

بررسی عملکرد مدل‌های رایج توربولنس برای جریان شتاب‌دار غیر پرپودیک در لوله

علی خالقی
دانشجوی دکتری مکانیک
دانشگاه فردوسی مشهد

مجید ملک جعفریان
استادیار دانشکده مکانیک
دانشگاه بیرجند

محمود پسندیده فرد
استادیار دانشکده مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده: در این مقاله، جریان شتاب‌دار در یک لوله برای اعداد رینولدز، از ۷۰۰۰ تا ۴۵۲۰۰ (بر پایه سرعت متوسط و قطر) بوسیله شش مدل معمول جریان متلاطم شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌های مفروض شامل مدل جبری بالدوین-لومکس^۱ (BL)، مدل تک معادله‌ای اسپالارت-آلماراس^۲ (SA)، مدل $k - \epsilon$ با تصحیح دیواره لام-برمهورست^۳ (KE)، مدل $k - \omega$ ویلکاکس^۴ (KW)، مدل تنش برشی انتقالی منتیر^۵ (SST) و مدل $k - \epsilon - U^2$ دوربین^۶ (KEV2) می‌باشند. نتایج حاصله از این مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی اخیر مقایسه شده‌اند.

نتایج بدست آمده از مدل BL در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ضعیف ظاهر شدند. سرعت و زمان تأخیر پیش‌بینی شده بوسیله دیگر مدل‌ها به خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده برای یک دوره کامل شتابدهی جریان با دبی افزایشی در کوتاه مدت (دوره ۵ ثانیه) و بلند مدت (دوره ۴۵ ثانیه) انطباق دارد. زمان تأخیری انرژی جنبشی جریان متلاطم محاسبه شده در نزدیکی خط مرکزی لوله تقریباً ۴ ثانیه می‌باشد که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. مدل $k - \epsilon - U^2$ بهترین نتایج را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در ناحیه دور از دیواره بدست می‌دهد. در انتهای مقاله، جریان در نزدیکی دیواره مورد بررسی قرار می‌گیرد، هرچند نتایج این مدل با نتایج آزمایشات متفاوت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل اغتشاش، جریان شتاب‌دار در لوله، جریان غیر پرپودیک، DNS

۱. مقدمه

مطالعه جریان متلاطم شتاب‌دار (جریان متلاطم با پروفیل سرعت تابع زمان) در لوله به دلیل کسب اطلاعات، برای درک پدیده اغتشاش در لوله‌ها دارای اهمیت می‌باشد. در این‌گونه جریانها مشخصه‌هایی از جریان متلاطم وجود دارند که در جریانهای متلاطم غیر شتاب‌دار (جریان متلاطم با پروفیل سرعت ثابت) مشاهده نمی‌گردند. بعلاوه به علت تأثیرات لختی چندین اثر اغتشاش موجود در جریانهای گذرا در این جریان نیز قابل رویت می‌باشند. با توجه به مشکلات و مسائل تکنیکی، اندازه‌گیری جزئیات اغتشاش در جریانها با پروفیل‌های سرعت (یا فشار) تابع زمان تا سال‌های اخیر امکان‌پذیر نبوده است. در حال حاضر، به دلیل وجود ابزارهای سنجش مدرن و کامپیوترهای قدرتمند، جریانهای متلاطم گذرا (با پروفیل سرعت ناپایا) قابل رسیدگی شده‌اند. لذا این جریانها مورد توجه بیشتر قرار گرفته‌اند. [۱] جریانهای متلاطم ناپایای درون لوله‌ها در دو گروه قابل طبقه‌بندی می‌باشند، جریانها ضربانی پرپودی و جریانها گذرای غیرپرپودی. هدف این تحقیق مقایسه پیش‌بینی‌های شش مدل اغتشاش رایج قابل اعمال

-
- Baldwin-Lomax¹
 - Spalart-Allmaras²
 - Lam-Bremhorst³
 - Wilcox⁴
 - Menter shear-stress Transport⁵
 - Durbin⁶

بر جریان در یک لوله، با نتایج به دست آمده از کارهای آزمایشگاهی جدید **He** و **Jackson** [۱] می‌باشد. این حل بر مبنای مسأله ناپایایی می‌باشد. این مطلب به ما این اجازه را می‌دهد که مدل‌هایی را برای جریان لوله‌ای با مرزهای تعریف شده، تعیین کنیم.

در این مقاله، در وهله اول مدلها را به طور خلاصه مرور می‌کنیم، سپس ارزیابی و سنجش مدلها با استفاده از داده‌های **DNS** منتشر شده توسط **Moser** و همکاران [۲] برای جریان کانالی در $R_\tau = 590$ ارائه خواهد شد. در مرحله بعد نتایج **URANS** با نتایج عملی آن مورد مقایسه قرار خواهد گرفت و در پایان نتایجی استخراج خواهد شد.

۲. مدل‌های اغتشاش:

به دلیل هندسه ساده، معادله **URANS** برای لوله‌های افقی به سادگی به دست می‌دهد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \nu \frac{\partial u}{\partial r} - r \overline{u'v'} \right] \quad (1)$$

در مقام مقایسه با دیگر تحقیقات [۳] و [۱۱] که در اکثر موارد چهار مدل مختلف برای اغتشاش مطرح شده است، در این مقاله، شش مدل عمومی و رایج **URANS**، به ترتیب افزایش پیچیدگی محاسبات آنها مدل جبری **Baldwin-Lomax (BL)** [۴]، مدل تک‌معادله‌ای انتقال لزجت تلاطم **(SA)** [۵]، مدل استاندارد $k-\varepsilon$ با تصحیح دیواره **Lam** و **Bremhorst (KE)** [۶]، مدل ویلکاکس $k-\omega$ **(KW)** [۷]، مدل **(SST)** [۸] و مدل **Durbin(KEV2)** [۹] مورد آزمایش قرار گرفته است. تمامی مدلها با فرض وجود لزجت تلاطم می‌باشند که بیانگر رابطه (تنش) رینولدز زیر است:

$$-\overline{u'v'} = \nu_t \frac{\partial u}{\partial r} \quad (2)$$

که در آن ν_t بیانگر لزجت تلاطم می‌باشد در ادامه به طور خلاصه همه مدل‌های فوق مرور می‌شود.

۲-۱. مدل جبری **(BL)**:

مدل **BL** پس از مدل اعتشاشی ارائه شده توسط **Cebeci-Smith (CS)** [۳۰] ارائه گردید. این مدل برای حذف مسائل و مشکلات مربوط به محاسبات انتگرالی کمیت لایه مرزی لایه خارجی مدل **CS** در جریانهای پیچیده پیشرفت و توسعه یافت. با توجه به سادگی آن و عدم نیاز به زمان محاسباتی بلندمدت **BL** استفاده گسترده‌ای در هوافضا دارد، اگرچه **BL** نتایج مطلوبی برای جریانها درهم و مختلط و مخصوصاً برای جریانها دارای جدایش نمی‌دهد [۱۰]. لزجت تلاطم طبق رابطه زیر فرض می‌شود:

$$\nu_t = \min(\nu_{ii}, \nu_{to}) \quad (3)$$

که ν_{ii} لزجت تلاطم لایه داخلی است که لایه داخلی محل طول اختلاط و حالت گردابی می‌باشد. ν_{to} لزجت تلاطم لایه خارجی می‌باشد که شامل دو (تابع) است، یک تابع بازدارنده (F_{wake}) و تابع **Klebanoff** (F_{kleb}) [۴].

۲-۲. مدل تک‌معادله‌ای **(SA)**:

در این مدل از یک معادله انتقال برای لزجت گردابه ای \bar{V} استفاده شده است [۵]. این معادله شامل تأثیرات تولید، انتشار، کناره دیواره، اتلافات و محدود کننده عدد رینولدز در نزدیکی دیواره می‌باشد. معادله انتقال بر مبنای مشاهدات و تجربیات با تجدیدنظر در جریانها دارای پیچیدگی نسبت به مدل BL بیشتر بنا شده است. این مدل به علت نتایج معقول و منطقی آن برای محدوده وسیعی از مسائل جریان و خواص عددی این مدل تقریباً مدلی عمومی شده است.

۲-۳. مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ (KE) :

مدل $k-\varepsilon$ به یکی از رایج‌ترین مدل‌های بررسی اغتشاش مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های برنامه‌های کاربردی تبدیل شده است. این مدل انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ اتلافات آن را بوسیله معادلات انتقال تعریف می‌کند و در حالی که لزجت گردابه ای را به صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۴)$$

شکل‌های مختلف زیادی از این مدل وجود دارد، مثل مدل‌های Lam-Tagawa, Nagano, Launder-Sharma و Chien, Bremhorst, Shih-Mansour. مدل مورد توجه در این مقاله مدل پیشنهادی Lam-Bremhorst می‌باشد [۶] به این خاطر که در این مدل نیازی به یافتن U_t لحظه‌ای نمی‌باشد.

۲-۴. مدل دو معادله‌ای $k-\omega$ (KW) :

این مدل توسط Wilcox [۷] پیشنهاد شده است که از توابع دمپینگ (میرایی) دیواره‌ها استفاده نمی‌کند. لزجت گردابه ای به صورت رابطه زیر فرض می‌شود:

$$v_t = \frac{k}{\omega} \quad (۵)$$

که ω عنصر گردابه‌ای است که معادله انتقال (نوشته شده برای ω) شامل تأثیرات تولید، انتشار و اتلافات می‌باشد. برخلاف تمامی مدل‌های دو معادله‌ای، مدل $k-\omega$ مشمول توابع دمپینگ (میرایی) نمی‌شود و اجازه مشخص شدن شرایط ساده Dirichlet مرزی را می‌دهد. مدل $k-\omega$ به خاطر سادگی و بالاخص با توجه به ثبات عددی، نسبت به دیگر مدل‌ها برتری دارد. در هر صورت مدل $k-\omega$ (مانند بسیاری از مدل‌های دیگر) به خوبی نمی‌تواند رفتار اغتشاش را در نزدیکی دیواره‌ها پیش‌بینی کند. بعلاوه مدل $k-\omega$ توزیع درستی برای k و ε در مطابقت با داده‌های DNS ارائه نمی‌دهد [۸].

۲-۵. مدل انتقال تنش برشی Menter (SST) :

مدل SST خود شامل دو معادله است $k-\varepsilon/k-\omega$ که به صورت دوگانه و مختلط به صورت $k-\omega$ طراحی شده- اند [۸]. این مدل باعث بهبود عمده‌ای در محاسبات اختلاف فشار معکوس (APG) و در جریانها لایه مرزی دارای جدایش و حذف حساسیت مدل $k-\omega$ به شرایط سطح آزاد می‌شود. در این مدل اصلاح لزجت گردابه ای در مدل $k-\omega$ مطرح شده است. این مطلب بر پایه فلسفه‌ای که در مدل Johnson-king است بنا شده است که بیان می‌دارد انتقال تنش برشی اصلی در محاسبه و پیش‌بینی جریانها با اختلاف شدید فشار معکوس بسیار اهمیت دارد. SST همچنین به یکی از رایج‌ترین مدل‌های مورد استفاده CFD هوافضا تبدیل شده است. برای برنامه نویسی مدل SST در مقایسه با مدل اصلی $k-\omega$ زمان بیشتری نیاز دارد در عوض این مدل حتی در عملکردهای پیچیده و مختلط نیز بسیار با ثبات می‌باشد.

۲-۶. مدل $k - \varepsilon - v^2$ (KEV2):

مدل پیشنهاد شده KEV2 ($k - \varepsilon - v^2$) توسط Durbin [۹] گسترش و توسعه مدل استاندارد $k - \varepsilon$ را ارائه می‌دهد. این مدل این امکان را به شرایط مرزی درست سینماتیکی می‌دهد که بر مولفه نرمال شدت اغتشاش اثر کنند. بنابراین انسداد دیواره‌ای مطرح می‌شود. مزیت این مدل این است که نیازی به «توابع میرایی» به دلخواه نیست. لزجت تلاطم مورد استفاده عبارت است از:

$$v_t = C_\mu v^2 \frac{k}{\varepsilon} \quad (5)$$

که v اندازه (مقیاس) سرعت می‌باشد (در هندسه لوله v^2 نمایانگر شدت نوسانات شعاعی می‌باشد)

۳. جنبه‌های عددی:

معادله URANS (۱) و معادلات مدل اغتشاش وابسته به آن توسط برنامه‌های عددی تفاضل متناهی (FD) و time marching حل شدند. کدهای پیشرفته‌ای در روش جداسازی مرتبه دوم Crank- Nicolson بر روی یک شبکه غیریکنواخت (ساختار یافته در جهت r) شامل دامنه‌ای از مدل‌های اغتشاش مذکور به خدمت گرفته شد. برای بهره‌برداری از تشابه تقارنی ما مومنتم و معادلات مدل را برای نیمی از کانال (محدوده لوله) حل کردیم و شرایط مرزی شیب صفر در خط مرکزی لوله را بر سرعت و متغیرهای انتقال مدل اعمال کردیم. ما از ۴۰۰ نقطه شبکه مابین دیواره و خط مرکزی لوله (یا کانال) برای کلیه مدل‌ها استفاده کردیم. کدهای هندسی تولید شده این شبکه برای دسته‌بندی نقاط نزدیکتر به دیواره استفاده شدند. اولین نقطه شبکه 0.1 برابر نخستین قسمت دیواره بالای دیواره در تمامی شش مدل مفروض می‌باشد. گام زمانبندی 5×10^{-2} که برای هر شش مدل کارآمد می‌باشد، در نظر گرفته شد. در هر صورت نتایج به صورت مستقل از این مقادیر شبکه‌ای و گامها هستند.

۴. نتایج - ارزیابی نتایج با داده‌های DNS:

ارزیابی دقت مدل‌ها بوسیله محاسبات و مقایسه پروفیل سرعت قابل دستیابی می‌باشد. تنشهای رینولدز و دیگر خصوصیات لازم توسط داده‌های Moser DNS و همکارانش در $R_\tau = 590$ معین شده‌اند [۲].

شکل‌های (۱) و (۲) پروفیل‌های معادل سرعت متوسط مدل شده را نشان می‌دهند و با داده‌های DNS جریان داخل کانال مقایسه می‌کند (منحنی توپر). شکل (۱) یک نمودار لگاریتمی - خطی می‌باشد که نشان دهنده محدوده دیواره با جزئیات بیشتر می‌باشد و برای قسمت‌های دیواره می‌باشد. از طرف دیگر شکل (۲) یک نمودار با محورهای خطی می‌باشد. تمامی مدل‌ها در محدوده نزدیک به دیواره انطباق مناسبی دارند. اما در $y^+ = 10$ هیچیک از پروفیل‌ها تطابقی با هم ندارند. در مقام مقایسه پیش‌بینی مدل KEV2 برای u^+ و $\frac{\bar{u}}{U_c}$ وقتی که بی-

بعدسازی u_r و U_c به دقت لحاظ می‌گردد، انطباق خوبی با DNS بدست می‌دهد. مدل BL پروفیل سرعت را اغراق‌آمیز برآورد می‌کند (شکل (۲)). مدل BL پروفیل جریان کانال دور از دیواره را کمتر پیش‌بینی می‌کند. این مطلب احتمالاً به خاطر مفروضات اغراق‌آمیز این مدل می‌باشد. محاسبات در دیگر مدل‌ها مثل KE, SA, KW و SST به یکدیگر خیلی نزدیک می‌باشند. پروفیل‌های تنشهای برشی رینولدز در شکل (۳) نمایش داده شده است. به جز مدل‌های BL و SA تطابق خوبی بین نتایج سایر مدل‌ها با داده‌های DNS ملاحظه می‌گردد. نتایج مدل BL کمتر از برآوردها و نتایج مدل SA بیش از برآوردها می‌باشد.

توزیع لزجت گردابه ای در هر کدام از مدلها در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج این مدلها در نزدیکی دیواره (مخصوصاً برای $y_w/h < 0.1$) در مقایسه با یکدیگر و نیز داده‌های DNS دارای تطابق خوبی می‌باشند. اما در لایه خارجی اختلافات زیادی به وقوع می‌پیوندد. در لایه خارجی مدل BL کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده و مدل تک‌معادله‌ای و دومعادله‌ای بیش از مقادیر پیش‌بینی شده را ارائه می‌کنند. تمامی آنها نسبت به داده‌های DNS دارای اختلافی 93% (برای مدل SA) و حتی بیشتر بخصوص در خط مرکزی می‌باشند. ν_t در مدل BL در لایه خارجی 20% از داده‌های DNS کوچکتر می‌باشد. بیشترین اختلاف متعلق به مدل SST است و دیگر لزجتهای تلامطم به اندازه نیمی از فاصله پروفیل‌های SST و DNS افت دارند. اشکال (۵) تا (۸) نمایانگر سهم محاسبه شده از داده‌های DNS برای انرژی جنبشی تلامطمی در محدوده دیواره مزبور می‌باشد، سهم k توسط انتشار و اتلافات در نزدیک دیواره بسیار مهم است. در حالی که دور از دیواره ترم تولید و اتلافات مهم می‌باشد، ترم انتشار اغتشاش در $y^+ = 7$ مشخصاً تغییر می‌کند. در محدوده دیواره نرخ اتلافات نرخ انتشار را تنظیم می‌کند. مابین ترم تولید در تمامی معادلات مدلها و سهم k از DNS مطابقت خوبی وجود دارد. اما اختلافات وسیعی در مقایسه مدل‌های SST و KE و KW با DNS برای ترمهای اتلافات و انتشار وجود دارد (اشکال ۵، ۷ و ۸). مدل KEV2 بهترین پیش‌بینی و تخمین را برای ترمهای اتلافات، تولید و انتشار در مقایسه با داده‌های DNS دارد (شکل ۶). این مطلب نشان می‌دهد که در لایه مرزی مدل KEV2 بهتر از سایر مدلها کار می‌کند. در قسمت بعدی ما اجرای این مدلها را برای جریان متلامطم شتاب دار در یک لوله تحلیل می‌کنیم.

۵. مقایسه با نتایج عملی و آزمایشگاهی:

He و Jackson جریان شتاب دار متلامطم (شتاب کاهنده و افزایشنده) در لوله‌ها را مورد مطالعه قرار دادند [۱]. آزمایشات آنها، برای یک دوره کامل شتابدهی جریان که سرعت سیال به صورت خطی از مقدار اولیه $U_{b0} = 0.138 \frac{m}{s}$ تا مقدار نهایی $U_{b1} = 0.891$ در پریودهای زمانی ۲ تا ۹ ثانیه افزایش می‌یابد، صورت پذیرفته است. عدد رینولدز اولیه و نهایی در ۷۰۰۰ و ۴۵۲۰۰ ثابت باقی می‌مانند. بنابراین اعداد رینولدز بر پایه واحدهای دیواره و $(Re_r)u_r$ برابر ۲۴۰/۵ و ۱۲۴۳ می‌باشند. از طرفی پارامتر بی‌بعد نرخ شیب سیستماتیک $\left(\gamma = \frac{D}{U_{r0}} \left(\frac{1}{U_{b0}} \frac{dU_b}{dt} \right) \right)$ از 0.34 (جریان شبه پایا) به 15.3 (جریان متلامطم شتاب دار) افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی آنها تنها جریان متوسط و چگونگی پاسخ اغتشاش به عوامل گذرای اعمالی را نشان نمی‌دهد بلکه یک منظر جدید پیرامون نگرش به مقوله دینامیک اغتشاش ایجاد می‌کند. ما اکنون تخمینهای مدل‌های URANS را با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط He و Jackson (که در بالا عنوان گردید) برای یک دوره کامل شتابدهی جریان با دبی افزایشی طی زمانهای ۴۵ و ۵ ثانیه مقایسه می‌کنیم.

شکل (۹) توسعه سرعت متوسط محلی برای یک دوره کامل شتابدهی جریان با دبی افزایشی طی ۴۵s را نشان می‌دهد ($\gamma = 0.68$). نتایج به صورت توابع اعداد رینولدز برای موقعیتهایی از شعاع ترسیم شده‌اند. پاسخ سرعت محلی در ناحیه دیواره و مرکز مختلف می‌باشند. پیش‌بینی صورت گرفته جریان متلامطم توسط مدل BL در این شرایط دارای نتایج ضعیف بوده و خیلی کمتر از مقادیر اندازه گیری شده است. جز در مرکز، مطابقت دیگر مدلها با نتایج آزمایشگاهی برای تمامی موقعیتهای شعاعی بسیار عالی است. تمامی مدلها تمایل دارند که در طی مرحله شتاب‌گیری در مرکز لوله سرعتی کمتر از مبنای اصلی داشته باشند. نتایج دوره افزایشی نرخ جریان با شیب صعودی برای پریود زمانی ۵s در شکل (۱۰) نمایش داده شده ($\gamma = 0.31$) است. مدل BL مشخصاً سرعت را کمتر از مقدار اندازه گیری پیش‌بینی می‌کند. نتایج دیگر مدلها به هم بسیار نزدیک اند و مخصوصاً با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند. به جز محدوده مرکزی برای

Re>32000 در انتهای مرحله شتابدهی که نتایج با هم مطابقت ندارند، البته پیش‌بینی‌های مدل KEV2 در این شرایط بسیار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد (Re>32000, $r=0$).

توسعه انرژی جنبشی اغتشاش k برای یک دوره کامل شتابدهی جریان با شیب صعودی برای پریود زمانی 5S در شکل (۱۱) بر چندین شعاع مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، یک تأثیر تأخیری بر اثر اعمال عبور جریان در پاسخ نوسانات سرعت وجود دارد. تمامی مدلها اثر تأخیر زمانی را به خوبی آزمایشات پیش‌بینی می‌کنند. حساسیت به تغییرات در محدوده مرکز بسیار کند می‌باشد در صورتی که این حساسیت در نزدیکی‌های دیواره بیشتر است. He و Jackson [۱] پریود تأخیری (τ) «پریود زمانی از لحظه شروع یک دوره تا لحظه واکنش دهی جریان در محلی معلوم می‌باشد» را تعیین کردند. همانگونه که مشاهده می‌شود، این پارامتر کاملاً تابع جایگاه شعاعی می‌باشد که کمتر از 1S در نزدیکی دیواره و در مرکز تقریباً 4S می‌باشد. واکنش انرژی جنبشی اغتشاش اعمالی در محدوده دیواره شروع می‌شود و در یک سرعت مشخص به سمت مرکز لوله کشیده می‌شود [۱].

در تمامی مکانها به جز نزدیکی دیواره در $Re > 25000$ ، KEV2 در یک دوره کامل شیب صعودی به طور محسوسی با آزمایشات مطابقت دارد، در حالی که KW و SST تنها در اعداد رینولدز بالا آن هم در نزدیکی دیواره با آزمایشات مطابقت دارد ($r = 21, 23.5mm$). اما آنها در اعداد رینولدز پایین انرژی جنبشی اغتشاش را کمتر از مبنای معلوم به دست می‌دهند $Re > 25000$. مدل KE در پایان یک دوره کامل شتابدهی جریان در مرکز ضعیف ظاهر می‌شود (Re>32000, $r=0$).

۶. نتیجه گیری:

جریان گذرای درون لوله توسط ۶ مدل مختلف RANS شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های DNS [۲] و آزمایشات اجرا شده توسط He و Jackson مقایسه شدند [۱]. مدل‌های مفروض مدل جبری Baldwin-Lomax، مدل تک‌معادله‌ای S-A، مدل $k-\epsilon$ با تصحیح دیواره BL، مدل $k-\omega$ ، مدل SST و مدل $k-\epsilon-U^2$ بودند.

برای ارزیابی صحت این مدل‌ها پروفیل سرعت، تنشهای رینولدز و دیگر خصوصیات در $Re_p = 590$ با استفاده از داده‌های DNS برای تعیین سرعت حقیقی محاسبه گردیدند [۲]. نشان داده شد که مدل $k-\epsilon-U^2$ دارای پتانسیل محاسبه دقیق‌تر سهم k و پروفیل سرعت و تنش رینولدز می‌باشد.

نتایج عددی ۶ مدل با اندازه‌گیری‌های He و Jackson [۱] برای آزمایش فرضیات این مدلها تحت شرایط شتابدهی موقت، برای بدست آوردن نقاط قوت و ضعف این مدلها مقایسه شد. نتایج مدل BL انطباق خوبی با نتایج آزمایشات نداشت. تمامی مدل‌های دیگر، سرعت و پریود زمانی تأخیر را در دوره‌های جریان کوتاه و بلند مدت با شیب صعودی به خوبی آزمایشات پیش‌بینی کردند. پریود زمانی تأخیر انرژی جنبشی اغتشاش محاسبه شده در محدوده مرکزی در حدود 4S است که با نتایج آزمایشات همخوانی دارد.

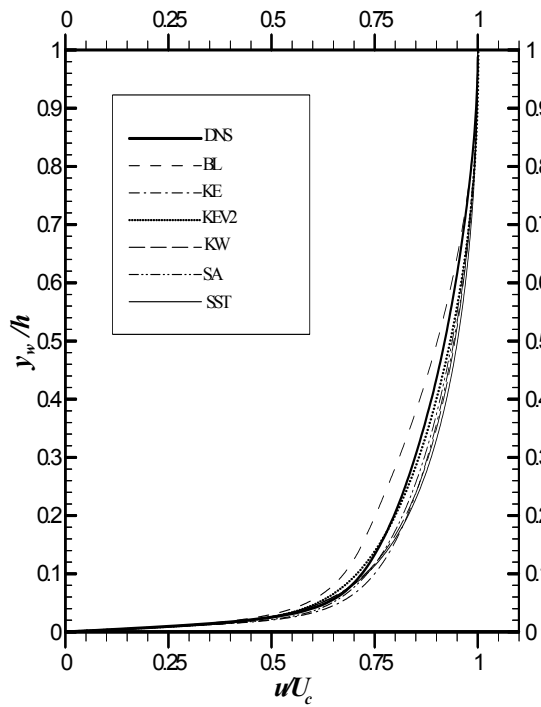
مراجع

- [1] He, S. and Jackson, J. D., "A Study of Turbulence under Conditions of Transient Flow in a Pipe," J. Fluid Mech. 408, 1-38, 2000.
- [2] Moser, R. D., Kim, J., and Mansour, N. M., "Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flows up to $Re_p=590$," Physics of Fluids, 11, 943-945, 1999.
- [3] Yorke, C. P., and Coleman, G. N., "Assessment of Common Turbulence Models for an Idealized Adverse Pressure Gradient Flow," European Journal of Fluid Mechanics B/Fluids, 23, 319-337, 2004.
- [4] Baldwin, B. S., Lomax, H., "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-257, 1978.

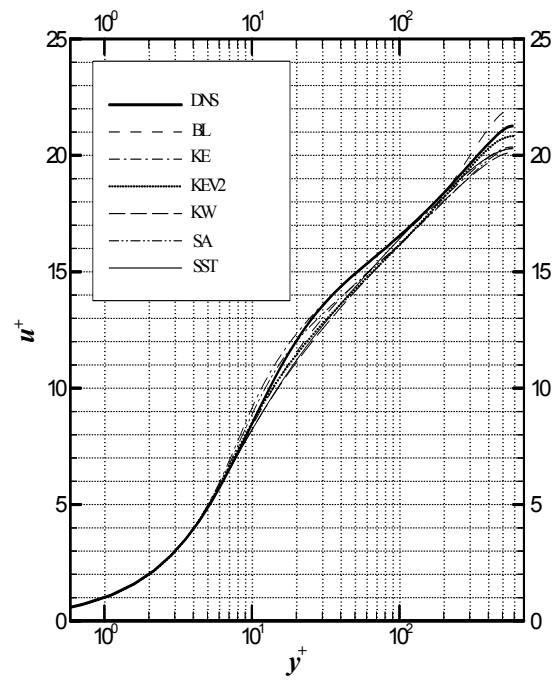
- [5] Spalart P. R. and Allmaras S. R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows," La Recherche Aeronautique, 1, 5-21, 1994.
- [6] Lam C. K. G. and Bremhorst K. A., "Modified Form of the $k - \varepsilon$ Model for Predicting Wall Turbulence," Journal of Fluids Engineering, 103, 456-460, 1981.
- [7] Wilcox D. C., "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models," AIAA Journal, 26, 1299-1310, 1988.
- [8] Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA J. 32, 1598-1605, 1994.
- [9] Durbin P. A., "Separated Flow Computations with the $k - \varepsilon - v^2$ Model," AIAA J. 33, 659-664, 1995.
- [10] Wilcox, D. C., "Turbulence Modeling for CFD," Second edition, DCW Industries, 1998.
- [11] Scotti, A. and Piomelli, U., "Turbulence Models in Pulsating Flows," AIAA J. 40, 537-540, 2002.

جدول ۱. تأخیرهای مطلق برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی

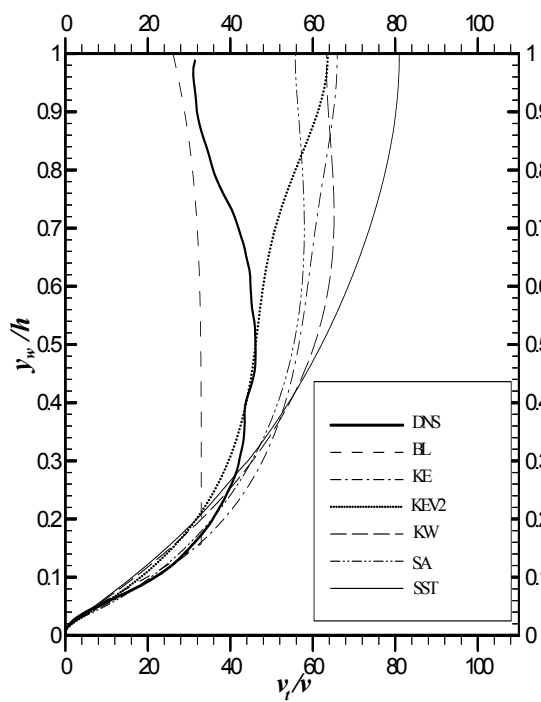
Ramp time period (sec)	5	10	15	25	45
Dimensionless ramp rate (γ)	6.1	3.1	2	1.5	0.68
Delay τ (sec) – experiments	3.9	4.1	4.0	3.9	4.0
Delay τ (sec) – KEV2 predictions	3.78	3.91	4.11	3.58	4.7



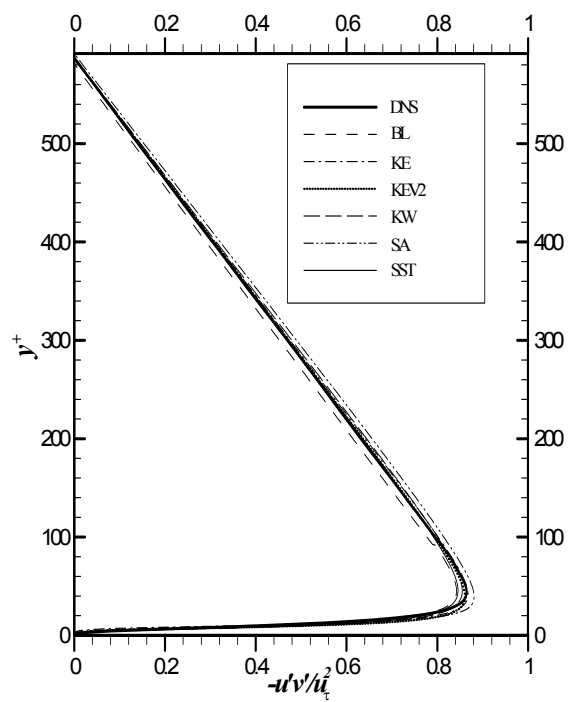
شکل ۲. پیش بینی مدلها و DNS برای \bar{u}/U_c در $R_\tau = 590$



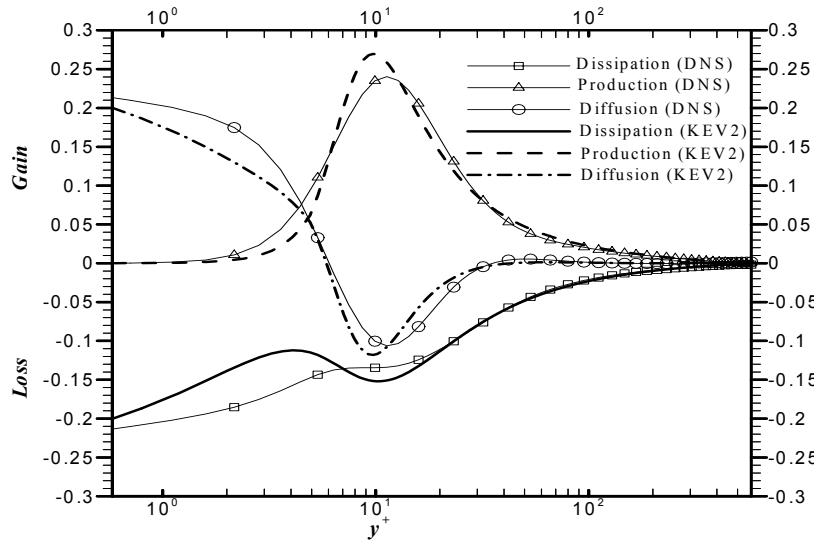
شکل ۱. پیش بینی مدلها و DNS برای u^+ در $R_\tau = 590$



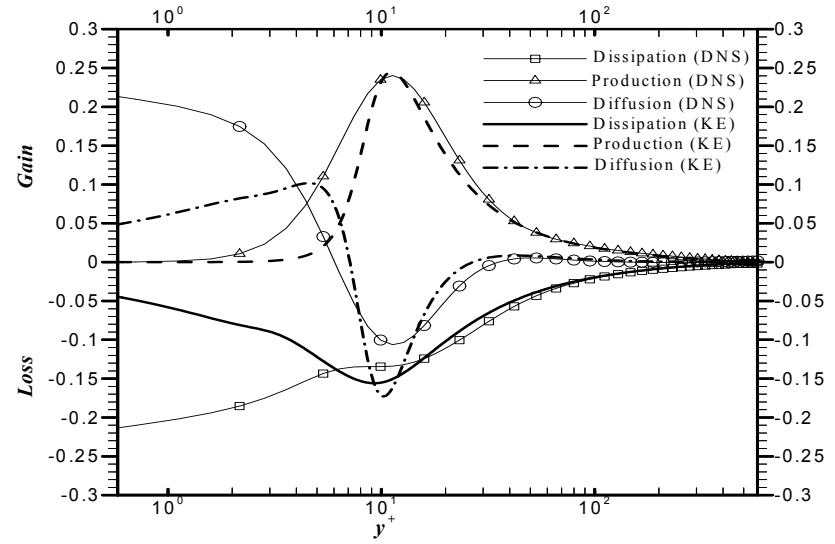
شکل ۴. پیش بینی مدلها و DNS برای v_T/v در $R_\tau = 590$



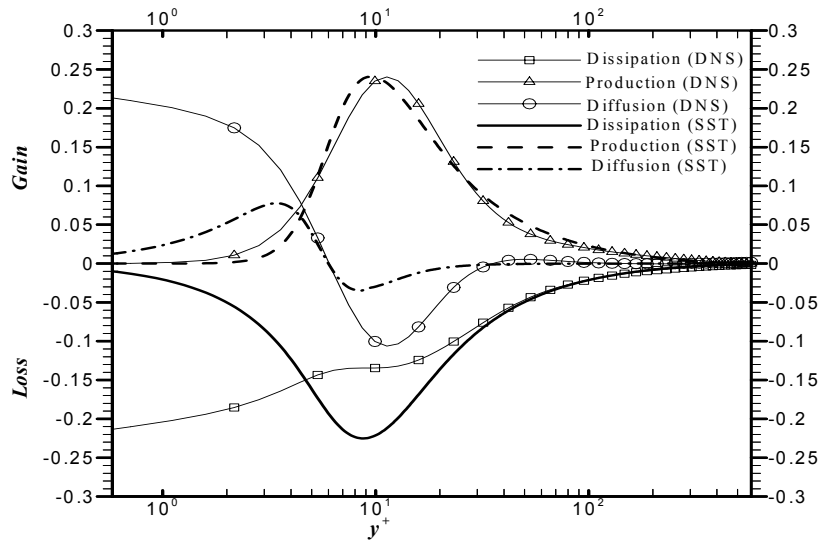
شکل ۳. پیش بینی مدلها و DNS برای $-u'v'/u_\tau^2$ در $R_\tau = 590$



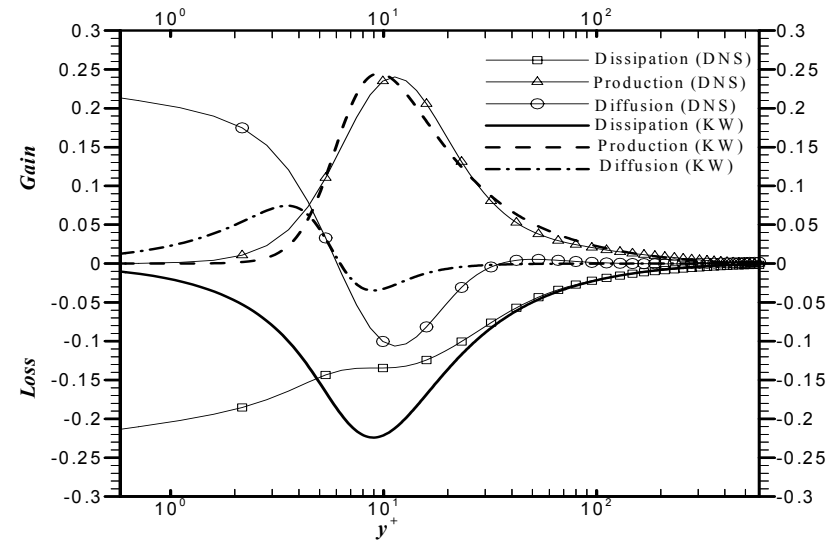
شکل ۶. پیش بینی مدل $k - \varepsilon - \nu^2$ و DNS برای سهم انرژی جنبشی اغتشاش در $Re_\tau = 590$



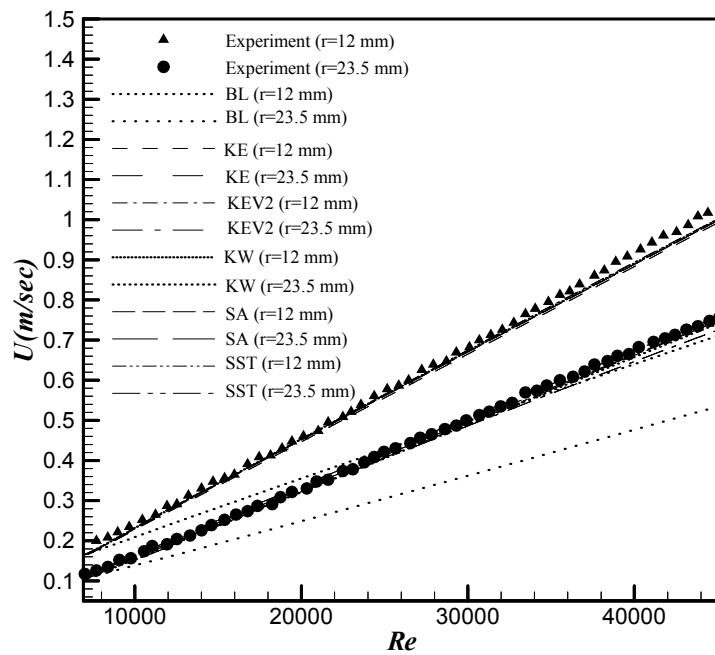
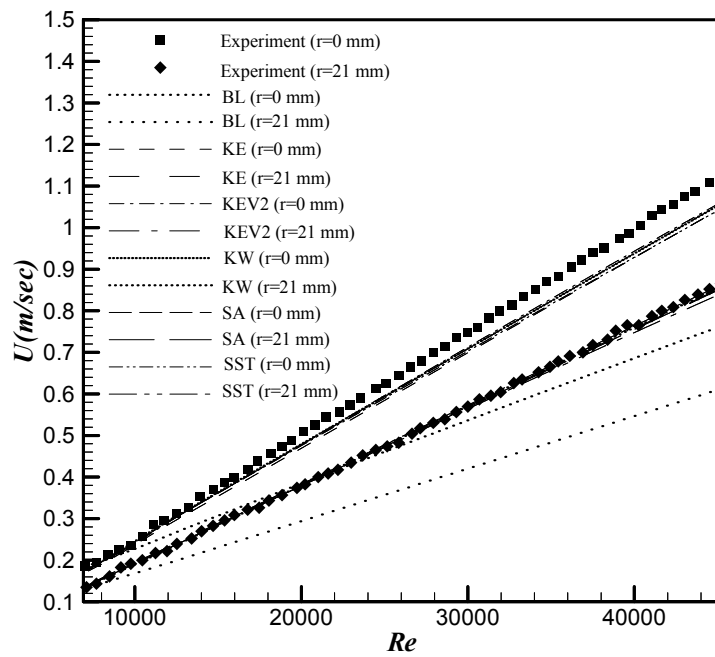
شکل ۵. پیش بینی مدل $k - \varepsilon$ و DNS برای سهم انرژی جنبشی اغتشاش در $Re_\tau = 590$



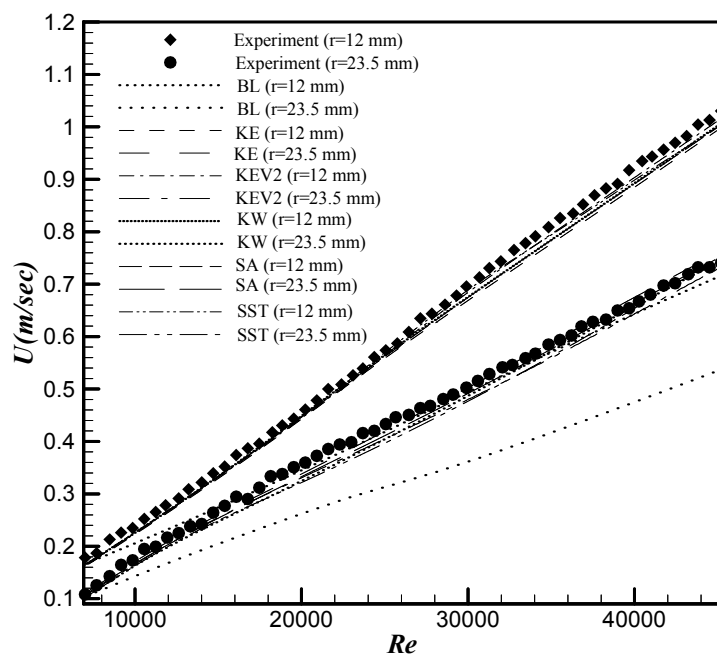
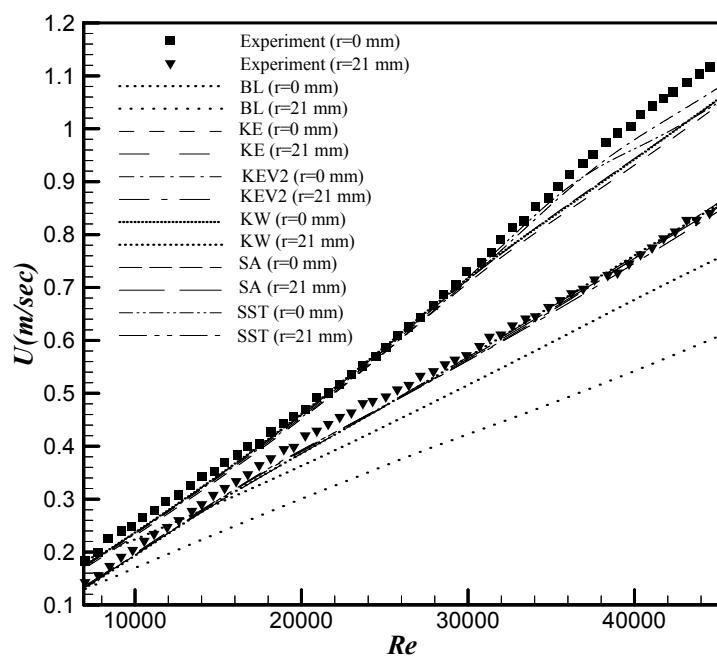
شکل ۸. پیش بینی مدل SST و DNS برای سهم انرژی جنبشی اغتشاش در $Re_\tau = 590$



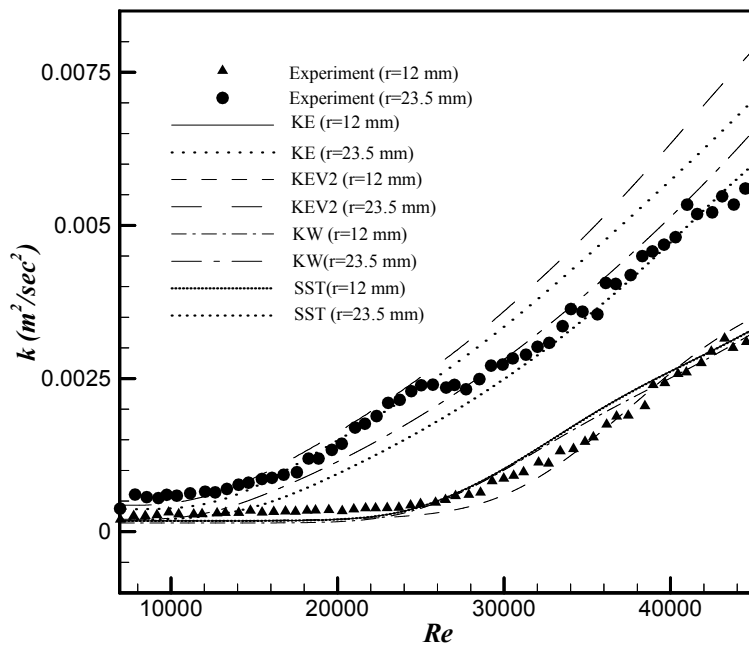
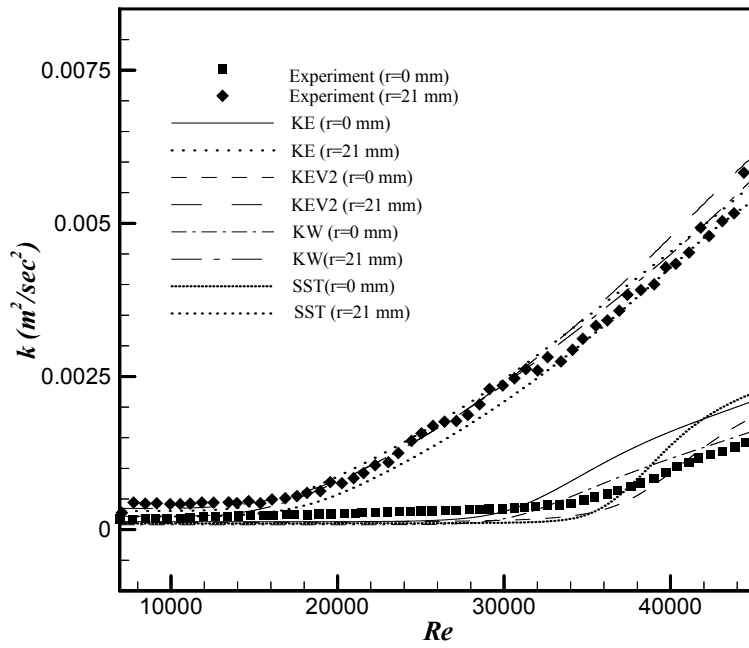
شکل ۷. پیش بینی مدل $k - \omega$ و DNS برای سهم انرژی جنبشی اغتشاش در $Re_\tau = 590$



شکل ۹. مقایسه سرعت متوسط محلی مدل‌های مختلف اغتشاش و نتایج آزمایشگاهی در دوره زمانی ۴۵S با شیب صعودی جریان



شکل ۱۰. پیش بینی مدل‌های مختلف اغتشاش و نتایج آزمایشگاهی برای سرعت متوسط محلی یک دوره کامل شتابدهی جریان با دبی افزایشی در مدت ۵S



شکل ۱۱. پیش بینی مدل‌های مختلف اغتشاش و نتایج آزمایشگاهی برای توسعه انرژی جنبشی اغتشاش (k) در طی یک دوره کامل شتابدهی ۵ ثانیه ای جریان با شیب صعودی