

عنوان مقاله :

طراحی، ساخت و تست توربین جریان آزاد توراب

نویسنده: یاسر مهرانفر

دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی مکانیک

نویسنده: مطلب خسروی

دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده فیزیک

نویسنده: وحید موسی بیکی

دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی مکانیک

نویسنده: حسین بابایی

دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده ماشین آلات کشاورزی

نویسنده: دکتر ابراهیم شیرانی

دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی مکانیک

نویسنده: دکتر احمد صداقت

دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی، ساخت و تست توربین جریان آزاد توراب

واژه های کلیدی: **Helical Turbine for Free Fluid Flows**، توربین توراب، طراحی توربین، ساخت توربین، انرژی رودخانه

چکیده

استفاده از انرژی های پاک از اهم مسایل روز دنیا در زمینه تولید، تبدیل و انتقال انرژی می باشد. یکی از منابع انرژی های پاک انری جنبشی رودخانه هاست. استفاده از توربین های با جریان آزاد می تواند بخشی از انرژی جنبشی آب رودخانه ها را به انرژی الکتریکی تبدیل نماید. در این مقاله هدف معرفی، طراحی، ساخت و تست و ارائه عملکرد یک توربین آبی با جریان آزاد (توربین توراب) که دارای راندمان بالایی است می باشد. توربین مورد نظر دارای پره های مارپیچی بوده و از نوع محور عمودی است. این توربین را براحتی می توان طراحی نمود و آنرا ساخت و در محل های زیادی در داخل رودخانه تعبیه کرد.

این توربین ها از پره های مارپیچی شکل تشکیل شده است. پره ها بر روی یک استوانه فرضی نصب شده و که شافت توربین از وسط این استوانه می گذرد. تعداد پره ها متفاوت است ولی در این مقاله از توربین های توراب با سه پره استفاده شده است. این پره ها به دو روش ریخته گری و کامپوزت کاری ساخته شده اند. برای تست توربین ساخته شده چندین نوع آزمایش انجام می گیرد. سپس داده های بدست آمده با داده های شبیه سازی شده ی توربین در نرم افزار فلونت مقایسه شده و تغییرات و بهینه سازی هایی بر روی توربین انجام می شود.

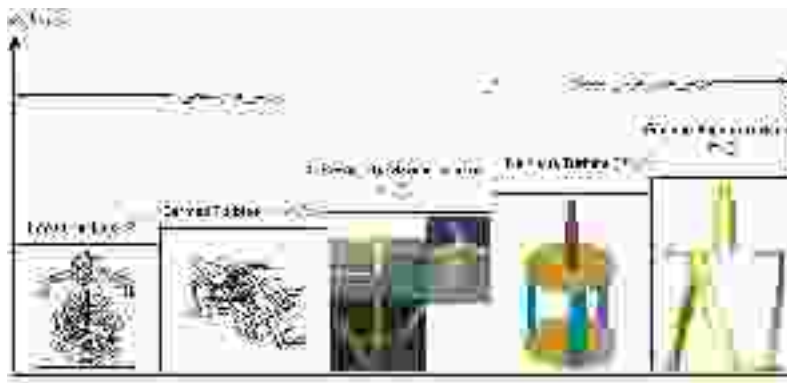
در این مقاله یک توربین توراب در مقیاس آزمایشگاهی با ارتفاع ۰/۸ متر و قطر ۰/۳۸ متر ساخته شده است و در آب کانال با سرعت جریان های آب متفاوت تست شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که گشتاور این توربین بر حسب سرعت جریان آب از یک منحنی سهمی پیروی می کند. با توجه به سرعت میانگین ۲/۲ متر بر ثانیه آب رودخانه زاینده رود می توان از این نوع توربین ها برای تولید انرژی الکتریکی از رودخانه استفاده نمود.

مقدمه

انرژی و ذخیره آن و یا تبدیل انرژی از مسایل مهم روز دنیاست. امروزه دانشمندان و محققین انرژی تحقیقات خود را به سمت انرژیهای پاک و انرژی تجدید پذیر میل داده اند. به علت مسایل زیست محیطی استفاده از انرژی های پاک از اولویت بالایی برخوردار است. انرژی جنبشی آب رودخانه ها و نیز انرژی حاصل از جذر و مد و امواج دریاها برای تولید انرژی الکتریکی از منابع انرژی پاک و تجدید پذیر است.

با توجه به وجود رودخانه های فراوان در ایران و جهان لازم است در مورد این انرژی پاک تحقیقات بیشتری صورت گیرد. امروزه دنیا به سمت استفاده از این انرژی رفته است. هم اکنون پژوهشگاه های تحقیقاتی مانند EPRI, VERDANT Power, LEGI, ... تحقیقات جدی در این مورد انجام می دهند.

توربین های جریان آزاد عموماً نیازی به احداث سد ندارد [۱]. یکی از تفاوت های اصلی توربین های جریان آزاد و توربین های سد در استفاده از نوع انرژی می باشد. انرژی استفاده شده در توربین های جریان آزاد بر خلاف توربین های سد که از نوع انرژی پتانسیل آب ذخیره شده در پشت سد است، از نوع انرژی جنبشی آب می باشد. توربین های جریان آزاد انواع مختلفی دارند که تعدادی از آنها در شکل (۱) آورده شده است [۲]. در این شکل پنج نوع توربین مختلف که در جریان های آزاد از آنها استفاده می شوند، به همراه بازده آنها نمایش داده شده است. همین طور که دیده می شود بازده این توربین ها از ۱۶ درصد برای توربین های ملخی از نوع تای سون تا ۳۵ درصد برای توربین های جریان های عمودی از نوع گارلاو و هلی کال می باشد.



شکل (۱): شکل شماتیک پنج نوع توربین جریان آزاد همراه با بازده آنها

توربین های جریان آزاد مانند ملخی، جریان عمودی و غیره در انواع مختلف با کاربردهای مختلف و مزایا و معایب گوناگون طراحی و ساخته شده اند. برای مثال توربین های ملخی مانند SMDH, MCT, RTT برای جریان های برگشتی جزر و مدی با عمق کم آب نمی توانند مفید باشند. عملکرد بعضی از توربین های جریان آزاد مانند توربین های داریوس و گارلاو که شکل آنها در شکل (۱) نیز نمایش داده شده است به جهت برخورد جریان آب با پره های توربین بستگی ندارند [۳]. این موضوع مزیت فوق العاده ای برای این نوع توربین ها بوده و در صورت تغییر جهت آب توربین عملکرد یکسانی از خود نشان می دهد.

در توربین های از نوع جریان عمودی، جهت جریان آب به گونه ای است که بردار سرعت آب عمود بر شافت توربین باشد. نمونه اولیه این توربین با نام داریوس است که مطابق شکل (۲) از تیغه های ایرفویلی صاف تشکیل شده است. از معایب توربین داریوس می توان به ناپایداری، واماندگی دینامیکی، عدم تقارن راست و چپ، دشواری محاسبات اشاره نمود. در سال ۱۹۹۷ یک نوع جدید از توربین داریوس با ساختاری متفاوت با نام توربین گارلاو یا توربین توراب مطرح شد [۲]. در توربین گارلاو از پره های مارپیچی به جای پره های صاف داریوس استفاده شده است.



شکل (۲): شکل شماتیک توربین داریوس (راست) و توربین گارلاو (چپ)

در این مقاله هدف طراحی و ساخت توربین توراب است. این توربین که در شکل (۱) با نام توربین گارلاو نشان داده شده است دارای مزیت هایی مانند بازده، پایداری بالا می باشد. در قسمت های بعدی این مقاله ابتدا مختصری راجع به تئوری توربین توراب و سپس روش طراحی، نحوه ی ساخت، نتایج آزمایش روی توربین و نتیجه گیری ارائه می شود.

۱. روش تحقیق و تحلیل

در توربین های داریوس و توراب از نیروی لیفت و درگ ناشی از جریان آب بر روی پره های ایرفویلی شکل برای تولید گشتاور استفاده می شود. در طراحی های انجام شده از ایرفویل NACA0018 به عنوان مقطع پره ها استفاده شده است. همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است دو سرعت بر روی ایرفویل توربین توراب جریان دارد، سرعت مماسی، $R \cdot \omega$ و سرعت جریان آب، U_{∞} . در این شکل شعاع توربین و ω سرعت زاویه ای محور توربین است. برآیند این دو سرعت را با V_T ، نشان داده شده است. ضریب لیفت، C_L ، در راستای برآیند سرعت و ضریب درگ، C_D ، عمود بر راستای برآیند سرعت و ضریب شعاعی، C_N ، در راستای شعاع توربین و ضریب مماسی، C_T ، در راستای دوران توربین می باشد. نمودار های (۱) و (۲) ظرایب لیفت و درگ را در بازه ی زاویه ی حمله ی صفر تا ۱۸۰ درجه را نشان می دهد. [۴]. در رابطه های (۱-۱) و (۱-۲) F_L نیروی لیفت وارد بر پره ها، F_D نیروی درگ وارد بر پره ها، ρ چگالی سیال، U_{∞} سرعت جریان آزاد و A سطح مقطع عمود بر جریان می باشد.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A} \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

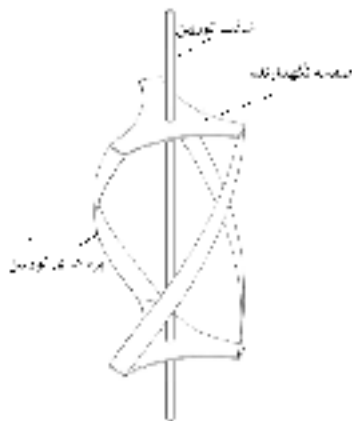
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A} \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$



شکل (۳): نمایش سرعت و نیرو در جریان چرخشی توربین داریوس

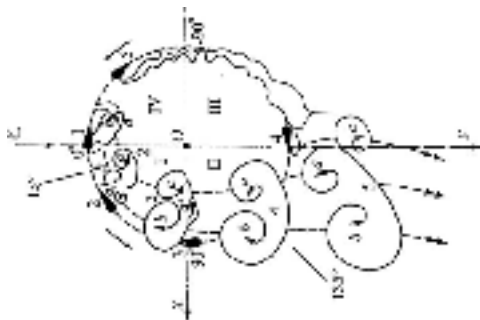
توربین توراب به علت داشتن پره های مارپیچی مزیت های بیشتری نسبت به توربین داریوس دارد. در توربین داریوس به علت صافی پره ها، زاویه حمله مقطع ایرفویلی شکل پره ها در هر درجه از دوران توربین متفاوت است که این امر باعث تفاوت ضریب درگ و لیفت و ایجاد ناپایداری در توربین داریوس می شود.

همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است توربین توراب از دو صفحه نگه دارنده برای نگه داشتن سه پره مارپیچی، یک شافت در وسط توربین و عمود بر دو صفحه نگه دارنده است. یک سیکل کامل توربین توراب سه پره به این معنی است که اختلاف فاز محل نصب یک پره ی توربین در صفحه نگه دارنده پایینی با محل نصب همان پره در صفحه نگه دارنده بالایی برابر با ۱۲۰ درجه باشد. در یک سیکل کامل توربین توراب به علت اینکه پره ها مارپیچی است توربین تمام زاوایای حمله مقطع ایرفویلی شکل پره ها را تامین می کند. توربین توراب پایداری زیادی نسبت به توربین داریوس دارد.



شکل (۴): شماتیک اجزا توربین توراب

شکل (۵) یک مقطع از توربین توراب همراه با ساختار شماتیک جریان سیال اطراف آن را نشان می دهد [۵]. در این شکل آب به سمت راست حرکت می کند. ورتکس های **a** و **b** به صورت بسته اطراف تیغه ها را می گیرد که این خود باعث افزایش لیفت می شود شکل (۵).



شکل (۵): ساختار جریان اطراف پره ی توربین توراب

۱-۱. پارامتر های موثر در توربین توراب

پارامتر های موثر در عملکرد توربین توراب عبارتند از تعداد پره ها، طول کورد ایرفویل مقطع پره ها، شعاع نصب پره ها بر روی صفحات نگه دارنده، سرعت جریان آب و سرعت چرخشی توربین.

۲-۱. مزایای توربین توراب

از مزایای توربین توراب پایداری توربین، عدم وجود نوسانات گشتاور تولیدی و بازده بالای توربین (در حدود ۳۵٪) است [۶].

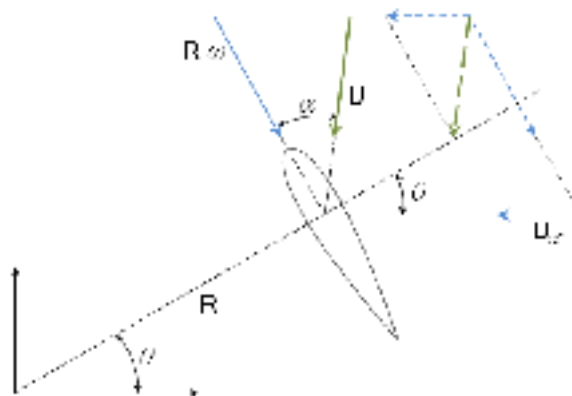
۳-۱. تحلیل های زاویه ای توربین توراب:

در این قسمت به ارائه روابط تنوری مربوط به زوایای توربین توراب پرداخته می شود. این روابط از معادله مهم زاویه ای بدست می آید. سرعت جریان آب بر روی پره های توربین، U ، برآیند سرعت مماسی، $R \cdot \omega$ و سرعت جریان آب، U_{∞} بدست می آید. رابطه ی (۳-۱) برآیند سرعت آب را نشان می دهد. برای بدست آوردن زاویه حمله جریان آب بر روی پره های توربین از رابطه (۴-۱) استفاده می شود. در رابطه (۴-۱) زاویه حمله جریان آب بر روی پره های توربین، θ زاویه دوران توربین است.

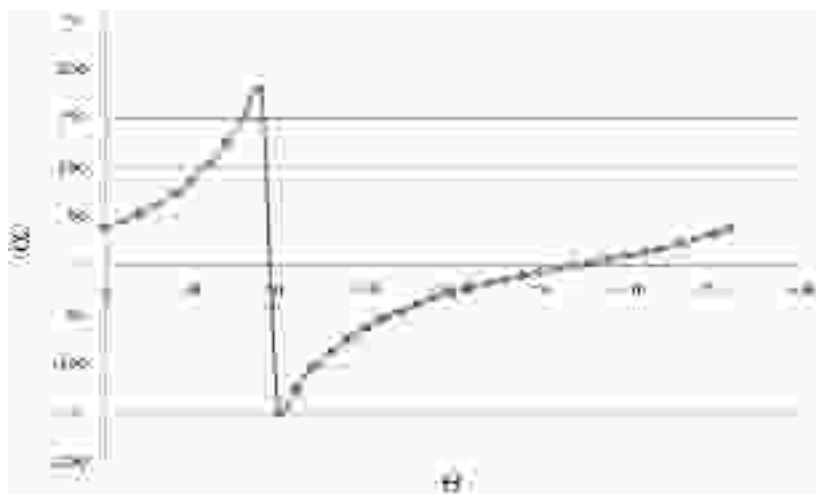
$$U^2 = U_{\infty}^2 + (R \cdot \omega)^2 - 2 \times U_{\infty} \times R \cdot \omega \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

$$\sin \alpha = \frac{R \cdot \omega}{U} \cos \theta$$

رابطه (۴-۱)



شکل (۶): تحلیل سرعت بر روی ایرفویل پره



شکل (۷): زاویه حمله جریان آب α بر حسب زاویه دوران محور θ

۲. طراحی توربین توراب

در این کار تحقیقی پس از جمع آوری اطلاعات کلی در مورد مشخصات توربین، ابعاد توربین توراب در مقیاس آزمایشی ۳۸/۵ / ۳۸/۵ / ۷۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. برای مقطع پره های توربین از ایرفویل متقارن **NACA0018** استفاده شد. سپس شبیه سازی توربین با استفاده از نرم افزار **CATIA V5R16** انجام شد. پس از اتمام شبیه سازی در **CATIA V5R16**، توربین ساخته شد و برای ساخت پره ها از روش ریخته گری با مدل فوم - کامپوزیتی استفاده شد. پره های توربین پس از ریخته گری بر روی بدنه توربین نصب شد. سپس اسکلت توربین ساخته شد و توربین بر روی اسکلت نصب شد.

۳. شبیه سازی توربین توراب

در ابتدا برای ساخت توربین توراب، توربین و اسکلت با تمام جزئیات در نرم افزار **CATIA V5R16** شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی در شکل (۸) نمایش داده شده است. در این شکل، شکل سه بعدی پره ها، محور توربین و نحوه اتصال پره ها روی محور نمایش داده شده است.



شکل (۸): شبیه سازی توربین توراب

۴. ساخت توربین توراب

در این قسمت به مراحل ساخت توربین توراب اشاره خواهد شد.

۴-۱. قالب پره برای ریخته گری

با توجه به مارپیچی بودن پره های توربین، ساخت مدل برای ریخته گیری پره ها کاری دشوار است. برای ساخت مدل پره از روش ساندویچ پتل استفاده شد که در این روش مدل پره توربین داریوس که تیغه هایی صاف هستند توسط دستگاه هات وایر از فوم فشرده بدست آمد شکل (۹). برای شکل دهی پره ها بصورت مارپیچی، پره های فومی بر روی قالب استوانه ای شکل، بصورت مارپیچ و اختلاف فازی 120° قرار داده شدند. برای حفظ شکل پره ها بر روی آن رزین کاری صورت گرفت تا شکل موردنظر بدست آید شکل (۱۰). سپس برای استحکام مدل، روی آن کامپوزیت کاری انجام گرفت. بعد از ساخت مدل، مدل برای ریخته گری به یک شرکت ریخته گری سپرده شد.



شکل (۹): تیغه صاف پره (راست) و شکل دهی مدل پره و رزین کاری (چپ)



شکل (۱۰): مدل پره آماده برای ریخته گری

۲-۴. مونتاژ پره ها

عملیات مونتاژ سه پره توربین و همچنین نصب بوشهای شافت توربین بعد از ریخته گری پره ها بر روی صفحات نگه دارنده انجام شد. شکل (۱۱). برای بدست آوردن صافی سطح بالا، بتونه کاری و رنگ آمیزی توربین در چندین مرحله انجام شد.



شکل (۱۱): عملیات مونتاژ سه پره توربین



شکل (۱۲): اتمام کار ساخت و رنگ آمیزی توربین توراب

۵. آزمایش‌های تست توربین توراب

پس از ساخت توربین مدل توراب، برای بررسی عملکرد آن در کانال آب دانشگاه تست‌هایی به شرح زیر انجام گرفت.

۱-۵. تست استاتیکی توربین توراب

به منظور بدست آوردن گشتاور و توان مصرفی برای حرکت توربین در آب توربین را بدون داشتن جریان آب در دور‌های متفاوت بوسیله یک موتور الکتریکی در آب چرخانده شد. بدین منظور از یک موتور الکتریکی و یک درایو برای چرخاندن توربین در دور و توان مشخص استفاده گردید. دوره‌های مورد آزمایش ۷۰،۶۰،۵۰ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه بودند. برای دوران توربین در آب در هر دور متفاوت توان مصرفی الکتریکی متفاوتی توسط موتور الکتریکی مصرف می‌شود که توان نشان دهنده مقدار توان مقاوم در برابر دوران توربین توسط آب می‌باشد.

۲-۵. تست اصطکاکی دستگاه‌های آزمایش

به علت وجود اصطکاک در بلبرینگ‌ها، worm Gear و همچنین خطای موجود در بستن دستگاه‌ها به یکدیگر لازم است که توان مقاوم مصرفی اصطکاک را محاسبه نمود. برای محاسبه این توان، توان مصرفی برای دوران توربین در سیال هوا را در دور‌های متفاوت محاسبه شد. لازم به ذکر است، به علت اینکه هر یک از تست‌های توربین یکی از توان‌های مصرفی توربین را می‌دهد، در تمامی آزمایش‌ها، دور توربین در بازه ۵۰ تا ۲۵۰ با فواصل معین تعیین و بازده توربین محاسبه شد.

۳-۵. تست دینامیکی توربین توراب

برای تعیین توان تولیدی توربین از دستگاه ساده تست دینامیکی استفاده شده است. در این دستگاه مقدار جرمی که در یک بازه زمانی توربین قادر به بالا کشیدن آن در یک ارتفاع می شود، توان تولیدی توربین را نشان می دهد.

۶. طراحی و ساخت دستگاه های تست توربین

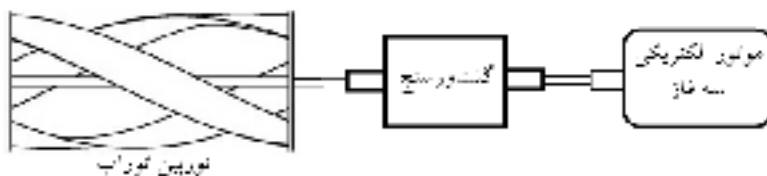
در این قسمت تجهیزات و دستگاه های مورد استفاده جهت تست تشریح می شود.

۱-۶. دستگاه تست استاتیکی

برای ساخت دستگاه تست استاتیکی شکل (۱۳)، از یک موتور الکتریکی سه فاز و یک درایور موتور سه فاز به منظور کنترل توان و آمپر و ولتاژ و دور موتور و دستگاه گشتاور سنج استفاده شد. در این دستگاه همانطور که در شکل های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است گشتاورسنج باید بین توربین و موتور الکتریکی سه فاز قرار گیرد.



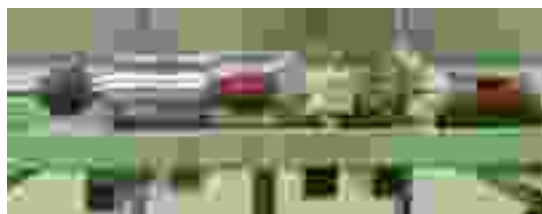
شکل (۱۳): دستگاه تست استاتیکی



شکل (۱۴): دستگاه تست استاتیکی

۱-۱-۶. تجهیزات دستگاه تست استاتیکی

در تست استاتیکی توربین توراب از درایور موتور سه فاز Delta، موتور سه فاز ۲۵۰ وات و ۱۴۰۰ rpm و همچنین گشتاور سنج استفاده شده است شکل (۱۶).



شکل (۱۵): نحوه مونتاژ تجهیزات دستگاه تست استاتیکی



شکل (۱۶): تجهیزات دستگاه تست استاتیکی

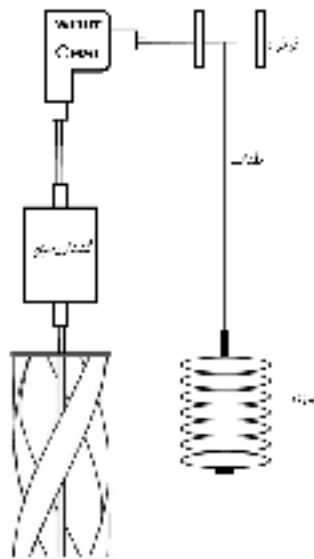
۲-۶. دستگاه تست دینامیکی

در این کار تحقیقی برای محاسبه توان تولیدی توربین به جای تولید برق از بالا بردن وزنه ها استفاده شد. بدین گونه که توربین تعدادی وزنه را بالا برد. به این صورت توان تولیدی توربین از فرمول ساده زیر بدست می آید:

دور توربین = گشتاور شافت توربین = توان

برای استفاده از این روش مبنای شروع بالارفتن وزنه و ثبت زمان از جایی است که توربین به سرعت دلخواه و ثابت رسیده است.

در شکل (۱۷) نحوه مونتاژ اجزا دستگاه تست دینامیکی توربین نشان داده شده است.



شکل (۱۷): نحوه مونتاژ اجزا دستگاه تست دینامیک-وزنه ای

۱-۲-۶. تجهیزات دستگاه تست دینامیک-وزنه ای

در تست دینامیک-وزنه ای توربین توراب از وزنه های ۵ تا ۶۰ کیلو گرمی، گشتاور سنج، قرقه و worm Gear استفاده شده است

شکل (۱۸).



شکل (۱۸): تجهیزات دستگاه تست دینامیک-وزنه ای

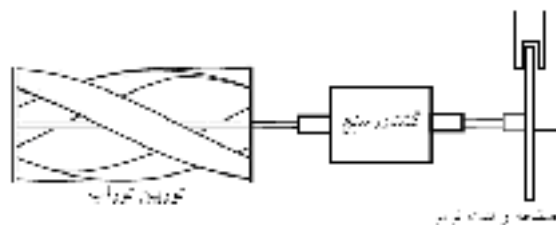
در شکل (۱۹) توربین مجهز به دستگاه تست دینامیکی شده و آماده تست می باشد.



شکل (۱۹): دستگاه تست دینامیک-وزنه ای

۳-۶. دستگاه تست دینامیکی لنت و ترمز

برای انجام تست های دقیق دینامیکی از سیستم ترمز استفاده شد شکل (۲۰). در این دستگاه که در شکل (۲۱) نشان داده شده است از یک صفحه ترمز و لنت به عنوان تولید کننده ی گشتاور منفی بر روی توربین استفاده می شود.



شکل (۲۰): دستگاه تست دینامیکی لنت و ترمز



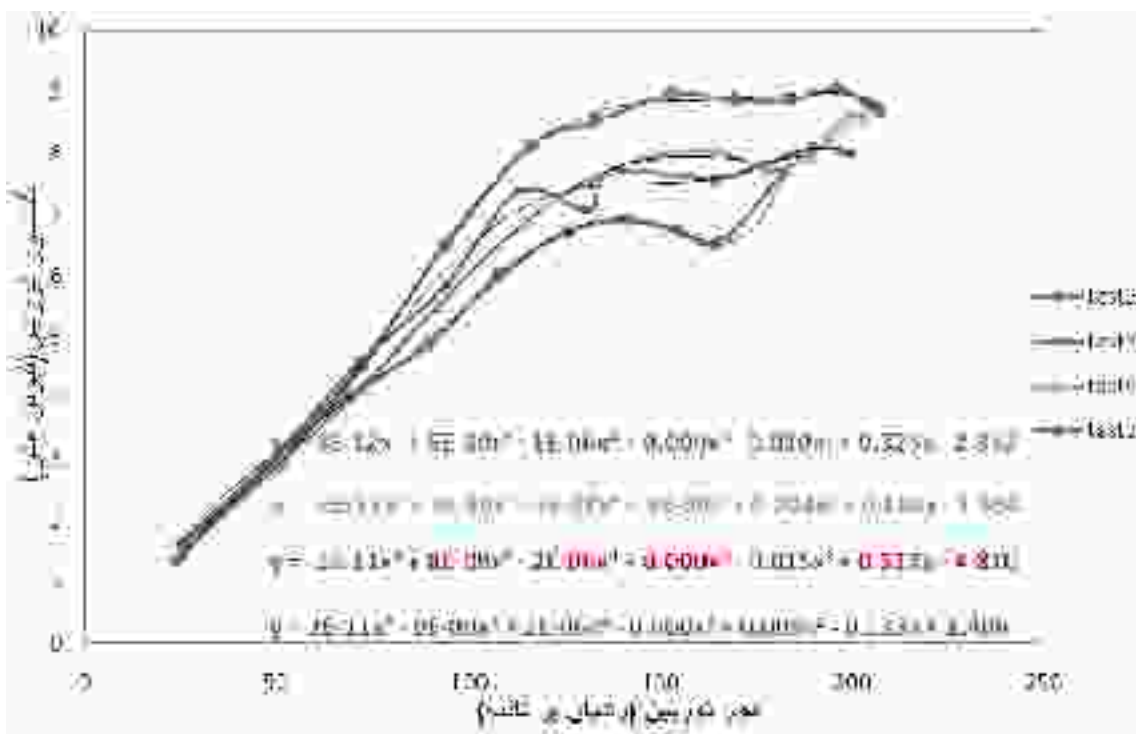
شکل (۲۱): صفحه ترمز و لنت

۷. نتایج تست توربین

پس از انجام تست های توربین نتایج زیر بدست آمد:

۱-۷. تست استاتیکی توربین توراب

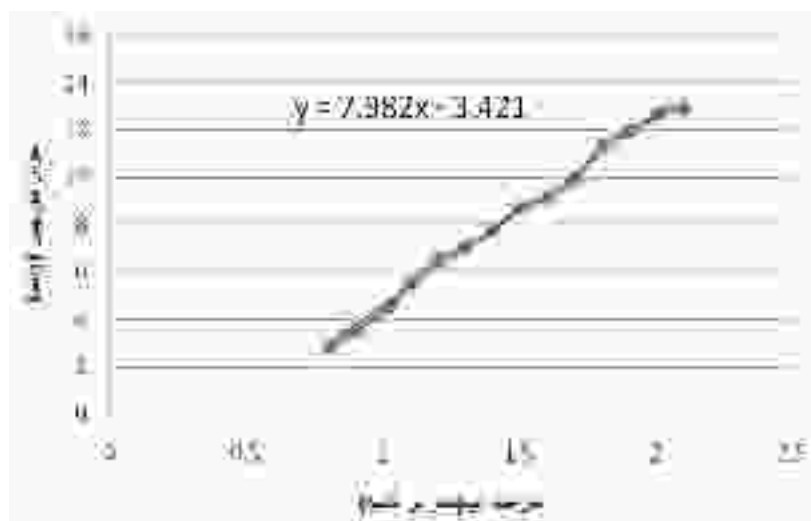
در این تست گشتاور توربین در دورهای مختلف محور توربین در چهار تست مختلف اندازه گیری شد. نتایج حاصل در شکل (۲۳) آورده شده است. همان طوری که دیده می شود گشتاور شکل سهموی داشته و کلیه تست ها روند تقریباً یکسانی را طی می کنند.



شکل (۲۲): نتایج تست استاتیکی توربین توراب

۲-۷. تست اصطکاکی دستگاه های آزمایشی تست توراب

همچنین توان توربین بر حسب سرعت آب در شکل (۲۳) نمایش داده شده است. این شکل نیز نتایج چهار تست مختلف را نشان می دهد که همگی مشابه هم اند و با افزایش سرعت آب قدرت توربین تقریباً به صورت خطی افزایش یافته است. بازده منفی محاسبه شده برای تست اصطکاکی دستگاه های آزمایشی تست توراب در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۲۳): نتایج تست اصطکاکی دستگاه های آزمایشی تست توراب

جدول (۱): محاسبه بازده منفی اصطکاکی وسایل آزمایشگاهی

سرعت آب (m/s)	گشتاور (N.m)	دور (Rpm)	توان توربین (w)	توان آب (w)	بازده منفی
0.77	-0.090	0	0	81.49114	0
0.8	-0.225	120.75	-284.366	87.9648	-3.23273
0.9	-0.255	131.25	-350.306	111.3305	-3.14654
1.02	-0.285	152.25	-454.162	142.9978	-3.17601
1.1	-0.315	168	-553.896	166.3085	-3.33053
1.2	-0.330	189	-652.806	197.9208	-3.29832
1.3	-0.330	204.75	-707.207	232.2821	-3.0446
1.4	-0.345	215.25	-777.268	269.3922	-2.88526
1.5	-0.345	241.5	-872.057	309.2513	-2.8199
1.6	-0.345	252	-909.972	351.8592	-2.58618
1.7	-0.36	262.5	-989.1	397.2161	-2.49008
1.8	-0.375	288.75	-1133.34	445.3218	-2.545
1.9	-0.375	304.5	-1195.16	496.1765	-2.40874
2	-0.39	309.75	-1264.4	549.78	-2.29983
2.1	-0.39	315	-1285.83	606.1325	-2.12137

۳-۷. تست دینامیکی توربین توراب

۱-۳-۷. تست دینامیک-وزنه ای

نتایج تست های دینامیکی توربین در جداول (۲) تا (۸) آمده است. در این جداول وزن وزنه ها، سرعت آب، گشتاور محور و دور محور نمایش داده شده است. با توجه به جدول (۹) توربین توراب دارای بازده ۲۲ درصد است که به علت اصطکاک در وسایل و خطاهای موجود در تست با بازده تئوری توربین گارلاو ۱۳ درصد تفاوت دارد.

جدول (۲): وزنه ۵ کیلوگرمی

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm
5	0.86	0.42	105
5	0.91	0.45	131.25
5	1.04	0.45	152.25
5	1.09	0.45	157.5
5	1.15	0.48	162.75
5	1.36	0.48	210
5	1.51	0.495	231
5	1.59	0.501	241.5
5	1.68	0.51	252
5	1.85	0.525	288.75
5	2.04	0.555	357

جدول (۳): وزنه ۱۰ کیلوگرمی

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm
10	1.01	0.63	147
10	1.1	0.63	168
10	1.22	0.63	173.25
10	1.35	0.66	199.5
10	1.42	0.66	225.75
10	1.54	0.75	241.5
10	1.65	0.78	252
10	1.85	0.81	283.5
10	1.94	0.81	283.5
10	2.1	0.81	299.25

جدول (۴): وزنه ۲۰ کیلوگرمی

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm
20	0.82	1.02	73.5
20	0.94	1.05	115.5
20	1.03	1.11	141.75
20	1.11	1.08	162.75
20	1.17	1.08	168
20	1.27	1.14	183.75
20	1.49	1.17	220.5
20	1.6	1.14	241.5
20	1.8	1.17	273
20	1.98	1.14	304.5
20	2.03	1.17	304.5

جدول (۵): وزنه ۳۰ کیلوگرمی

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm
30	0.92	1.44	84
30	1.02	1.47	131.25
30	1.12	1.5	141.75
30	1.24	1.53	178.5
30	1.38	1.56	199.5
30	1.52	1.56	231
30	1.64	1.56	236.25
30	1.65	1.56	236.25
30	1.78	1.53	262.5
30	2.03	1.53	299.25

جدول (۶): وزنه ۴۰ کیلوگرمی

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm
40	1.1	1.83	136.5
40	1.23	1.83	162.75
40	1.35	1.86	178.5
40	1.5	1.89	267.75
40	1.64	18.6	252
40	1.73	1.86	262.5
40	1.98	1.89	304.5

جدول (۷): وزنه ۵۰ کیلوگرمی

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm
50	1.28	2.19	173.25
50	1.37	2.22	199.5
50	1.58	2.19	215.25
50	1.66	2.19	241.5
50	1.74	2.22	252
50	1.8	2.22	262.5
50	2	2.22	304.5

جدول (۸): وزنه ۱۰۰ کیلوگرمی

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm
100	1.31	3.96	168.5
100	1.39	3.96	182.25
100	1.6	3.99	198
100	1.7	3.99	223.5
100	1.81	4.02	257.25
100	1.92	4.02	265.25
100	2	4.05	285.5

جدول (۹): محاسبه بازده توربین توراب

وزنه kg	سرعت آب m/s	گشتاور N.m	دور rpm	توان توربین (w)	توان آب (w)	بازده
100	1.31	3.96	168.5	69.83988	308.9889	22.60272
100	1.39	3.96	182.25	75.53898	369.1249	20.46434
100	1.6	3.99	198	82.68876	562.9747	14.68783
100	1.7	3.99	223.5	93.33807	675.2673	13.82239
100	1.81	4.02	257.25	108.24051	815.0133	13.28083
100	1.92	4.02	265.25	111.60659	972.8203	11.47248
100	2	4.05	285.5	121.02345	1099.56	11.00653

۲-۳-۷. تست دینامیک-لنت و ترمز

نتایج تست های دینامیکی-لنت و ترمز توربین در جداول (۱۰) تا (۱۴) آمده است. در این جداول سرعت آب، گشتاور محور و دور محور و بازده توربین نمایش داده شده است.

جدول (۱۰): سرعت آب ۱/۳ متر بر ثانیه

دور توربین (rpm)	گشتاور توربین (N.m)	سرعت آب (m/s)	توان توربین (w)	توان آب (w)	بازده توربین
330	2.7	1.3	93.258	603.93333	15.44177
360	2.49	1.35	93.8232	676.3324838	13.87235
330	2.4	1.26	82.896	549.8833586	15.0752
340	2.25	1.33	80.07	646.7163849	12.38101
270	1.8	1.26	50.868	549.8833586	9.250689
270	2.25	1.32	63.585	632.2382035	10.05713
260	3	1.3	81.64	603.93333	13.51805
250	5.7	1.35	149.15	676.3324838	22.05276

جدول (۱۱): سرعت آب ۱/۴ متر بر ثانیه

دور توربین (rpm)	گشتاور توربین (N.m)	سرعت آب (m/s)	توان توربین (w)	توان آب (w)	بازده توربین
300	2.58	1.4	81.012	754.2982	10.7400501
290	3.6	1.4	109.272	754.2982	14.4865792
310	3.75	1.43	121.675	803.8353	15.136808
300	3.12	1.4	97.968	754.2982	12.9879675
300	3	1.39	94.2	738.2498	12.7599085
300	2.85	1.4	89.49	754.2982	11.8640088
320	3.81	1.44	127.6096	820.8171	15.5466539
300	4.05	1.4	127.17	754.2982	16.8593809
300	4.2	1.4	131.88	754.2982	17.4838024
300	3.81	1.4	119.634	754.2982	15.8603065
280	5.1	1.4	149.464	754.2982	19.8149761
280	6	1.4	175.84	754.2982	23.3117366
270	6.45	1.4	182.277	754.2982	24.1651126
440	5.55	1.4	255.596	754.2982	33.8852742
220	6.09	1.4	140.2324	754.2982	18.5911099
300	4.5	1.4	141.3	754.2982	18.7326455
290	5.1	1.4	154.802	754.2982	20.5226538

جدول (۱۲): سرعت آب ۱/۶ متر بر ثانیه

دور توربین (rpm)	گشتاور توربین (N.m)	سرعت آب (m/s)	توان توربین (w)	توان آب (w)	بازده توربین
490	2.94	1.59	150.7828	1104.96956	13.64588
450	4.11	1.59	193.581	1104.96956	17.51913
450	5.4	1.57	254.34	1063.794887	23.90874
450	5.1	1.56	240.21	1043.596794	23.01751
450	5.4	1.58	254.34	1084.251926	23.45765
500	4.05	1.56	211.95	1043.596794	20.30957
430	5.4	1.62	243.036	1168.702532	20.79537

جدول (۱۳): سرعت آب ۱/۷ متر بر ثانیه

دور توربین (rpm)	گشتاور توربین (N.m)	سرعت آب (m/s)	توان توربین (w)	توان آب (w)	بازده توربین
300	5.28	1.7	165.792	1350.53457	12.27603
270	6.9	1.7	194.994	1350.53457	14.43828
270	6.6	1.7	186.516	1350.53457	13.81053
270	8.4	1.7	237.384	1350.53457	17.57704
250	8.85	1.7	231.575	1350.53457	17.14691

جدول (۱۴): سرعت آب ۱/۸ متر بر ثانیه

دور توربین (rpm)	گشتاور توربین (N.m)	سرعت آب (m/s)	توان توربین (w)	توان آب (w)	بازده توربین
300	2.55	1.8	80.07	1603.15848	4.994516
300	3.3	1.8	103.62	1603.15848	6.463491
280	3.6	1.8	105.504	1603.15848	6.581009
270	4.95	1.8	139.887	1603.15848	8.725713

۸. نتیجه گیری

یک توربین توراب در مقیاس آزمایشگاهی با ارتفاع ۰/۸ متر و قطر ۰/۳۸ متر طراحی، ساخته و در سرعت جریان های آب متفاوت تست شده است. از نتایج بدست آمده این نکته حاصل می شود که گشتاور این توربین بر حسب سرعت جریان آب از یک منحنی سهمی پیروی می کند.

باید به این نکته اشاره کرد که ساخت آسان، حمل و نقل و نصب راحت از خصوصیات این توربین می باشد. همچنین برای کاهش بیشتر وزن توربین می توان پره ها را با مواد خاص کامپوزیتی (پارچه های کربنی) که کشش آنها دوازده برابر فولاد می باشد، ساخت. با توجه به تست های مختلفی که انجام شد، با تغییر جهت جریان آب، جهت گردش پره های توربین ساعت گرد می باشد که از این مهم می توان در پدیده جذر و مد و یا امواج آب دریاها و یا حرکت های متلاطم رودخانه ها استفاده کرد. با توجه به سرعت میانگین ۲/۲ رودخانه زاینده رود می توان از این رودخانه به عنوان منبع مناسب برای تولید انرژی الکتریکی با استفاده از این توربین استفاده نمود. در ضمن با توجه به مشخصات رودخانه می توان تعداد توربین های داخل رودخانه را افزایش داد و آنها را به صورت سطری ستونی در کنار یکدیگر قرار داد. این توربین ها حتی می توانند به عنوان جاذبه های گردش گری نیز در محل های مناسب مثلاً نزدیک پل های تاریخی نصب گردند. با توجه به محاسبات انجام شده بازده توربین در حالت بهینه ۳۳/۸۸ درصد است.

منابع:

[1]. A.M. Gorlov, The helical turbine: A new idea for low-head hydropower, Hydro Review 14 (5), 44-50, (1995).

[2]. Gorban AN, Gorlov AM and Silantyev VM, "Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow ", J. of Energy Resources Technology 2001;123(4):311-317

[3]. EPRI-TP-004 NA, " EPRI North American tidal In Stream Energy Conversion Feasibility Demonstration Project", November 9,2005

[4]. Linda Guittet , Milé Kusulja , Thierry Maitre , "Setting up of an Experiment to Test Vertical Axis Water- Turbines"- 20th of October 2004

[5]. Thierry Maître, Assist Prof, Jean-Luc Achard, Senior Researcher," MARINE TURBINE DEVELOPMENT: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS", I.N.P. Grenoble, France

[6]. Gorlov, A. M., 1998, "Helical turbines for the Gulf Stream," Marine Technology,35, No 3, pp. 175-182.