

# بررسی اثرات توزیع فشار و سرعت بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در آبیگرهای

## سد انحرافی - تنظیمی گتوند به کمک نرم افزار Flow3D

امین محمدزاده شعبه گر<sup>۱\*</sup>، جلال روانبخش<sup>۲</sup>، عبدالعظیم مالگرد<sup>۳</sup>

- ۱- امین محمدزاده شعبه گر دانش آموخته فوق لیسانس رشته سازه آبی [amin.mohammadzadeh63@gmail.com](mailto:amin.mohammadzadeh63@gmail.com)  
۲- جلال روانبخش کارشناس ارشد اجرایی سازمان آب و برق خوزستان [jalal1341265@yahoo.com](mailto:jalal1341265@yahoo.com)  
۳- عبدالعظیم مالگرد کارشناس ارشد اجرایی سازمان آب و برق خوزستان [mabdolazim@gmail.com](mailto:mabdolazim@gmail.com)

### چکیده:

از آنجا که سرعت آب در کانال آبیگر غالباً بسیار کمتر از رودخانه اصلی است در نتیجه مقدار زیادی رسوب در آن ته نشین می شود. این پدیده سبب کاهش عمده ای در ظرفیت کانال انتقال شده، لذا تغذیه کانال با دبی مورد نیاز یا تامین دبی طرح مشکل می شود. همچنین ته نشینی رسوبات در کانال انتقال سبب رشد علفهای هرز می گردد که این نیز مشکلاتی در تامین دبی مورد نظر پدید می آورد. هدف از این تحقیق، به کمک نرم افزار شبیه ساز Flow3D تاثیرات توزیع فشار و نقش آن در پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله رسوب و سرعت در آبیگرهای جانبی سد انحرافی- تنظیمی گتوند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد در دهانه دو آبیگر جناح چپ و راست سد انحرافی گتوند با توجه به توزیع فشار مخزن و دهانه آبیگرها شاهد افت ناگهانی فشار هستیم که نشان دهنده فشارهای منفی و مکش جریان به سمت آبیگرها است و از نظر توزیع سرعت، در تمامی حالات و با اعمال تمامی دبی ها، یک ناحیه سرعت های مینیمم به شکل دایره در مخزن سد بوجود می آید. این ناحیه به دلیل مکش بیشتر آبیگر جناح چپ سد و به دلیل عرض بیشتر نسبت به آبیگر جناح راست، نزدیکتر به آبیگر با عرض و مکش کمتر تشکیل می شود.

واژه های کلیدی: توزیع فشار، توزیع سرعت، آبیگر، سد انحرافی گتوند، FLOW3D

### ۱- مقدمه

سدهای انحرافی سدهایی هستند که به منظور بالا آوردن سطح آب رودخانه و در نتیجه سوار شدن آن به زمینهای کشاورزی اطراف رودخانه، احداث می گردند. سد انحرافی- تنظیمی گتوند که در شکل شماره (۱) نشان داده شده است در شمال خوزستان و در ۴ کیلومتری بخش گتوند و در ۳۷۷ کیلومتر کارون واقع گردیده است. رودخانه کارون پس از عبور از سد سه منظوره شهید عباسپور و الحاق رودخانه لالی به آن در منطقه تنگ آبیید به سد انحرافی گتوند می رسد آب مخزن سد انحرافی گتوند توسط دو آبیگر عقیلی در سمت چپ با ظرفیت ۱۲ مترمکعب در ثانیه و گتوند در سمت راست با ظرفیت ۹۲/۵ متر مکعب در ثانیه به کانالهای درجه ۱ و ۲ و ۳ و در نهایت به مزارع زارعین و شرکت کشت و صنعت کارون هدایت می شود.

بطور کلی می توان ادعا نمود که فرآیند کنترل رسوبات وارده به سیستم های کانالهای آبرگیر پیچیده و بفرنج می باشد زیرا دبی رسوبات حمل شده توسط رودخانه ها متغیر و غیر دائمی است و ممکن است به صورت روزانه تغییر کند، در حالی که کانال آبرگیر دبی کم و پیش معینی داشته و عموماً با شیب ملایم تر از رودخانه طراحی می شود بطوری که بتواند اراضی پایین دست خود را آبیاری کند.



شکل ۱: تصویر صحرایی آبرگیرهای سد انحرافی گتوند در حال بهره برداری

## ۲- مواد و روش ها

استفاده از مدل های ریاضی امروزه کاربرد وسیعی در علوم پیدا کرده است یکی از این مدل های ریاضی که جهت حل مسائل پیچیده در سازه های هیدرولیکی بکار می رود نرم افزار جریان سه بعدی Flow3D بوده که توانایی حل سه بعدی پدیده های هیدرولیکی را داراست. مطابق خروجی این نرم افزار با نتایج آزمایش های مدل هیدرولیکی در تعدادی از پروژه ها موجب افزایش میزان اعتماد پذیری در استفاده از این برنامه کامپیوتری گردیده است.

Flow3D را می توان در زمره یکی از نرم افزارهای قدرتمند برای نمایش سه بعدی تغییرات لحظه ای پارامترهای هیدرولیکی در جهات مختلف و در هر مقطع دلخواه از سازه، به صورت فایل متنی یا گرافیکی دانست. یکی دیگر از توانمندی های این نرم افزار حل معادلات حاکم بر حرکت سیال با استفاده از تقریبات احجام محدود می باشد. روش کار به گونه ای است که جریان به شبکه ای با سلولهای مستطیلی ثابت تقسیم بندی شده که برای هر سلول مقادیر میانگین کمیت های وابسته وجود دارد. به عبارتی دیگر همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می شوند.

برای مدل کردن آشفتگی جریان از مدل RNG که بهترین گزینه برای حل این مسئله بوده و با تقریب خوبی شرایط اغتشاش را مدل می نماید استفاده شده است.

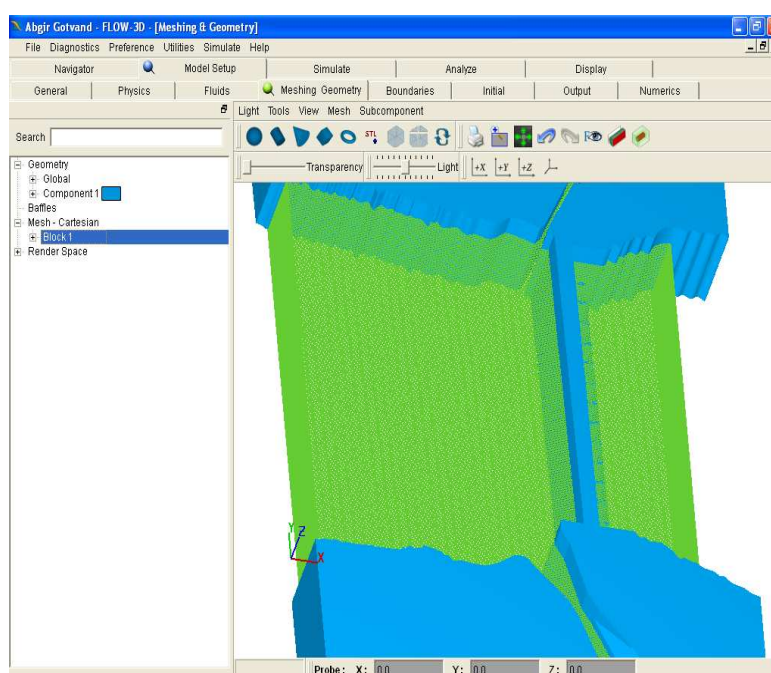
مدل مورد استفاده برای چهار دبی متفاوت در جدول شماره (۱)، مدت زمان ۵۰۰ ثانیه و تعداد ۳۵۸۱۶۰۰ سلول تحلیل گردید.

جدول ۱: دبی های انتخاب شده برای مدل (متر مکعب بر ثانیه) در سال ۱۳۹۰

دبی سیلابی ( $m^3/s$ )	دبی پرابی ( $m^3/s$ )	دبی متوسط ( $m^3/s$ )	دبی کم آبی ( $m^3/s$ )
۱۹۷۸	۵۵۰	۴۵۴	۱۵۰

### ۳- مش بندی

در شکل شماره (۲) هندسه مدل آگیرها و نحوه مش بندی نشان داده شده است.



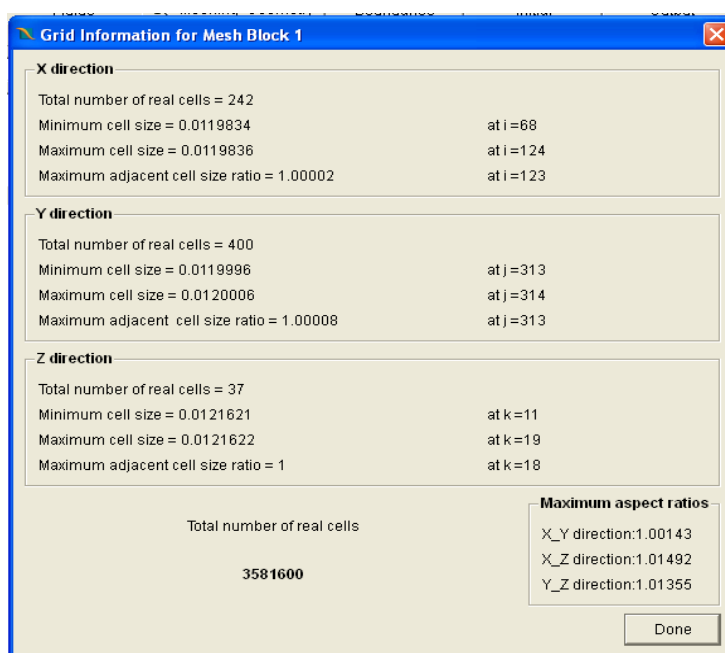
شکل ۲: نمایش مدل مش بندی در نرم افزار Flow3D

مش بندی بدین صورت انجام پذیرفت که ۳۵۸۱۶۰۰ سلول مش تعریف شد:

نرم افزار Flow3D این امکان را به کاربر می دهد که بعد از تعیین تعداد مش ها، صحت تناسب تعداد آنها را در سه راستای X, Y, Z بوسیله دو پارامتر Maximum adjacent cell size ratio و Maximum Aspect Ratios در راستاهای مختلف تعیین نماید. این دو پارامتر در بخش Info در قسمت Meshing قرار دارند.

پارامتر Maximum adjacent cell size ratio بیشترین نسبت اندازه سلول های مجاور را در سه راستای X, Y, Z نشان می دهد. طبق دستورالعمل نرم افزار جهت بالا رفتن دقت در حل مسئله و کاهش خطاهای ناشی از مش بندی، مقدار این پارامتر باید در هر سه راستای X, Y, Z کمتر از ۱/۲۵ باشد. پارامتر Maximum Aspect Ratios بیشینه نسبت صفحات را نسبت به یکدیگر بدست می دهد. مقدار این پارامتر نیز طبق دستورالعمل نرم افزار باید برای هر سه نسبت X-Y, X-Z, Y-Z کمتر از ۳ باشد.

با توجه به پارامترهای فوق صحت نسبت مش‌ها مورد بررسی قرار گرفت که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: صفحه اطلاعات مش

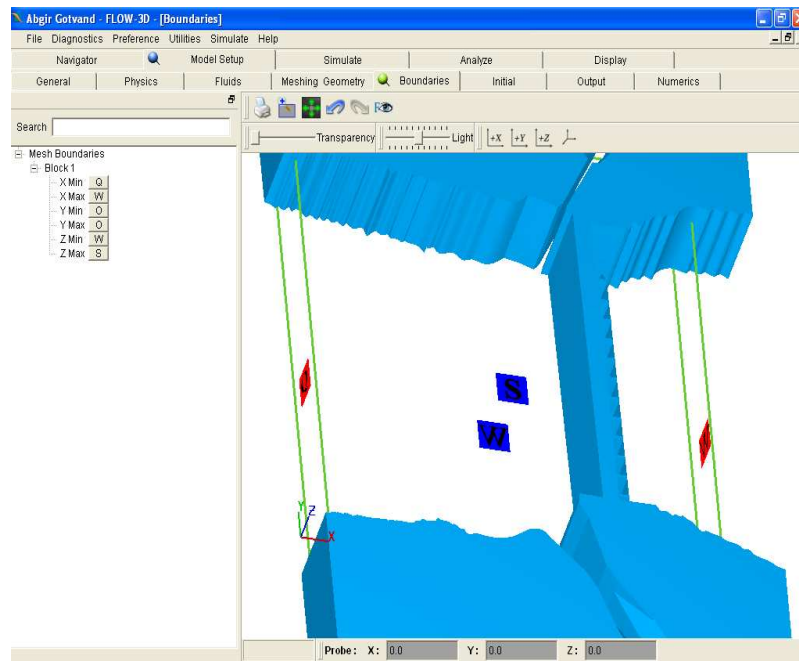
در پایان برای رسیدن به مقادیر فوق بصورت سعی و خطا و بوسیله تغییر مقدار مش‌ها پارامترهای فوق به میزان استاندارد رسید. در این مرحله به صورت آزمون و خطا چند مش بندی مختلف بکار گرفته شد تا نهایتاً به یک مش بندی مطلوب و مناسب شرایط آزمایش دست یافتیم.

مرحله قبل، برای تعداد مش‌های مختلف دیگری نیز انجام داده شد، تا میزان بهینه تعداد مش‌ها نیز تعیین شود. این مرحله به این دلیل صورت پذیرفت که اگر تعداد مش‌ها از مقدار مشخصی کمتر باشند، از دقت حل مسئله کاسته خواهد شد و اگر از مقدار بهینه بیشتر شوند هم بدون آنکه تاثیر مثبتی در مقدار خروجی‌ها داشته باشد، زمان بیشتری صرف آن خواهد شد و هم اینکه ممکن است اختلالاتی در حل مسئله بوجود بیاید. نهایتاً بعد از سعی و خطا یک مش بندی ثابت تعیین شد و مسئله با شرایط ثابت این مش حل شد.

#### ۴- شرایط مرزی

در قسمت Boundaries شرایط مرزی مسئله مشخص شد:

مرز ورودی از نوع Volume flow rate تعیین شد. در این قسمت دبی جریان ورودی تعیین شد. مرز خروجی در دو سمت چپ و راست خروجی آنگیر نیز از نوع Outflow در نظر گرفته شد. در شرایط Outflow تمام جریانی که به این مرز می‌رسد بدون تغییری در شرایط جریان، خارج می‌شود. مرز کف و پایین دست نیز از نوع دیواره یا Wall انتخاب شدند. شرایط مرزی دیواره یا جدار برای جدا کردن سیال از مرز جامد بکار می‌رود. در این شرط مرزی سرعت‌های عمود و مماس روی مرز دیواره صفر در نظر گرفته می‌شود و جداره‌ی بالایی نیز از نوع Symmetry (قرینه) انتخاب شد.



شکل ۴: شرایط مرزی مدل

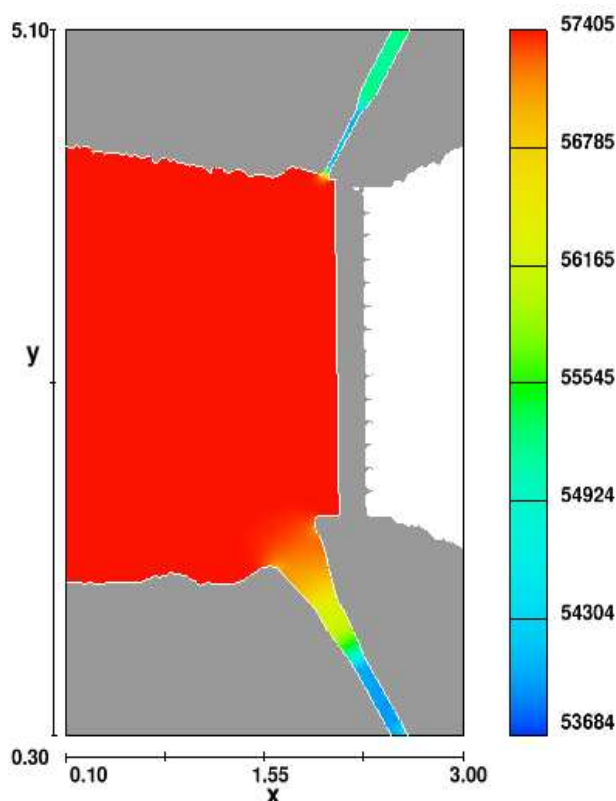
## ۵- بحث و نتایج

با توجه به اطلاعات و شرایط موجود و در نظر گرفتن شرایط مرزی، مش بندی و با توجه به اعمال چهار دبی که در قبل به آن اشاره شد اقدام به اجرای Run نرم افزار می نماییم.

## ۶- اثر توزیع فشار بر فرسایش و رسوبگذاری اطراف دهانه آبگیر

یکی از مشخصات ورود مناسب جریان به آبگیر که موجب ایجاد گرداب و جریان های ثانویه نگردد، ورود ملایم و بدون مکش جریان در جلوی آبگیر است که زاویه قرارگیری کانال فرعی یا آبگیر تاثیر زیادی بر این الگوی جریان دارد و در مورد آبگیرهای سد انحرافی گتوند، طراحی مناسبی از این جهت انجام شده است. این مکش در اشکال (۶) و (۷) که تصاویر توزیع فشار اطراف دهانه آبگیر هستند، نشان داده شده است. با کاهش دبی، با کاهش قابل ملاحظه فشار و مکش جریان در دهانه آبگیر و به سمت آبگیر روبرو هستیم.

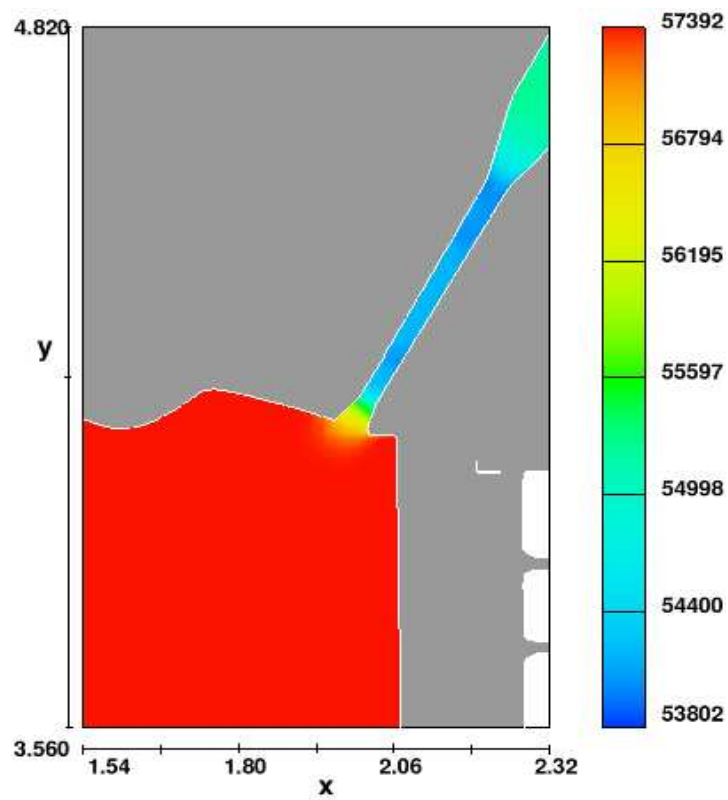
با توجه به شکل (۵) که نمایش توزیع فشار در مخزن سد و دهانه آبگیرهای سد انحرافی است، با توجه به ارتفاع و حجم آب ثابت موجود در مخزن، فشار بالایی در تمامی نقاط مخزن مشاهده می شود. اما در دهانه ورودی آبگیرها و درون آبگیرها به دلیل فشار منفی و مکش ایجاد شده از طرف آبگیر، نواحی با فشار پایین تر مشاهده می شود.



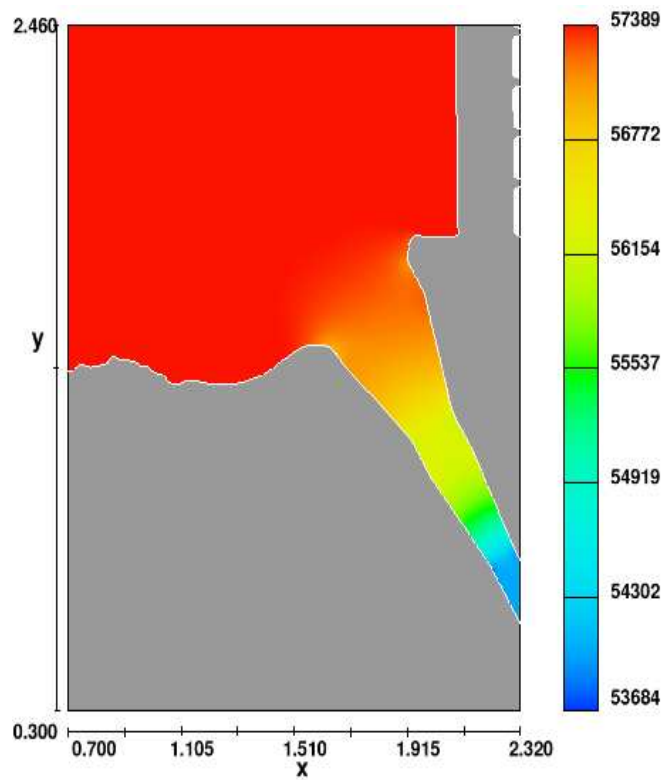
شکل ۵: توزیع فشار در مخزن و اطراف دهانه آبگیرها

با نزدیک شدن جریان به آبگیر بدلیل فشار مکش اعمالی از طرف کانال جانبی و خلاء ناگهانی ایجاد شده، جریان در جهت عرضی شتاب گرفته و به دو قسمت تقسیم شود: قسمتی وارد آبگیر شده و مابقی در کانال اصلی پایین دست جریان می یابد. قسمتی که وارد کانال انشعاب میشود توسط صفحه برشی خمیده ای معین می شود که به صفحه تقسیم کننده جریان معروف است. جریانی که وارد آبگیر میشود، دارای مومنتم شدیدی در جهت کانال اصلی بوده و به همین علت داخل آبگیر جدایی جریان اتفاق می افتد. بخاطر وجود گرادیان فشار جانبی و نیروهای برشی و جانب مرکز، جریان ورودی به آبگیر دچار عدم تعادل شده و همین عامل باعث ایجاد جریان ثانویه ای در جهت چرخش عقربه های ساعت میشود که مکانیسم تشکیل آن شبیه مکانیسم تشکیل جریان ثانویه در قوسها می باشد بطوریکه صفحه برشی مزبور به عنوان دیواره بیرونی عملکرده و ناحیه قوسی شکل ایجاد شده توسط قسمت چرخشی داخل آبگیر، دیواره داخلی قوس مزبور را تشکیل می دهد.

با توجه به طراحی هر دو آبگیر با زاویه قرارگیری ۱۲۰ درجه سعی بر آن بوده تا با ایجاد تعادل بین سرعت جریان در کانال اصلی و سرعت زیاد دهانه ورودی آبگیر که در اثر کاهش فشار و مکش اتفاق می افتد، از جداسازی جریان و ایجاد جریان های ثانویه تا حد امکان جلوگیری شود.

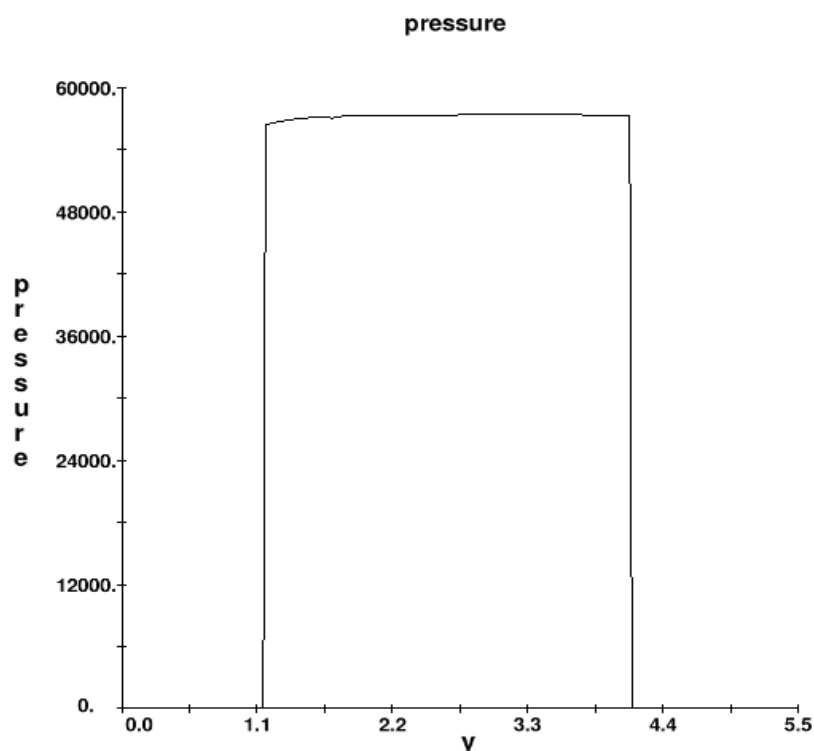


شکل ۶: توزیع فشار اطراف آبگیر کوچکتر در جناح راست سد



شکل ۷: توزیع فشار اطراف آبگیر بزرگتر در جناح چپ سد

در نمودار (۱) پروفیل طولی فشار بموازات سد بر حسب SI نمایش داده شده است که این پروفیل دو دهانه آبگیر را قطع می کند و همانطور که مشخص است قسمتی که این نمودار به صورت یک خط افقی است نشان دهنده فشار در مخزن است که شاهد فشار تقریباً ثابت بیشینه هستیم. اما دو خط عمودی نشان دهنده افت ناگهانی فشار در دهانه دو آبگیر جناح چپ و راست سد است و نشان دهنده فشارهای منفی و مکش جریان است. نتایج حاصله نشان می دهد که این مدل، در نمایش پروفیل طولی فشار از دقت خوبی برخوردار است.



نمودار ۱: پروفیل طولی فشار در محوری به موازات سد

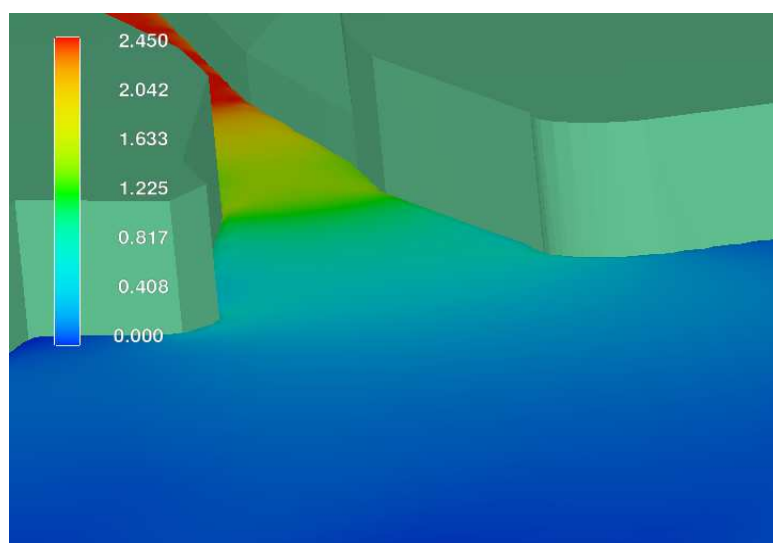
## ۷- اثرات توزیع سرعت بر فرسایش و رسوبگذاری اطراف دهانه آبگیر

با توجه به شکل (۸) در محل اتصال کانال ها که جریان دو کانال اصلی و فرعی به هم می پیوندند، بوجود آمدن جریان های گردابه ای و افزایش سرعت در محل تنگ شدگی جریان باعث ایجاد پدیده فرسایش در این محل می شود. این پدیده در محل اتصال دو جریان موجب کاهش راندمان انتقال آب و وارد آمدن خسارات به سازه های ساحلی می شود.

مطابق شکل (۸) که نشان دهنده توزیع سرعت در محدوده دهانه آبگیر با عرض بیشتر و در جناح چپ سد می باشد، با ورود جریان به آبگیر، جریان به دیواره خارجی آبگیر برخورد می کند و به سمت بستر و در ادامه به سمت جریان ورودی حرکت می کند و در برخورد با جریان اصلی ورودی باز می گردد و مقدمات تشکیل یک جریان گردابه ای را فراهم می کند که باعث فرسایش در این ناحیه می شود و این در حالی است که در دیواره داخلی آبگیر به دلیل جدایی جریان متلاطم از این منطقه و ایجاد محدوده سرعت های مینیمم در این ناحیه، احتمال رسوبگذاری در این محدوده آرام، تا جایی که جریان در مسیر



مستقیم کانال قرار بگیرد و توزیع سرعت در طول آبگیر به تعادل برسد، ادامه دارد. البته فشارهای منفی و مکش دهانه آبگیر از شدت این رسوبگذاری می کاهد.

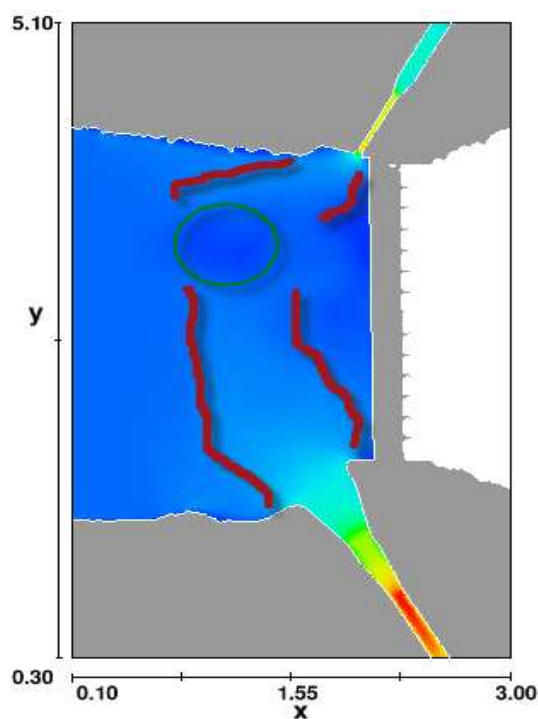


شکل ۸: نمایش سه بعدی توزیع سرعت و الگوی جریان اطراف دهانه آبگیر جناح چپ سد

در ناحیه سکون که در گوشه بالادست محل اتصال وجود می آید اولین برخورد بین دو جریان کانال فرعی و اصلی رخ می دهد و سرعت جریان در این ناحیه تقریباً صفر است. ناحیه انحراف ناحیه ای است که جریان کانال اصلی از مسیر خود منحرف می شود و به دیواره روبرویی اتصال نزدیک میشود. جریان کانال فرعی پس از اتصال از دیواره داخلی کانال فاصله می گیرد و باعث بوجود آمدن ناحیه ای به نام ناحیه جدایی می شود که سرعت جریان در این محل بسیار پائین بوده و رسوبگذاری در آن رخ می دهد

در تمامی حالات و با اعمال تمامی دبی ها، یک ناحیه سرعت های مینیمم به شکل دایره در مخزن سد مطابق شکل (۹) بوجود می آید. این ناحیه به دلیل مکش بیشتر آبگیر جناح چپ سد و به دلیل عرض بیشتر نسبت به آبگیر جناح راست، نزدیکتر به آبگیر با عرض و مکش کمتر تشکیل می شود.

مطابق شکل (۹) ناحیه سرعتی که می توان آن را از نظر توزیع سرعت بین سرعت های کم و بدون سرعت قرار داد و با رنگ آبی کم رنگ نمایش داده شده، در مقابل دهانه آبگیر جناح چپ تا محدوده بیشتری کشیده شده است و این در حالی است که این محدوده سرعت در دهانه آبگیر جناح راست به دلیل عرض کمتر مقطع ورودی این کانال تا طول کمتری و تقریباً با نسبت ۱ به ۳ کشیده شده است.

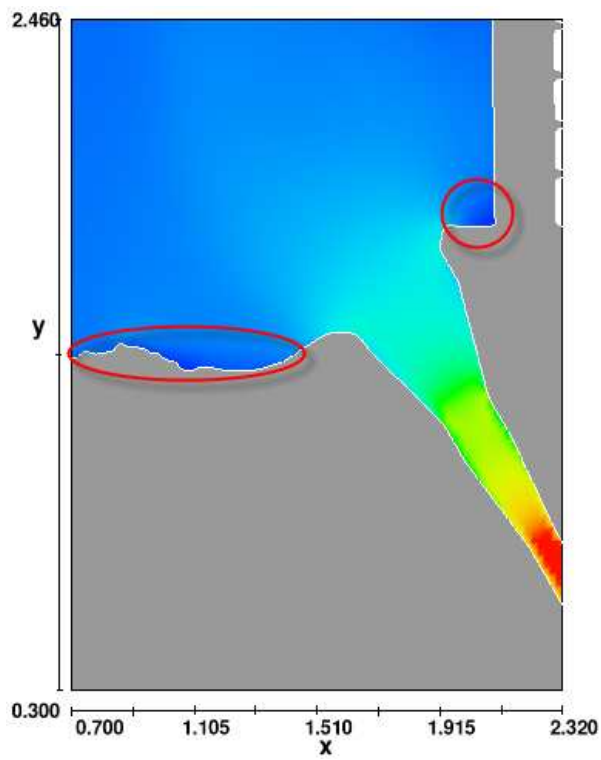


شکل ۹: نمایش توزیع سرعت در نواحی مختلف

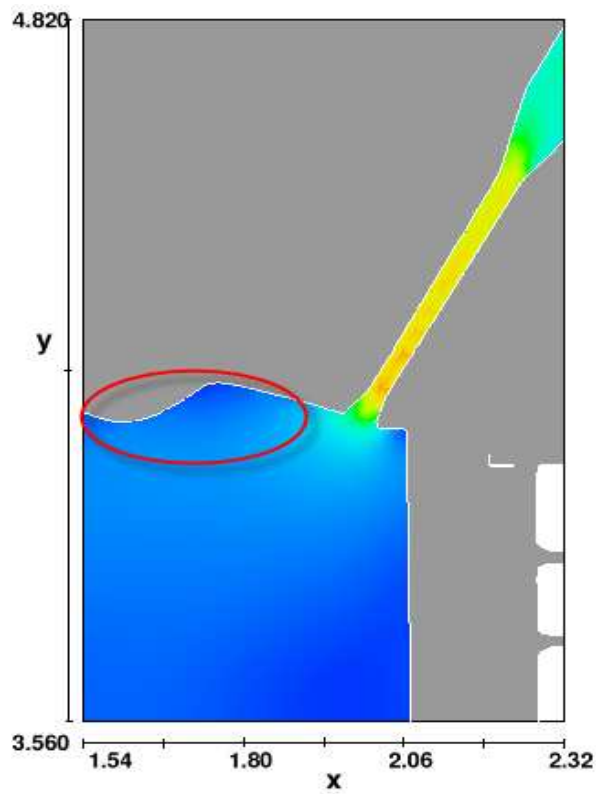
در نواحی دیگری از جمله در بالادست دو دهانه و در نزدیکی دیواره های مخزن نیز محدوده جریان های ایستا و بدون حرکت دیده می شود که در نتیجه امکان رسوبگذاری در این نواحی وجود دارد. از جمله مناطق دیگری که احتمال رسوبگذاری زیادی در آنها وجود دارد و همچنین سایر محدوده سرعت های مینیمم در شکل های (۱۰) و (۱۱) مربوط به دو دهانه آبگیر مشخص شده است.

در ناحیه حداکثر سرعت یا ناحیه فشردگی سرعت، شدت جریان بالا رفته و با بیشتر شدن تنش برشی از تنش بحرانی، فرسایش موضعی در آن صورت می گیرد.

تنش برشی بین جریان اصلی و فرعی باعث بوجود آمدن ناحیه لایه های برشی می شود و در پائین دست، جریان در ناحیه باز یافت به حالت عادی برمیگردد.



شکل ۱۰: نمایش نواحی سرعت های مینیمم و مستعد رسوبگذاری اطراف آبگیر بزرگتر در جناح چپ سد

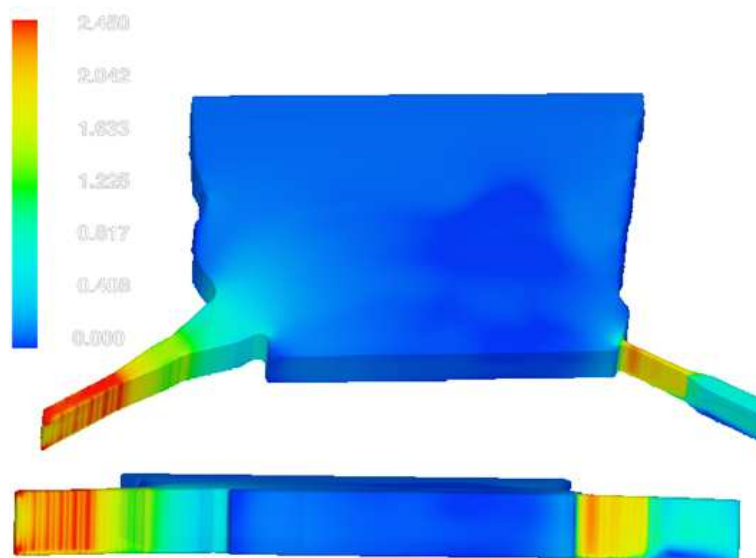


شکل ۱۱: نمایش محدوده سرعت های مینیمم و مستعد رسوبگذاری اطراف آبگیر کوچکتر در جناح راست سد

الگوی جریان ناشی از احداث آبگیر جانبی جهت انشعاب آب رودخانه دارای ویژگی های پیچیده ای بوده و کاملاً سه بعدی می باشد. در شکل (۱۲) الگوی جریان به صورت سه بعدی در دهانه آبگیر نشان داده شده است. هنگام وارد شدن جریان به اکثر آبگیرهای طراحی شده، تغییر جهت به صورت ناگهانی و یکباره صورت می گیرد. این تغییر جهت یکباره باعث جداسازی جریان در گوشه بالادست آبگیر می شود و این در حالی است که آبگیرهای سد انحرافی گتوند به منظور جلوگیری از بروز این مشکل با یک زاویه مناسب ۱۲۰ درجه در جهت جریان قرار گرفته اند و به این ترتیب، تغییر جهت به صورت ناگهانی اتفاق نمی افتد و جریان به آرامی و بدون جداسازی و ایجاد گرداب وارد آبگیر می شود.

همانگونه که در شکل (۱۲) مشاهده می شود، در گوشه بالادست کانال آبگیر، جریانهایی با سرعت ۱/۲ تا ۱/۵ مشاهده می شود که این نواحی نشان دهنده محل جداسازی جریان هستند.

با دور شدن از دهانه آبگیر به طرف پایین دست از میزان سرعت در جهت X کاسته می شود که این امر موجب نشست رسوبات حمل شده در پایین دست دهانه آبگیر می شود. در ناحیه آبی رنگ قبل از دهانه ورودی آبگیر نیز به دلیل پایین بودن سرعت جریان در این نواحی، احتمال رسوبگذاری بالا می رود و کاهش سرعت در این ناحیه امکان رشد گیاهانی همچون نی را فراهم می کند.



شکل ۱۲: نمایش سه بعدی توزیع سرعت و الگوی جریان مخزن و اطراف دهانه آبگیرها

## ۸- نتیجه گیری

- ۱- در دهانه دو آبگیر جناح چپ و راست سد انحرافی گتوند با توجه به توزیع فشار مخزن و دهانه آبگیرها شاهد افت ناگهانی فشار هستیم که نشان دهنده فشارهای منفی و مکش جریان به سمت آبگیرها است.
- ۲- زاویه انحراف هر دو آبگیر جناح چپ و راست سد طراحی خوبی دارد و به همین دلیل تغییر جهت ناگهانی جریان اتفاق نمی افتد و جریان به آرامی و بدون جداسازی و ایجاد گرداب وارد آبگیرها می شود.
- ۳- قبل از دهانه ورودی آبگیر به دلیل پایین بودن سرعت جریان در این نواحی، احتمال رسوبگذاری بالا می رود و کاهش سرعت در این ناحیه امکان رشد گیاهانی همچون نی را فراهم می کند.

۴- در تمامی حالات و با اعمال تمامی دبی ها، یک ناحیه سرعت های مینیمم به شکل دایره در مخزن سد بوجود می آید. این ناحیه به دلیل مکش بیشتر آبگیر جناح چپ سد و به دلیل عرض بیشتر نسبت به آبگیر جناح راست، نزدیکتر به آبگیر با عرض و مکش کمتر تشکیل می شود.

۵- در بالادست دو دهانه و در نزدیکی دیواره های مخزن نیز محدوده جریان های ایستا و بدون حرکت دیده می شود که در نتیجه امکان رسوبگذاری در این نواحی وجود دارد.

۶- در محل اتصال کانال ها که جریان دو کانال اصلی و فرعی به هم می پیوندند، بوجود آمدن جریان های گردابه ای و افزایش سرعت در محل تنگ شدگی جریان باعث ایجاد پدیده فرسایش در این محل می شود.

۷- با افزایش دبی سرعت های منفی کمتر شده، احتمال رسوبگذاری کاهش می یابد.

۸- با افزایش دبی سرعت های طولی در کناره ها، جریان چرخشی ایجاد می شود.

۹- مدل آشفتگی RNG در مدلسازی آشفتگی جریان و شبیه سازی نواحی جریان ورودی به آبگیرها و توزیع سرعت در تمام نقاط مخزن و دهانه آبگیرها دقت خوبی دارد.

۱۰- در صورت معرفی شبکه های ریزتر به نرم افزار دقت محاسبات افزایش خواهد یافت لیکن به دلیل افزایش حجم محاسبات و نیز طولانی شدن زمان حل، استفاده از ابر رایانه ها را الزامی می نماید.

## مراجع

- [1] Agrawal, 2005, "Three-Dimensional Numerical Modeling of Sediment Flow in Tala Desilting Chamber", Master Thesis, pp. 1-100.
- [2] Atckinson, Olsen, Ruether, Sinh, 2005, "3-D Computation of Sediment Transport at Water Intakes", Water Management 158, Issue WMI, pp. 1-8.
- [3] Chang, H.H, 1988, "Fluvial Processes in River Engineering" John Wiley & sons New York, pp. 325-359.
- [4] Flow3D, Help, ver9.3
- [5] Hedayat, N (2005). Improving the Perfomance of Water Delivery in the Dez and Moghan Irrigation Schemes in Iran. Unpublished Ph.D Thesis, Cranfield University, UK.
- [6] Olsen (2003), "Three -Dimensional Numerical Modeling Of Self- Forming Meandering Channel".
- [7] Barkdool, R and Ettema and Odgaard, A.J. (1999) Sediment control at lateral diversions: limits and enhancement to vane use. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No, 8,132-136.
- [8] Johnson, M.C. (2000). "Discharge coefficient analysis for flat- topped and sharp- cressed weirs." Irrig.Sci, 19,133-137.