

مدلسازی فرایند یک روش نوین پیشنهادی ساده به منظور کسب انرژی از امواج دریا

ناصر ثقه الاسلامی*، حمیدرضا کرباسیان

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: slami@um.ac.ir

چکیده

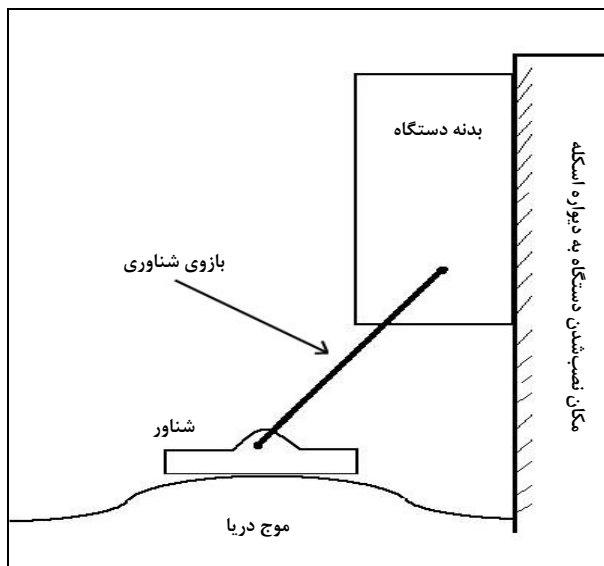
امروزه به علت محدودیت‌هایی در تولید و مصرف انرژی بشر به سوی استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی کشانده شده است. یکی از این منابع مهم انرژی، امواج دریاست که محققین را به خود جلب نموده است. یکی از این روش‌های کسب انرژی، استفاده از دستگاه‌هایی است که بر روی آب شناور می‌باشند و با حرکت امواج مقداری از انرژی آنها را جذب کرده و به انرژی جنبشی تبدیل کرده و این نوع انرژی را توسط ژنراتور های خطی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در این تحقیق، این نوع مکانیزم را با یک مکانیزم پیشنهادی توسط محققین حاضر مورد بررسی قرار داده‌ایم. این روش پیشنهادی شامل مکانیزم ساده‌ای است که در آن مسیر حرکت شناور یک مسیر دایره‌ای شکل است و شناور، انرژی جنبشی خود را به صورت گشتاور به مولد انتقال می‌دهد. نتایج این تحقیق معرف آن است که در یک مدت مشخص، مسیر طی شده توسط شناور در مکانیزم پیشنهادی، در مقایسه با مکانیزم مقایسه‌شونده، بیشتر است و این امر منجر به بدست آوردن انرژی جنبشی بیشتری می‌گردد. برای مدل‌سازی این مکانیزم، معادلات حرکت و انرژی این فرایند بدست آورده شده و طبق یک سری از فرضیات و شرایط مرزی حاکم بر فرایند حل گردیده است. نتایج، معرف آن است که روش پیشنهادی نسبت به روش مورد مقایسه می‌تواند از لحاظ نظری حدود ۳۷ درصد انرژی بیشتری را از امواج دریا دریافت نماید و همچنین بازدهی آن تا حدود ۱۷ درصد قابل افزایش است. مزایای دیگر این روش، مکانیزم ساده آن و قطعاتی است که نیاز به فناوری بالایی برای تولید آن نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، امواج دریا، مدلسازی، نیروی شناوری

۱- مقدمه

چشمگیر روبه رشد این صنعت بوده ایم [۱]. آنچه تحقیقات را در این زمینه متمرکز کرده است این است که این صنعت بیشترین تراکم انرژی را در بین انرژی‌های تجدیدپذیر به خود اختصاص داده است [۲]. علاوه بر آن، این انرژی در یک مکان تعیین شده دارای دسترسی بیش از ۹۰ درصد در زمان عملکرد را به خود اختصاص می‌دهد در حالیکه منابع باد و خورشید تنها ۲۰ تا ۳۰ درصد توانایی در دسترس بودن را مختص خود می‌کنند [۳]. محدودیت کار با این صنعت محدود به سرعت‌های پایین امواج می‌باشد که به طور معمول

امروزه برای تولید انرژی‌های بی‌ضرر و تجدید پذیر تحقیقات زیادی انجام شده است. مکانیزم‌های مختلفی وجود دارد که با استفاده از آنها انرژی موجود در طبیعت که شامل انرژی خورشید، باد، امواج دریا و نظایر آن است به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. امکان دریافت انرژی از امواج دریا فکر محققین را برای سال‌ها به خود مشغول نموده است. از آنجایی که بیشتر مفاهیم کلی در مورد امواج دریا محدود به یک قرن اخیر می‌شود، فقط در دو دهه اخیر شاهد



شکل ۱- نمای اجمالی روش پیشنهادی

۲- مدل سازی مکانیزم اول

با توجه به صورت کلی نظری خطی که در آن امواج دریا به صورت امواج سینوسی فرض شده اند، معادله حرکت موج به صورت زیر می باشد [۱۰-۱۳]:

$$y(t) = \frac{H}{2} \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

معادله حرکت یک شناور در جهت محور y که بر روی سطح آب آزادانه مطابق با امواج حرکت می کند با معادله حرکت موج یکسان است. اگر از معادله بالا مشتق بگیریم به رابطه سرعت شناور زیر دست خواهیم یافت:

$$V_y(t) = \frac{H\omega}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

شرایط مرزی حاکم بر معادلات (۱) و (۲) برای حالتی که شناور فقط حرکت رفت و برگشتی در جهت محور y دارد به صورت زیر است:

$$\begin{cases} @ t = 0 \Rightarrow y = 0, V_y = 0 & \text{(I.C.)} \\ @ y = y_{\max} \Rightarrow V_y = 0 & \text{(B.C.1)} \\ @ t = T \Rightarrow y = 0, V_y = 0 & \text{(B.C.2)} \end{cases}$$

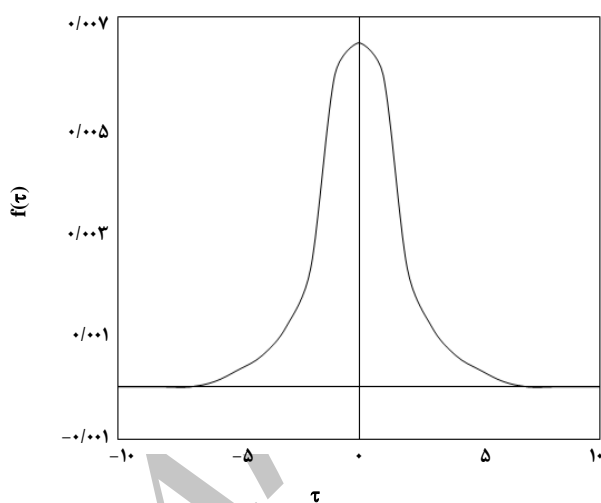
۰/۱ هرتز است [۴] و برای کسب انرژی الکتریکی توسط ژنراتورها این مقدار را باید به حدود ۵۰۰ برابر مقدار اولیه افزایش داد [۵].
 چو و همکاران در سال ۲۰۱۱ به تحقیقاتی در زمینه مدلسازی و کنترل دینامیکی شناورهای نوسانگر از نوع ۷۵ کیلو وات پرداختند که شناور فقط در راستای عمودی نوسان کرد [۶]. همچنین آمون و همکاران در سال ۲۰۱۰ نیز اطلاعاتی آماری از انرژی امواج دریا در مناطق مختلف توسط دستگاه ارائه نمودند که مبنایی برای طراحی بهینه و آزمایش دستگاه های شناور نوسانگر بود [۷]. به طور کلی اولین مساله ای که با آن روبرو هستیم، دانستن شرایطی برای بهینه سازی فرایند است. در گام بعدی ما نیازمند بررسی راه های کلی برای دستیابی به شرایط بهینه هستیم و در گام نهایی طراحی مکانیزم و اجزای آن مطرح می شود تا بتوان عملکرد در شرایط بهینه را فراهم کرد [۸]. از فعالیت های مهم در این زمینه می توان به مکانیزم شناوری مطرح شده در مرجع [۹] اشاره کرد که مکانیزم حرکتی آن به نام مکانیزم اول در این تحقیق نام برده شده و نتایج بر اساس این مکانیزم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به موارد فوق، آنچه در این بخش مورد بررسی قرار خواهد گرفت بررسی راهکارهای مختلف برای کسب هر چه بیشتر انرژی از امواج دریا می باشد. شکل (۱) نمای اجمالی از یک روش پیشنهادی را به نمایش می گذارد که در آن دستگاه بر دیواره یک سکو یا اسکله نصب می شود. این دستگاه شامل شناوری است که در اثر برخورد امواج دریا به آن، به حرکت در می آید و باعث بحرکت در آمدن بازوی شناور می شود. این بازو، گشتاور بوجود آمده را به جعبه دنده منتقل می کند تا فرکانس حرکتی را قبل از انتقال انرژی مکانیکی به ژنراتور افزایش دهد. در این پژوهش به تحلیل عملکرد اینگونه دستگاه ها برای استفاده به منظور کسب انرژی از امواج دریا پرداخته ایم. ابتدا به مدل سازی مکانیزم اول که شناور فقط در جهت محور قائم (محور y) حرکت می کند می پردازیم و معادلات مربوط به فرایند را با توجه به شرایط مرزی حاکم بر آن حل می کنیم. سپس به مدل سازی مکانیزم دوم که در آن به روش پیشنهادی و حرکت شناور در دو جهت محوری (محور y و محور x) استوار است می پردازیم و معادلات مربوط به آنها را با شرایط مرزی منحصر بفرد خود مورد تحلیل قرار می دهیم.

چون هدف ما در اینجا تمرکز بر روی مقدار انرژی جذب شده توسط شناور است، برای کاهش حجم محاسبات، نیروی انعکاس یافته بر شناور را ناچیز در نظر می‌گیریم، با جایگذاری روابط (۱)، (۲) و (۵) در رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$P(t) = f(t) * y(t) V_y(t) \quad (8)$$

۳- مدل‌سازی مکانیزم دوم (مدل پیشنهادی)

معادلات حاکم برای شناور بکار رفته در مکانیزم پیشنهادی با معادلات حالت اول کمی متفاوت می‌باشند. علت این تفاوت، تغییر شرایط مرزی حاکم بر فرایند است. در این مکانیزم، شناور روی مسیر دایره‌ای شکل در حال حرکت است و علاوه بر حرکت در جهت y ، شناور در جهت x نیز حرکت می‌کند. مسیر طی شده در این حالت از جابجایی شناور در حالت اول بیشتر است.



شکل ۲- ضریب نیروی جذب شده بدون بعد بر حسب زمان بی بعد شده برای شناور استوانه‌ای

معادله حرکت و سرعت در جهت محور y ، به ترتیب، همان معادلات روابط (۱) و (۲) می‌باشند و شرایط مرزی آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} @t=0 \Rightarrow y=0, V_y=0, V_x=0 & \text{(I.C.)} \\ @y=y_{\max} \Rightarrow t_1=[(\lambda/2-x)/c], V_y=9, V_x=0 & \text{(B.C.1)} \\ @t=T \Rightarrow y=0, V_y=0, V_x=0 & \text{(B.C.2)} \end{cases}$$

چون با نزدیک شدن موج به شناور، علاوه بر حرکت شناور در جهت

مقدار انرژی بدست آمده توسط حرکت شناور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P(t) = F_{\text{ext}} V_{\text{total}}(t) \quad (3)$$

که در این رابطه V_{total} سرعت حرکت شناور و F_{ext} مقدار نیرویی است که موج در هنگام عبور از شناور، به علت وجود نیروی شناوری، به آن وارد می‌کند. به منظور تحلیل هیدرودینامیکی دستگاه جهت کسب انرژی، به طور کلی مواردی که در مدل‌سازی فرایند اثرگذار است مشخصات هیدرودینامیکی دستگاه است. علاوه بر آن، جنس دستگاه بر روی چگالی شناور و همچنین بر روی مقدار انرژی منعکس شده نیز اثرگذار است. قابل ذکر است که مشخصات ظاهری و جنس دستگاه مربوط به مرحله ساخت و تحلیل مکانیکی آن می‌باشد. نیروی کلی را که موج بر روی شناور اعمال می‌کند می‌توان به صورت زیر نشان داد [۵]:

$$F_{\text{wave}}(t) = F_{\text{ext}}(t) + F_{\text{rad}}(t) \quad (4)$$

که نیروی جذب شده توسط شناور را می‌توان به صورت زیر بدست آورد [۵]:

$$F_{\text{exc}}(t) = f(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cdot y(t - \tau) \cdot d\tau \quad (5)$$

که در آن $f(t)$ ضریب نیروی جذب و $f(t) * y(t)$ حاصلضرب کانولوشن^۱ می‌باشد. این ضریب برای شناور مذکور به صورت بدون بعد در نمودار شکل (۲) نشان داده شده است. این نمودار ضریب نیروی جذب مربوط به یک شناور استوانه‌ای با قطر هیدرودینامیکی ۶۳ cm است که با توجه به نتایج تجربی مرجع [۵] بدست آمده است. در شکل (۲) محورهای عمودی و افقی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f(\tau) = f(t) (D_b / (2g))^{0.5} / S_b \quad (6)$$

$$\tau = (2g / D_b)^{0.5} t \quad (7)$$

1. Convolution

برای محاسبه مقدار انرژی بدست آمده توسط شناور طبق رابطه (۴) سرعت شناور علاوه بر مولفه y شامل مولفه x نیز هست که سرعت در جهت محور x را می‌توان با توجه به سرعت شناور در جهت y و شیب بدست آمده در حرکت بر روی مسیر دایره‌ای بدست آورد. با توجه به معادلات (۱)، (۲) و (۵) در رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$P(t) = f(t) * y(t) \sqrt{V_y(t)^2 + V_x(t)^2} \quad (11)$$

با توجه به اینکه این دستگاه در مقیاس ارائه شده نسبت به دستگاه‌های عظیم با مکانیزم‌های پیچیده، انرژی کمتری تولید می‌کند ولی با بزرگ‌سازی مدل^۱ و تغییرات در اندازه اجزای آن می‌توان انرژی قابل قبولی را از آن دریافت کرد. افزایش مقیاس با در نظر گرفتن مشخصات هیدرودینامیکی امواج تعیین می‌شود. هر چه امواج دارای انرژی زیادتری باشند امکان ساخت دستگاه در مقیاس‌های بزرگتر نیز وجود دارد. ولی نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که محاسبات اقتصادی (تعمیر و نگهداری، حمل و نقل دستگاه و فرسایش)، نقش تعیین‌کننده‌ای در مقیاس اینگونه دستگاه‌ها دارد. البته مسأله مهمی که باید در نظر داشت این است که هزینه تولید و خدمات جانبی این دستگاه در مقایسه با دستگاه‌های دیگر بسیار کمتر است و در کل می‌توان نتیجه گرفت که هزینه کم و تولید انرژی قابل قبول، بهتر از انرژی زیاد با هزینه بالا می‌باشد که این مسأله در صنعت مهم است. یک شناور که فقط در جهت بالا و پایین در حال نوسان است می‌تواند تا سقف حداکثر ۵۰ درصد، انرژی را دریافت کند [۱۶-۱۳]. با این پیاده‌سازی، این مقدار را می‌توان به بیش از ۵۰ درصد رساند. آزمایش‌های سالتر^۲ نشان می‌دهد که می‌توان تا سقف ۸۰ درصد انرژی امواج را دریافت کرد [۱۷].

۴- بحث و بررسی

برای بررسی فرایند و حل مسئله نیاز به داده‌های هیدرودینامیکی می‌باشد که این مقادیر در جدول (۱) نشان داده شده است. مقدار انرژی کلی موج بر حسب واحد عرض به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴]:

$$P = \frac{\rho_{\text{water}} g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (12)$$

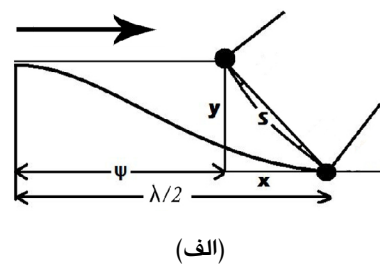
y . حرکت در جهت محور x نیز وجود دارد در این حالت سرعت نسبی موج و شناور نسبت به یکدیگر افزایش می‌یابد و شناور زودتر از مکانیزم اول به قله موج می‌رسد. ولی هنگامیکه فرود شناور از قله به سمت پایین و برگشت به حالت اولیه اتفاق می‌افتد این عمل در مدت بیشتری، در مقایسه با مدت مکانیزم اول، به طول می‌انجامد. در شکل (۳-الف)، با جابجایی موج به اندازه Ψ به سمت شناور، مرحله رفت فرایند اتفاق می‌افتد که زمان لازم برای به وقوع پیوستن آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$t_1 = [(\lambda/2 - x)/c] \quad (9)$$

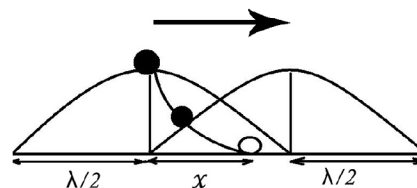
در شکل (۳-ب)، شناور با وجود جابجایی $\lambda/2$ از حالت B.C.1 به حالت اولیه خود (B.C.2) نرسیده است بلکه با جابجایی $\lambda/2 + x$ به حالت اولیه اش باز می‌گردد که در این صورت خواهیم داشت:

$$t_2 = [(\lambda/2 + x)/c] \quad (10)$$

با در نظر گرفتن زمان کلی لازم برای شروع حرکت شناور و بازگشت به حالت اولیه اش می‌توان نشان داد که این زمان برابر T می‌باشد که منجر به بوجود آمدن B.C.2 می‌گردد. با توجه به شرایط مرزی مطرح شده سرعت زاویه‌ای برای B.C.1 و B.C.2 یکسان نبوده و مقدار آن با توجه به زمانهای معین شده در شرایط مرزی مشخص می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۳- (الف) نمایش نزدیک شدن موج به شناور در مکانیزم دوم، (ب) نمایش گذر موج از شناور در مکانیزم دوم

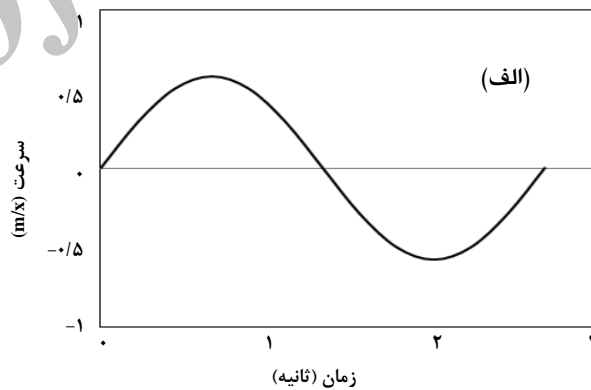
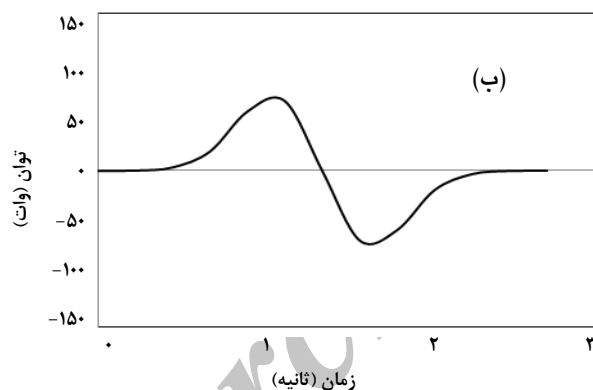
1. Scale-Up
2. Salter

جدول ۱- پارامترهای در نظر گرفته شده برای شناور و امواج

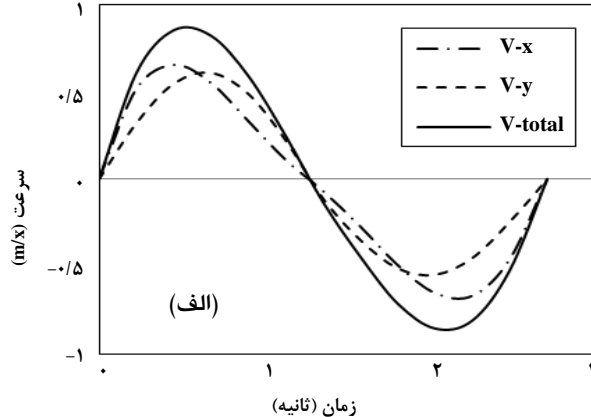
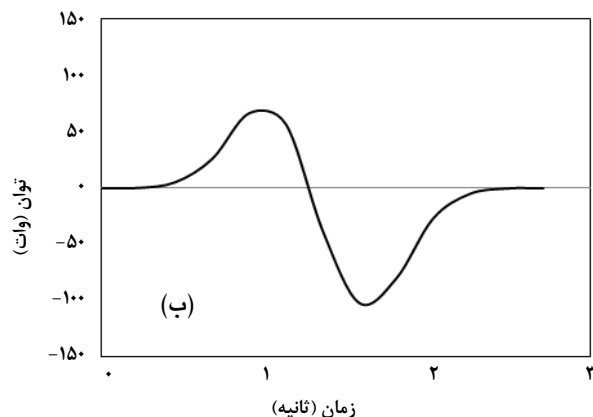
پارامترها	مقادیر
ρ_{water}	$1025 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
ρ_{buoy}	$90 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
D_b	100 cm
T	$(2/7) \text{ sec}$
g	$(9/81) \text{ (m/s}^2\text{)}$
H	50 cm

نشان دهنده سرعت شناور در یک دوره تناوب برای مکانیزم اول است. این سرعت، برآمده از سرعت حرکت موج به سمت شناور می‌باشد. شکل (۴-ب) مقدار انرژی جذب شده توسط شناور یا به عبارتی مقدار انرژی جنبشی شناور را در یک دوره تناوب برای مکانیزم اول نشان می‌دهد. این مقدار با پیشرفت هر چه بیشتر موج به سمت شناور بیشتر شده و در یک لحظه مقدارش به صفر می‌رسد (زمان رسیدن شناور به قله موج) و دوباره افزایش می‌یابد تا اینکه به هنگام رسیدن به سطح مبنا مقدارش دوباره صفر می‌شود. نمودار شکل (۵-الف) و (۵-ب) نیز به ترتیب سرعت شناور و مقدار انرژی جذب شده توسط شناور را در یک دوره تناوب برای مکانیزم دوم نشان می‌دهد. باید توجه داشته باشیم که مقادیر منفی انرژی به علت تغییر جهت در مولفه سرعت است. در نمودار شکل (۶-الف) مقدار سرعت شناور برای هر دو مکانیزم در یک دوره تناوب مورد بررسی قرار گرفته است.

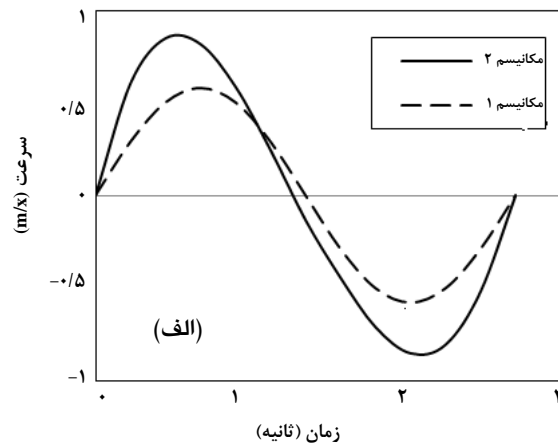
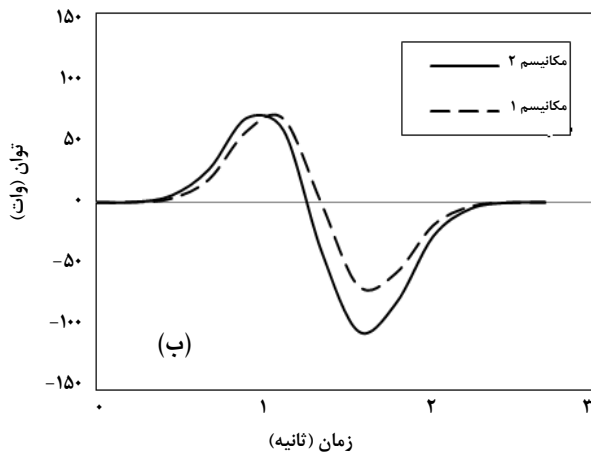
مقدار انرژی برای موج دریا با مشخصات جدول (۱) و با توجه به معادله ۱۲ برابر 662 (w/m) می‌باشد. ضریب جذب موج برای یک شناور که در نمودار شکل (۲) ارائه شده است برای یک حالت بهینه نیست و به همین منظور نتایج بدست آمده نشان دهنده مقدار ماکزیمم انرژی نمی‌باشند و برای بهینه کردن فرایند باید پارامترهای هیدرودینامیکی شناور مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۴-الف)



شکل ۴- (الف) سرعت شناور برای مکانیزم اول، (ب) مقدار انرژی جذب شده توسط شناور برای مکانیزم اول



شکل ۵- (الف) سرعت شناور برای مکانیزم دوم، (ب) مقدار انرژی جذب شده توسط شناور برای مکانیزم دوم



شکل ۶- (الف) سرعت شناور هر دو مکانیزم، (ب) مقدار انرژی جذب شده توسط شناور برای هر دو مکانیزم

هر چه بیشتر انرژی از امواج دریافت. این دستگاه بر دیواره یک سکو یا اسکله نصب می‌شود و شامل شناوری می‌باشد که در اثر برخورد امواج دریا به آن به حرکت در می‌آید و باعث حرکت درآمدن بازوی شناوری شود. این بازو، گشتاور بوجود آمده را به جعبه‌دنده منتقل می‌کند تا فرکانس حرکتی را قبل از انتقال انرژی مکانیکی به ژنراتور افزایش دهد. در این پژوهش به تحلیل عملکرد اینگونه دستگاهها برای استفاده به منظور کسب انرژی از امواج دریا پرداخته شده و با روش معمولی مقایسه شده است. این دستگاه به علت مکانیزم های ساده‌ای که دارد، به راحتی قابل تهیه و هزینه آن در مقایسه با ساخت دیگر مکانیزم ها کمتر است. نصب آن به راحتی صورت می‌پذیرد و امکان اینکه به طور مداوم کنترل شود وجود دارد تا در هنگام بروز مشکل سریعاً اقدامات لازم انجام شود. تعمیرات دستگاه نیز به علت سادگی اجزای آن به راحتی انجام می‌پذیرد. معادلات حرکتی و هیدرودینامیکی شناور و موج به صورت عددی توسط نرم‌افزار مطلب^۱ مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق معرف آن است که روش پیشنهادی نسبت به روش مورد مقایسه می‌تواند از لحاظ نظری ۳۷ درصد انرژی بیشتر را از امواج دریا دریافت کند و بازدهی آن ۱۷ درصد بیشتر است. از مزایای دیگر این روش می‌توان از مکانیزم ساده آن نیز نام برد.

۶- فهرست علائم، واحد و اختصارات

سرعت موج	(c)	[m/s]
ارتفاع موج	(H)	[M]

همانگونه که ملاحظه می‌شود منحنی سرعت برای مکانیزم دوم قبل از زمان $(T/2)$ به صفر می‌رسد. علت آن، حضور مولفه دیگر سرعت می‌باشد که باعث سریع رسیدن شناور به نوک قله موج می‌باشد. این مقایسه بیان می‌کند که در هر صورت مقدار سرعت شناور در مکانیزم دوم افزایش یافته است. نمودار شکل (۶-ب) نیز مقدار انرژی جنبشی شناور را در هر دو مکانیزم نشان می‌دهد. این نمودار، بیانگر آن است که انرژی جنبشی شناور در مکانیزم دوم بیشتر از انرژی جنبشی شناور در مکانیزم اول است. چون اختلاف نیروی اعمال شده در هر دو مکانیزم ناچیز است می‌توان از آن صرف نظر کرد و از طرفی انرژی جنبشی با مجذور سرعت جسم متناسب است، پس می‌توان از این دو پارامتر موثر در مقدار انرژی بدست آمده نتیجه گرفت که این افزایش انرژی به علت این دو پارامتر است. حال با توجه به روش های موجود در حل معادلات و بدست آوردن مقادیر انرژی بر حسب زمان می‌توان مقدار کل انرژی را با گرفتن انتگرال از معادلات (۸) و (۱۱) برای هر دو حالت محاسبه کرد. مقدار کل انرژی برای مکانیزم اول و مکانیزم دوم به ترتیب برابر $(289/9)$ و $(397/4)$ بوده که افزایشی حدود ۳۷ درصد را نشان می‌دهد. یعنی انرژی جنبشی شناور در حالت دوم بیشتر از مقدار آن در حالت اول است که این مقدار می‌تواند با بهینه‌سازی مکانیزم نیز بیشتر شود. همچنین بازدهی‌های مکانیزم‌های اول و دوم به ترتیب، ۴۳ درصد و ۶۰ درصد، می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق ارائه و طراحی راهکاری جدید و ساده برای کسب

- [3] Pelc, R., Fujita, R.M., "Renewable energy from the ocean", *Marine Policy* 26, 471-479, (2002).
- [4] Erikson, M., "Modeling and experimental verification of direct drive wave energy conversion", *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 287, (2007).
- [5] Eidsmoen, H., "Simulation of a tight-moored amplitude limited heaving-buoy wave energy converter with phase control", N-7034 Trondheim, Norway, (1996).
- [6] Cho, B., Yang, D., Park, S., Choi, K., Lee, D., Byun, S., Jung, H., "Modeling and control of a 75 kW class variable liquid-column oscillator for highly efficient wave energy converter", *Ocean Engineering* 38, 436-443, (2011).
- [7] Amon, E., Brekken, T.K.A., Jouanne, A., "A power analysis and data acquisition system for ocean wave energy device testing", *Renewable Energy* 35, 348-354, (2010).
- [8] Newman, J.N., "The interaction of stationary vessels with regular waves", *Proc. 11th Symposium on Naval Hydrodynamics*, London, 491-501, (1976).
- [9] Elwood, D., Yim, S.C., Prudell, J., Stillinger, C., Jouanne, A., Brekken, T., Brown, A., Paasch, R., "Design, construction, and ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off", *Renewable Energy* 35, 348-354, (2010).
- [10] Stoker, J. J., "Water waves: the mathematical theory with applications", *Wiley Classics Library*, N.Y., (1992).
- [11] Billingham, J., King, A.C., "Wave motion", *Cambridge University Press*, N.Y., (2006).
- [12] Dean, R.G., Dalrymple, R.A., "Water wave mechanics for engineers and scientists", *Advanced series on ocean engineering*, Edition 2, *World Scientific*, Singapore, (1991).
- [13] Falnes, J., "Ocean waves and oscillating systems", *Cambridge*, (2002).
- [14] Tucker, M.J., Pitt, E.G., "Waves in ocean engineering", *Elsevier*, New York, (2001).
- [15] Evans, D.V., "A theory for wave-power absorption by oscillating bodies", *Journal of Fluid Mechanics* 77, 1, 1-25, (1976).
- [16] Falnes, J., "Principles for capturing of Energy from ocean waves", *Phase Control and Optimum Oscillations*, <http://www.phys.ntnu.no/instdef/prosjekter/bolgeenergi/index-e.html>.
- [17] Salter, S.H., "Wave power", *Nature* 249, 720-724, (1974).
- [m²] (A) مساحت سطح مقطع شناور
- [m⁻¹] (k) عدد موج
- [m/s] (V_y) سرعت در جهت y
- [m/s] (V_x) سرعت در جهت x
- [w] (P) توان کسب شده
- [N] (F_{ext}) نیروی جذب شده توسط شناور
- [m/s] (V_{total}) سرعت کل شناور
- [N] (F_{rad}) نیروی منعکس شده از شناور
- [kg/s³] (f) ضریب جذب نیرو برای شناور
- [m] (x) جابجایی شناور در جهت x
- [m] (y) جابجایی شناور در جهت y
- [m] (y_{max}) حد اکثر ارتفاع شناور از سطح آب
- [m] (λ) طول موج شناور
- [s] (T) فرکانس موج
- [m] (D_b) قطر هیدرولیکی شناور
- [m] (S) جابجایی کلی شناور
- [N/m] (S_b=ρ_{water}gA) سختی¹ هیدرواستاتیکی شناور
- [m/s²] (g) شتاب گرانش
- [kg/m³] (ρ_{water}) چگالی آب دریا
- [kg/m³] (ρ_{buoy}) چگالی شناور
- [rad/s] (ω) سرعت زاویه ای
- [-] (τ) متغیر بدون بعد زمان

مراجع

- [1] Ozger, M., "Stochastic wave energy calculation formulation", *Renewable Energy* 29, 1747-1756, (2004).
- [2] Clement, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Schild, P., Pontes, M.T., Sjoström, B.O., Sorensen, H. C., Thorpe, T., "Wave energy in Europe: current status and perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 405-431, (2002).

1. Stiffness