



1205P-NWWCE بررسی عددی افت انرژی جریان گردابهای در شفت قائم سازهی ورتکس (مطالعهی موردی فاضلابروی شرق تهران)

مجيد رحمتي'، محمدجواد خانجاني'

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازههای هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
 ۲- استاد بخش مهندسی عمران- آب و سازههای هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

majidr1990@yahoo.com

خلاصه

سازهی ورتکس یا شیب شکن گردابهای یکی از راهکارهای مؤثر و اقتصادی در مناطق شهری برای فانق آمدن بر تغییر ارتفاع شدید در مسیرهای انتقال است. در این تحقیق با توجه به مطالعهی موردی بر روی سازهی ورتکس فاضلابروی شرق تهران، پس از ایجاد هندسهی مسئله در نرمافزار 3DW-3D و اعمال شرایط مرزی و مش بندی میدان حل، عملکرد هیدرولیکی سازهی ورتکس برای شش دبی متفاوت و سه حالت ضریب زبری مانینگ جدارهی شفت قائم (مجموعاً هجده حالت) مورد ارزیابی قرار گرفته است. درنهایت حل عددی معادلات جریان بهصورت سه بعدی به وسیله SHCW-3D صورت پذیرفته است. نتایج حاکی از آن است که عملکرد شفت قائم برای مستهلک نمودن انرژی در دبی های پایین تر بهتر است. همچنین با افزایش زبری جدارهی شفت قائم درصد تأثیر اتلاف انرژی در شفت قائم افزایش می یابد. با تغییر ضریب زبری از ۱۲/۹ متر مکعب بر ثانیه تقریباً یک درصد تأثیر اتلاف انرژی در شفت قائم افزایش می یابد. با تغییر ضریب زبری از ۲۰۰۹ م بر ثانیه تقریباً ۲/۱۸ درصد تأثیر اتلاف انرژی بیشتر شده است. همچنین با تغییر ضریب زبری از ایش اندر در دبی های بر بر ثانیه تقریباً ۲/۱۸ درصد تأثیر اتلاف انرژی بیشتر شده است. موجنین با تغییر ضریب زبری از افزایش ضریب و بری تا بر تا میر می به می باد. با تغییر ضریب زبری از بری ترمی می می به به به ۲۰۱۷ می می باد بر می به میا به مورد بر و بی میزمی ترخی از میرا و بری تو به را به ۲۰۱۷ در دید بر ثانیه تقریباً ۲/۱۸ درصد تأثیر اتلاف انرژی بیشتر شده است. همچنین با تغییر ضریب زبری از ۲۰۱۷، در دبی ۲/۹ میر می بر تانیه تقریباً ۲/۱۸ درصد تأثیر اتلاف انرژی بیشتر شده است. میرانی است که در دبی های بزر گذر افزایش ضریب زبری تأثیر بیشتری

کلمات کلیدی: جریان گردابهای، شفت قائم، مدلسازی عددی، اتلاف انرژی

۱- مقدمه

عبور مجاری فاضلاب بر روی شیبهای تند باعث بروز مشکلات اساسی در پروژههای انتقال سیالات می شود. در اثر تغییر ارتفاع، انرژی پتانسیل سیال به انرژی جنبشی که همان سرعت سیال است تبدیل می شود. افزایش سرعت سیال باعث بروز مشکلاتی از قبیل کاویتاسیون، ورود مقادیر زیادی از هوا به سیال، فرسایش و غیره می گردد. این تغییرات شدید ارتفاع در سیستمهای جمع آوری و انتقال فاضلاب شهری و همچنین رواناب سطحی، بهویژه در مناطق کوهستانی بسیار مشاهده می شود[۱]. سازهی ورتکس جزء سازههای شناخته شده در این زمینه است و قادر است جریان را بدون ایجاد نوسانات شدید از شیب عبور داده و به پایین دست هدایت کند.

همچنین می توان از آن در محدوده وسیعی از دبی و ارتفاع استفاده کرد. شیب شکنهای گردابهای از سه بخش اصلی سازه ورودی، شفت قائم و مستهلک کننده انرژی تشکیل شدهاند. جریان با عبور از سازهی ورودی به صورت چرخشی وارد شفت قائم می شود. به دلیل تشکیل هستهی مرکزی هوا، فشار در این قسمت سازه تقریباً هیدرواستاتیک است. در شفت قائم، سیال سقوط آزاد نمی کند و به صورت چسبیده به دیواره حرکت می کند. در این بخش سازه هوا در مرکز آن و با فشاری کمی بیشتر از فشار اتمسفر جریان دارد. جریان در شفت قائم نوعی جریان دوفازی مایع (آب) و گاز (هوا) است و با الگوی حلقوی پایدار در جریان می باشد. بعلاوه مقدار زیادی از انرژی جریان ورودی به واسطه اصطکاک جریان با دیواره شفت مستهلک می شود و تنها مقدار کمی از انرژی جنبشی اضافی ناشی از تغییر ارتفاع، برای استهلاک در مستهلک کننده ی خروجی باقی می ماند. این اثر





مؤلفه سرعت با دیوارهی شفت است که باعث تشکیل جریان مارپیچی در شفت قائم میشود. طراحی سازه ور تکس بستگی به نوع جریان ورودی دارد و هر سه بخش آن باید بهطور دقیق طراحی گردد [۲]. در شکل (۱) نمای کلی از سازهی ور تکس(الف) به همراه برش سازه(ب) نشان داده شده است:



شکل ۱- سازهی ور تکس: الف: نمای سه بعدی سازهی ور تکس، ب: نمای برش از سازهی ور تکس[۲].

۲- تاريخچه

شیب شکن ورتکس ابتدا توسط دریولی در سال ۱۹۴۷ به عنوان یک سازه ی سرریز برای سدها معرفی شد. امروزه از این سازه ها در سیستمهای جمع آوری و انتقال فاضلاب به تونل های زیر زمینی نیز استفاده می شود. در شهر کاربن ایتالیا سازه ی ورتکسی ساخته شده که دبی ورودی ۱۴۰ مترمکعب بر ثانیه را از ارتفاع ۱۷۰ متری به پایین انتقال داده و قطر شفت قائم آن نیز ۷/۳ متر گزارش شده است [۳]. همچنین در نیروگاه شاپای در چین، سازه ی ورتکس تعبیه شده با ارتفاع ۱۰۰ متر و توانایی انتقال داده و مقر شفت قائم آن نیز ۷/۳ متر گزارش شده است [۳]. همچنین در نیروگاه شاپای در چین، سازه ی ورتکس تعبیه شده با ارتفاع ۱۰۰ متر و توانایی انتقال دبی ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه می باشد [۴]. در نیروگاه دیگری در چین یک سازه ی افت انرژی شبیه سرریز تونلی احداث شده که آب را از ارتفاع ۱۹۰ متری به پایین دست انتقال داده و برای دبی حداکثر ۱۴۰۰ مترمکعب در ثانیه تعبیه شده است [۵].

ایجاد یک جریان چرخشی در شفت قائم موضوع مهمی در سازه ی شیب شکن ورتکس میباشد. برای این منظور میتوان از سازه های ورودی متفاوتی استفاده کرد. ورودی مماسی برای سازه ی ورتکس اولین بار در سال ۱۹۵۳ ارائه شد. در آن زمان پنج نوع ورودی مختلف برای این سازه بررسی شد و مشاهده گردید که ورودی مماسی دارای کارایی مشابه با دیگر ورودی های مرسوم در کاهش هوای ورودی به جریان است [۶]. همچنین مطالعات جامعی بر روی مدل ورودی مماسی ورتکس ساندیاگو اوشن انجام شده است [۷]. محققان همچنین مدل آزمایشگاهی ورتکس سد مدمدو قزاقستان را که دارای ورودی مماسی است بررسی نمودهاند [۸]. هگر نیز از جمله محققانی است که در تحقیقات عمدهای ورودی ورتکس را مورد بررسی قرار داده است. هدف او ارائه رابطه ی ساده برای افت در جریان زیر بحرانی بود. او درنهایت ملاحظاتی برای طراحی ورتکس ارائه نمود [۹]. ویز و همکاران وی نیز اقدام به ساخت مدل آزمایشگاهی ورتکس ویگن در سوییس با مقیاس ۱ به ۱۰ کردند. ایشان ساخت مدل آزمایشگاهی را قبل از ساخت مدل اصلی بشدت توصیه کردند و هزینه آن را نسبت به ساخت مدل اصلی ناچیز دانستند[۱۰].

در سال ۲۰۱۰ روش طراحی ورودی شفت قائم و مستهلک کننده انرژی در سازه ور تکس ارائه شد. در آن تحقیق توضیحات مبسوطی در مورد انواع سازه های آبریز از جمله سازه ی ور تکس بیان گردید و افت انرژی در این سازه به علت جریان چرخشی در شفت قائم قابل توجه ارزیابی شد[۱۱]. در زمینه ی استهلاک انرژی در شفت قائم سازه ی ور تکس، نتایج تحقیقات حاکی از آن است که اگر نسبت طول شفت قائم به قطر آن و همچنین ضریب زبری مانینگ دیواره ی شفت قائم برابر ۲۰۱۲، باشد، مقدار استهلاک انرژی در شفت قائم به قطر آن(L/D) برابر ۵۰ باشد و مرحینین ضریب زبری مانینگ دیواره ی شفت قائم برابر ۲۰۱۲، باشد، مقدار استهلاک انرژی در شفت قائم برابر با ۸۵٪ خواهد بود[۲۲]. همچنین برای بررسی میزان استهلاک انرژی در شفت قائم سازه ی ور تکس، شفتی با نسبت طول به قطر برابر ۱۰۰ و همچنین ضریب زبری مانینگ ۲۰۱۰ در نظر گرفته بررسی میزان استهلاک انرژی در شفت قائم سازه ی ور تکس، شفتی با نسبت طول به قطر برابر ۱۰۰ و همچنین ضریب زبری مانینگ ۲۰۱۹. در شد. محققان دریافتند که افت انرژی حدود ۹۰٪ در شفت قائم سازه ی ور تکس رخ می دهد[۱۳]. همچنین محققان برای شفتی با نسبت طول به قطر ۹ میزان استهلاک انرژی را ۲۲٪ بر آورد نمودند[۱۴].





34- معادلات حاکم و روش تحقیق 1-3 معادلهی پیوستگی

در دینامیک سیالات یا بهصورت عمومیتر مکانیک محیطهای پیوسته، جریان تراکم ناپذیر به جریانی اطلاق میشود که در آن چگالی ماده در یک جزء سیال- حجم بینهایت کوچک که با سرعت جریان حرکت میکند، ثابت است. بیان دیگری که نشانهی تراکم ناپذیری جریان است این است که دیورژانس سرعت جریان صفر باشد. در صورتیکه سیال تراکم ناپذیر باشد فرم کلی معادلهی پیوستگی بهصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial (A_x u)}{\partial x} + \frac{\partial (A_y v)}{\partial y} + \frac{\partial (A_z w)}{\partial z} = 0$$
(Y)

۲-۳ معادلات ناویر استوکس

از جمله معادلات حاکم بر جریان تراکم ناپذیر در سازهی ورتکس علاوه بر معادلهی پیوستگی میتوان به معادلات متوسط گیری شده ی ناویر استوکس نیز اشاره کرد. معادلات ناویر استوکس معادلات ممنتم حاکم بر جریان سیالات لزج میباشد. فرم کلی معادلات ناویر استوکس در دستگاه سه بعدی به حالت زیر است:

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) + \rho g_x \tag{(7)}$$

$$\rho(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) + \rho g_y$$
(*)

$$\rho(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) + \rho g_z$$
(δ)

که در معادلات فوق p چگالی سیال و u ,v, w به ترتیب مؤلفههای سرعت در راستای x و y و z ، P نشاندهندهی ترم فشار سیال، µ نشاندهندهی لزجت دینامیکی سیال و g شتاب ثقل میباشد.

۳-۳ معادله پروفیل سطح آزاد جریان

موقعیت سیال توسط تابع حجم سیال ، (F(x ,y, z ,t تعریف میشود . این تابع حجم سیال فاز ۱ را در واحد حجم بیان میکند و معادله زیر را ارضاء میکند:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{Vf} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + \varepsilon \frac{FA * u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR}$$
(9)

که در معادلات فوق u ,v ,w به ترتیب مؤلفههای سرعت در راستای x وy و z ، t بیانگر زمان ، Vf حجم جزیی باز به سمت جریان، A_x و A_x و A_z سطوح جزیی باز بسمت جریان و ضریب R بسته به انتخاب نوع سیستم مختصات دارد. همچنین داریم:





(**Y**)

 $F_{\rm DIF} = \frac{1}{V_f} \Big\{ \frac{\partial}{\partial x} \Big[\upsilon f A_x \frac{\partial F}{\partial x} \Big] + R \frac{\partial}{\partial x} \Big[\upsilon f A_y R \frac{\partial F}{\partial y} \Big] + \frac{\partial}{\partial z} \Big[\upsilon f A_z \frac{\partial F}{\partial z} \Big] + \epsilon \frac{\upsilon f A_x F}{x} \Big\}$

ضریب پخش نیز بهصورت v_f = C_fµ /p تعریف می شود که C_f ثابتی است که عکس آن معمولا بیانگر عدد اشمیت در حالت متلاطم می باشد . این ترم انتشار ، فقط تشخیص اختلاط آشفتگی دو سیال را نشان میدهد که توزیع آن توسط تابع F تعریف می شود. ترم F_{SOR} نرخ زمانی تغییر کسری از حجم سیال فاز ۱ وابسته به منبع جرم برای سیال فاز ۱ می باشد.

3-3 معادله انرژی

جریان سیال در درون شفت قائم سازهی ورتکس بهصورت جت حلقوی متغیر تدریجی میباشد. فشار در جریان گردابهای ناشی از نیروی گریز از مرکز است و هستهی مرکزی هوا دارای فشار غالب اتمسفریک است[۱۵]. لذا در هر مقطع شفت قائم توزیع فشار به فرم زیر میباشد:

$$p(r) = \int_{R-b}^{r} (\rho v_t^2 / r) dr = \frac{1}{2} \rho \Omega^2 \left[\frac{1}{R^2 (1-t)^2} - \frac{1}{r^2} \right]$$
(A)

در فرمول فوق R شعاع شفت قائم، b برابر است با ضخامت جت آب در مقطع، ρ برابر است با چگالی سیال، t برابر است با نسبت ضخامت جت آب به شعاع شفت قائم(b/R)، v سرعت مماسی و Ω برابر است با حاصلضرب سرعت مماسی در شعاع(v_t.r). بر اساس تئوری هد انرژی مخصوص در کانال های باز خواهیم داشت:

$$E = \frac{v_t^2}{2g} + \frac{v_z^2}{2g} + \frac{p(r)}{\rho g} = \frac{v_z^2}{2g} + \frac{2\Omega^2}{gD^2(1-t)^2}$$
(9)

که در معادله فوق D قطر شفت قائم و 1⁄2 سرعت قائم میباشد. همچنین سرعت قائم از معادلهی زیر محاسبه می گردد:

$$\mathbf{v}_{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{A}} = \frac{4\mathbf{Q}}{\pi \mathbf{D}^2 \mathbf{t}(2-\mathbf{t})} \tag{1.1}$$

در معادلهی فوق A مساحت سطح مقطع جریان میباشد. با محاسبهی ضخامت جریان در هر مقطع و هد فشار دیواره و جایگذاری در معادلات فوق، درنهایت هد کل در هر مقطع از شفت قائم با اضافه کردن ارتفاع از تراز مبنا از رابطهی زیر محاسبه خواهد شد:

$$H = E + Z \tag{11}$$

که درصد تأثیر شفت قائم در اتلاف انرژی برابر است با:

$$\eta = (1 - \frac{H_{i+1}}{H_i}) * 100 \tag{11}$$

در معادلهی فوق H_{i+1} هد هیدرولیکی کل در انتهای شفت و H_i هد هیدرولیکی کل در ورودی شفت است [۱۶].





3-3 مشخصات سازهی ورتکس

سازهی ورتکس مدل شده در این تحقیق دارای کانال ورودی به ابعاد ۱۸۰ در ۲۰۱/۳۵ سانتیمتر در ورودی خود، ابعاد ۴۰ در ۴۰۱/۳۵ سانتیمتر در قسمت اتصال به شفت قائم و زاویه ۳۰ درجه نسبت به سطح افق در کف کانال میباشد. همچنین قطر شفت قائم ۱۶۰ سانتیمتر و ارتفاع شفت قائم از زیر کانال ورودی تا بالای سازهی مستهلک کنندهی انرژی برابر ۱۵ متر میباشد (شکل ۲).



شکل ۲- مشخصات هندسهی ورودی سازهی ورتکس

3-3 متغیرهای تحقیق

در این تحقیق ۶ عدد دبی ورودی به سازهی ورتکس و همچنین ۳ عدد ضریب زبری مانینگ جدارهی شفت قائم که مربوط به پلکسی گلس، فولاد و بتن میباشد، طبق جدول زیر متغیر مفروض گردیده که در مجموع ۱۸ حالت تحلیل جریان مورد بررسی قرار گرفته است(جدول ۱). لازم به ذکر است اطلاعات مربوط به متغیرهای مسئله با توجه به دبی طراحی سازهی ورتکس[۱۷] و نیازمندیهای مد نظر سازمان آب و فاضلاب در نظر گرفته شده است.

عدد ضریب زبری مانینگ	پلكسى گلس	•/••٩	Q (m3/s)				
			١	۲	۴	۴	۵
	فولاد	•/•14	Q (m3/s)				
			١	۲	٣	۴	۵
	بتن	•/•10	Q (m3/s)				
			١	۲	٣	۴	۵

جدول ۱- متغیرهای مورد بررسی

۳-۷ روش تحقيق

در این قسمت به بررسی کلیات مدلسازی سازهی ورتکس در نرمافزار FLOW-3D میپردازیم. مدت زمان برای پایدار شدن مؤلفههای جریان غیرقابل تراکم سطح آزاد ۲۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. تمامی واحدها بر اساس سیستم واحد SI انتخاب شده است. میدان حل طبق شکل (۳) با ۴ بلوک مستطیلی جداگانه مش بندی گردیده است. برای فاز اولیه آب با وزن مخصوص (kg/m3) ۱۰۰۰ و لزجت (kg/m.s) ۲۰۰۱، به نرمافزار معرفی شده است. برای شروع محاسبات فرض شده که ورتکس پر از هوا بوده و هیچ آبی در آن وجود ندارد. در ورودی ورتکس دبی جریان به همراه ارتفاع سیال به صورت شرط مرزی داده شده است. همچنین شرایط مرزی مناسب در مدل اعمال شده است که برخی از این شرایط در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ٤- شرایط مرزی اعمال شده بر سازهی ورتکس

شکل ۳- بلو کُهای مستطیلی مش بندی

مرز بالایی در بلوک های شبکه بندی بهصورت صفحهی تقارن تقریب زده شده است. در مرز خروجی شرط مرزی خروجی لحاظ گردید که گرادیان تمامی متغیرها برابر صفر قرار داده شده است. به دلیل نواحی چر خشی زیاد در مدل از مدل آشفتگی RNG K-۶ استفاده شده است. جداسازی معادلات با روش مرتبهی اول صورت پذیرفته و درنهایت معادلات جریان بهصورت سه بعدی بهوسیله FLOW-3D حل گردیده است. مطابق جدول (۲) عملکرد هیدرولیکی سازهی ورتکس برای شش دبی مختلف و سه حالت ضریب زبری جدارهی شفت قائم مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است میزان سرعت و ارتفاع سیال در قسمت ورودی سازهی ورتکس بر اساس معادلهی مانینگ محاسبه گردیده است.

Q	Y	v		
$(\frac{m^3}{s})$	m	m/s		
١	•/۲٩٨	1/1937		
۲	•/448	2/320		
٣	•/937	2/212		
۴	۰/۷۸۵	۲/۸۳۱		
۵	•/٩٢٧	۲/۹۹۶		
۶/۱۲	١/•٨١	4/144		

جدول ۲- مشخصات جریان ورودی به سازهی ورتکس

4- نتايج

با مقایسهی هد هیدرولیکی کل در ورودی و خروجی شفت قائم و بر اساس رابطهی (۱۲) که درصد تأثیر شفت در اتلاف انرژی را مشخص می کند، نتایج بررسی برای بدست آوردن مقدار η برای ۱۸ حالت در شفت قائم به شرح زیر است (جداول ۳-۴–۵):





جدول ۳- افت انرژی(0.009 = (

ضریب زبری مانینگ = ۰/۰۰۹		
$Q(m^{3}/s)$	$\eta = (1 - \frac{H_{i+1}}{H_i}) * 100(\%)$	
١	Λ٢/٨۵	
٢	۸۲/۰۳	
٣	۸۱/۲۴	
۴	٨٠/٢٣	
۵	٧٨/٩۵	
۶/۱۲	٧٧	

جدول ٤- افت انرژی(0.012 = 1)

ضریب زبری مانینگ = ۰/۰۱۲		
$Q(m^{3}/s)$	$\eta = (1 - \frac{H_{i+1}}{H_i}) * 100(\%)$	
١	۸۳/۰۶	
۲	Λ٢/٢۵	
٣	۸۱/۸	
۴	٨٠/٧٩	
۵	٧٩/۵١	
۶/۱۲	٧٧/٩۵	

$(\eta = 0.015)$ جدول ٥- افت انرژی ضریب زبری مانینگ = ۰/۰۱۵ $\eta = (1 - \frac{H_{i+1}}{H_i}) * 100(\%)$ $Q(m^{3}/s)$ 14/19 ١ 13/00 ۲ ٣ 84/94 ۴ ۸۱/۹۸ ۵ ۸۱/۰۱ 9/15 ٨٠/١٣

-2.042 -5.871

-9.701 -13.531

-17.360

21.190

در اشکال زیر نتایج ناشی از مدلسازی عددی نشان داده شده است (شکل ۵-۶-۷-۸-۹):



شکل٦- هد هیدرولیکی کل برای دبی (m3/s)



شکل٥ - هد هیدرولیکی کل برای دبی (m3/s) ا



شکل۸- هد هیدرولیکی کل برای دبی (m3/s) ٤



شکل۲- هد هیدرولیکی کل برای دبی (m3/s) ۳







شکل۹- هد هیدرولیکی کل برای دبی (m3/s) ه

در نمودارهای زیر نتایج برای ضرایب زبری مختلف نشان داده شده است (اشکال ۱۱–۱۲–۱۳–۱۴):



 $(\eta = 0.015)$ شکل ۱۳ – اتلاف انرژی توسط شفت قائم ($\eta = 0.015$

Q (M3/S)

Q (M3/S) شکل 12- مقایسه ی درصد اتلاف انرژی توسط شفت قائم

۵- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق پس از معرفی سازهی ورتکس و اجزای تشکیلدهندهی آن ، مراحل تحلیل رژیم جریان در سازهی ورتکس بیان گردید و به طور خاص به بررسی میزان تأثیر اتلاف انرژی در شفت قائم سازهی ور تکس پرداخته شد. در طی فر آیند تحقیق عملکرد هیدرولیکی سازهی ور تکس برای ۶ دبی متفاوت و ۳ ضریب زبری مانینگ برای شفت قائم سازهی ورتکس بررسی گردید. از جمله مهم ترین نتایج این تحقیق میتوان به عوامل زیر اشاره نمود:





- ۱- در کلیهی دبیهای مورد بررسی در داخل شفت قائم هستهی هوا ایجاد شد که منجر به ایجاد یک جریان پایدار در شفت قائم سازهی ورتکس شده بود. لازم به ذکر است با افزایش دبی میزان مساحت این هستهی هوا کوچکتر شد.
 - ۲- در تمامی دبیهای مورد بررسی جت جریان به صورت چرخشی و تقریباً چسبیده به دیوارهی شفت قائم حرکت می کند.
- ۳– با افزایش دبی درصد تأثیر شفت قائم در اتلاف انرژی سیال کمتر میشود و عملکرد شفت قائم برای مستهلک نمودن انرژی در دبیهای پایین تر بهتر است.
- ۴- با افزایش زبری جدارهی شفت قائم درصد تأثیر اتلاف انرژی در شفت قائم افزایش مییابد. با تغییر ضریب زبری از ۰٬۰۱۹ به ۱٬۰۱۲ در دبی ۶/۱۲ مترمکعب بر ثانیه تقریباً یک درصد تأثیر اتلاف انرژی بیشتر شده است. همچنین با تغییر ضریب زبری از ۲٬۰۱۲ به ۰٬۰۱۵ در دبی ۶/۱۲ مترمکعب بر ثانیه تقریباً ۲/۱۸ درصد تأثیر اتلاف انرژی بیشتر شده است.
 - در دبی های بالاتر افزایش ضریب زبری تأثیر بیشتری بر اتلاف انرژی خواهد گذاشت.

6- منابع

1. Granata F., M. G. (2011). Hydraulic of Circular Drop Manholes. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 137(2), 102-111.

۲. مهندسین مشاور طرح و سازه کاسپین. (۱۳۸۹). طرح تحقیقی بررسی هیدرولیکی سازه ور تکس فاضلابروی شرقی تهران(بزرگراه صیاد شیرازی).

- 3. Vischer, D. L., and Hager, W. H. 1995_. "Vortex drops." Energy dissipators: Hydraulic structures design manual, No. 9, Chap. 9, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 167–181.
- 4. Dong, X., and Gao, J. _1995_. "Report on model study of retrofitting a Diversion tunnel into a vortex dropshaft spillway in Shapai Power Station "IWHR Research Rep., China Institute of Water Resources and Hydropower Research, China _in Chinese.
- 5. Zhao, C. H., Sun, S. K., and Liu, Z. P. 2001.. "Optimal study on the depth of stilling well for rotationflow shaft flood-releasing tunnel." Water Power, 2001_5_, 30–33 _in Chinese.
- 6. Jevdjevich, V., and Levin, L. <u>1953</u>. "Entrainment of air in flowing water and technical problems connected with it." Proc., Minnesota International Hydraulics Convention, ASCE, St. Anthony Falls Hydralic Lab.
- Brooks, N. H., and Blackmer, W. H. <u>1962</u>. "Vortex energy dissipator for San Diego ocean outfall— Laboratory investigations." Rep. No. KH-R-5, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
- 8. Slisskii, S. M., Kuznetsov, E. B., and Akhmedov, T. K. 1980.. "Multistage whirlpool shaft spillway." Power Tech. and Eng.; formerly, Hydrotech. Constr.14_9_, 892–895.
- 9. Hager, W. H. (1985). Head-Discharge Relation for Vortex Shaft. Hydraulic Engineering, 111, 1015-1020.
- 10. Weiss, G. B. (2010). Hydraulic Model Test on a Storm Water Vortex Drop Shaft: Verification on Special Conditions. Novatech.
- 11. Hager, W. H. (2010). Waste Water Hydraulics: Theory and Practice (Second ed.). Springer.
- 12. Vischer, D. L., and Hager, W. H. 1995_. "Vortex drops." Energy dissipators: Hydraulic structures design manual, No. 9, Chap. 9, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 167–181.
- 13. Jain, S. C., and Kennedy, J. F. 1984... "Vortex-flow drop." Proc., 1984 Int. Symp. On Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, Univ. of Kentucky, Lexington, Ky., 115–120.
- 14. Jeanpierre, D., and Lachal, A. _1966_. "Dissipation d'énergie dans un puits a vortex." Houille Blanche, 21_7_, 825-831.
- 15. Jain, S. C. (1987). Vortex-Flow intakes. In Hydraulic Structures Design Manual (pp.125-137). IAHR.
- 16. Zhao, C. H., David, Z., Zhu, M.ASCE; Shuang-Ke Sun; and Zhi-Ping Liu. (2006). Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft. J. Hydraul. Eng. 2006.132:61-68.
- 17. Yu, D., and Lee, J. H. W. 2009_. "Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage." J. Hydraul. Eng., 135_3_, 164–174.