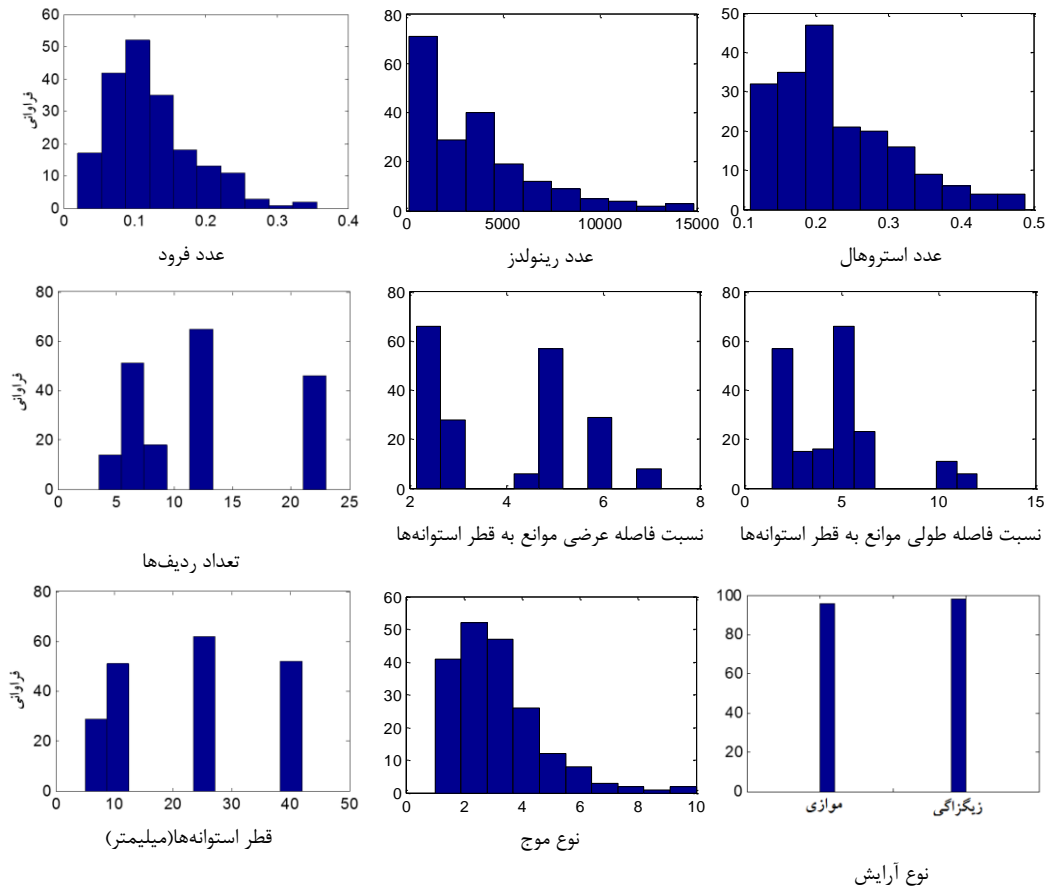
Ackermann, 2002). از جمله اولین این تحقیقات را می‌توان به Dean & Dalrymple (1984) مربوط دانست. این دو محقق با استفاده از تئوری امواج کم دامنه نشان دادند که طول موج، دوره تناوب موج، شتاب جاذبه زمین و عمق جریان بر یکدیگر تاثیر می‌گذارد. این محققین با توجه به اینکه فرکانس موج عکس دوره تناوب است، رابطه‌ای را جهت تخمین فرکانس امواج ارائه کردند. Zima & Ackermann (2002) جهت مطالعه امواج عرضی ایجاد شده در اثر موانع از یک فلوم کوچک به عرض ۱۵ سانتیمتر و یک فلوم بزرگ به عرض ۴۵ سانتیمتر استفاده کردند. در هر دو فلوم از پایه‌های استوانه‌ای جهت ایجاد امواج عرضی استفاده شد. در طی آزمایشات انجام شده امواج نوع یک و نوع دو مشاهده گردید. Ghomeshi et al. (2007) از موانعی به قطر ۲۴ میلیمتر جهت ایجاد امواج عرضی استفاده کردند. در طی این آزمایشات امواج نوع یک، دو، سه و چهار در فلوم آزمایشگاهی مشاهده گردید. این محققین دو رابطه جهت برآورد حداکثر دامنه امواج عمود بر جریان ارائه نمودند. Prasanth & Mittal (2009) نیز تحقیقی را در زمینه ارتعاش ناشی از ورتکس مربوط به دو مانع استوانه‌ای در اعداد رینولدز پائین انجام دادند. Sahu et al. (2009) مکانیزم جریان عبوری از یک مانع چهارگوش را در عدد رینولدز پایین به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق در عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۳۲۵ انجام شد. این محققین مشاهده کردند که جریان در عدد رینولدز ۱۶۰ دو بعدی و در عدد رینولدز ۱۶۳/۵ سه بعدی بوده و در عدد رینولدز ۱۷۵ بسیار متمایز می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز طول موج تشکیل شده کاهش می‌یابد. Jafari et al. (2010) در تحقیقی آزمایشگاهی با انجام ۳۸ نوع آزمایش، ده نوع موج را در فلوم آزمایشگاهی مشاهده نمودند. این محققین در مقاله‌ای دیگر دامنه ده نوع موج عرضی را با انجام ۳۸ نوع آزمایش در جریان آزاد بر روی موانع مورد بررسی قرار دادند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰). Azizi & Ghomeshi (2010) در یک فلوم آزمایشگاهی، آزمایش‌هایی را جهت محاسبه عدد

معدلاتی جهت برآورد حداکثر دامنه نسبی امواج بر اساس کلیه متغیرهای تاثیرگذار ارائه شود.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق جهت برآورد حداکثر دامنه نسبی امواج عمود بر جهت جریان از اطلاعات مربوط به Zima (2002) Ackermann & Jafari et al. (2010) استفاده گردید. کلیه آزمایشات صورت گرفته شامل ۲۱۱ آزمایش بوده که ۸ آزمایش آن مربوط به Zima & Ackermann (2002) بوده و ۲۰۳ آزمایش باقیمانده توسط Jafari et al. (2010) صورت گرفته است. کلیه این اطلاعات به عنوان داده‌های مورد نیاز جهت ساخت و صحت سنجی مدل درختی M5 مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق عدد رینولدز، عدد فرود، شماره موج و نسبت فاصله طولی و عرضی به قطر پایه‌ها به عنوان متغیرهای ورودی به مدل درختی معرفی گردید. متغیر خروجی نیز نسبت دامنه موج به عمق جریان در نظر گرفته شد. در اغلب تحقیقات گذشته نحوه چیدمان پایه‌ها در مسیر جریان به دلیل کمیت غیر عددی آن از محاسبات حذف می‌گردید، این در حالی است که در این تحقیق این متغیر نیز به عنوان یک متغیر تقسیم بندی در الگوریتم مورد نظر به کار گرفته شد. مشخصات اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شد. در این شکل هیستوگرامهای مربوط به توزیع فراوانی هر کدام از متغیرها ارائه گردید که با استفاده از آن می‌توان به توزیع متغیرها و نیز نقص موجود در داده‌ها پی برد. در کلیه شکل‌ها محور عمودی نشانگر فراوانی داده‌های مورد استفاده می‌باشد. از میان کلیه داده‌های مورد استفاده ۸۰٪ آن‌ها جهت آموزش و ساخت مدل درختی و ۲۰٪ باقیمانده نیز جهت صحت‌سنجی آن به کار تحقیق، الگوریتم M5 بوده که اولین بار توسط Quinlan (1992) ابداع شد و پس از آن توسط Wang & Witten (1997) توسعه و بهبود یافت. روش M5 شاخه‌های خود را به صورت دوتایی و تنها براساس یک متغیر ایجاد می‌کند، بدین گونه که بر اساس شرطی که

استروهاال در جریان آب با مجموعه موانع استوانه‌ای انجام دادند. در این آزمایش‌ها قطر موانع و دبی جریان ثابت بوده و چهار نوع موج عرضی در فلوم تشکیل گردید. این محققین بر اساس نتایج به دست آمده روابطی را برای محاسبه عدد استروهاال ارائه کردند. پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۴) از موانع استوانه‌ای و مثلثی جهت بررسی تاثیر شکل موانع بر روی تشکیل امواج عرضی استفاده کردند. برای مانع مثلثی دو حالت برخورد جریان به راس و ضلع مثلث در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده تاثیر شکل مانع بر روی تشکیل امواج عرضی می‌باشد. این محققین در نهایت با استفاده از نرم افزار SPSS روابطی جهت تخمین عدد استروهاال ارائه دادند. (2015) Chung به بررسی ضرایب هیدرودینامیکی و ساختار گردابه در یک جریان یکنواخت بر روی یک استوانه نوسانی با استفاده از مدل ریاضی پرداخت. این محقق شبیه‌سازی عددی را در رینولدز ثابت ۱۰۰، سه عدد فرود، دو عمق استغراق و سه دامنه نوسان با فرکانس‌های متعدد نوسانی انجام داد. نتایج این محقق نشان داد که برای یک استوانه نوسانی در زیر سطح آزاد، دامنه‌های نوسانی بالا و یا اعماق استغراق زیاد باعث نیروهای دراگ شدید در نسبت‌های فرکانس (= نسبت فرکانس نوسان به فرکانس طبیعی گردابه) بالاتر از ۲/۵ می‌گردد. علاوه بر این در اعداد فرود بالا و نسبت‌های فرکانس بزرگتر از یک، فرکانس بالابرنده تنها تابعی از فرکانس نوسانی استوانه می‌گردد. در اکثر تحقیقات صورت گرفته تاثیر همزمان پارامترهایی از قبیل نحوه چیدمان موانع، عدد فرود و عدد رینولدز جریان در معادلات ارائه شده، مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که پارامترهای ذکر شده به طور هم‌زمان می‌توانند بر روی دامنه نسبی امواج تاثیرگذار باشند. از جمله مدل‌های داده‌کاوی نوین که جهت بررسی پارامترهای موثر بر روی یک پدیده و حذف پارامترهای غیر موثر مورد استفاده قرار می‌گیرد، الگوریتم درختی M5 می‌باشد. بر همین اساس در این تحقیق سعی شده است با استفاده از بازه وسیعی از اطلاعات آزمایشگاهی و با به کار بردن الگوریتم درختی M5



شکل (۱): هیستوگرام مربوط به توزیع فراوانی متغیرهای موثر بر دامنه نسبی حداکثر امواج عمود بر جریان

کاهش خطای مورد انتظار جهت داده‌های غیر آموزشی می‌شود (ظهیری، ۱۳۹۴). پس از هرس کردن، مدل‌های خطی مورد استفاده در برگ‌های مجاور درخت هرس شده به شدت دچار ناپیوستگی می‌گردند که این امر سبب از بین رفتن پیوستگی سیستم می‌گردد. بر همین اساس می‌بایستی از مکانیزم هموارسازی<sup>۳</sup> جهت رفع ناپیوستگی ایجاد شده در مدل‌های خطی استفاده نمود. در این فرآیند مقدار تخمین زده شده در هر برگ تصحیح می‌شود. چنانچه نمونه مورد نظر در شاخه  $S_i$  از زیر درخت  $S$  باشد،  $n_i$  تعداد نمونه‌های آموزشی در  $S_i$ ،  $PV(S_i)$  مقدار محاسبه شده در  $S_i$  و  $M(S)$  مقدار محاسبه شده توسط مدل در  $S$  باشد، آنگاه مقدار اصلاح شده  $(PV(S_i))$  از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

در هر گره تعریف می‌شود، اطلاعات در آن گره به دو قسمت تقسیم می‌شود. در روش  $M5$  فضای مساله به زیر دامنه‌هایی تقسیم شده و برای هر زیر دامنه یک مدل رگرسیون خطی چند متغیره برازش داده می‌شود. این مدل تنها قادر به شبیه سازی مدل‌های خطی بوده که این امر با اساس معادلات متداول در زمینه حداکثر دامنه نسبی امواج در تناقض است. بر همین اساس کلیه داده‌ها به صورت لگاریتم طبیعی به مدل معرفی شدند تا پس از خارج کردن روابط از حالت لگاریتمی به صورت روابط توانی تبدیل شوند. در طی ساخت مدل درختی توسط الگوریتم  $M5$  فرآیند جداسازی در گره‌های تقسیم ممکن است بارها تکرار شده و در نتیجه درخت بسیار بزرگی ایجاد شود. در این حالت مدل دچار بیش برازش<sup>۱</sup> شده که از طریق هرس کردن<sup>۲</sup> می‌توان این مشکل را رفع کرد. عمل هرس کردن باعث

<sup>3</sup> Smoothing process

<sup>1</sup> Overfitting

<sup>2</sup> Pruning

معادلات ۶ تا ۱۰ نیز مربوط به آرایش زیگزاگی می باشند.

LM 1 →

$$\frac{A}{H} = 0.92 \left( \frac{T}{D} \right)^{0.52} n^{-0.11} S^{0.3} Re^{-0.11} Fr^{0.47} \quad (۲)$$

LM 2 →

$$\frac{A}{H} = 1.92 \left( \frac{P}{D} \right)^{-0.28} \left( \frac{T}{D} \right)^{-0.02} n^{-0.62} S^{0.38} Re^{0.23} Fr^{1.56} \quad (۳)$$

LM 3 →

$$\frac{A}{H} = 1.6 \left( \frac{P}{D} \right)^{-0.28} n^{-0.62} S^{0.38} Re^{0.27} Fr^{1.56} \quad (۴)$$

LM 4 →

$$\frac{A}{H} = 20 \left( \frac{P}{D} \right)^{-0.54} n^{-0.19} S^{2.9} Re^{0.04} Fr^{0.1} \quad (۵)$$

LM 1 →

$$\frac{A}{H} = 46.9 \left( \frac{P}{D} \right)^{-0.43} \left( \frac{T}{D} \right)^{-0.92} n^{-0.4} S^{0.55} Re^{-0.28} Fr^{1.28} \quad (۶)$$

LM 2 →

$$\frac{A}{H} = 9.68 \left( \frac{P}{D} \right)^{0.56} \left( \frac{T}{D} \right)^{-1.53} n^{-0.36} S^{-0.55} Re^{-0.05} Fr^{1.74} \quad (۷)$$

LM 3 →

$$\frac{A}{H} = 109.9 \left( \frac{P}{D} \right)^{0.02} \left( \frac{T}{D} \right)^{-1.27} n^{-0.55} S^{-0.55} Re^{-0.05} Fr^{1.74} \quad (۸)$$

LM 4 →

$$\frac{A}{H} = 0.04 \left( \frac{T}{D} \right)^{-0.6} n^{-1.98} S^{-0.6} Re^{-0.57} Fr^{1.78} N^{0.51} \quad (۹)$$

LM 5 →

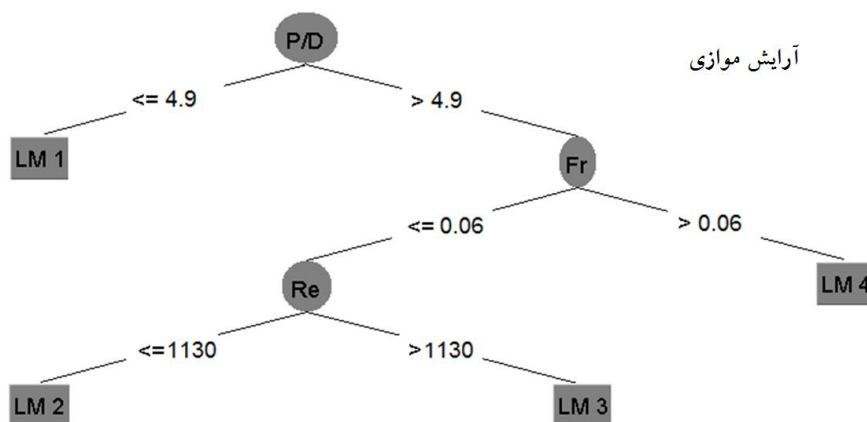
$$\frac{A}{H} = 0.7 \left( \frac{P}{D} \right)^{-0.11} \left( \frac{T}{D} \right)^{-0.6} n^{-0.65} S^{-0.6} Re^{-0.06} Fr^{0.65} N^{0.35} \quad (۱۰)$$

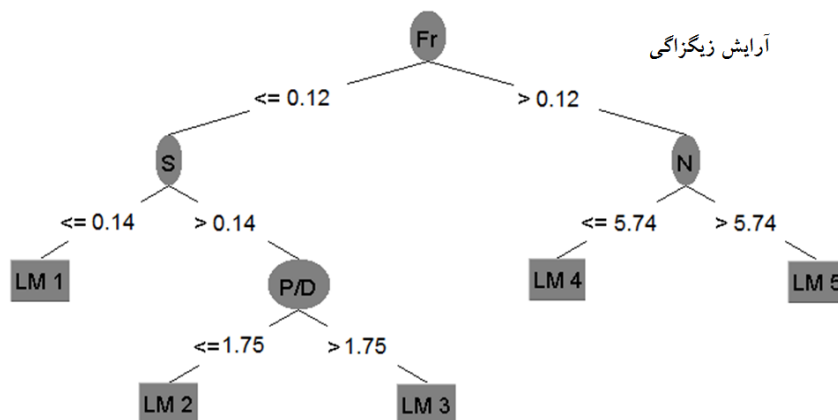
$$PV = \frac{ni \times pv (si) + k \times M (s)}{ni + k}$$

در رابطه فوق  $k$  ثابت هموارسازی بوده که به صورت پیش فرض برابر ۱۵ در نظر گرفته می شود. هموارسازی به ویژه در مواقعی که مدل های خطی در برگ های مجاور، مقادیر کاملاً متفاوتی ارائه می دهند و یا مدل هایی که بر اساس داده های آموزشی محدود ساخته می شوند، می تواند به میزان زیادی مؤثر باشد (Wang & Witten, 1997).

## نتایج و بحث

پس از ساخت مدل درختی M5 با استفاده از داده های آموزش، ساختار درختی ارائه شده توسط مدل درختی به صورت شکل ۲ گردیده است. نتایج در دو درخت، بر اساس نحوه چیدمان پایه ها که به صورت موازی و زیگزاگی است ارائه شده است. مقادیر ارائه شده توسط مدل M5 حالت لگاریتمی داشته که در شکل ۲ مقادیر از حالت لگاریتمی خارج شده اند. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، مدل جهت برآورد حداکثر دامنه نسبی امواج از شاخه های متعددی استفاده کرده است، بدین صورت که در آرایش موازی از چهار مدل و در آرایش زیگزاگی از پنج مدل استفاده شده است. معادلات ارائه شده توسط مدل درختی جهت آرایش موازی شامل معادلات ۲ تا ۵ بوده و



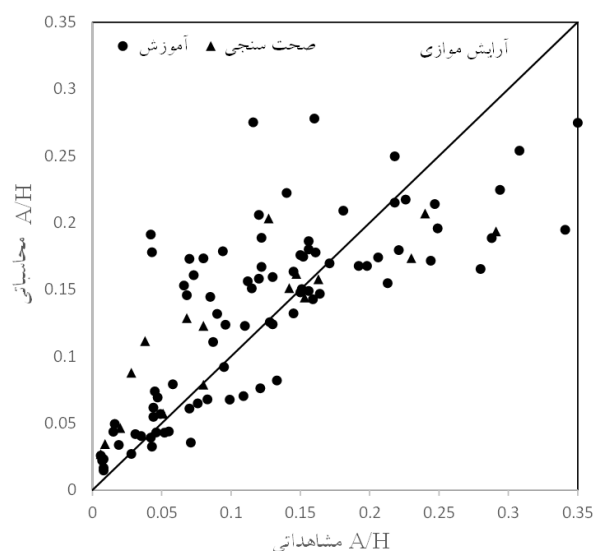
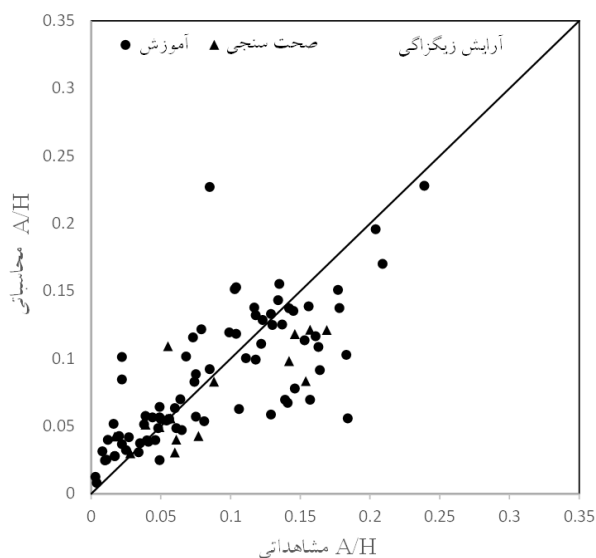


شکل (۲): ساختار درختی ارائه شده جهت دو آرایش موازی و زیگزاگی

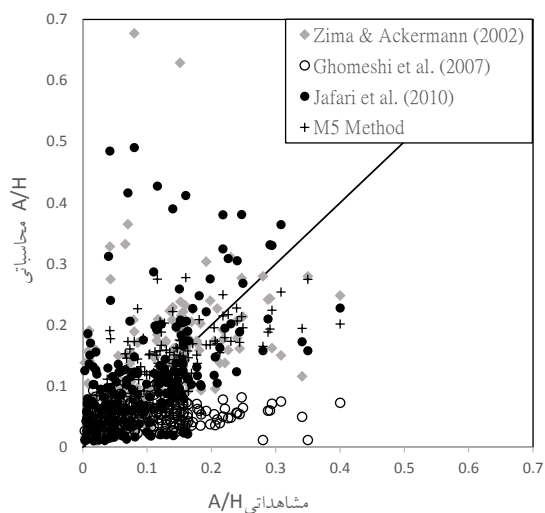
روی جریان داشته و این پارامتر تنها در آرایش زیگزاگی جهت ساخت مدل به کار رفته است. در آرایش زیگزاگی تراکم پایه‌ها به شدت بر روی مکانیزم جریان تاثیر گذاشته و افزایش تراکم پایه‌ها باعث افزایش حداکثر دامنه نسبی امواج گشته است. جهت بررسی معادلات ارائه شده توسط مدل درختی در دو مرحله آموزش و صحت سنجی از شکل ۳ استفاده شده است. بر اساس این شکل نتایج حاصل از مدل M5 در هر دو مرحله ساخت و صحت سنجی مطابقت خوبی با مقادیر مشاهداتی دارد. نحوه قرارگیری نتایج حاصل از این مدل در اطراف خط ۴۵ درجه نشان دهنده عملکرد مناسب مدل در مرحله آموزش و عدم بیش برآزش<sup>۱</sup> آن می‌باشد که این امر در هر دو چیدمان موازی و زیگزاگی مشاهده می‌شود.

یکی از دلایل بیشتر بودن معادلات آرایش زیگزاگی نسبت به آرایش موازی را می‌توان پیچیده‌تر بودن مکانیزم جریان در این حالت دانست که می‌تواند بر روی شرایط موج ایجاد شده تاثیرگذار باشد. در هر دو حالت آرایش موازی و زیگزاگی عدد فرود و نسبت فاصله طولی موانع به قطر استوانه (P/D) به عنوان متغیرهای جدا کننده شاخه‌ها مورد استفاده قرار گرفته که نشان‌دهنده اهمیت این دو پارامتر بر روی دامنه نسبی امواج در هر دو آرایش می‌باشد. علاوه بر عدد فرود و P/D، در آرایش موازی عدد رینولدز نیز جهت ایجاد شاخه در مدل درختی به کار رفته است در حالیکه در آرایش زیگزاگی این پارامتر در ساخت مدل مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر را می‌توان در مکانیزم جریان در حالت موازی جستجو کرد. در این حالت چیدمان موانع مانع از تلاطم شدید جریان شده و جریان حالت ورقه‌ای خود را تا حدی حفظ می‌کند، این در حالی است که در آرایش زیگزاگی، چیدمان موانع باعث تلاطم جریان و کاهش تاثیر عدد رینولدز می‌گردد. از دیگر تفاوت‌های مدل‌های درختی ارائه شده در دو آرایش پایه‌ها، وجود تراکم پایه‌ها (N) به عنوان معیار تقسیم کننده در آرایش زیگزاگی است. در آرایش موازی، نحوه چیدمان پایه‌ها مانع از تغییر شدید شکل جریان شده و جریان حالت خود را در میان پایه‌ها حفظ می‌کند، به همین دلیل در آرایش موازی میزان تراکم پایه‌ها تاثیر کمی بر

<sup>1</sup> Overfitting



شکل (۳): مقایسه نتایج حاصل از مدل درختی در دو آرایش موازی و زیگزاگی با مقادیر مشاهداتی



شکل (۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل درختی و معادلات سایر محققین با مقادیر مشاهداتی

جهت بررسی دقیق‌تر کارایی مدل درختی از معادلات ارائه شده توسط سایر محققین از قبیل Zima & Ackermann (2002)، Ghomeshi et al. (2007) و Jafari et al. (2010) استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌های مختلف در مقابل مقادیر مشاهداتی در شکل ۴ ارائه شده است. براساس شکل ۴ نتایج حاصل از معادله Ghomeshi et al. (2007) معمولاً مقادیر دامنه نسبی امواج را کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده است. علاوه بر این نتایج Zima & Ackermann (2002) و Jafari et al. (2010) پراکندگی بیشتری نسبت به خط ۴۵ درجه در مقایسه با نتایج مدل درختی دارند.

جهت مقایسه بهتر کارایی مدل ارائه شده در مقایسه با معادلات سایر محققین از تحلیل‌های آماری خطای متوسط مطلق<sup>۱</sup> (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) استفاده گردید.

<sup>۱</sup> Mean-absolute error

<sup>۲</sup> Root mean square error

علاوه بر معیارهای ذکر شده در این تحقیق از نسبت اختلاف<sup>۱</sup> (DR) نیز استفاده گردید.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{A}{H}^{\text{measured}} - \frac{A}{H}^{\text{computed}} \right| \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{A}{H}^{\text{measured}} - \frac{A}{H}^{\text{computed}} \right)^2} \quad (12)$$

$$DR = \log \frac{A/H^{\text{computed}}}{A/H^{\text{measured}}} \quad (13)$$

چنانچه DR برابر صفر باشد نشان‌دهنده تطابق کامل نتایج مدل و مقادیر واقعی است و چنانچه  $DR > 0$  باشد مدل دامنه نسبی امواج را بیشتر از مقدار واقعی<sup>۲</sup> برآورد کرده است، در غیر اینصورت  $(DR < 0)$ ، دامنه نسبی امواج کمتر از مقدار واقعی<sup>۳</sup> محاسبه شده است. (Seo & Cheong (1998) درصد مقادیر با  $-0.3 < DR < 0.3$  را به‌عنوان دقت مدل<sup>۴</sup> انتخاب کردند که در این تحقیق نیز از این معیار به‌عنوان دقت هر مدل استفاده گردید. نتایج مربوط به تحلیل آماری روش‌های مختلف برآورد دامنه نسبی امواج در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین هیستوگرام فراوانی نسبت اختلاف (DR) برای تمامی روش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Discrepancy Ratio

<sup>2</sup> Overestimation

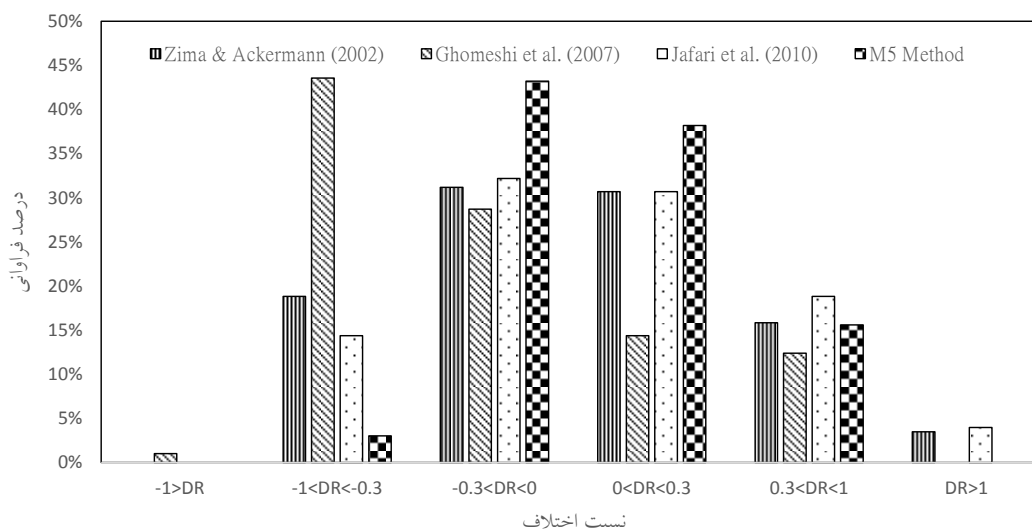
<sup>3</sup> Underestimation

<sup>4</sup> Accuracy



جدول (۱): مقایسه کارایی مدل‌های مختلف در برآورد حداکثر دامنه نسبی امواج

MEAN	RMSE	دقت	DR>0.3	0<DR<0.3	-0.3<DR<0	DR<-0.3	مدل
۰/۳۲	۰/۴۳	۶۲%	۱۹%	۳۱%	۳۱%	۱۹%	Zima & Ackermann (2002)
۰/۳۹	۰/۴۶	۴۳%	۱۲%	۱۴%	۲۹%	۴۵%	Ghomeshi et al. (2007)
۰/۳۳	۰/۴۴	۶۳%	۲۳%	۳۱%	۳۲%	۱۴%	Jafari et al. (2010)
۰/۱۷	۰/۲۳	۸۱%	۱۶%	۳۸%	۴۳%	۳%	M5



شکل (۵): مقایسه مقادیر نسبت اختلاف روش‌های مختلف

RMSE برابر ۰/۲۳ بوده که در مقایسه با سایر معادلات متداول به میزان ۴۶ تا ۵۰ درصد کاهش داشته است. میزان کاهش مقدار MEAN در مدل درختی نیز بین ۴۶ تا ۶۹ درصد بوده است که نشان‌دهنده دقت نسبتاً معنی‌دار نتایج حاصل از مدل M5 در مقایسه با معادلات موجود است. علاوه بر این در مورد معیار دقت تعریف شده نیز این مدل به میزان ۱۸ تا ۳۸ درصد دقت بیشتری نسبت به معادلات سایر محققین دارد. نکته حائز اهمیت در شکل ۵ مربوط به مدل درختی بوده که هیچکدام از نتایج این مدل دارای  $DR < -1$  و یا  $DR > 1$  نمی‌باشد، در حالیکه در مورد سایر معادلات موجود حداقل یکی از حالت‌های فوق مشاهده می‌شود. بررسی نسبت اختلاف در نتایج مدل درختی نیز نشان می‌دهد که این پارامتر در بازه ۰/۵۲ تا ۰/۶۶ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل است.

با توجه به تحلیل‌های آماری صورت در جدول ۱ مقادیر خطای متوسط مطلق و جذر میانگین مربعات خطای روش‌های ارائه شده توسط محققین مختلف نزدیک به هم بوده ولی با توجه به معیار دقت تعریف شده توسط Seo & Cheong (1998)، معادلات ارائه شده توسط Zima & Ackermann (2002) و Jafari et al. (2010) از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. معادله Ghomeshi et al. (2007) با توجه به جدول ۱ و شکل ۵ بیشترین کم برآورد<sup>۱</sup> را میان روش‌های مختلف دارا می‌باشد. در این روش در ۷۲٪ از داده‌های مورد استفاده، مقدار دامنه نسبی امواج کمتر از مقدار واقعی برآورد شده که این مقدار در مورد بقیه معادلات ارائه شده حدود ۵۰ درصد می‌باشد. در مدل درختی مقدار

<sup>1</sup> Lower estimate

## نتیجه گیری

نشان دهنده دقت بالای این مدل در برآورد حداکثر دامنه نسبی امواج می باشد. در میان معادلات موجود نیز مقادیر خطا نزدیک به هم بوده ولی معادله قمشی و همکاران بیش از سایر معادلات مقدار دامنه نسبی امواج را کمتر از مقدار واقعی برآورد می کند. از لحاظ معیار دقت نیز نتایج مدل درختی در ۸۱ درصد از داده ها بین ۰/۵ تا دو برابر مقادیر واقعی قرار گرفته در حالیکه در مورد معادلات سایر محققین این نسبت بین ۴۳ تا ۶۳ درصد می باشد. موارد بالا نشان می دهد که مدل درختی M5 با توجه به ساختار ساده و قابل فهم و نیز ارائه معادلاتی جهت تخمین دامنه نسبی امواج می تواند جایگزین مناسبی جهت معادلات متداول موجود باشد.

حداکثر دامنه نسبی امواج عمود بر جهت جریان تحت تاثیر پارامترهای متعددی بوده که در معادلات ارائه شده توسط محققین مختلف تعدادی از پارامترها حذف شده است. در این تحقیق با استفاده از مدل درختی و در نظر گرفتن کلیه پارامترهای موثر بر این پدیده، معادلاتی جهت برآورد دامنه نسبی امواج در دو آرایش موازی و زیگزاگی ارائه شده است. جهت هر دو آرایش، عدد فرود و نسبت فاصله طولی موانع به قطر مانع به عنوان پارامترهای مشترک جهت ایجاد شاخه ها در مدل های درختی مورد استفاده قرار گرفتند. در تحلیل آماری صورت گرفته نیز مشخص شد که جذر میانگین مربعات خطا در مدل درختی نسبت به سایر معادلات موجود حدود ۵۰ درصد کاهش داشته که

## منابع

- پورمحمدی، م. ح.، م. قمشی و ح. موسوی. ۱۳۹۴. تاثیر موانع منشوری شکل بر روی خصوصیات امواج عرضی در جریان کانال های باز. فصلنامه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۲، ص ۱۱۷-۱۲۸.
- جعفری، ا.، م. قمشی، م. بینا و م. کاشفی پور. ۱۳۹۰. معادله ای جدید جهت بدست آوردن عدد استروهل موج ناشی از عبور آب از موانع استوانه ای. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۴، شماره ۱، ص ۵۸-۴۹.
- ظهیری، ج. ۱۳۹۴. کاربرد مدل های ناپارامتریک CART و M5 در محاسبه عمق آبشستگی اطراف پایه های پل. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. شماره ۲۰، ص ۳۵-۵۰.
- Azizi, R. and M. Ghomeshi. 2010. Computing Strouhal Number in transverse wave generation by vortex shedding in open channels. Proceedings of IAHR-APD Congress, University of Auckland, New Zealand.
- Barrero Gil, A., S. Pindado and S. Avila. 2012. Extracting energy from Vortex-Induced Vibrations: A parametric study. Journal of Applied Mathematics Modelling. 36(7): 3153-3160.
- Chung, M. H. 2015. Hydrodynamics of flow over a transversely oscillating circular cylinder beneath a free surface. Journal of Fluids and Structure. 54:27-73.
- Dean, G. D. and R. A. Dalrymple. 1984. Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific Publishing Company, Singapore.
- Etemad-Shahidi, A. and M. Taghipour. 2012. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams using M5' model tree. Journal of Hydraulic Engineering. 138(6): 542-554.
- Ghomeshi, M., S. A. Mortazavi Dorcheh and R. Falconer. 2007. Wave formation by vortex shedding in open channel. Journal of Applied Science. 7(24): 3927-3934.
- Jafari, A., M. Ghomeshi, M. Bina and S. M. Kashefipour. 2010. Experimental study on ten modes of transverse waves due to vertical cylinders in open channels. Journal of Food, Agriculture & Environment. 8(2): 949-955.
- Prasanth, T. K. and S. Mitta. 2009. Vortex-induced vibration of two circular cylinders at low Reynolds number. Journal of Fluids and Structure. 25(4): 731-741.
- Quinlan, J. R. 1992. Learning with continuous classes. Proceedings of AI'92, World Scientific.

- Sahu, A. K., R. P. Chhabra and V. Eswaran. 2009. Two-dimensional unsteady laminar flow of a power law fluid across a square cylinder. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 160(2): 157-167.
- Seo, I. W. and T. S. Cheong. 1998. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124(1), 25-32.
- Wang, Y. and I. H. Witten. 1997. Induction of model trees for predicting continuous classes. *Proceedings of the European Conference on Machine Learning*, University of Economics, Faculty of Informatics and Statistics, Prague.
- Zima, L. and N. L. Ackermann. 2002. Wave generation in open channels by vortex shedding from channel obstructions. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(6): 596-603.

## Developing Formula based on M5 Tree Algorithm to Evaluate Maximum Relative Amplitude of Transverse Waves

Javad Zahiri<sup>\*1</sup>, Ahmad Jafary<sup>2</sup>

### Abstract

Vortex vibrations in structures has been considered in some of engineering problems such as vibration at exchanger tubes and bridge and hydraulic structures designing. Accordingly, evaluation the maximum relative amplitude of transverse waves developed by obstacle, attracts a lot of attention. Reynolds number, Froude number, wave mode, ratio of longitudinal and transverse distances of obstacles to cylinder diameter and arrangement of cylinders used as input variables to M5 model. Ratio of wave amplitude to flow depth considered as an output variable. After training tree model, two different structures proposed for inline and staggered arrangement. There are four and five equations for inline and staggered arrangements proposed by tree model, respectively. In this study, Reynolds number that ignored in existing formula, used as a division variable at inline arrangement and performed important role in proposed equations. Root mean square error in tree model was 0.23 which in compare with other models, has been reduced 46 to 50 percent. In addition, accuracy of tree model estimated 81 percent which about 18 to 38 percent more than other equations. Discrepancy ratio of tree model oscillates between 0.52 and 0.66 which shows the performance of this model in wave maximum relative amplitude estimation.

**Keywords:** Inline and staggered arrangement, Vortex, Tree model, Oscillating force.

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering, Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Water Engineering, Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University, [jafary\\_ahmad@yahoo.com](mailto:jafary_ahmad@yahoo.com)

\* Corresponding author: [j.zahiri@ramin.ac.ir](mailto:j.zahiri@ramin.ac.ir), Tel: +98 916 653 1896