



## مطالعه پارامتری توربین موج اقیانوسی (نوع ولز) بر روی بستر نوسانی شناور: آنالیز عددی

سیدحامد فاطمی<sup>1</sup>، علیرضا ریاسی<sup>2\*</sup>، سید احمد نوروبخش<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\*تهران، صندوق پستی 11155-4563، ariasi@ut.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 اردیبهشت 1393

پذیرش: 20 اردیبهشت 1393

ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:

توربین ولز

موج دریا

پدیده استال

حل عددی

امروزه، استفاده از انرژی‌های نو، به‌ویژه انرژی امواج اقیانوس، جایگاه خاصی در دنیا پیدا کرده است. یکی از روش‌های استحصال این انرژی استفاده از توربین‌های محوری با هد پایین است. در این مقاله، عملکرد یک توربین محوری موج اقیانوسی از نوع ولز، که بر روی بستر نوسانی شناور نصب می‌شود، به‌صورت عددی مطالعه و بررسی شده است. طول بستر نوسانی برابر با طول موج اقیانوس بوده که توربین ولز در وسط آن قرار دارد. این طراحی سبب دوبرابر شدن دبی ورودی به توربین و در نتیجه افزایش توان آن می‌شود. در این راستا معادلات حاکم شامل پیوستگی و مومنتوم با در نظر گرفتن مدل توربولانس SST K- $\omega$  در دستگاه مختصات دوار حل شده‌اند. نتایج از طریق استقلال حل از شبکه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی راست‌آزمایی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با کم کردن لقی و رساندن آن به میزان 2% وتر، بازده تا حدود 35% افزایش پیدا می‌کند. همچنین، با تغییر زاویه پره نسبت به نوک آن از صفر تا 12 درجه در نسبت سرعت‌های مختلف، میزان بازده در نقاط خارج از طراحی بهبود پیدا کرده است. استفاده از پره با پروفیل متغیر باعث به‌تعویق افتادن پدیده استال در مقاطع نزدیک هاب می‌شود. در انتها نتایج نشان می‌دهند که استفاده از پره‌های راهنما بین طبقات توربین سبب افزایش راندمان تا حدود 9 درصد شده است.

## Parametric study of ocean wave turbine (Wells type) over the floating oscillating platform: A numerical analysis

Hamed Fatemi<sup>1</sup>, Alireza Riasi<sup>2\*</sup>, Ahmad Nourbakhsh<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, ariasi@ut.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 28 April 2014  
Accepted 10 May 2014  
Available Online 04 October 2014

Keywords:  
Wells Turbine  
Ocean Wave  
Stall  
CFD

## ABSTRACT

Nowadays, using renewable energies, specifically ocean wave energy, is of importance in the world. One of the methods by which this energy can be harnessed is through using axial turbines with low head. In this study, performance of an ocean wave axial turbine of Wells type installed on the floating oscillating platform has been numerically studied. The length of the oscillating platform is equal with the wave length of the ocean and the Wells turbine is installed at the center of oscillation platform. This design causes the inlet flow rate to be doubled which in turn increases the power. In this way, the governing equations include continuity and momentum equations have been solved considering k- $\omega$ SST turbulence model in the rotating frame. The obtained results have been verified through mesh independency analysis and have been validated by comparison with the available experimental data. The results show that with decreasing the clearance by 2% of the chord length, the maximum efficiency, which is approximately 35%, will be gained. Moreover, by varying the blade angles from 0 to 12° at the different flow coefficients, the turbine performance is improved at the off-design points. Also, employing a blade with variable profile will lead to postponing stall phenomena. Moreover, employing multistage turbines with guide vanes at the mid stage can improve efficiency by 9 percent.

تجدیدپذیر، که در سال‌های اخیر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است، انرژی حاصل از موج اقیانوس است. روش‌های متعددی برای استحصال این انرژی در دنیا ابداع شده است، از جمله:  
الف: جاذب نقطه‌ای<sup>1</sup>: این نوع دستگاه بر روی سطح آب شناور بوده و توسط

## 1- مقدمه

بیش از صدها سال است که انسان از سوخت فسیلی به‌منظور استحصال انرژی استفاده می‌کند؛ اما با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی و مسائل زیست‌محیطی، در سال‌های اخیر انرژی‌های دیگر مانند انرژی‌های آبی، بادی، موجی و خورشیدی نیز به‌کار گرفته شده‌اند. یکی از انرژی‌های

1-Point Absorber

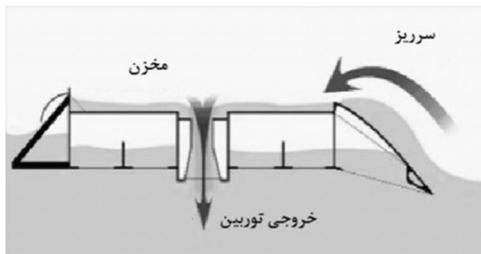
Please cite this article using:

H. Fatemi, A. Riasi, A. Nourbakhsh, Parametric study of ocean wave turbine (Wells type) over the floating oscillating platform: A numerical analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 77-85, 2015 (In Persian)

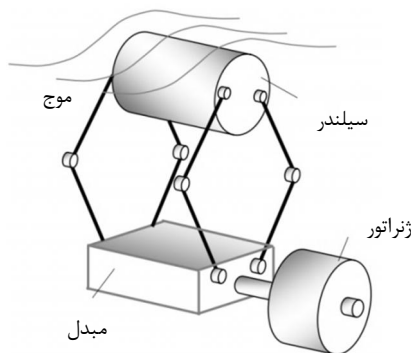
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اختلاف هد تولید بروی توربین سبب چرخش آن می‌شود (شکل 4) [5,1]. ه: سیلندر بریستون: در این روش یک استوانه شناور با موج آب بالا و پایین می‌رود، این سیلندر به میله‌ها لینک است. این میله‌ها از یک سو با سیلندر حرکت رفت و برگشتی کرده و از طرف دیگر به مبدل متصل است. در این مبدل حرکت رفت و برگشتی لینک تبدیل به حرکت دورانی در ژنراتور می‌شود. برای این حالت نیاز به یک ژنراتور دور پایین است. در شکل 5، شماتیکی از این نوع توربین نشان داده شده است [7].

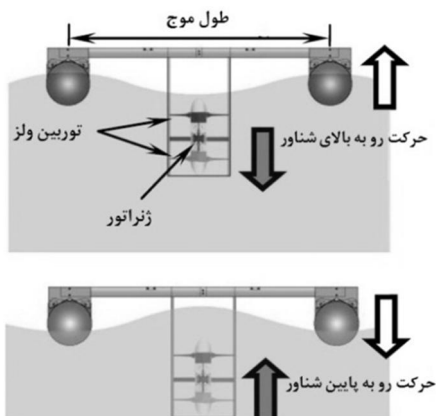
یکی دیگر از روش‌های استحصال انرژی امواج، که در این مقاله بررسی شده است، استفاده از توربین ولز آبی بر روی یک بستر شناور است. در این روش یک توربین ولز با دوچرخ، مطابق شکل 6، بروی یک بستر شناور، که طول بستر معادل یک طول موج است، نصب شده است. نوسانات همزمان بستر و موج در خلاف جهت هم سبب دوبرابر شدن دبی به درون توربین می‌شود که این دبی دوبرابری و چگالی نسبی بالای آب نسبت به هوا باعث افزایش توان خروجی توربین می‌شود. توضیح این نکته لازم است که با توجه به هندسه توربین ولز، که پره‌های آن از هیدروفویل متقارن تشکیل شده است، با تغییر جهت مسیر آب ورودی به آن، جهت دوران تغییر نخواهد کرد.



شکل 4 مبدل انرژی موج از بالا پرشونده [6]



شکل 5 سیلندر بریستون برای استخراج انرژی موج [7]



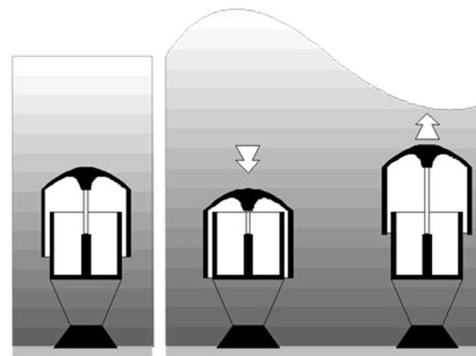
شکل 6 حرکت شناور بر روی موج اقیانوس [9,8]

کابل‌هایی به کف دریا متصل است. به دلیل تغییرات نیروی شناوری ناشی از حرکت موج، شناور به سمت بالا و پایین حرکت کرده که این حرکت باعث پمپ شدن جریان آب بر روی توربین می‌شود که به تبع آن مبدل الکترومکانیکی به حرکت درآمده است (شکل 1) [1].

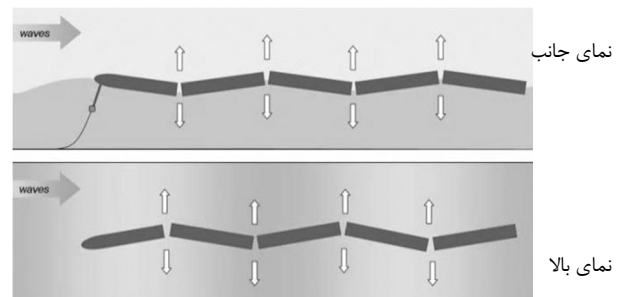
ب: تضعیف‌کننده‌ها<sup>1</sup>: این دستگاه‌های شناور از یک سری قطعات زنجیره‌ای طولانی تشکیل شده‌اند که در امتداد امواج و بروی آن‌ها سوار می‌شوند. حرکت امواج سبب تولید انرژی در پمپ‌های هیدرولیکی و یا سایر مبدل‌های متصل به آن‌ها می‌شوند (شکل 2) [2,1].

ج: نیروگاه‌های ستون نوسانی آب (OWC)<sup>2</sup>: در این واحدها انرژی موج اقیانوس به یک ستون هوا منتقل شده و از این طریق یک توربین باد محوری از نوع ولز به چرخش درمی‌آید. با در نظر گرفتن چگالی پایین هوا نمی‌توان انتظار تولید انرژی زیادی داشت. در شکل 3 نمونه‌ای از این نوع نیروگاه نمایش داده شده است [3,1].

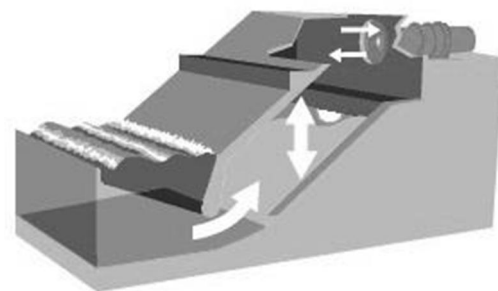
د: توربین‌های اورتاپینگ<sup>3</sup>: در این روش مخزن آب حاوی توربین، که در ارتفاعی بالاتر از سطح اقیانوس نصب شده است، توسط امواج پر شده و



شکل 1 شماژیکی از جاذب نقطه‌ای [1]



شکل 2 دو نما از حالت تضعیف کننده بر روی موج



شکل 3 نمونه‌ای از یک نیروگاه ستون نوسانی آب [4]

- 1-Attenuator
- 2-Oscillating Water Column
- 3-Overtopping

## 2- انرژی موج و توان

تحلیل زیر مشخصات انرژی و توان موجود در یک موج را مشخص می‌کند. شکل 7 متغیرهای مورد استفاده در این بخش را مشخص می‌کند. در این شکل،  $L$  طول موج،  $A$  دامنه موج و  $H$  ارتفاع موج است. حرکت نوسانی موج در طبیعت به صورت غیرخطی بوده و شکل موج لزوماً سینوسی نیست. محققان مختلف سعی کردند که یک مدل غیرخطی برای حرکت موج بیابند، با این حال، این مدل هنوز درگیر تقریب‌های مختلف به منظور به دست آوردن یک راه حل است. به منظور ساده‌سازی ریاضی، اغلب حرکت موج توسط نظریه موج خطی تبیین می‌شود. برای  $H/L < 1/50$  نظریه موج خطی می‌تواند تقریب بسیار خوبی از جنبه‌های مختلف از موج را ارائه کند [10].

حال، با فرض سینوسی بودن موج، معادله موج به صورت رابطه (1) در نظر گرفته می‌شود:

$$y(x, t) = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (1)$$

با توجه به اینکه معادله موج حالت سینوسی دارد، سرعت موج هم به صورت سینوسی در خواهد آمد، برای سادگی کار، در این مقاله از سرعت میانگین موج استفاده شده است. در شکل 8، روند تغییرات سرعت نسبت به زمان و همچنین سرعت میانگین نشان داده شده است [11].

## 3- نحوه عملکرد توربین‌های ولز

توربین ولز از تعدادی پره تشکیل شده است که با زاویه 90 درجه نسبت به محور دوران قرار می‌گیرند (شکل 9). مطابق با مفاهیم استاندارد مربوط به هیدروفویل‌ها، اگر جریانی با زاویه حمله  $\alpha$  (نسبت به لبه حمله) به یک هیدروفویل برخورد کند، موجب ایجاد نیروی برآ (عمود بر جریان نسبی آزاد  $w$ ) و نیروی پسا (هم‌جهت با آن) می‌شود. ترکیب این نیروها، همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، منجر به ایجاد دو مؤلفه نیرویی محوری ( $F_A$ ) و

مماسی ( $F_T$ ) می‌شوند. برای یک پروفیل متقارن، همان‌طور که در شکل 10 نشان داده شده است، جهت نیروی مماسی برای مقادیر مثبت و منفی جهت جریان و به تبع آن زاویه حمله یکسان است.

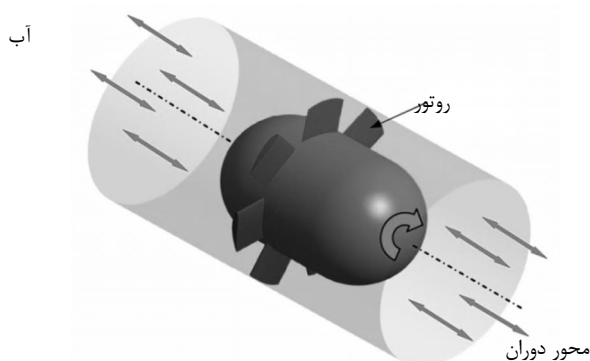
در شکل 10، پره توربین ولز، مثلث سرعت و نیروهای وارد بر پره در دو جهت جریان آب مخالف هم نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، نیروی محوری در راستای سرعت  $C$  است. جهت چرخش در پره‌ها وابسته به نیروی مماسی است. در هر دو حالت جریان آب جهت نیروی مماسی به سمت نوک پره بوده، بنابراین، جهت چرخش پره مستقل از جهت جریان است که امتیاز مهم این نوع از توربین‌هاست. نیروی محوری  $F_A$  موجب ایجاد فشار در جهت محور دوران می‌شود که باید توسط یاتاقان‌ها جذب شود. نیروهای مماسی و محوری از روابط (1) و (2) به دست می‌آیند:

$$F_A = F_L \cos \alpha + F_D \sin \alpha \quad (2)$$

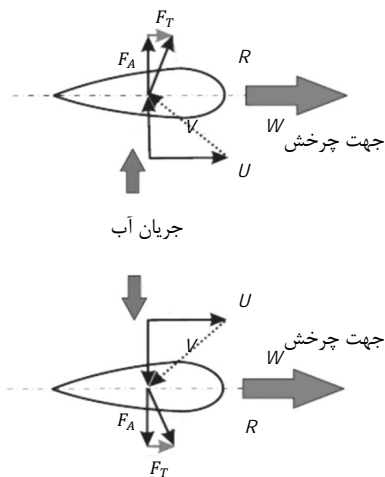
$$F_T = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \quad (3)$$

## 4- پارامترهای عملکرد توربین ولز

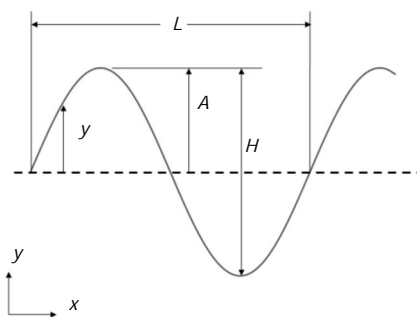
عملکرد توربین ولز شامل توان خروجی، افت فشار در دو طرف روتور، بازده توربین و محدوده کاری آن است. البته باید توجه کرد که بازده مبدل انرژی موج، وابستگی زیادی به بازده جذب انرژی ستون آب نوسانی دارد که تأثیر مستقیمی روی افت فشار و بازدهی توربین می‌گذارد. پارامترهای مختلفی روی بازده یک توربین ولز تأثیرگذارند که در بخش‌های بعدی به تفکیک در مورد آن‌ها بحث خواهد شد.



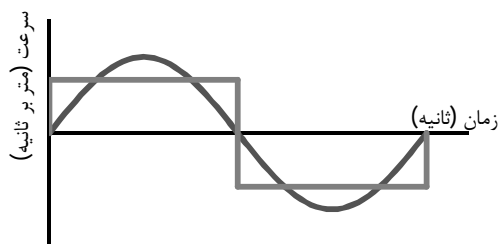
شکل 9 شماتیکی از توربین ولز [12]



شکل 10 نیروهای مماسی و عمودی بر روی پره



شکل 7 متغیرهای نشان‌دهنده موج



شکل 8 روند تغییرات سرعت نسبت و سرعت میانگین

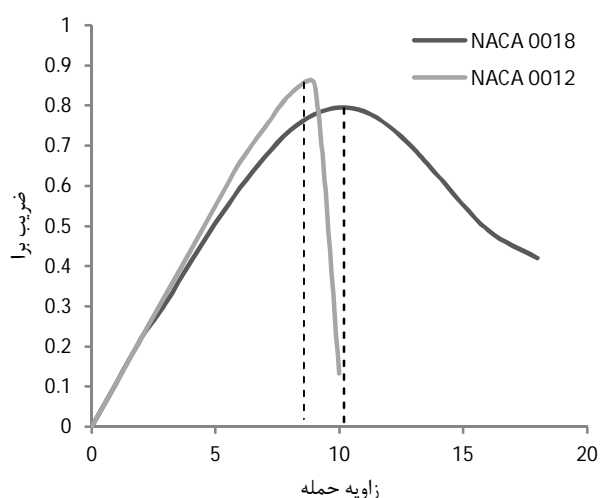
## 1-4- صلبیت

بین 10 تا 16 درصد وتر پره) استال به صورت جدایش از لبه جلویی پره و ناگهانی رخ می‌دهد و اما در پره‌های ضخیم‌تر جدایش به مرور و از لبه انتهایی رخ می‌دهد.

پره NACA0012 باریک و پره NACA0018 ضخیم است. در هر دو پره ضریب برا به صورت خطی نسبت به زاویه حمله شروع به افزایش می‌کند تا زاویه حدود 4 درجه و از آنجا به بعد پره NACA0012 به سرعت به ضریب برای بیشینه خود می‌رسد و به دلیل استال از نوع لبه جلویی به سرعت کل جریان دچار جدایش شده و ضریب برا آن افت شدیدی می‌کند. اما، در پره NACA0018، به دلیل اینکه جدایش به تدریج از لبه عقبی پره شروع شده و به سمت لبه جلویی پیشروی می‌کند، استال به آرامی رخ داده و ناحیه ضریب برای بیشینه آن تا حدودی تخت بوده که این به بهبود عملکرد آیرودینامیکی کمک می‌کند. توضیح این نکته لازم است که در NACA0012 به دلیل ضخامت کم و شیب شدید فشار مقدار ضریب برا بیشینه بزرگ‌تر از NACA0018 است. در شکل 11، نمودار ضریب برا برحسب زاویه حمله برای دو پره با NACA0012 و NACA0018 رسم شده است [21].

## 5- مراحل شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی عملکرد توربین نسبت به تغییر پارامترهای هندسی، مشخصات هندسی توربین ولز طراحی شده در جدول 1 نشان داده شده است. هندسه سه‌بعدی توربین در نرم‌افزار کتیا<sup>3</sup> مدل سازی در شکل 12 نشان داده شده است.



شکل 11 نمودار ضریب لیفت نسبت به زاویه حمله ( $\alpha$ )

جدول 1 مشخصات هندسی پره

مشخصات توربین	اندازه
صلبیت (s)	0/68
نسبت هاب به نوک	0/72
شعاع میانگین پره	81/5 mm
طول پره	32 mm
تعداد پره	5
طول وتر	60 mm
سرعت میانگین	0/56 m/s

صلبیت توربین مقیاسی برای انسداد جریان هوا و یا آب گذرنده از توربین است. همچنین، صلبیت مقیاسی از تأثیر متقابل پره‌ها بر روی یکدیگر است که روی قابلیت خودگردشی توربین تأثیر می‌گذارد. برای اینکه توربین قابلیت خودگردشی داشته باشد، بایستی صلبیت بیشتر از 0/5 باشد [13]. برای صلبیت‌های بالا، به دلیل اثرات چرخش جریان، تلفات انرژی در خروجی پره افزایش یافته که باعث کاهش بازده توربین شده است. در این حالت‌ها (صلبیت بالا) پره‌های در نزدیکی هاب به هم نزدیک هستند که موجب تأثیر لایه مرزی آن‌ها بر روی یکدیگر می‌شود. این تأثیر منجر به تلفات دیواره پره روی سطح هاب و ناحیه‌ای از پره که نزدیک به هاب هست، می‌شود. همچنین، در نزدیکی هاب، به دلیل سرعت خطی کمتر حاصل از دوران، زاویه حمله بزرگ‌تر می‌شود که منجر به ایجاد گردابه‌ها می‌شود و در نتیجه تلفات در این ناحیه بیشتر است [14] (رابطه 4).

$$s = \frac{zc}{\pi r_t(1+h)} \quad (4)$$

که در این رابطه s صلبیت، z تعداد پره، c طول وتر،  $r_t$  شعاع نوک پره و  $h = D_h/D_t$  نسبت قطر هاب به نوک پره است.

## 2-4- نسبت هاب به نوک

تأثیر نسبت هاب به نوک در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [15-17]. نتایج نشان می‌دهد که افزایش این نسبت از حدی مشخص منجر به کاهش بازده می‌شود. البته، به دلایل عکس‌العمل بین پره‌ها در ناحیه هاب و زاویه حمله بیشتر در این ناحیه که منجر به تولید گردابه‌ها در زاویه حمله کمتری نسبت به نوک پره می‌شود، بررسی این اثر اندکی پیچیده‌تر است. بر این اساس،  $h=0.6$  مناسب‌ترین مقدار جهت بهینه‌سازی طراحی است [14].

## 3-4- لقی نوک

نسبت لقی نوک پره به طول پره پارامتر مهمی برای عملکرد توربوماشین‌هاست. تحقیقات متعددی در مورد تأثیر لقی نوک بر روی بازدهی و استال توربین ولز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش لقی نوک باعث پیشروی نقطه استال می‌شود (استال زودتر رخ می‌دهد)؛ اما بازدهی توربین، به علت کاهش تلفات ناشی، افزایش می‌یابد. از طرفی، اگر توربین لقی نوک بزرگی داشته باشد، بدون وقوع استال عمل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه برای این نسبت حدود 2 درصد است [18, 19].

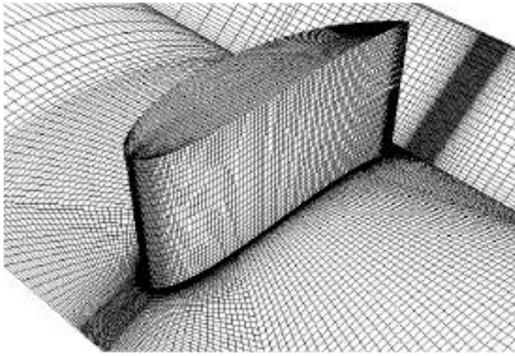
## 4-4- شکل پره

ضخامت پره، به دلیل تأثیری که بر روی آیرودینامیک حول پره و نقطه استال می‌گذارد، بسیار حائز اهمیت است. البته، تأثیر ضخامت بر روی آیرودینامیک از تأثیر عدد رینولدز قابل تفکیک نیست، زیرا با هم بر روی جدایش روی هیدروفیل تأثیر می‌گذارند [20].

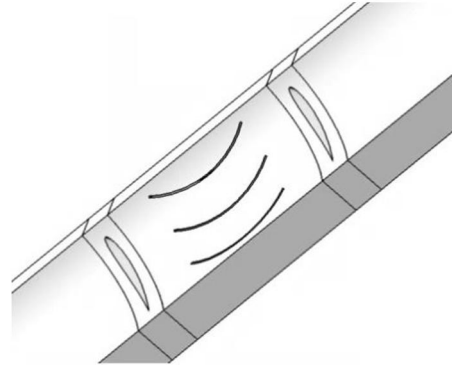
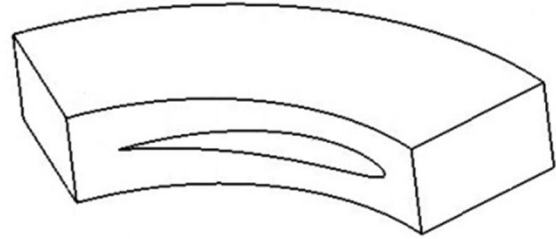
## 1-4-4- وقوع پدیده‌ی استال

پدیده استال حاصل جدایش جریان از روی پره است که باعث افت نیروی برا می‌شود. این پدیده به دو صورت رخ می‌دهد؛ یکی جدایش جریان از لبه جلوی پره<sup>1</sup> و دیگری جدایش جریان از لبه عقبی<sup>2</sup>. در پره‌های نازک (ضخامت

1- Leading Edge Stall  
2- Trailing Edge Stall



شکل 14 شبکه بندی اطراف پره



شکل 12 مدل سه بعدی حجم پره

### 5-2- $\gamma^+$ دیواره

یکی از مواردی که بر روی همگرایی حل سی اف دی تأثیر گذار است فاکتور  $\gamma^+$  است که به نوعی مبین فاصله شبکه از دیواره‌هاست. در واقع  $\gamma^+$  نوعی فاصله از دیواره بدون بعد است که برای جریان‌هایی که توسط دیواره‌ها احاطه شده‌اند، به صورت زیر تعریف می‌شود. طبق روابط (5) و (6) داریم:

$$\gamma^+ = \frac{u_* \times y}{\nu} \quad (5)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (6)$$

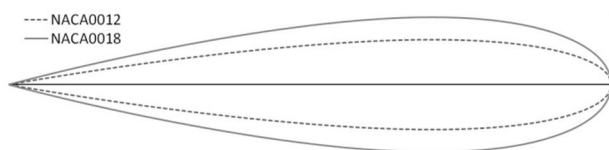
در روابط فوق  $u_*$  سرعت اصطکاکی در نزدیک‌ترین دیواره،  $y$  فاصله مش از نزدیک‌ترین دیواره و  $\nu$  لزجت سینماتیکی موضعی سیال است. با توجه به استفاده از توابع استاندارد و امکان جدایش جریان از روی پره مقادیر  $\gamma^+$  در محدوده  $30 < \gamma^+ < 100$  باید باشد.  $\gamma^+$  در اینجا حدود 45 است [22]. با توجه به نتایج حاصل از مرجع [23]، معادلات حاکم بر مدل آشفتگی SST مناسب است و با شرایط مرزی زیر در قاب چرخان حل شده‌اند.

- ورودی: سرعت ثابت
  - خروجی: فشار استاتیکی ثابت
  - دیواره شروود<sup>2</sup>: بدون لغزش و سرعت صفر
  - دیواره هاب و پره: بدون لغزش و سرعت برابر با سرعت دورانی
- به منظور شبیه‌سازی عملکرد توربین ولز سعی شد تا تأثیر تغییر پارامترهای طراحی توربین ولز بر روی عملکرد آن مورد بررسی قرار گیرد. این پارامترها به شرح زیرند:

#### 1. پروفیل پره

پروفیل پره طبق استاندارد NACA0012 و NACA0018 انتخاب شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل 15 پروفیل استاندارد هر دو نوع پره نمایش داده شده است.

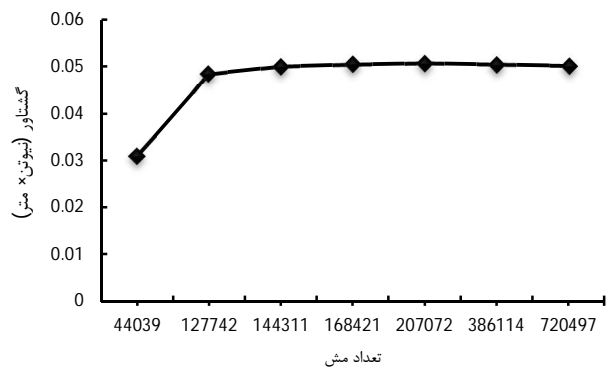
1. لقی نوک پره
2. میزان پیچش کلی پره



شکل 15 سطح مقطع پره‌های استاندارد NACA0012 و NACA0018

### 5-1- عدم وابستگی حل به شبکه

هندسه ایجاد شده در محیط نرم‌افزار آنسیس سی اف ایکس<sup>1</sup> شبکه بندی شده است. معادلات حاکم شامل پیوستگی و مومنتوم در دستگاه مختصات دوار با در نظر گرفتن مدل توربولانس SST K- $\omega$  حل می‌شوند. به منظور بررسی عدم وابستگی حل به شبکه و در نتیجه معتبر بودن آن، نتایج حل برای اندازه‌های مختلفی از شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل 13 مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌کنید، برای تعداد شبکه‌های 44039، گشتاور خروجی دارای 10 درصد خطاست؛ اما، برای تعداد شبکه‌های 127742، 144311 و 168421 گشتاور خروجی با تلورانسی در حدود کمتر از 1 درصد با هم برابر است. این امر بیانگر استقلال حل و عدم وابستگی آن به اندازه شبکه است و به نوعی صحت محاسبات انجام شده را تأیید می‌کند. همچنین، با توجه به اینکه در تعداد مش‌های 127742 همگرایی مورد نظر حاصل می‌شود، استفاده از همین تعداد مش برای کاهش هزینه محاسباتی مناسب است. نمونه‌ای از شبکه ایجاد شده در شکل 14 نشان داده شده است.



شکل 13 مقایسه تأثیر پروفیل پره بر روی بازده

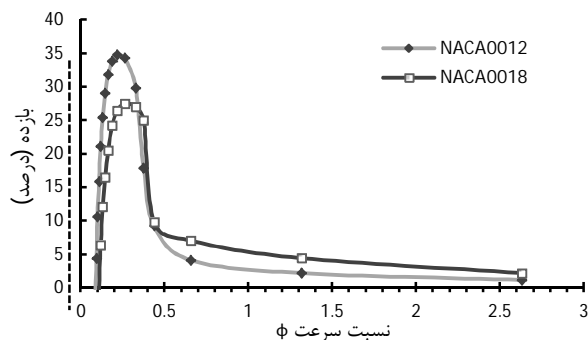
به بعد زوایا به مقادیر بالاتر از 15 درجه می‌روند که می‌توان گفت وارد ناحیه استال شده‌اند و در نتایج نیز افت شدیدی در گشتاور و بازده دیده می‌شود. به‌صورت خلاصه می‌توان گفت که بیشترین بازده و گشتاور تولیدی پروفیل NACA0012 نسبت به پروفیل NACA0018 بالاتر است، اما پره NACA0018 دیرتر دچار استال می‌شود. همان‌طور که گفته شد، این موضوع به تفاوت نوع استال در لبه جلویی و عقبی پره مربوط می‌شود.

### 6-2- تأثیر لقی نوک بر روی بازدهی توربین

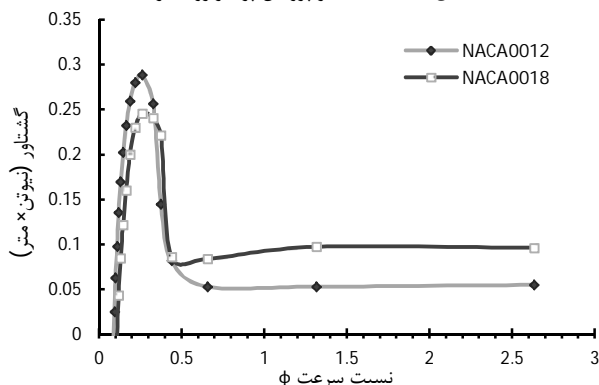
در شکل 20، تأثیر لقی نوک بر روی بازدهی توربین ولز در سیستم ستون نوسانی آب مورد بررسی قرار گرفته است. با کاهش لقی نوک، سطح پره برای تبادل انرژی با جریان ورودی افزایش و تلفات ناشی کاهش می‌یابد و در نتیجه برای نسبت‌های سرعت پایین بازدهی توربین افزایش می‌یابد که این موضوع به‌وضوح در شکل 20 قابل مشاهده است. بیش‌ترین بازده توربین ولز در لقی نوک 2/5 میلی‌متر 8 درصد بیشتر است از حالت 5 میلی‌متر و در 1/5 میلی‌متر 6 درصد بیشتر است از لقی نوک 2/5 میلی‌متر؛ اما اختلاف بازدهی بین 1/5 و 1 میلی‌متر کمتر از یک درصد در نتیجه استفاده از لقی‌های کمتر از 1 میلی‌متر نیز مزیت چندانی بر افزایش بازده توربین نخواهد داشت. در لقی نوک پایین‌تر استال زودتر رخ می‌دهد، اما در مجموع استفاده از لقی نوک پایین‌تر منجر به بازدهی بیشتری می‌شود.

### 6-3- میزان پیچش کلی پره

همان‌گونه از روی نمودار شکل 18 مشاهده می‌شود، در نسبت سرعت‌های بالا بازده به‌شدت افت پیدا می‌کند. یک راه حل برای بالا بردن بازده در نسبت سرعت‌های بالا استفاده از پره پیچشی است. در این حالت، با تغییر هوشمند میزان پیچش کل پره در نسبت سرعت‌های بالاتر (دبی‌های بیشتر) و کاهش



شکل 18 مقایسه تأثیر پروفیل پره بر روی بازده



شکل 19 مقایسه تأثیر پروفیل پره بر روی گشتاور تولیدی

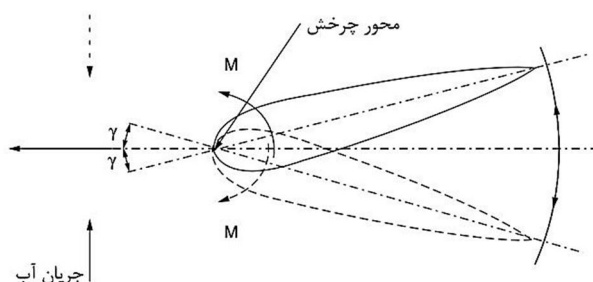
در شکل 16 میزان پیچش کلی پره نسبت به نوک آن نشان داده شده است [24].

### 6- نتایج

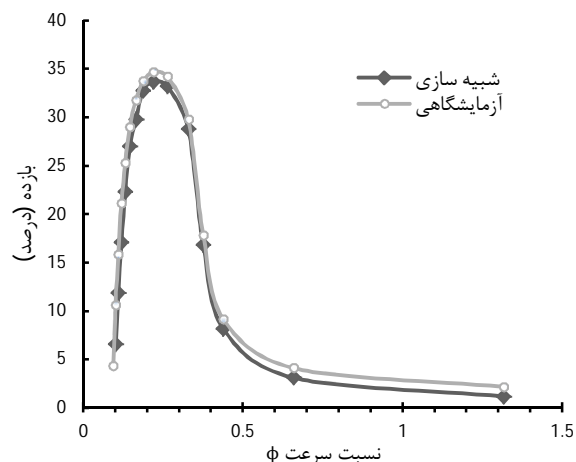
پس از انجام مراحل شبیه‌سازی نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مرجع [8]، که در نمودار شکل 17 نشان داده شده است، مقایسه شده است. بیش‌ترین خطای بین بازده حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی 3/36% است. در ادامه سایر نتایج حاصل از این مقایسه نشان داده شده‌اند.

### 6-1- تأثیر پروفیل پره بر روی بازدهی توربین

همان‌طور که در شکل 18 و 19 نشان داده شده است، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیان‌کننده این مطلب هستند که پره‌هایی با هیدروفیل باریک‌تر دارای خواص خودگردشی بهتری<sup>1</sup> هستند. در نتیجه در نسبت سرعت پایین‌تری شروع به تولید توان می‌کنند که این موضوع در شکل 18 قابل مشاهده است. از طرف دیگر، با توجه به نمودار ضریب برآ، که در شکل 11 نشان داده شده است، پره باریک‌تر ضریب برآی بیشتری دارد. در نتیجه، در ضریب برآی بیشینه، توان و گشتاور بیشتری تولید می‌کند. شکل 18 و شکل 19 صحت این موضوع را تأیید می‌کنند، اما استال بر روی پره‌های باریک‌تر نسبت به پره‌های ضخیم‌تر در زاویه حمله پایین‌تری اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر، پره NACA0012 در نسبت سرعت 0/25 دارای بیش‌ترین مقدار گشتاور (در شکل 19 مشخص شده است) است. در این نسبت سرعت، زاویه حمله در حدود 14/5 درجه است که هنوز به زاویه استال نرسیده است، اما از این نقطه



شکل 16 چرخش پره نسبت به نوک



شکل 17 مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی برای بررسی بازده توربین ولز با پروفیل پره NACA0012 [8]

1- خودگردشی بهتر: روتور در سرعت سیال پایین شروع به چرخش می‌کند

این صورت است که در هاب پروفیل پره NACA0018 و در نوک پروفیل پره NACA0012 به کار برده می‌شود و ضخامت پره در راستای طول به صورت پیوسته از پروفیل پره NACA0018 به NACA0012 می‌رسد. حال پره جدید را تحلیل کرده و نتایج را در نمودار شکل 22 می‌بینید.

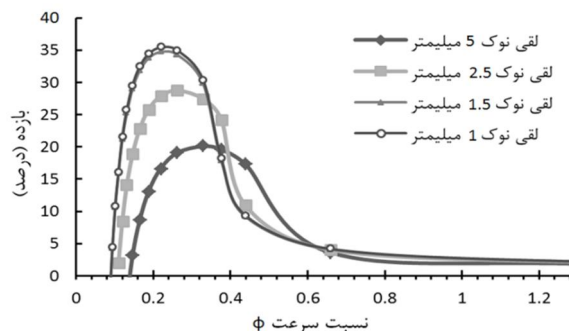
### 5-6- توربین ولز چندمرحله‌ای

یکی از روش‌های بالا بردن بازده در این نوع توربین به این صورت است که از دو ردیف پره به جای یک ردیف پره استفاده شود. در شکل 23 مثلث سرعت مربوط به دو ردیف پره نشان داده شده است.

همان‌گونه که در تحلیل‌های توربین با یک ردیف پره دیده شد، جریان آب خروجی از پره دارای پارامتر سرعت  $C_U$  است، که باعث به وجود آمدن گردابه در پایین دست جریان می‌شود. جریان خارج شده از پره ردیف اول با زاویه نامناسب به پره‌های ردیف دوم برخورد می‌کند و بعد از آن خارج می‌شود. مثلث سرعت این دو ردیف پره در شکل 23 مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که از مثلث سرعت شکل بالا مشخص است، مقدار  $C_{U1} = C_{U2} < C_{U3}$  است و مشخص می‌شود که استفاده از پره دوم باعث بالاتر رفتن سرعت جریان چرخشی خروجی از توربین می‌شود و این خود باعث به وجود آمدن تلفات در توربین می‌شود.

برای جلوگیری از به وجود آمدن جریان چرخشی و تشدید آن در پره ردیف دوم، استفاده از پره‌های راهنما توصیه می‌شود. با توجه به زاویه خروجی جریان از پره‌های ردیف اول، یک پره راهنما متناسب با این زاویه در بین دو



شکل 20 نمودار بازده توربین در لقی‌های مختلف

زاویه حمله در این نسبت‌ها، از وقوع استال جلوگیری شده و راندمان بهبود پیدا می‌کند. در واقع، با تغییر هندسه پره توربین جدیدی تولید شده که منحنی راندمان-نسبت سرعت متفاوتی دارد. در دبی‌های خارج از نقطه طرح میزان راندمان با تنظیم پیچش مناسب بهبود پیدا می‌کند. بدیهی است که در نسبت سرعت‌های پایین همچنان طراحی اصلی بیشترین راندمان را دارد (شکل 21).

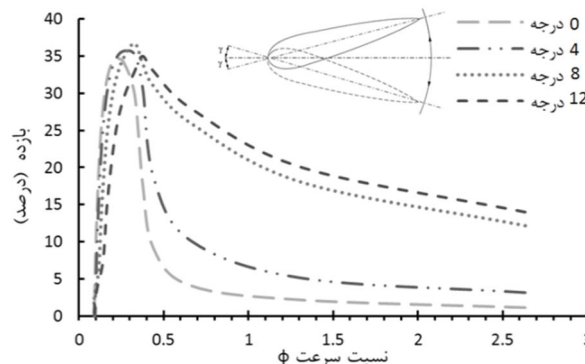
بنابراین، توربین باید به گونه‌ای طراحی شود که با بالا رفتن مقدار نسبت سرعت زاویه  $\gamma$  نیز بیشتر شود تا بر روی بستر موج نوسانی، که نسبت سرعت دائماً تغییر می‌کند، توربین در بالاترین بازده کار کند.

### 4-6- پره با سطح مقطع متغیر

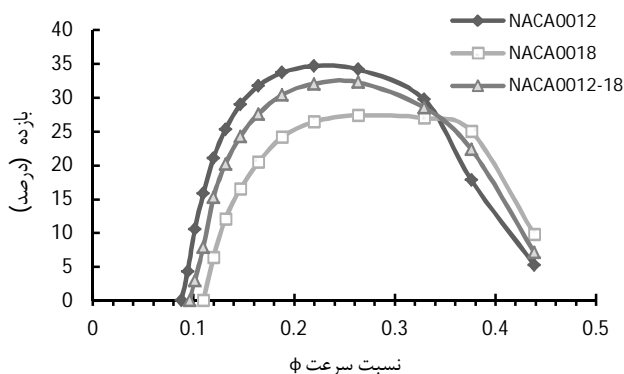
همان‌گونه که از شکل 18 می‌بینید، هر دو نوع پروفیل در سرعت نسبی خاصی با افت شدید در بازده مواجه می‌شوند که اصلی‌ترین دلیل آن مواجه شدن با پدیده استال است. طبق شکل 18، مشخص است که پره NACA0018 در  $\phi$  بزرگ‌تری نسبت به پره NACA0012 دچار پدیده استال می‌شود؛ یعنی در زاویه  $\alpha$  بزرگ‌تری دچار پدیده استال می‌شود که با نتیجه حاصل از شکل 11 همخوانی دارد.

از طرف دیگر پره NACA0012 نسبت به NACA0018 دارای بازده بالاتری است. بنابراین، با توجه به این دو خاصیت، باید از طرح جدیدی برای بهینه کردن این دو نوع پروفیل استفاده کرد.

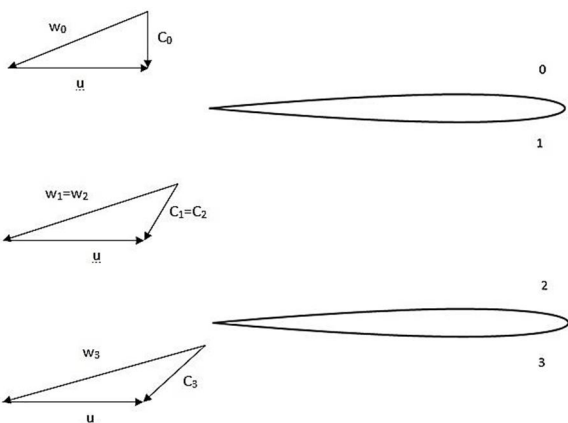
با توجه به اینکه سرعت مماسی در نوک پره بیشتر از هاب است و با ثابت بودن مقدار  $C$  مشخص می‌شود که زاویه  $\alpha$  از هاب تا نوک پره به مرور کم می‌شود، با این تفاسیر مشخص می‌شود که احتمال ایجاد پدیده استال در نزدیکی هاب بسیار بیشتر از نوک پره است. بنابراین نوع جدیدی از پره را طراحی کرده که ترکیبی از پره‌های NACA0012-18 است. طراحی این پره به



شکل 21 بازده در زاویه‌های  $\gamma$  مختلف



شکل 22 مقایسه پروفیل توربین مقطع متغیر با NACA0018 و NACA0012



شکل 23 مثلث سرعت مربوط به دو ردیف پره

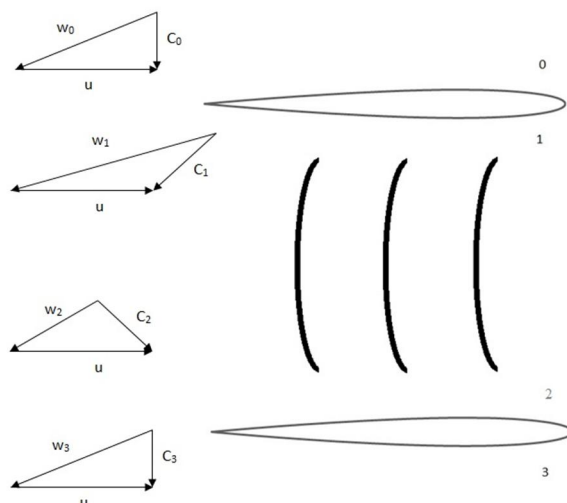
پره طراحی می‌کنیم. پره راهنما را به گونه‌ای طراحی می‌کنیم که پارامتر سرعت  $C_U$  از خروجی توربین حذف شود. با این کار چرخش در خروجی به حداقل می‌رسد.

در شکل 24، مدل قرارگیری پره‌ها و مثلث سرعت رسم شده است. حال، با توجه به مثلث سرعت، مشاهده می‌شود که جریان در خروجی محوری است و این امر خود باعث بالارفتن بازده می‌شود. با توجه به نمودار و شکل بالا، مشاهده می‌شود که با وجود پره راهنما در بین دو پره بازده زیاد می‌شود. در زیر بازده توربین دوطبقه همراه با پره راهنما و بدون پره راهنما مقایسه می‌شوند. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، توربین در حالت دارای پره راهنما بازده‌ای به میزان 9 درصد بیشتر از حالت بدون پره راهنما را دارد.

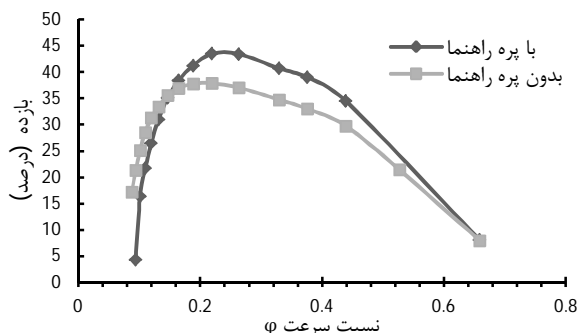
همانطور که در شکل 25 مشاهده می‌شود، بازده توربین همراه با پره راهنما بیشتر از بازده توربین در حالت بدون پره راهنماست. دلیل این امر یکنواختی جریان ورودی به پره‌های طبقه دوم در حالت استفاده از پره راهنما نسبت به پره‌های ردیف دوم در حالت بدون پره راهنماست.

### 7- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، یک توربین محوری اقیانوسی از نوع ولز بر روی یک بستر شناور نوسانی به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. مطالعه پارامتری این توربین نشان می‌دهد که کاهش لقی تا مرز 2% وتر منجر به افزایش بازده توربین می‌شود. همچنین چرخش پره نسبت به تیغه جلویی آن در بعضی از دبی‌ها



شکل 24 شماتیک توربین دو طبقه به همراه پره راهنما با رسم مثلث سرعت



شکل 25 بازده توربین دو طبقه همراه با پره راهنما و بدون پره راهنما

### 8- فهرست علائم

$A$	دامنه موج (m)
$c$	سرعت مطلق (m/s)
$h$	طول پره (m)
$H$	ارتفاع موج
$L$	طول موج (m)
$r$	شعاع (m)
$s$	صلبیت
$t$	زمان (s)
$T$	دوره تناوب (s)
$u$	سرعت مماسی (m/s)
$w$	سرعت نسبی (m/s)
$z$	تعداد پره

### علائم یونانی

$\gamma$	زاویه پیچش پره
$\tau$	لقی نوک پره
$\phi$	نسبت سرعت

### زیرنویس

$h$	ریشه پره
$t$	نوک پره

### 9- مراجع

- [1] T. K. Ghosh, M. A. Prelas, *Energy Resources and Systems: Vol. 2, Renewable Resources: Springer*, 2011.
- [2] B. Drew, A. Plummer, M. N. Sahinkaya, A review of wave energy converter technology, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 223, No. 8, pp. 887-902, 2009.
- [3] K. Naghizade, *Design and Numerical Analysis Axial Turbine*, master Thesis, Mechanical, University of Tehran, 2013. (In Persian)
- [4] *Oscillating Water Column*, Accessed 2011; <https://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu/ocean-energy-generating-technologies/wave-energy/oscillating-water-column>.
- [5] T. Hansen, *Power Engineering*, Accessed 2012; [http://pepei.pennnet.com/Articles/Article\\_Display.cfm?Section=Articles&ARTICLE\\_ID=2](http://pepei.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=Articles&ARTICLE_ID=2).
- [6] A. Muetze, J. Vining, Ocean wave energy conversion-a survey, *Proceedings of the 41st IEEE IAS Annual Conference*, Vol. 3, pp. 1410-1417, Tampa, FL, October 8-12, 2006.
- [7] L. Rodrigues, *Wave power conversion systems for electrical energy production*, Accessed 20 July 2013, [http://www.energycentral.com/download/products/Wave\\_Power\\_Conversion.pdf](http://www.energycentral.com/download/products/Wave_Power_Conversion.pdf).
- [8] T. Otsubo, M. Orita, T. Kinoshita, T. Kanemoto, K. Kokubu, Floating type ocean wave power station (unique work of oscillating platform), *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Hamamatsu, pp. 1937-1942, 2011.
- [9] Sh. Okamoto, T. Kanemoto, T. Umekage, Floating type ocean wave power station equipped with hydroelectric unit, *Journal of Thermal Science*, Vol. 22, No. 5, pp. 467-471, 2013.



- [18] M. Inoue, K. Kaneko, T. Setoguchi, S. Raghunathan, Starting and running characteristics of biplane Wells turbine, in *Proceedings of the 5th OMAE Conference*, London, pp. 571-579, 1986.
- [19] M. Inoue, K. Kaneko, T. Setoguchi, S. Raghunathan, The fundamental characteristics and future of Wells turbine for wave power generation, *Science of Marines*, Vol. 39, pp. 275-280, 1987.
- [20] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, London: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [21] J. D. Anderson Jr, *Fundamentals of Aerodynamics*, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [22] M. Torresi, Detailed CFD analysis of the steady flow in a Wells turbine under incipient and deep stall conditions, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 131, No. 7, pp. 071103, 2009 .
- [23] Z. Čarija, L. Kranjčević, V. Banić, M. Čavrak, Numerical analysis of Wells turbine for wave power conversion, *Engineering Review*, Vol. 32, No. 3, pp. 141-146, 2012.
- [24] T. H. Kim, T. Setoguchi, M. Takao, K. Kaneko, S. Santhakumar, Study of turbine with self-pitch-controlled blades for wave energy conversion, *International journal of thermal sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 101-107, 2002.
- [10] J. Vining, Ocean wave energy conversion, *Electrical and Computer Engineering*, in Proceeding of IEEE, pp. 80, 2005 .
- [11] T. Kloprogge, *Turbine Design for Thermoacoustic Generator*, bachelor Thesis, FACT-Foundation, Hogeschool INHolland Delft, Aeronautical Engineering, 2012 .
- [12] A. Gareev, *Analysis of Variable Pitch Air Turbines for Oscillating Water Column (OWC) Wave Energy Converters*, Doctor of Philosophy Thesis, School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong, 2011 .
- [13] S. Raghunathan, C. Tan, Performance of the Wells turbine at starting, *Journal of Energy*, Vol. 6, No. 6, pp. 430-431, 1982 .
- [14] M. H. A. Mohamed, *Design Optimization of Savonius and Wells Turbines*, Doktoringenieur Thesis, Otto-von-Guericke University Magdeburg, 2011 .
- [15] S. Raghunathan, The Wells air turbine for wave energy conversion, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 31, No. 4, pp. 335-386, 1995 .
- [16] S. Raghunathan, C. ABTAN, Aerodynamic performance of a Wells air turbine, *Journal of Energy*, Vol. 7, No. 3, pp. 226-230, 1983 .
- [17] S. Raghunathan, A methodology for Wells turbine design for wave energy conversion, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 209, No. 3, pp. 221-232, 1995 .