

تصحیح هیل چارت نیروگاه مارون بر اساس شبیه سازی عددی

جعفر نژادرجبعلی بیشه^{*۱}

مهدی درویش پسند^۲

علیرضا ریاسی^۳

سید احمد نوربخش^۴

چکیده

مهمترین هدف این مقاله، تصحیح هیل چارت نیروگاه مارون است. به این منظور از روش های عددی به کمک نرم افزار ANSYS CFX برای شبیه سازی جریان در اجزای توربین (محفظه حلزونی، پره های ثابت، پره های متحرک، رانر و درافت تیوب) استفاده شده است. هندسه چرخ به وسیله CMM و هندسه سایر اجزا به کمک نرم افزار CATIA توسط نقشه های موجود رسم شده است. شبیه سازی جریان برای دبی های مختلف ورودی در باز شدگی های متفاوت پره های متحرک شکل گرفت تا اطلاعات کافی برای رسم هیل چارت به دست آید. نتایج نشان داد که در مقایسه با هیل چارت قبلی در بهترین نقطه کاری توربین میزان هد افزایش پیدا کرده است و این در حالی است که مقدار بازده کاهش یافته است. این تغییرها به طور مشابه در سایر نقاط کاری توربین نیز مشاهده می شود. همچنین نتایج، حاکی از شکل گیری حباب های بخار یا گاز یا کاویتاسیون (Cavitation) شدید در لبه خروجی چرخ می باشد.

واژه های کلیدی

توربین فرانسسیس، شبیه سازی عددی، چرخ توربین، پره های متحرک، توربولانس.

* J.nejad@ut.ac.ir

ariasi@ut.ac.ir

J.nejad@ut.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران.

۲. مدیر دفتر فنی نیروگاه مارون، بهبهان، خوزستان.

۳. استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران.

۴. استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران.

مقدمه

توربین‌های آبی نقش بسیار مهمی در گسترش نیروگاه‌های آبی در سراسر دنیا ایفا می‌کنند. به منظور تولید الکتریسیته، در اواخر قرن هجدهم آشنایی با نیروگاه‌های آبی آغاز شد. تا اواخر جنگ جهانی دوم، دو هزار واحد آبی کوچک با توان کمتر از ۱ مگاوات در چرخه تولید وجود داشت که هنوز هم بیشترین تولید توان آبی را در اروپای غربی دارند.

هرچند در کشورهای توسعه یافته، نیروگاه‌های آبی کوچک، تنها یک روش کمکی در تولید انرژی تجدیدپذیر پاکیزه است؛ اما در کشورهای در حال توسعه، نقش مهمی را در تأمین الکتریسیته ایفا می‌کنند (۱، ۱۳۸۴ و ۲، ۱۳۸۶).

در حال حاضر حدود ۱۵ درصد برق تولیدی در ایران از نیروگاه‌های برقابی تأمین می‌شود که بیشتر آنها به دلایل مختلف قادر به تولید توان نامی خود نیستند. بنابراین، عیب‌یابی و رفع مشکل این نیروگاه‌ها، سبب کارکرد بهینه و افزایش تولید آنها خواهد شد.

نیروگاه مارون که روی رودخانه مارون در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان احداث شده است، دارای ۲ واحد (توربین فرانسس) می‌باشد که هر یک با ظرفیت ۷۵ مگاوات است. بروز مشکل در واحد ۱ نیروگاه، مسئولان را بر آن داشت تا با بررسی‌های علمی، برای رفع مشکل موجود و افزایش تولید برق تا ظرفیت نامی نیروگاه راهکاری بیابند. در دهه‌های اخیر با گسترش قدرت رایانه‌ها، شبیه‌سازی عددی جریان «CFD» به عنوان یکی از مرحله‌های فرایند طراحی، سبب کاهش در زمان و هزینه شده است.

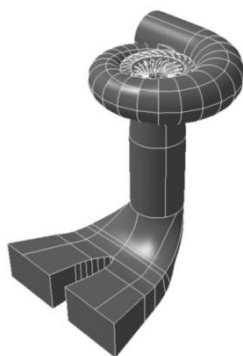
در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عددی به کمک نرم افزار «ANSYS CFX»، جریان آب در همه اجزای توربین فرانسس (محفظه حلزونی، پره‌های ثابت، پره‌های متحرک،

چرخ و درافت تیوب) به صورت یکپارچه، مورد بررسی قرار گرفته است.

برای به دست آمدن اطلاعات کافی برای رسم هیل چارت، مطالعه مورد نظر برای پنج دبی مختلف ورودی و چهار بازشدگی پره‌های متحرک (Wicket gate) گرفت. با حل دو فازي جریان، احتمال وقوع کاویتاسیون در بین پره‌های چرخ توربین بررسی شد تا اطلاعات کاملی از شرایط عملکرد نیروگاه به دست آید.

تهیه نقشه‌های سه‌بعدی اجزای توربین

نقشه‌های سه‌بعدی تمامی اجزای توربین فرانسس (محفظه حلزونی، پره‌های ثابت، پره‌های متحرک در بازشدگی‌های مختلف، چرخ و درافت تیوب) با استفاده از نقشه‌های موجود، به وسیله نرم افزار «CATIA» تولید شده است. (لازم به توضیح است؛ باتوجه به اینکه طراحان خارجی، نقشه چرخ را در اختیار مشتری قرار نمی‌دهند، نقشه سه‌بعدی چرخ توسط روش «CMM» اپتیک تهیه شده است).



شکل (۱): شماتیک سه‌بعدی اجزای توربین نیروگاه مارون

تولید شبکه محاسبه‌ای

یکی از مسائل اساسی در حل صحیح عددی مسائل جریان سیالات، شبکه محاسبه‌ای مناسب است. با در نظر گرفتن محدودیت‌های سخت‌افزاری ظرفیت رایانه مورد استفاده، برای استفاده صحیح از تابع محاسبه‌ای، لازم است که شبکه محاسبه‌ای تا حد امکان کوچک‌تر انتخاب شود.

(۲)

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + (\rho v_i v_j)_{,j} = -p_{,i} + \left(\mu [v_{i,j} + v_{j,i} - \rho v_i' v_j'] \right)_{,j}$$

مشخصه‌های جریان و شرایط مرزی

با مطالعه های صورت گرفته مقرر شد تا مجموعه محفظه حلزونی، پره های ثابت و راهنما، چرخ و درافت تیوب، برای تحلیل مورد بررسی قرار گیرد. ویژگی قابل توجه این تحلیل، حل جریان سیال به صورت یکپارچه؛ یعنی از ورودی محفظه حلزونی تا خروجی درافت تیوب است.

انتخاب شرایط مرزی از نکته های اساسی در تحلیل هر طرح است. شرایط مرزی مناسب نیز بر حسب دبی های مورد مطالعه، به ترتیب دبی ورودی به عنوان شرط مرزی ورودی محفظه حلزونی، و برای خروجی درافت تیوب، شرط مرزی فشار (استاتیک) میانگین (Average static pressure) در نظر گرفته شده است. با انتقال اطلاعات مربوط به شرایط کاری توربین، به صورت شرایط مرزی مناسب با نرم افزار، شرایط برای حل جریان فراهم شد.

جدول (۱): مشخصه های کاری توربین

اندازه	کمیت
m ³ /sec ۷۰	دبی
rpm ۲۵۰	سرعت دوران توربین
m ۱۲۱	هد توربین

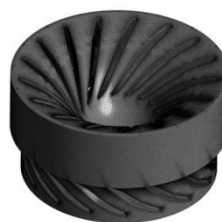
برای حل معادله های جریان، از روش دو معادله ای $k - \epsilon$ استفاده شده است که در این مدل لزجت اغتشاش به صورت زیر تعریف می شود (۲، ۱۳۸۶):

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (۳)$$

که ϵ نسبت هدررفت انرژی جنبشی توربولانت و C_μ ثابت مدل می باشد.

پس از آنکه هندسه چرخ به روش CMM و اجزای دیگر سیستم (حلزونی، پره های ثابت، پره های متحرک و درافت تیوب) با کمک نقشه های موجود و با استفاده از نرم افزار CATIA طراحی شد، برای حل مسئله از روش عددی، به کمک نرم افزار Gambit شبکه محاسبه ای مناسب برای چرخ و برای سایر اجزا با نرم افزار ANSYS ایجاد گردید.

از آنجا که چرخ از اصلی ترین اجزای توربین است، به منظور ایجاد شبکه بندی مناسب برای آن، یکی از پرها به طور مجزا و با استفاده از نرم افزار Gambit مش بندی و در نهایت باتوجه به تعداد پرها حول محور z چرخانده شد تا شکل چرخ به دست آید. برای ایجاد شبکه محاسباتی مناسب برای اجزای توربین تلاش شد تا در نواحی با گرادیان های شدید، اندازه سلول های محاسباتی ریزتر انتخاب شود. سرانجام همه اجزای محاسباتی در نرم افزار ANSYS CFX بر یکدیگر منطبق شد تا حوزه محاسباتی واحدی را شکل دهند.



شکل (۲): تولید شبکه محاسباتی برای چرخ توربین

مدل سازی عددی جریان توربولانس

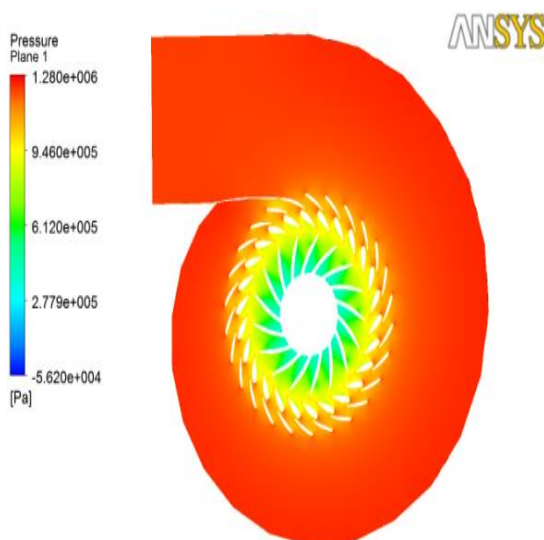
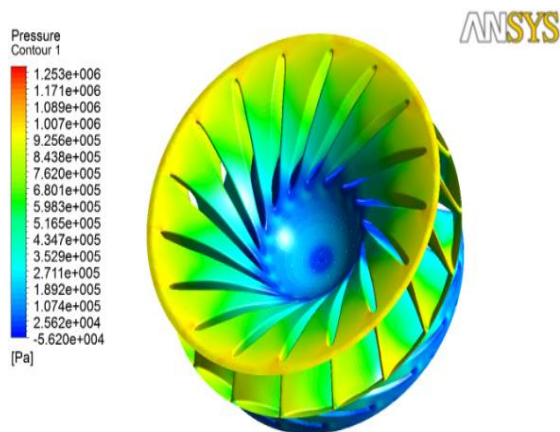
یکی از مشخصه های مهم در جریان مغشوش، دارا بودن طیف وسیعی از طول های مشخصه است که حل جریان را به روش عددی، دشوار و زمان بر می سازد. در شبیه سازی حاضر، جریان مغشوش از طریق روش میانگین «رینولدز» معادله های «ناویر-استوکس» (RANS) انجام شده است (۳، ۲۰۰۳).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v_i)_{,i} = 0 \quad (۱)$$

تحلیل جریان برای حالت‌های مختلف و رسم هیل چارت

مجموعه در پنج دبی مختلف و برای چهار بازشدگی مختلف پره‌های متحرک (بازشدگی ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰) درصد) تحلیل شد که نتایج آن در ادامه ارائه گردیده و مورد بررسی قرار گرفته است.

میزان بازشدگی پره‌های راهنما نسبت به حداکثر سطح عبوری جریان (زاویه ۲۷/۵ درجه نسبت به حالت بسته بودن کامل پره‌های متحرک) سنجیده می‌شود. نتایج به‌دست آمده از محاسبات برای مجموعه توربین نیروگاه مارون در حالت‌های مختلف در زیر ارائه شده است.



تابع دیواره در نظر گرفته شده به صورت زیر تعریف می‌شود:
که در آن:

$$U^* = \frac{1}{k} \ln(Ey^*) \quad (۱)$$

$$(۲)$$

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu}, \quad U^* = \frac{U_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho}$$

در تحلیل مجموعه حاضر، برای گسسته‌سازی معادله‌های مومنتوم، فشار، انرژی جنبشی توربولانس و نرخ هدررفت توربولانس از مدل Upwind Second Order و از مدل Simple برای کوپل معادله‌های سرعت و فشار استفاده شده است.

مشخصه‌های هیدرولیکی

در تولید انرژی، هدررفت هیدرولیکی با در نظر گرفتن بازده هیدرولیکی به حساب می‌آید که به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\eta_h = \frac{\text{Power developed by the turbine runner}}{\text{Power supplied by the water jet at entrance of the turbine}} \quad (۶)$$

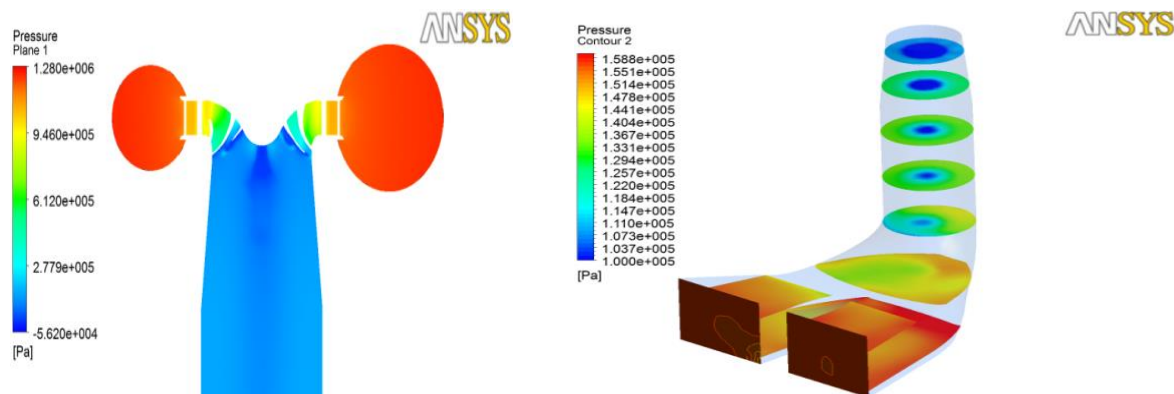
مفاهیم مهم به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$e_{hid} = \frac{p_{obs1} - p_{obs2}}{\rho} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + g(z_1 - z_2), \quad (۷)$$

$$P = M.\omega \quad (۸)$$

$$\eta = \frac{P}{\rho.Q.e_{hid}} \quad (۹)$$

مشخصه‌های هیدرولیکی بالا به‌طور مستقیم و یا از طریق اطلاعات به دست آمده (گشتاور دورانی (M) نیوتن - متر)، توان خروجی (P)، بازده (η) محاسبه می‌شوند (۴، ۲۰۰۸، ۵، ۲۰۱۰).

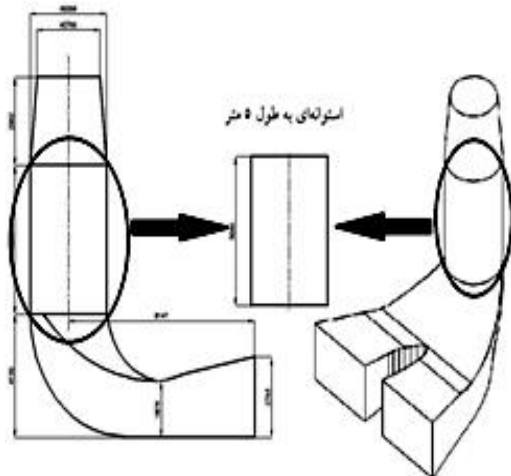


شکل (۳): کانتورهای فشار در قسمت‌های مختلف توربین

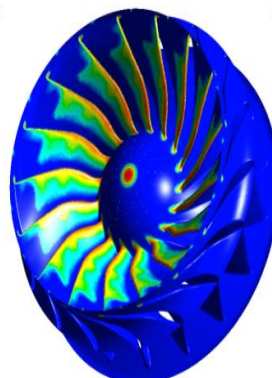
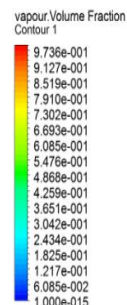
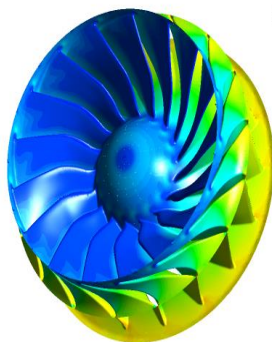
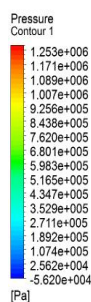
جدول (۲): مشخصه‌های هیدرولیکی و نتایج حاصل از تحلیل

WG opening	Q (m ³ /s)	Head (m)	Torque (N-M)	Power (Watt)	η (%)	E	Q11	Qed	N11	Ned
100 %	55	90.7276	1.48E+06	3.88E+07	79.491	890.0378	0.75801	0.242014	72.44016	0.385473
	60	102.835	1.87E+06	4.90E+07	81.051	1008.811	0.776717	0.247987	68.04224	0.36207
	65	116.477	2.34E+06	6.14E+07	82.792	1142.639	0.790633	0.25243	63.93358	0.340207
	70	131.288	2.85E+06	7.46E+07	82.886	1287.935	0.801987	0.256055	60.21942	0.320443
	75	146.947	3.40E+06	8.91E+07	82.571	1441.55	0.8122	0.259315	56.9205	0.302889
80 %	50	93.488	1.46E+06	3.82E+07	83.487	917.1173	0.67885	0.21674	71.36268	0.379739
	55	106.627	1.92E+06	5.02E+07	87.411	1046.011	0.699215	0.223242	66.82139	0.355574
	60	123.846	2.43E+06	6.37E+07	87.590	1214.929	0.70777	0.225974	62.00234	0.32993
	65	142.181	3.01E+06	7.88E+07	87.085	1394.796	0.715607	0.228476	57.86665	0.307923
	70	161.34	3.64E+06	9.52E+07	86.064	1582.745	0.723451	0.23098	54.32229	0.289063
	75	181.933	4.31E+06	1.13E+08	84.534	1784.763	0.72994	0.233052	51.15562	0.272212
60%	45	109.58	1.63E+06	4.26E+07	88.260	1074.98	0.564324	0.180175	65.91488	0.35075
	47	117.56	1.84E+06	4.82E+07	89.001	1153.264	0.569049	0.181683	63.63841	0.338636
	50	129.393	2.17E+06	5.69E+07	89.834	1269.345	0.577027	0.184231	60.65878	0.322781
	55	150.824	2.78E+06	7.28E+07	89.654	1479.583	0.587908	0.187705	56.18416	0.29897
	60	174.226	3.45E+06	9.03E+07	88.242	1709.157	0.596728	0.190521	52.27483	0.278168
40%	30	107.314	992075	2.60E+07	82.385	1052.75	0.380167	0.121378	66.60716	0.354434
	35	134.317	1.52E+06	3.97E+07	86.214	1317.65	0.396446	0.126576	59.53654	0.316809
	36	140.202	1.63E+06	4.28E+07	86.550	1375.382	0.399123	0.12743	58.27362	0.310089
	38	152.409	1.88E+06	4.92E+07	86.816	1495.132	0.404073	0.129011	55.89125	0.297412
	40	164.837	2.14E+06	5.61E+07	86.903	1617.051	0.408992	0.130581	53.74298	0.28598
	43	184.965	2.57E+06	6.72E+07	86.299	1814.507	0.415055	0.132517	50.73461	0.269972

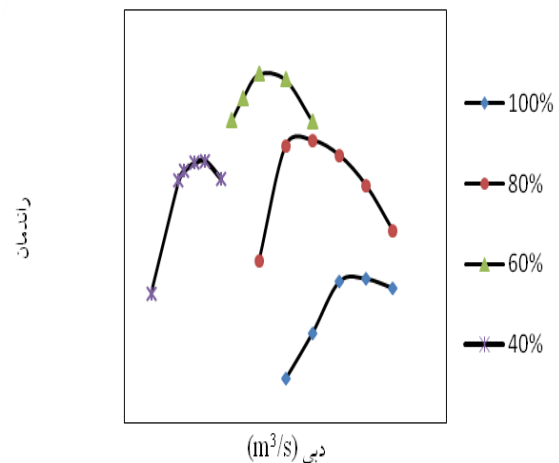
۵ متر در زیر مخروطی درافت تیوب (شکل ۵) می‌باشد. استفاده از این استوانه موجب عدم تطابق چرخ توربین طراحی شده با درافت تیوب شده و منجر به کاهش شدید فشار در زیر چرخ می‌گردد که سبب ایجاد کلویتاسیون شدید در لبه خروجی چرخ شده که در اغلب نقاط کاری توربین اتفاق می‌افتد و در نهایت باعث افت بازده می‌شود.



شکل (۵): نمایی از درافت تیوب



شکل (۶): کانتورهای کسر حجمی بخار (بالا) و فشار (پایین)



شکل (۴): تغییرهای راندمان بر حسب دبی در بازشدگی‌های مختلف پره‌های راهنما

برای رسم هیل چارت، از روش‌های میان‌یابی و برون‌یابی از داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی جریان در توربین برای شرایط مختلف استفاده شده است. نوع منحنی برای رسم هیل چارت، پارا اسپلاین (Para Spline) می‌باشد.

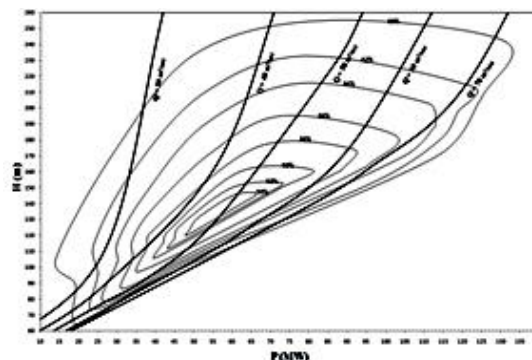
بررسی پدیده کلویتاسیون

پدیده «کلویتاسیون» شکل‌گیری حباب‌های بخار یا گاز در یک سیال، در اثر افت فشار محلی تا حد فشار بخار اشباع آن سیال، در دمای مشخص است.

با بررسی کانتورهای فشار و کسر حجمی بخار (Gas Volume Fraction) در شرایط مختلف کارکرد توربین، مشخص شد که پدیده کلویتاسیون در لبه خروجی چرخ توربین، قابل ملاحظه است. با بررسی انواع کلویتاسیون در توربین‌های فرانسیس (۶، ۲۰۰۴) مشخص شد که در اینجا کلویتاسیون بیشتر از نوع حباب‌های سیار و نیز کلویتاسیون گردابه‌ای در لوله مکش می‌باشد.

کلویتاسیون (حباب‌های سیار در منطقه خروجی چرخ یک ناحیه) همانند برفک زدگی دیده می‌شود این نوع کلویتاسیون، به سادگی با عدد «کلویتاسیون توما» قابل کنترل است. اصلی‌ترین دلیل شکل‌گیری چنین کلویتاسیونی، استفاده از یک استوانه اضافه به طول

نکته در خور توجه اینکه؛ چرخ توربین که شبیه‌سازی و تحلیل شده است، اصلی نیست. این چرخ نمونه ساخته شده توسط شرکت نیر پارس است که تفرانس‌های ساخت و CMM آن را کمی با نمونه اصلی متفاوت کرده است.



شکل (۷): هیل چارت نیروگاه مارون بر حسب

پارامترهای هد، توان، دبی و بازده

مراجع

۱. نوربخش، احمد. «توربوماشین‌ها»؛ دانشگاه تهران، (۱۳۸۴).
۲. سیدرضوی، امید. «طراحی و تحلیل رانر توربین فرانسویس به همراه نرم افزار مربوطه»؛ دانشگاه تهران، (۱۳۸۶).
3. Arun Kumar, R. P. Saini, Sanjay Jain; "CFD Approach for Prediction of Efficiency of Francis Turbine"; IGHEM- (2010).
4. Z. Čarija and Z. Mrša; "Complete Francis turbine flow simulation for the whole range of discharges"; 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics. (2003).
5. Zoran Čarija, Zoran Mrša and Sanjin Fućak; "Validation of Francis Water Turbine CFD Simulations"; ISSN 0562-1887, (2008).
6. Francois Avellan; "Introduction to cavitation in Hydraulic Machinery", 6th International Conf. on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, (2004), Timișoara.

نتیجه‌گیری

در این پروژه، جریان در توربین نیروگاه مارون، برای بازشدگی‌های مختلف پره‌های متحرک شبیه‌سازی شد و مورد تحلیل قرار گرفت، و نتایج به صورت جدول، نمودار و کانتورهای جریان ارائه شدند.

مقایسه هیل چارت به دست آمده با هیل چارت قبلی که توسط شرکت GE آلمان ارائه شده بود، نشان داد که در هیل چارت فعلی بازده حدود ۵ تا ۸ درصد کاهش یافته و در نتیجه از میزان توان خروجی کاسته شده است.

مطالعه الگوی تست نیروگاه مارون نشان داد که درافت تیوب استفاده شده در الگوی (مدل) تست، با درافت تیوب مخروطی (Cone) درافت تیوب نیروگاه مارون استوانه‌ای به طول ۵ متر قرار گرفته، که چنین استوانه‌ای در الگو وجود ندارد. پس هیل چارت ارائه شده توسط شرکت «GE» نمی‌تواند مطابقت چندانی با نیروگاه مارون داشته باشد. استفاده از یک استوانه اضافی در زیر مخروطی، منجر به کاهش شدید فشار در زیر چرخ می‌شود، که سبب ایجاد کاویتاسیون شدید در لبه خروجی چرخ شده، که در اغلب نقاط کاری توربین اتفاق می‌افتد و در نهایت باعث افت بازده می‌شود.