



تعیین ضرایب هیدرودینامیکی استوانه به روش تجربی در کانال آب تحت اثر امواج منظم

امین گنجی ارجنکی^۱، احمدرضا زمانی^۲، محسن ثقفیان^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ a.ganji@cc.iut.ac.ir

^۲هیئت علمی پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ arzamani@cc.iut.ac.ir

^۳هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ saghafian@cc.iut.ac.ir

چکیده

تحلیل جریان حول یک استوانه در حال نوسان و یا استوانه ساکن در جریان نوسانی، اهمیت زیادی در بسیاری از زمینه‌های طراحی و ساخت سازه‌های دریایی از جمله رایزرها دارد. در صنعت نفت و گاز فراساحل، رایزرها دریایی به عنوان یکی از المانهای مهم برای حفاری، تولید و انتقال مواد از سر چاه به سکوها دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این المانهای مهم تحت نیروهای پربودیک ناشی از موج و جریان‌های دریایی می‌باشند.

در این مقاله ضرایب درگ و اینرسی استوانه ساکن تحت تاثیر امواج منظم از طریق آزمون‌های تجربی محاسبه می‌شود. آزمون‌های انجام شده در حوضچه کشش پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان به انجام رسیده است. پس از تهیه مدل، سیستم اندازه‌گیری بر روی مدل قرار داده شده و سیستم اندازه‌گیری به یک ترولی واقع بر روی کانال آب ثابت می‌گردد. تولید امواج منظم توسط دستگاه موج ساز واقع بر روی حوضچه صورت می‌گیرد. امواج تولید شده نیرویی به استوانه وارد می‌کند که بوسیله دستگاه اندازه‌گیری با یک فرکانس نمونه برداری مشخص ثبت می‌شود. با استفاده از روابط موريسون و از طریق تعیین ضرایب فوریه، ضرایب درگ و اینرسی برای استوانه مورد نظر محاسبه می‌گردد. نتایج حاصله بر اساس عدد بدون بعد کولگان- کارپنتر بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد کولگان- کارپنتر ضریب درگ و ضریب اینرسی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ضرایب هیدرودینامیکی، امواج منظم، معادله موريسون، موج ساز، حوضچه کشش

مقدمه

در تحلیل هیدرودینامیکی سازه‌های دریایی اثر یک موج سطحی به صورت نیروهای نوسانی وارد بر المانهای مختلف سازه ظاهر می‌شود. در این مقاله جریان نوسانی کامل بدون حضور جریان یکنوخت مورد نظر است. این حالت معمولاً به دو صورت، جریان با نوسان سینوسی حول استوانه ساکن و یا استوانه نوسانی در جریان ساکن مورد توجه قرار می‌گیرد. اعداد بی‌بعد رینولدز $Re = U_m D / \nu$ و کولگان- کارپنتر $KC = U_m T / D = U_m / fD$ به عنوان اعداد مشخصه جریان مطرح هستند.

در این روابط U_m سرعت ماکزیمم، D قطر استوانه، ν لزجت سینماتیکی، f فرکانس و T پریود نوسان هستند. نیروهای وارد بر استوانه (F_x, F_y) توسط $1/2 \rho U_m^2$ بدون بعد می‌شوند. نیروی طولی F_x جمع نیروی درگ و نیروی مجازی (اینرسی) است که توسط موريسون و همکاران [۱] به شکل زیر ارائه شده است:

$$F_x = 1/2 \rho D C_D U |U| + 1/4 \pi \rho D^2 C_M \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

در این معادله ρ دانسیته یا چگالی، D قطر استوانه، U سرعت لحظه ای سیال یا استوانه $(U = -U_m \cos(\omega t))$ ، $\omega = \frac{2\pi}{T}$ فرکانس زاویه‌ای نوسان و t زمان است. C_M و C_D ضرایب درگ و اینرسی هستند که با بکارگیری روش مینیمم مربعات یا میانگیری فوریه با فرض ثابت بودن در طی یک سیکل با داشتن F_x واقعی بدست می‌آیند. در واقع معادله موريسون با این فرض که مقدار نیرو متناسب با سرعت و شتاب ذرات سیال است به دست آمده و این معادله به شرط تعیین C_M و C_D یک حل تقریبی از یک مسئله پیچیده است که صحت آن باید توسط آزمایش یا محاسبات تأیید شود.

برای تعیین C_M و C_D مطالعات نظری استوکس [۲] و سپس ونگ [۳] قابل اشاره است که با فرض جریان چسبیده (attached) و برای اعداد KC کوچک و اعداد Re بزرگ معتبر می‌باشد. به علاوه این جریان توسط محققینی همچون کولگان و کارپنتر [۴]، هونجی [۵] که سه بعدی

شدن جریان را با افزایش KC نشان داد ، اوباساجو و همکاران [۶] ، تانسونو، بی یرمن [۷] و سارپکایا [۸] مورد مطالعه قرار گرفته و برخی پدیده‌های پیچیده پیرامون آن و گوناگونی جریان ایجاد شده تشریح شده است .

در مورد کارهای تجربی در سال ۱۹۹۱ تروش و همکارش ضرایب هیدرودینامیکی استوانه مرتعش را در آب ساکن در هر دو حالت عددی و آزمایشگاهی بدست آوردند [۹]. در سال ۲۰۰۴ چاندراسکاران به همراه همکارانش ضرایب درگ و اینرسی پایه کششی مثلثی را طبق معادله موريسون اصلاح شده تحت اثر امواج منظم مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که در امواج با دوره تناوب بیشتر اثرات ضرایب هیدرودینامیکی بیشتر است [۱۰].

در این مقاله ضرایب درگ و اینرسی برای استوانه ساکن در جریان نوسانی و بر اساس امکانات آزمایشگاهی داخل کشور بدست آمده است. با جایگذاری $U = -U_m \cos(\omega t)$ در فرمول (۱) نتیجه می‌شود:

$$F_x = -1/2 \rho DC_D U_m^2 \cos(\omega t) |\cos(\omega t)| + 1/4 \pi \rho D^2 C_M U_m \omega \sin(\omega t)$$

یا به عبارت دیگر:

$$\frac{F_x}{1/2 \rho D U_m^2} = -C_D \cos(\omega t) |\cos(\omega t)| + \frac{\pi^2 D C_M \sin(\omega t)}{U_m} \quad (2)$$

کولگان - کارپنتر نیرو را به صورت تابع زوج هارمونیک به صورت زیر بیان کردند:

$$\frac{F_x}{1/2 \rho D U_m^2} = 2[a_1 \sin \theta + a_3 \sin 3\theta + a_5 \sin 5\theta + \dots + b_1 \cos \theta + b_3 \cos 3\theta + b_5 \cos 5\theta + \dots] \quad (3)$$

در معادله (۳) U_m ماکزیمم سرعت و $\theta = \omega t$ است. با برابر قرار دادن دو رابطه (۲) و (۳) به شرطی که C_D و C_M وابسته به ωt نباشد، ضرایب درگ و اینرسی ضرایب سری فوریه خواهند بود و در نهایت نتیجه به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$C_D = -\frac{3}{4 \rho D U_m^2} \int_0^T F_x \cos(\theta) d\theta$$

$$C_M = \frac{1}{\rho \frac{\pi^2 D^2}{4} \left(\frac{dU}{dt}\right)_{\max}} \int_0^T F_x \sin(\theta) d\theta \quad (4)$$

سرعت ماکزیمم $U_{x_{\max}}$ و شتاب ماکزیمم $a_{x_{\max}} = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{\max}$ با توجه به روابط تئوری خطی امواج از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$U_x = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(K(z+h))}{\sinh(Kh)} \sin(Kx - \omega t) \quad (5)$$

که u سرعت در راستای x ، $K = \frac{2\pi}{L}$ عدد موج، L طول موج، H ارتفاع موج و h عمق آب می‌باشد. همچنین $a_{\max} = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{\max}$ ماکزیمم شتاب است که با توجه به تئوری خطی امواج از روی رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$a_x = \frac{du}{dt} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh(K(z+h))}{\sinh(Kh)} \sin(Kx - \omega t) \quad (6)$$

در روابط بالا z بیانگر فاصله تا سطح آب است.

تعیین محدوده عمق آب

محدوده عمق آب به سه دسته آبهای کم عمق، آبهای با عمق متوسط و آبهای عمیق به صورت زیر تقسیم می‌شود:

$$\left(\frac{h}{gT^2}\right) < 0.0025 \quad \text{یا} \quad \left(\frac{h}{L}\right) < \frac{1}{20} \quad \text{آبهای کم عمق:}$$

$$0.0025 < \left(\frac{h}{gT^2}\right) < 0.08 \quad \text{یا} \quad \frac{1}{20} < \left(\frac{h}{L}\right) < \frac{1}{2} \quad \text{آبهای عمق متوسط:}$$

آبهای عمیق:

$$\left(\frac{h}{gT^2}\right) > 0.08 \quad \text{یا} \quad \left(\frac{h}{L}\right) > \frac{1}{2}$$

معیار عمیق بودن کانال آب مقدار $\frac{h}{gT^2}$ است. در حوضچه کشش پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا حداکثر ارتفاع موج ۲۰ سانتی متر، میانگین دوره تناوب ۱.۳ ثانیه و عمق آب ۲.۲ متر است.
بنابراین:

$$\frac{h}{gT^2} = \frac{2.2}{9.8(1.3)^2} = 0.133 > 0.08$$

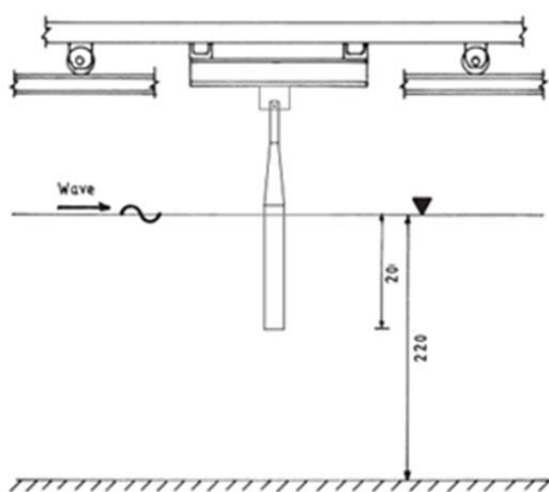
در نتیجه با توجه به ارتفاع موج و دوره تناوب انتخابی، در کانال مورد نظر انجام آزمون آب عمیق امکان پذیر است.
برای آبهای عمیق روابط (۵) و (۶) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$U_x = \left(\frac{\pi H}{T}\right) e^{Kz} \cos \theta \quad (7)$$

$$a_x = \frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{Kz} \sin \theta \quad (8)$$

آزمایشات

مدلی که در این آزمایش استفاده شده است استوانه ای از جنس فولاد به قطر ۵cm و طول ۵۵ cm می‌باشد که قسمت بالایی آن به علت نصب بر روی سیستم اندازه‌گیری به شکل مخروطی ساخته شده است. طول آبخور استوانه ۲۰cm است. در شکل (۱) نمایی از استوانه مورد نظر و در شکل (۲) نمایی از نحوه نصب آن به دینامومتر و ترولی نشان داده شده است.



شکل ۲: نحوه قرار گیری مدل بر روی ترولی

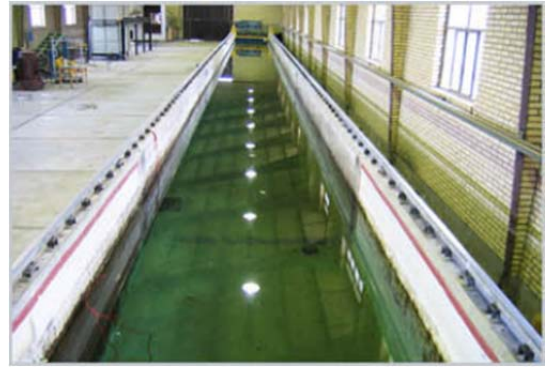


شکل ۱: استوانه مدل

حوضچه کشش مورد استفاده دارای ۱۰۸ متر طول، ۳ متر عرض و ۲/۲ متر عمق می‌باشد.
همچنین موج ساز این پژوهشکده قادر به تولید امواج با ارتفاع حداکثر ۲۰ cm می‌باشد. در شکل‌های (۳) و (۴) و (۵) به ترتیب حوضچه کشش، موج ساز و ترولی این پژوهشکده نشان داده شده است.



شکل ۴: موج ساز



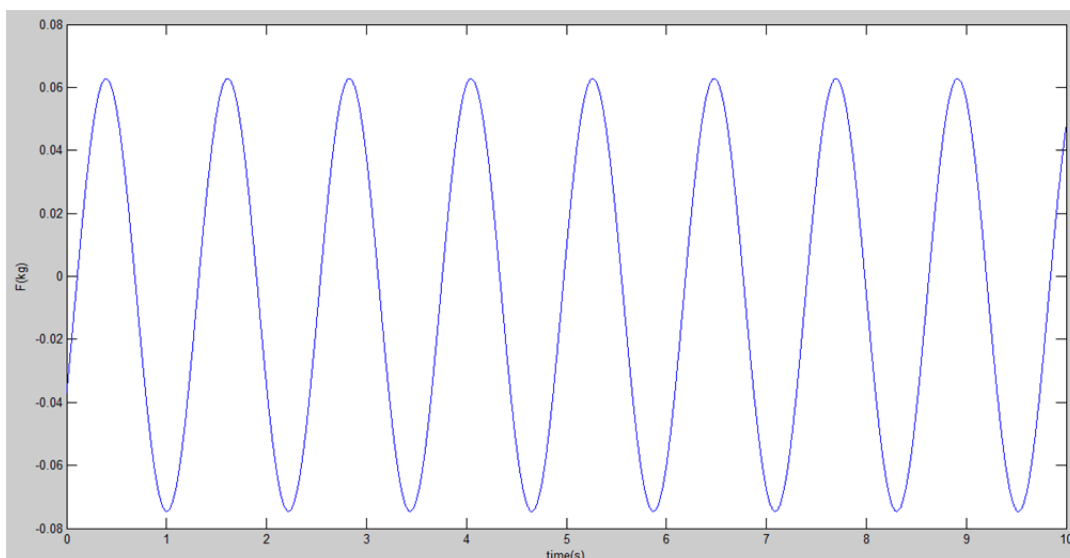
شکل ۳: حوضچه کشش



شکل ۵: ترولی

جهت انجام آزمایشات ابتدا مدل به سیستم دینامومتر نصب شده و سپس این مجموعه به ترولی وصل می‌شود. پس از نصب کامل مدل به ترولی دستگاه موج ساز روشن می‌شود. موج ساز امواج منظمی تولید می‌کند که توسط سیستم جمع آوری اطلاعات (نصب شده به ترولی) نیروهای وارد بر استوانه ثبت می‌شود.

سیستم جمع آوری اطلاعات داده‌ها را با نرخ نمونه ۰/۰۲ ثانیه ثبت می‌کند. داده‌های ثبت شامل نیروی وارد بر استوانه در جهات جریان است. در شکل (۶) نمونه‌ای از منحنی نیروی ثبت شده در فرکانس موجی ۰/۸ هرتز نشان داده شده است.



شکل ۶: نمونه‌ای از نیروی وارد بر استوانه در فرکانس موجی ۰/۸ هرتز

با استفاده از رابطه (۲) ضرایب C_D و C_M بدست می‌آید. آزمایشات برای پنج فرکانس (۰/۹-۰/۸۵-۰/۸-۰/۷۵-۰/۶۵) صورت گرفته است. در جدول (۱) مقادیر ارتفاع موج، دوره تناوب، طول موج، حداکثر سرعت و حداکثر شتاب محاسبه شده است.

جدول ۱: پارامترهای آزمون

ردیف	فرکانس (Hz)	ارتفاع موج (cm)	دوره تناوب (S)	طول موج (m)	حد اکثر سرعت (m/s)	حداکثر شتاب (m/s^2)
۱	۰/۶۵	۶/۵	۱/۵۴	۳/۵	۰/۱۵۸	۰/۶۴۷
۲	۰/۷۵	۹	۱/۳۳	۲/۷۵	۰/۲۶۷	۱/۲۶۱
۳	۰/۸	۱۰	۱/۲۵	۲/۵	۰/۳۲۲	۱/۶۲۱
۴	۰/۸۵	۱۱	۱/۱۸	۲/۱	۰/۳۹۵	۲/۱۰۵
۵	۰/۹	۱۲	۱/۱۱	۱/۹	۰/۴۷۲	۲/۶۷۵

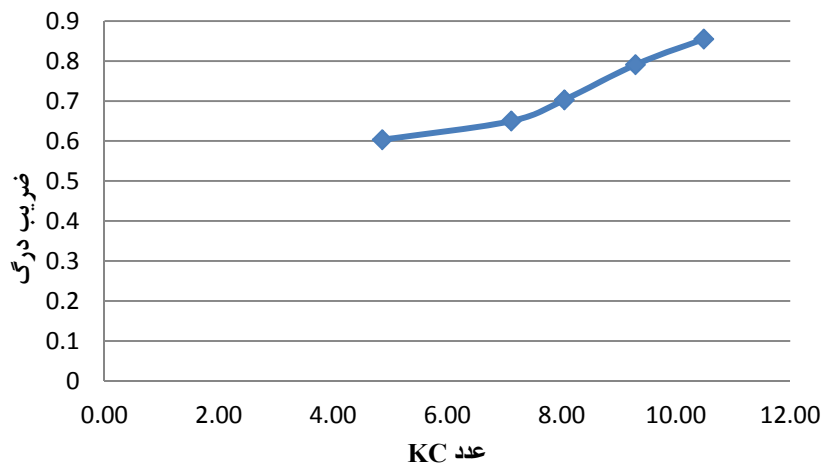
نتایج آزمون

در جدول (۲) ضریب درگ و اینرسی بر حسب KC مختلف بیان شده است.

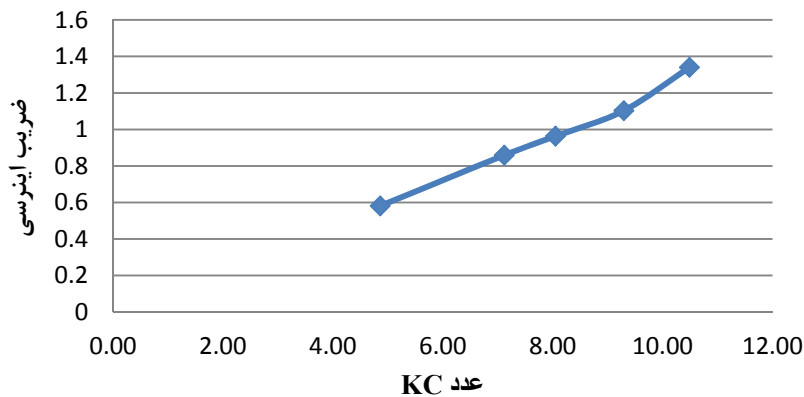
جدول ۲: ضرایب درگ و اینرسی برای KC مختلف

ردیف	KC	C_D	C_M
۱	۴/۸۶	۰/۶۰۳	۰/۵۸۱
۲	۷/۱۲	۰/۶۵	۰/۸۵۹
۳	۸/۰۵	۰/۷۰۳	۰/۹۶۳
۴	۹/۲۹	۰/۷۹۱	۱/۱۰۳
۵	۱۰/۴۹	۰/۸۵۵	۱/۳۴

در شکل (۷) ضریب درگ بر حسب عدد کولگان - کارپنتر و در شکل (۸) ضریب اینرسی بر حسب عدد کولگان - کارپنتر رسم شده است.



شکل ۷: ضریب درگ بر حسب عدد KC



شکل ۸: ضریب اینرسی بر حسب عدد KC

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در سایر مراجع آزمایشات در محدوده عدد کولگان- کارپنتر KC خیلی کم (بین ۱ تا ۰/۱) انجام گرفته است اما در این آزمایش محدوده عدد کولگان- کارپنتر KC بین ۴/۸ تا ۱۰/۵ می باشد لذا این دو محدوده با یکدیگر قابل مقایسه نمی باشند. از آزمایشات انجام شده نتیجه می شود که با افزایش عدد کولگان- کارپنتر ضریب درگ و ضریب اینرسی افزایش می یابد. همچنین همانطور که در نمودارها دیده می شود نرخ تغییرات ضریب درگ کمتر از نرخ تغییر ضریب اینرسی می باشد.

مراجع

- [1] Sarpkaya, T., and Isaacson, M., Mechanics of wave forces on offshore structures-Van Nostrand Reinhold Company. 1949.
- [2] Stokes, G. G., "Fundamental the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums," Trans. Ccamb. Phil. Soc, 1851.
- [3] Wang, C. Y., "On high-frequency oscillating viscous flows," J. Fluid Mech, Vol. 32, pp. 55-68, 1968.
- [4] Kulegan, G. H. and Carpenter, L. H., "Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid," J. Res. Nat. Bur. Standards, Vol. 60, pp 423-440, 1958.
- [5] Honji, H., "Streaked flow around an oscillating circular cylinder," J. Fluid Mech, Vol. 107, pp 509-520, 1981.
- [6] Obasaju, E. D., Bearman, P. W. and Graham, M. R. "A study of forces, circulation and vortex patterns around a circular cylinder in oscillating flow," J. Fluid Mech, Vol. 196, pp 467-494, 1988.
- [7] Tatsuno, M. and Bearman, P. W., "A visual study of the flow around an oscillating circular cylinder at low Keulegan-Carpenter numbers and low stokes numbers," J Fluid Mech, Vol. 211, pp 157-182, 1990.
- [8] Sarpkaya, T., "Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers," J Fluid Mech, Vol. 165, pp 61-71, 1986.
- [9] Troesch, A. and Kim, P., "Hydrodynamic forces acting on cylinder oscillating at small amplitudes," Jornal of fluid and structures, Vol. 5, pp 113-126, 1991.
- [10] Chandrasekaran, S., Jain, A and Chandak, N.R., "Influence of hydrodynamic coefficients in the response behavior of triangular TLPs in regular waves," Ocean Engineering, Vol. 31, pp 2319-2342, 2004.