

## مدل سازی جریان در یک قوس از رودخانه طبیعی بر اساس مدل های مختلف آشفستگی (مطالعه موردی: رودخانه دو آب صمصامی)

افشین هنربخش<sup>۱\*</sup>، روح الله کریمیان کاکلی<sup>۲</sup>، غلامرضا شمس قهفرخی<sup>۳</sup>، علیرضا داودیان دهکردی<sup>۴</sup>، مهدی پژوهش<sup>۵</sup>

۱. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشجوی دکتری تخصصی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۳. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

۴. استاد گروه پترولوژی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۵. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۰۴)

### چکیده

مدل سازی جریان در رودخانه ها با توجه به مسیر پیچان رودی آنها بسیار پیچیده بوده و اغلب مستلزم استفاده از یک مدل عددی قوی برای پیش بینی آثار آشفستگی است. همچنین، انتخاب نوع مدل آشفستگی می تواند در شبیه سازی و بررسی خصوصیات جریان مؤثر باشد. انواع مختلفی از مدل های آشفستگی در مدل عددی SSIIM قابل استفاده است که در تحقیق حاضر با هدف بررسی کارایی مدل های آشفستگی، از سه نوع مختلف مدل آشفستگی  $k-E$  یعنی نوع استاندارد، بر اساس سرعت آب و RNG به منظور شبیه سازی خصوصیات جریان در نقاط مختلف از مقطع عرضی ۴۵ درجه از یک قوس تند واقع در رودخانه دو آب صمصامی از سرشاخه های کارون بزرگ استفاده شد. با مقایسه مقادیر اندازه گیری شده مؤلفه های سرعت، نتایج به دست آمده از مدل ها مشخص شد. مدل  $k-E$  استاندارد در تعیین مؤلفه قائم سرعت و نوع مدل  $k-E$  بر اساس سرعت آب برای مؤلفه طولی سرعت دقت بیشتری دارد که در مجموع قابلیت کلیه مدل های آشفستگی یاد شده مناسب ارزیابی می شود. همچنین، در نظر گرفتن دقیق ناهمواری های بستر و زبری کناره کانال رودخانه در مدل عددی می تواند بر افزایش صحت نتایج مدل تأثیر بسزایی داشته باشد.

**کلیدواژه ها:** مدل  $k-E$ ، مدل عددی SSIIM، مؤلفه طولی سرعت، مؤلفه قائم سرعت، RNG.

## مقدمه

رودخانه‌ها در واقع جریان‌های حیات روی کره زمین هستند که نبود شناخت و توجه به فرایندهای واقع در آنها می‌تواند به وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیر و گاه مسائل و مشکلات زیست‌محیطی منجر شود. یکی از فرایندهای مهم واقع در رودخانه‌ها و به‌خصوص در رودخانه‌های غیرمستقیم، جریان‌های ثانویه است که سبب آشفتگی جریان، فرسایش رودخانه، ایجاد گل‌آلودگی و نیز برهم خوردن اکوسیستم رودخانه می‌شود. از طرفی، تغییرات در پیچ رودخانه‌ها و فرسایش دیواره و بستر آنها سبب حرکت و مهاجرت پیچ رودخانه و تخریب تأسیسات اطراف آن و اراضی کشاورزی و ایستگاه‌های پمپاژ مجاور می‌شود. بنابراین، به‌کارگیری تصمیم فنی و مدیریتی مستلزم شناخت الگوی جریان و مکان بیشینه جریان ثانویه و نیز تنش برشی در پیچ رودخانه به وسیله مدل‌های عددی لازم است. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌ها و روش‌های مدل‌سازی گسترش یافته است [۱-۳] به‌ویژه، در رودخانه‌ها مدل‌های متعددی به منظور بررسی و مدل‌سازی جریان و رسوب استفاده شده است [۴-۶]. خسروی [۷] و نیز فتحی و همکارانش [۸] به شبیه‌سازی الگوی جریان در رودخانه طبیعی با استفاده از مدل عددی دوبعدی CCHE2D پرداختند، که هر دو تحقیق نشان‌دهنده قابلیت مناسب مدل یادشده در پیش‌بینی مشخصات جریان در بازه‌های پیچان‌رود از رودخانه است. مدل‌سازی جریان آشفته، ایجاد یک مدل برای پیش‌بینی آثار آشفتگی و استفاده از آن است. یک جریان سیال آشفته ویژگی‌های بسیاری در مقیاس طول‌های مختلف دارد که همگی با یکدیگر در ارتباط‌اند. روش معمول، متوسط‌گیری از معادلات حاکم بر جریان است تا ویژگی‌های جریان متمرکز بر مقیاس بزرگ و در حالت بدون نوسان باشند. با این حال، آثار مقیاس‌های کوچک و بخش‌های نوسانی جریان باید مدل‌سازی شوند. معادله‌های ناویر-استوکس حاکم بر سرعت و فشار یک جریان سیال‌اند. در جریان آشفته، هر یک از این کمیت‌ها به دو بخش متوسط و بخش نوسانی تجزیه می‌شوند. با انجام متوسط‌گیری، معادله‌های ناویر-استوکس متوسط‌گیری‌شده رینولدز، که بر متوسط جریان حاکم است، به دست می‌آیند [۹].

برای مدل‌سازی بهتر آشفتگی جریان در کانال‌هایی با هندسه پیچیده و در طول قوس یک رودخانه طبیعی، باید از مدل‌های آشفتگی در کنار معادلات جریان استفاده کنیم. به طور کلی، مدل‌های آشفتگی شامل مدل‌های صفرمعدله‌ای، یک‌معدله‌ای و دومعدله‌ای می‌شوند. مدل‌های دومعدله‌ای در واقع به عنوان کامل‌ترین مدل‌های آشفتگی، زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان آشفته، به‌خصوص در سالیان اخیر به کار رفته‌اند. مدل  $k-\epsilon$  معروف‌ترین مدل دومعدله‌ای است. در این مدل میدان آشفته بر حسب دو متغیر انرژی جنبشی جریان آشفته و میزان اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته بیان می‌شود.

یکی از مطالعات مهم صورت‌گرفته در این زمینه توسط رودی و لسزینر [۱۰] انجام شد. آنها جریان را در یک قوس تند با به‌کارگیری مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد، به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی عددی کردند و گفتند که چنانچه بیشترین ارتفاع سطح آب از ۱۰ درصد عمق کانال تجاوز نکند، تغییرات سطح آب تأثیر چندانی روی نتایج مربوط به الگوی جریان ندارد.

شتارو مورتی [۱۱] برای شبیه‌سازی عددی جریان در حالت آشفته از معادلات رینولدز متوسط‌گیری‌شده در عمق برای حالت دوبعدی استفاده کرد. هان [۱۲] سه مدل  $k-\epsilon$ , RNG, LES, RSM را در یک پیچ تند بررسی کرد و نتیجه گرفت که مدل RSM تطابق مناسبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. ون بالن و همکارانش [۱۳] مدل LES در پیچ ملایم کانال را بررسی کردند. صفرزاده گندشمین و صالحی نیشابوری [۱۴] برای بررسی الگوی جریان در آبگیر جانبی از نرم‌افزار فلوننت استفاده کردند. آنها برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل‌های دومعدله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد و  $k-\omega$  استفاده کرده و عملکرد مدل  $k-\omega$  را در پیش‌بینی نواحی گردابه‌ای و جدایی جریان، بهتر از مدل  $k-\epsilon$  ارزیابی کردند. امیدبیگی و همکارانش [۱۵] به بررسی عددی ساختار سه‌بعدی جریان در آبگیر جانبی پرداختند. آنها برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل‌های  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  و RSM استفاده کردند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد الگوی جریان داخل کانال اصلی به‌وسیله هر سه مدل به‌خوبی پیش‌بینی شده است،

در مدل عددی سه‌بعدی SSIIM حالت‌های مختلفی از مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار مربوط به آن تعریف شده که کاربر می‌تواند با تعیین مقدار کد F24 در فایل Control نوع مدل آشفتگی مد نظر را برای مدل تعریف کند. با بررسی منابع یادشده مشخص شد که بیشتر کارهای انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی عددی جریان یا دوبعدی یا سه‌بعدی در مطالعات آزمایشگاهی بوده و در منابع خارجی نیز کمتر درباره رودخانه طبیعی تحقیق صورت گرفته است، بنابراین در مطالعه حاضر با هدف بررسی توانایی سه حالت مختلف از مدل آشفتگی k-ε شامل نوع استاندارد مدل k-ε، مدل k-ε محلی بر اساس سرعت آب و مدل k-ε با استفاده از اضافه RNG (Random Number Generator) در شناخت الگوی جریان در پیچ تندی از یک رودخانه طبیعی با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی اقدام شد تا در صورت امکان به کمک آن بتوان در مدل‌سازی‌های دیگر برای شرایط مختلف، الگوی جریان را پیش‌بینی کرد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

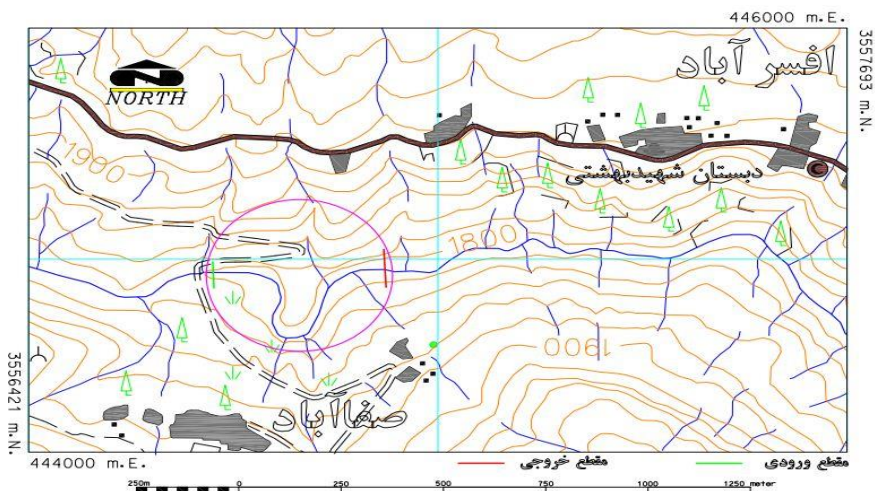
برای نیل به اهداف تحقیق حاضر و بررسی و ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف آشفتگی با استفاده از مدل SSIIM، بازه‌ای شامل یک قوس طبیعی ۹۰ درجه از رودخانه دوآب صمصامی از سرشاخه‌های کارون بزرگ واقع در استان چهارمحال و بختیاری انتخاب شد. طول قوس یادشده ۲۳۰ متر و عرض کانال در محدوده این قوس از ۱۲ متر تا ۵۴ متر متغیر است. رودخانه یادشده جریان‌های دائمی دارد که آب پایه حوزه مربوط به این رودخانه ۱۳۰۰ لیتر در ثانیه در خروجی برآورد شده است. رودخانه دوآب صمصامی در فصول پربارش و هنگام وقوع بارندگی بیشتر سیلابی می‌شود. نوع مواد موجود در بستر و کناره‌های رودخانه بیشتر از نهشته‌های آبرفتی دوره کواترنر است که در کناره‌ها توالی لایه‌ها به خوبی تشخیص داده می‌شود. در شکل ۱ موقعیت بازه مطالعه شده روی نقشه‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور موسوم به نقشه دشتک به شماره برگ 60542NE و همچنین نمایی از رودخانه دوآب صمصامی و بازه مطالعه شده و کناره‌های رودخانه در شکل ۲ نشان داده شده است.

اما در کانال آبگیر، مدل RSM نسبت به دو مدل دیگر بهتر عمل می‌کند و قابلیت مدل k-ω بیشتر از مدل k-ε است. مظفری و همکارانش [۱۶] نیز در یک بررسی آزمایشگاهی دو مدل آشفتگی LES و RSM را با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت در پیچ تندی از کانال استفاده کردند و دریافتند که در مقایسه نتایج کمی پروفیل‌های سرعت مدل LES خطای کمتر و نتایج دقیق‌تری دارد.

ژانگ و شن [۱۷] یک مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی جریان آشفته بر اساس مدل آشفتگی k-ε با RNG را توسعه دادند. در این مدل برای محاسبه معادلات از روش حجم محدود استفاده شد که با کاربرد مدل در رودخانه طبیعی، دقت مدل برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌های طبیعی در تحقیقات مهندسی هیدرولیک مناسب ارزیابی شد.

یو [۱۸] در تحقیقی آشفتگی جریان را با استفاده از مدل‌های دومعادله‌ای عمق متوسط آشفتگی شامل k-ε، k-ω و k-ω شبیه‌سازی عددی کردند. وی در نهایت کاربرد کلیه مدل‌های دومعادله‌ای یادشده را برای مدل‌سازی جریان آشفته مناسب ارزیابی کرد و نتیجه گرفت استفاده از مدل‌های آشفتگی جدید مانند k-ω با مقدار بیشتر پارامتر آشفتگی، سبب افزایش دقت محاسبات می‌شود.

وو [۱۹] در مطالعات خود به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین پرداخت. همچنین، ایشان با استفاده از مدل عددی دوبعدی، مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای k-ε را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه کرد و نتیجه گرفت که همه مدل‌های آشفتگی، نتایجی واقعی (نزدیک) درباره جریان‌های ساده ارائه می‌کنند؛ اما درباره جریان‌های پیچیده، دو مدل آشفتگی k-ε و RNG نتایجی واقعی‌تر را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. همچنین، بر اساس پژوهش یادشده، در میان مدل‌های دومعادله‌ای، مدل‌های k-ε و RNG درباره جریان‌های چرخشی، نتایج بهتری ارائه می‌کنند. در تحقیقی دیگر سیا و همکارانش [۲۰] به بررسی و ارزیابی قابلیت مدل آشفتگی k-ε در محاسبه الگوی جریان و میدان آشفتگی در آب‌های کم‌عمق پرداختند، که نتایج نشان‌دهنده قابلیت زیاد مدل یادشده است.



شکل ۱. موقعیت بازه مطالعه شده روی نقشه توپوگرافی منطقه



شکل ۲. نمایی از رودخانه دوآب صمصامی و بازه مطالعه شده

geodata که یک فایل متنی حاوی اطلاعات هندسه کانال است، برای معرفی به مدل اقدام شد. یکی دیگر از اطلاعات و داده‌های مورد نیاز در مدل SSIIIM مقادیر زبری بستر است. در تحقیق حاضر نمونه‌های مختلفی از رسوبات بستر واقع در مرکز و سواحل چپ و راست بازه تهیه شده و در آزمایشگاه خاک نسبت به دانه‌بندی و سپس تعیین مقادیر ضریب زبری مانینگ (n) اقدام شد. همچنین، به منظور بررسی کارایی و نیز ارزیابی نتایج محاسبات مدل، سرعت جریان با استفاده از سرعت‌سنج مناسب در محل مقطع ۴۵ درجه ثبت شد. در ضمن، در نقاط مختلف از مقطع یادشده به لحاظ ارتفاعی و طولی در راستای عمود بر مسیر جریان مربوط به یک مورد سیلاب رخ داده در فروردین ماه ۱۳۹۵ با دبی حداکثر ۱۸/۵ مترمکعب بر ثانیه اقدام شد. در گام بعد، نتایج به دست آمده از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در مقطع عرضی یادشده مقایسه شد.

### نقشه‌برداری و ثبت خصوصیات بازه و جریان

از جمله داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی جریان و رسوب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های توسعه‌یافته جدید، مقادیر مربوط به توپوگرافی یا همان هندسه مسئله است. بنابراین، در تحقیق حاضر برای نقشه‌برداری بازه مطالعه شده از دو ابزار فتوگرامتری (نقشه‌برداری با استفاده از کوادکوپتر) و همچنین استفاده از دوربین توتال استیشن استفاده شد. درخور یادآوری است که در نقشه‌برداری نخست کل بازه با همه جزئیات برداشت شد. سپس، با استفاده از دوربین توتال استیشن نسبت به نقشه‌برداری رقوم کف بستر واقع در زیر آب و همچنین مناطق واقع در زیر درختان اقدام شد و با جایگزینی مقادیر برداشتی از روش دوم در توپوگرافی به دست آمده از روش فتوگرامتری هندسه بازه با دقت زیاد تهیه شد. در مرحله بعد نسبت به استخراج سیستماتیک نقاط به صورت XYZ و تهیه فایل

همچنین،  $k$  به صورت رابطه ۵ مدل‌سازی می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (5)$$

که  $P_k$  به صورت رابطه ۶ است:

$$P_k = v_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

که بیان‌کننده اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی است و با استفاده از رابطه ۷ تعیین می‌شود:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

در معادلات ۴ تا ۷ پارامترهای  $C_{\mu}$ ،  $\sigma_k$ ،  $\sigma_\varepsilon$ ،  $C_{\varepsilon 1}$  و  $C_{\varepsilon 2}$

ثابت‌های تجربی هستند که به ترتیب و به طور تقریبی به مقادیر ۰/۰۹، ۱، ۱/۳، ۱/۴۴ و ۱/۹۲ تعیین شده‌اند [۲۱].

### اجرای مدل SSIIM بر اساس مدل‌های مختلف آشفتگی

ایجاد شبکه محاسباتی مناسب می‌تواند به میزان درخور توجهی در صحت و دقت نتایج به‌دست‌آمده مؤثر باشد. برای پیدا کردن بهینه‌ترین اندازه شبکه، بررسی‌های لازم به‌صورت تغییر اندازه شبکه از ریزترین اندازه شبکه تا درشت‌ترین اندازه شبکه انجام شد. سپس، با مقایسه مقادیر کمترین و بیشترین سرعت، فشار و انرژی سینتیک متلاطم در شبکه‌بندی‌های مختلف، در نهایت اندازه شبکه ۲۰\*۱۵\*۴۰ به ترتیب برای مقادیر طولی، عرضی و ارتفاعی به عنوان بهینه‌ترین اندازه شبکه مطابق شکل ۳ برای بازه مطالعه‌شده انتخاب شد. پس از معرفی فایل geodata به مدل با استفاده از ابزار موجود در نرم‌افزار، شبکه محاسباتی بهینه ایجاد شد. شبکه تولیدشده توسط مدل در شکل ۳ آورده شده است.

### مدل عددی سه‌بعدی SSIIM و مدل‌های آشفتگی

مدل عددی سه‌بعدی SSIIM نخستین‌بار توسط آقای اولسن در سال ۲۰۰۲ ارائه شد که در مهندسی رودخانه، هیدرولیک و محیط زیست کاربرد دارد. معادلات جریان در مدل یادشده، معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویر-استوکس معروف به معادلات رینولدز هستند که به صورت رابطه ۱ بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho u_i u_j) \quad (1)$$

که در رابطه یادشده  $U_i$  برابر است با سرعت متوسط در جهت  $x_i$  و  $\rho$  معادل تراکم آب،  $P$  معادل فشار و  $\delta_{ij}$  مربوط به تابع دلتای کرونکر است که برای حالت  $i=j$  برابر یک و در سایر حالت‌ها برابر صفر است. در معادله ناویر-استوکس ترم اول سمت چپ، ترم تغییرات زمانی سرعت و ترم بعدی، ترم‌های انتقالی‌اند. همچنین، ترم اول سمت راست، ترم فشار و ترم‌های بعدی نیز ترم‌های تنش‌های رینولدز است. برای محاسبه تنش‌های رینولدز در مدل SSIIM از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استفاده شده است که معادلات مربوط به مدل یادشده به صورت رابطه ۲ بیان می‌شوند:

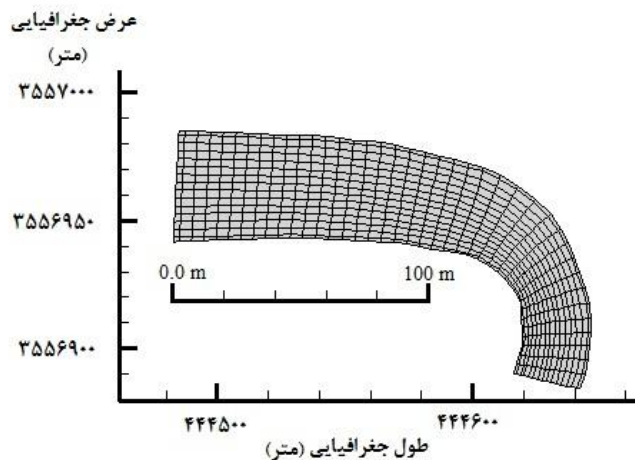
$$\rho u_i u_j = \rho v_t \left( \frac{\delta U_i}{\delta x_j} + \frac{\delta U_j}{\delta x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \cdot k \cdot \delta_{ij} \quad (2)$$

که در آن  $v_t$  معادل ویسکوزیته گردابی است که توسط مدل  $k-\varepsilon$  به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

که  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی است که به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$k = \frac{1}{2} u_i u_j \quad (4)$$



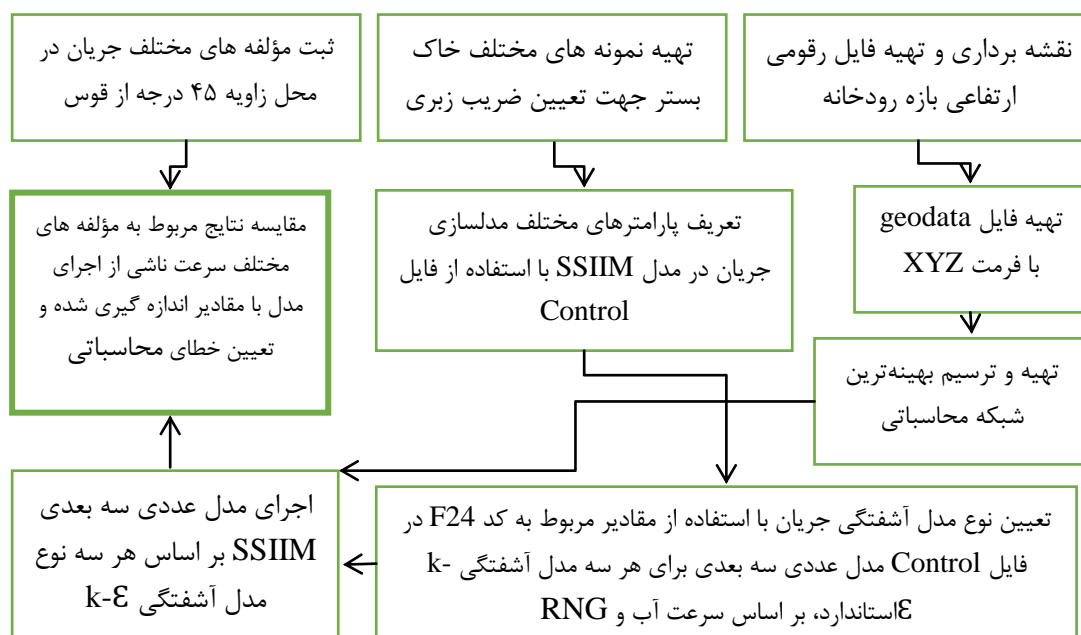
شکل ۳. شبکه محاسباتی استفاده‌شده برای مدل‌سازی جریان توسط مدل SSIIM

بحث، به منظور همگرایی محاسبات و کاهش باقی‌مانده خطای محاسبات مربوط به سه مؤلفه سرعت افقی، عمودی و قائم و نیز پارامترهای پیوستگی و آشفتگی که باید کمتر از مقدار ۰/۰۰۰۱ باشد، با تغییر مقادیر مربوط به ضریب زبری و همچنین ارتفاع سطح آب به عنوان یکی از شرایط مرزی، همگرایی محاسبات حاصل و سپس نتایج مربوط به مؤلفه‌های طولی و قائم سرعت با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محل‌های مد نظر با استفاده از شاخص آماری میانگین درصد خطای مطلق تعیین شد (رابطه ۸):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{VM_i - VP_i}{VM_i} \right| \times 100 \quad (8)$$

در رابطه یادشده MAPE میانگین خطای مطلق، N تعداد داده‌های اندازه‌گیری‌شده، VMi و VPi به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده مؤلفه‌های سرعت‌اند.

فایل Control یکی از فایل‌های مهم استفاده‌شده در مدل SSIIM است که می‌تواند حاوی کدهای مختلفی باشد. در این فایل پارامترهای مهم مورد نیاز برای حل مسئله آورده می‌شود. این پارامترها در دقت و همگرایی محاسبات کارکرد اساسی دارند. انواع مدل‌های آشفتگی را می‌توان با استفاده از مقادیر مختلف برای کد F24 در این فایل انتخاب کرد. همان‌طور که در انتهای مبحث مقدمه آورده شد، سه نوع از مدل آشفتگی k-E شامل نوع استاندارد مدل k-E، مدل k-E محلی بر اساس سرعت آب و مدل k-E با استفاده از اضافه RNG (Random Number Generator) به منظور مدل‌سازی آشفتگی و بررسی نتایج به کار گرفته شد. در شکل ۴ فلوچارت جریانی مربوط به روش تحقیق آورده شده است. پس از اجرای مدل بر اساس مدل‌های آشفتگی مورد



شکل ۴. فلوچارت جریانی روش تحقیق

یادشده، انطباق نتایج مدل عددی با هر سه نوع مدل آشفتگی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده به طور کلی خوب بوده که اختلاف بین مقادیر سرعت به دست آمده از مدل عددی با نوع مدل آشفتگی k-E بر اساس سرعت آب با مقادیر متناظر اندازه‌گیری‌شده اختلاف کمتری داشته است. این در حالی است که دقت محاسبه برای دو مدل دیگر تقریباً نزدیک به هم و بیشتر از نوع مدل k-E بر اساس سرعت

### نتایج و بحث

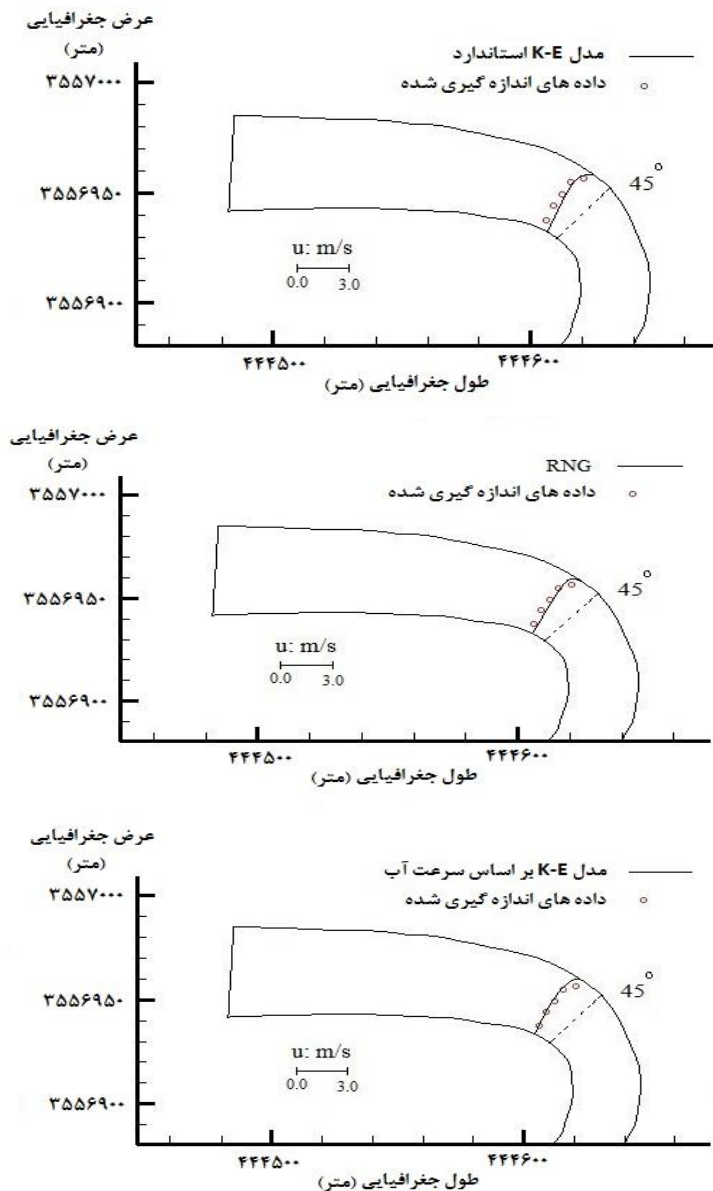
#### تغییرات مؤلفه طولی سرعت

در شکل ۵ تغییرات پروفیل‌های طولی سرعت پیش‌بینی‌شده با هر سه نوع از مدل k-E در مقطع عرضی ۴۵ درجه از قوس رودخانه در صفحه‌ای نزدیک سطح آب و در عمقی معادل ۰/۸۵ عمق جریان با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقایسه شده است. با توجه به شکل

در این نقطه است که با توجه به مرتفع و عمودی بودن کناره‌ها و ممکن‌نبودن در نظر گرفتن زبری آن در مدل، پیش‌بینی سرعت در منطقه نزدیک کناره با خطای بیشتری صورت گرفته است. این در حالی است که دو مدل استاندارد و RNG مقادیر سرعت در دیگر نقاط صفحه نزدیک به سطح آب را کمتر از میزان اندازه‌گیری شده محاسبه کرده است. میزان سرعت در ناحیه نزدیک کناره خارجی با فاصله دو متر از کناره بیشترین مقدار را دارند که عامل جریان ثانویه و گرادیان طولی فشار در این حالت به عنوان عوامل همسو عمل می‌کنند و سبب افزایش بیشتر سرعت در این ناحیه می‌شوند.

جریان است. میانگین خطای مطلق مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده برای سه نوع مدل آشفتگی k-ε بر حسب سرعت جریان، نوع استاندارد و با اضافه RNG به ترتیب برابر ۳/۵، ۶/۶ و ۶/۸ درصد است.

با بررسی دقیق‌تر پروفیل، سرعت طولی ناشی از مدل k-ε بر اساس سرعت آب مشاهده می‌شود. بیشتر اختلاف بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده در منطقه‌ای نزدیک به کناره خارجی قوس بوده و در سایر نقاط انطباق مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده بسیار خوب است. این اختلاف در قوس خارجی در سایر مدل‌های استفاده شده نیز دیده می‌شود که در واقع ناشی از زبری کناره‌ها و کاهش سرعت



شکل ۵. مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت محاسبه شده در صفحه نزدیک سطح آب با مقادیر اندازه‌گیری شده برای دبی  $18/5 \text{ m}^3/\text{s}$

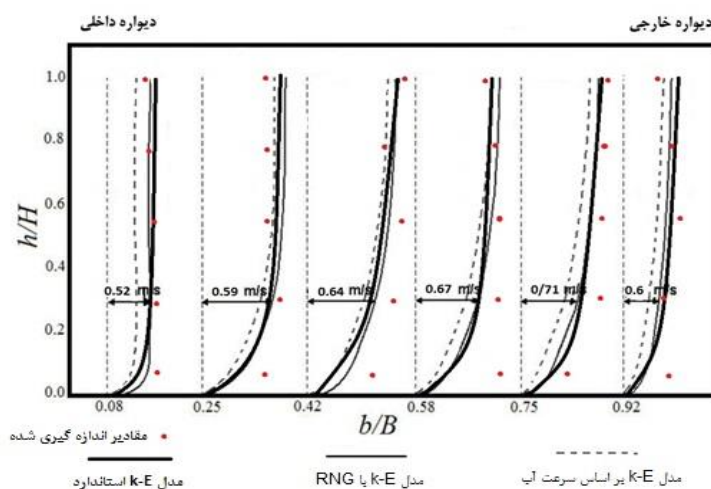
تغییرات مؤلفه قائم سرعت

برای بررسی چگونگی عملکرد مدل‌های آشفتگی k-E استفاده شده در تحقیق حاضر، پروفیل‌های سرعت قائم در مقطع عرضی ۴۵ درجه از قوس اول با نتایج و مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. در شکل ۶ پروفیل‌های یادشده نشان داده شده است.

با توجه به این شکل، پروفیل‌های پیش‌بینی شده با سه نوع مدل آشفتگی k-E قابل تعیین توسط مدل SSIIM تا حدودی با مقادیر اندازه‌گیری شده (نقاط قرمز رنگ) همخوانی داشته به طوری که میانگین خطای مطلق پیش‌بینی مدل‌های آشفتگی k-E نوع استاندارد، نوع محلی براساس سرعت آب و همچنین با استفاده از اضافه RNG به ترتیب برابر ۵/۸۳ و ۶/۹ و ۶/۵ درصد است. ولی با نگاه دقیق‌تر می‌توان به اختلاف محسوس پروفیل قائم سرعت حاصل از مدل k-E محلی بر اساس سرعت آب در کنار دیواره خارجی پی برد؛ به طوری که میانگین خطای مطلق پیش‌بینی در این ناحیه برای مدل k-E ۷/۸ درصد و برای نوع استاندارد و با اضافه RNG به ترتیب ۴/۳ و ۵/۱ درصد است. علت این موضوع وجود جریان‌ات ثانویه در منطقه یادشده است که نوع مدل k-E استاندارد قادر به محاسبه دقیق‌تر آن است. بنابراین، پروفیل سرعت پیش‌بینی شده توسط مدل k-E، همخوانی بهتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. به طوری که مدل k-E حالت برگشت پروفیل سرعت در ناحیه نزدیک سطح آب را بهتر از مدل قبلی پیش‌بینی می‌کند. با بررسی دقیق‌تر پروفیل‌های

تولیدشده توسط هر سه نوع مدل و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌توان به اختلاف زیاد این پروفیل‌ها با مقادیر واقعی در ناحیه نزدیک بستر پی برد. این اختلاف در واقع ناشی از ناهمواری‌های بسیار موجود در کف کانال است که در فایل مربوط به هندسه رودخانه این جزئیات به طور کامل وجود ندارد و بستر را هموارتر از آنچه در طبیعت بوده در نظر گرفته است. بنابراین، وجود زبری بستر و ناهمواری‌های متعدد به شدت الگوی جریان و پروفیل‌های سرعت را در این منطقه تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند در دقت نتایج مؤثر باشد.

در بررسی پروفیل‌های سرعت در منطقه نزدیک به بستر مشاهده می‌شود، پروفیل‌های محاسبه شده از هر سه نوع مدل آشفتگی k-E نزدیک به هم است و اختلاف کمتری با هم و نیز با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. دلیل این مطلب را می‌توان از عکس تفسیر حالت قبل یعنی منطقه نزدیک بستر به دست آورد. در این منطقه با توجه به دوری جریان از بستر و کناره‌ها کمتر شاهد تأثیر زبری روی الگوی جریان هستیم. در خصوص پروفیل‌های محاسبه شده سرعت در منطقه نزدیک دیواره داخلی مشاهده می‌شود که پروفیل‌های محاسبه شده از دو نوع مدل k-E استاندارد و RNG اختلاف ناچیزی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد، ولی این اختلاف با پروفیل سرعت محاسبه شده از مدل آشفتگی k-E محلی بر اساس سرعت آب دارای خطای ۷/۶ درصد است. البته، در مقایسه کلی نتایج مدل‌های آشفتگی مختلف k-E نشان‌دهنده اختلاف ناچیز نتایج است.



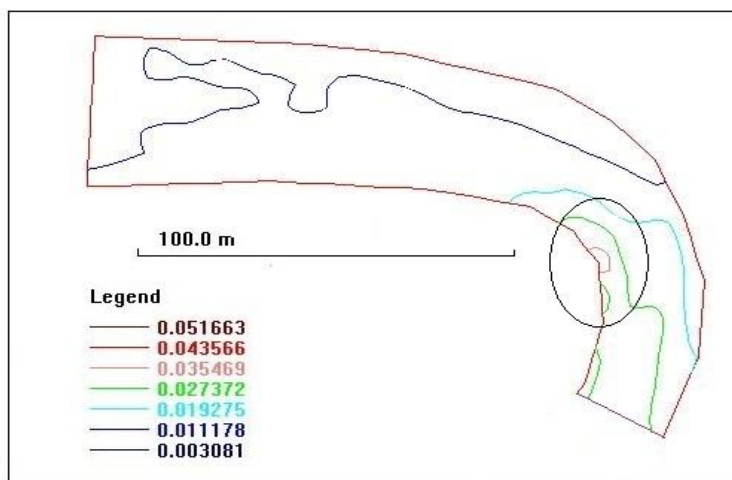
شکل ۶. بررسی عملکرد سه مدل آشفتگی k-E در پیش‌بینی پروفیل‌های قائم سرعت



### بررسی توزیع تنش برشی بستر

در شکل ۷ کانترهای پیش‌بینی شده تنش برشی بستر با استفاده از سه مدل آشفتگی نشان داده شده است. با مقایسه اشکال مربوط به تنش برشی بستر محاسبه شده از هر سه مدل آشفتگی مشاهده شد هر سه مدل توزیع تنش برشی یکسان دارد و تفاوتی بین نتایج سه مدل دیده نمی‌شود. هرچند مطالعه تغییرات بستر به آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های هم‌زمان جریان سیال و ته‌نشینی و رسوب‌گذاری بستر و همچنین برهم‌کنش این دو نیاز دارد،

اما با این وجود پیش‌بینی فرسایش و الگوهای رسوب‌گذاری برای بسترهای تغییرپذیر (سیال) با در نظر گرفتن توزیع تنش برشی بستر امکان‌پذیر است. همانند آنچه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، منطقه‌ای با بیشترین تنش برشی که به شکل دایره نشان داده شده در زاویه حدود ۴۵ درجه از ابتدای قوس دیده می‌شود. دلیل ایجاد چنین منطقه‌ای وجود یک گرادیان پرسرعت است که سبب انتقال یک هسته قوی و پرسرعت به سمت دیواره می‌شود و در صفحه‌ای نزدیک به بستر گسترش می‌یابد.



شکل ۷. توزیع تنش برشی بستر طی قوس رودخانه

### نتیجه‌گیری

با مدل‌سازی جریان بر حسب انواع مختلف از مدل آشفتگی k-E در یک قوس طبیعی از یک رودخانه طبیعی و در محل مقطع ۴۵ درجه بر اساس دبی ۱۸/۵ مترمکعب بر ثانیه نتیجه می‌شود مدل آشفتگی k-E نوع استاندارد برای شبیه‌سازی آشفتگی‌های جریان در قوس‌های ۴۵ درجه و در محاسبه مؤلفه‌های قائم سرعت قابل اعتماد است، ولی در خصوص پروفیل‌های طولی بهتر است از نوع مدل k-E بر حسب سرعت آب استفاده کرد. البته، با بررسی کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد مدل‌های دومعادله‌ای k-E دقت مناسب در شبیه‌سازی آشفتگی جریان دارند، ولی پیشنهاد می‌شود پروفیل‌های سرعت تولیدشده با مدل‌های آشفتگی مختلف در مقاطع با درجه‌های مختلف از قوس رودخانه نیز با مقادیر واقعی مقایسه شود. همچنین، به منظور دقیق‌تر بودن نتایج شبیه‌سازی عددی پیشنهاد می‌شود، توپوگرافی و

ناهمواری‌های رودخانه در بستر اصلی با دقت و جزئیات بیشتری برداشت و به مدل معرفی شود. همچنین، پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلفی از قوس رودخانه با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شود. با توجه به وجود جریان‌های ثانویه در قوس‌های رودخانه‌ای و اهمیت این پارامتر در تفسیر مشخصات و الگوی جریان، توانایی سایر مدل‌های آشفتگی نیز در تعیین و مدل‌سازی این پارامتر مهم ارزیابی شود. با توجه به تأثیر زبری کناره‌های کانال به خصوص در قوس‌های خارجی روی مؤلفه‌های سرعت در نظر گرفتن زبری کناره‌ها در مدل عددی می‌تواند سبب افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی جریان شود.

### منابع

- [1]. Yousefi, H, Golshan, M, Pirnia, A. Evaluation of HEC-HMS Hydrological Model in estimating Flood Hydrograph of Dry and Humid regions. Journal of Ecohydrology, 2018; 5(1): 319 – 330. (Persian).

- [2]. Yousefi, H, Ehara, S, Noorollahi, Y. Modifying the analysis made by water quality index using multi-criteria decision making methods. *Journal of African Earth sciences*, 2018; 138, 309 – 318.
- [3]. Yousefi, H, Tavakkoli-Moghaddam, R, Oliaei, MTB, Mohammadi, M. Solving a bi-objective vehicle routing problem under uncertainty by a revised multichoice goal programming approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2017; 8(3):283-302
- [4]. Xiufang Z. Pingyi W. and Y. Chengyu. Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure. *Journal of Procedia Engineering*, 2015; 28: 772-775.
- [5]. Hao, Z. Hajime, N. Kenji, K. and B. Yasyuki. Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke. *Journal of Sediment Research*, 2014; 24: 33-45.
- [6]. Lai, Y. G. and Greimann, B.P. Predicting contraction scour with two-dimensional depth averaged model. *Journal of Hydraulic Research*, 2010; 48(3): 383-387.
- [7]. Khosravi, G. The numerical simulation of flow and sediment transport with model CCHE2D (Case Study: meander downstream Minab). Master's thesis, University of Hormozgan, Bandarabbas, Iran. 2012. (Persian).
- [8]. Fathi, M., A. Honarbakhsh, M. Rostami and D. Davoodian Dehkordi. Simulating the flow pattern with a two-dimensional numerical model in a range of natural meanders, Case Study: Khoshkerood Farsan River, Chaharmahal and Bakhtiari, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences*. 2012; 62(1): 95-108. (Persian).
- [9]. Andersson. B, Andersson, R, Hakansson. L, Mortensen. M, Sudiyo. R and vanWachem. B. *Computational fluid dynamics for engineers*. Cambridge University Press, 2012.
- [10]. Rodi, W. and Leschziner M. A. Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow. *Journal of the Hydraulic Division*, 1978; 105(HY10) : 1297-1333.
- [11]. Shettar, A.S., and Murthy, K.K. A numerical study of division of flow in open channels, *Journal of Hydraulic Research, Delft, The Netherlands*, 1996; 34(5): 651-675.
- [12]. Han, S.S. Characteristics of flow around 90 open channel bends. PhD. Thesis. Dept. of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec. 2010.
- [13]. Van Balen, W., Uijtewaal, W.S.J., and Blanckaert, K. Large eddy simulation of a mildly curved open channel flow", *J. Fluid Mech.* 2009; 630(1): 413-442.
- [14]. Safarzadeh Gandshamin, A., and Salehi Neishabouri, A. A. Numerical study of turbulent flow pattern and qualitative study of sediment transport and erosion in lateral drainage from the river. *Journal of Modarres Technical and Engineering*, 2007; 25(1) : 1-18. (Persian).
- [15]. Omid Beygi, M. A. Laboratory study and numerical simulation of three dimensional flow pattern in lateral drainage of the river in the presence of submerged panels. Msc Thesis. Dept. of Agriculture, Tarbiat Modarres University. 2010. (Persian).
- [16]. Mozaffari, J., Samadi, A., Mohseni Movahhed, S. A., Davoud-Maghani, D. Comparison of RSM and LES Turbulence Models on Sharp Bend. *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 2015; 27(1): 77-86. (Persian).
- [17]. Zhang, M. L., and Shen, Y. M. Three-dimensional simulation of meandering river based on 3-D RNG k-ε turbulence model. *Journal of Hydrodynamics*, 2008; 20(4) : 448-455.
- [18]. Yu, L. R. Flow and transport simulation of Madeira River using three depth-averaged two-equation turbulence closure models. *Water Science and Engineering*, 2012. 5(1): 11-25
- [19]. Wu, W. CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1). Tech Report No. NCCHE-TR-2001-3, NCCHE, University of Mississippi, 2009. USA, P: 12.
- [20]. Cea, L., Pena, L., J. Puertas, J., M. E. Vazquez-Cendon, M. E., and Pena, E. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007; 133(2):160-172.
- [21]. Launder, B. E., and Spalding, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974; 3(2): 269-289.