

Research Paper

Non-Uniform Interaction Effect of Flow and Rigid Submerged Vegetation on Turbulent Flow Characteristics

Mohammad Hadi Mohammadi¹, Mohammad Hadi Fatahi^{2*}, Amin Rostami Ravari³

1. Department of Civil Engineering, Marv. C., Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

2. Department of Civil Department, Marv. C., Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

3. Department of Water Department, Marv. C., Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

Received: 2024/06/25

Revised: 2024/07/19

Accepted: 2024/09/28

Use your device to scan and read
the article online



DOI:

[10.30495/wej.2024.33599.2424](https://doi.org/10.30495/wej.2024.33599.2424)

Keywords:

Rigid Vegetated elements,
Acceleration and decelerating
flows, 3D pools, Padana Marbor
River

Vegetation patches in riverbeds create shear instability, leading to the transfer of mass and momentum between different layers of vegetation. The presence of vegetation reduces flow velocity, narrows the river width, increases sedimentation in the riverbed, and consequently decreases discharge. The study conducted experiments in a straight rectangular channel measuring 14 meters in length, 90 cm in width, and 60 cm in depth, with a constant flow rate of 31.7 L/s. A 3D pool was constructed with a gravel bed and rigid submerged vegetated elements of 12 cm height and 10 cm diameter, with a fixed area density of 0.004 irregularly distributed on the bedform. Velocity fluctuations were measured at 13 cross-sections from the decelerating flow region to the accelerating flow region with a spatial interval of 20 cm using a downward-looking ADV device with a sampling frequency of 200 Hz over a 90-second period. The research revealed that the maximum flow speed occurred at $y/h=0.52$ for decelerating flow and at $y/h=0.47$ for accelerating flow. However, the depth of validity of the logarithmic law appeared to depend on the velocity profile measurement location and the non-uniform distribution of submerged rigid vegetated elements on the 3D bedform. Analysis of the velocity defect law showed wake strength coefficients of $\Pi=-2.8$ and $\Pi=-5$ in the decelerating and accelerating flow sections respectively. These sections, in the presence of submerged rigid vegetated elements, can impede flow, causing water to swirl and bend around them, leading to increased vorticity generation and the formation of complex flow patterns with rotating vortices. Turbulent intensities in the accelerating flow section, both in the flow direction and perpendicular to it, were consistently higher than those in the decelerating flow section. This suggests that the flow in these areas is significantly influenced by the presence of submerged rigid vegetation, in addition to the effects of increased flow velocity and favorable pressure gradient. Eddy patterns influenced by the 3D pool and submerged rigid vegetation can have ecological implications, creating micro-habitats with varying current velocities and turbidity levels, impacting the distribution of aquatic organisms and overall ecosystem health. Understanding these implications is crucial for applications such as river restoration, habitat enhancement, and water resource management.

Citation: Mohammadi M.H, Fatahi M.H, Rostami Ravari A. Non-uniform interaction effect of flow and rigid submerged vegetation on turbulent flow characteristics. Water Resources Engineering Journal. 2025; 17(63): 82- 96.

***Corresponding author:** Mohammad Hadi Fatahi

Address: Associate Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, Marvdasht, Iran

Tell: +989171040309

Email: fatahi.mh@miau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The presence of vegetation in riverbeds and banks has a significant impact on the characteristics of water flow. It can enhance the roughness of the flow path, reduce the flow velocity, increase turbulence, reduce erosion, and deepen the flow. Vegetation is generally a key determinant of a river's hydraulic characteristics and can influence the functioning of hydraulic structures along its path. It's crucial to understand the interplay between the sediment in the river bed, the vegetation on the bedform, and the non-uniform flow for studying sediment transfer and friction coefficients. Despite being commonly observed, accelerating and decelerating currents in rivers are complex phenomena that are not yet fully comprehended. In the field of river geomorphology research, vegetation has a significant role. Numerous studies over the past decade have focused on velocity profiles and the characteristics of turbulent flow in vegetated channels. The phenomenon of maximum velocity occurring below the water surface, known as dip, and the nonlinear distribution of Reynolds stress are attributed to secondary currents and anisotropy in turbulence. Research findings indicate that negative values in the Reynolds stress distribution are found near the water surface, while zero shear stress is found below the water surface. Nezu and Nakagawa (1993) demonstrated that the negative Reynolds stress values near the water surface are consistent with the fact that du/dz is also negative in this region. These negative values are likely linked to the closeness to vegetation. Nosrati et al. (2021) conducted an investigation into the velocity profile at different intervals of a gravel bed river in the presence of three-dimensional bedforms, and scattered natural submerged vegetation patches. The presence of these patches causes the velocity profile to deviate from its classical trend. There has been less comparative research on flow turbulence components in decelerating and accelerating flow sections in the presence of submerged rigid vegetated elements that are irregularly and randomly distributed on the bed form. To address this, a three-dimensional pool with a grave bed has been used to simulate sections of decelerating and accelerating currents and rigid elements in a submerged

condition with random and scattered distribution on the pool. Laboratory studies can provide valuable insights about turbulence components in gravel-bed rivers in the presence of vegetated elements and the three-dimensional pool. By recreating natural river conditions in laboratory flumes, researchers and hydraulic engineers can describe various parameters such as flow velocity, turbulence intensities, and sediment transport patterns. However, it's important to note that while laboratory studies can yield valuable results, they may not fully replicate all aspects of natural river systems. Therefore, field studies are also necessary to validate laboratory findings and ensure their applicability to real-world conditions in natural rivers. The objective of this manuscript is to explore the effects of scattered and randomly distributed submerged rigid vegetated elements on turbulent flow characteristics, such as velocity distribution, turbulence intensities, and vorticity, in decelerating flow sections compared with accelerating flow sections in gravel channels.

Materials and Methods

The experiments were conducted in a straight, rectangular channel with glass walls. The channel, located in the hydraulic laboratory of Iran University of Science and Technology in Tehran, measures 14 meters in length, 90 cm in width, and 60 cm in depth. A vertical rectangular gate at the channel's end was utilized to regulate the water level throughout the experiment. The flow depth was measured using a ruler with a 1 mm increment. The gravel used in the experiment had a mean diameter (d_{50}) of 25 mm and a geometric standard deviation (σ_g) greater than 1.4, calculated as the square root of the ratio of the diameters of sediment particles smaller than 84% and 16% of the particle diameter. To simulate rigid submerged elements, plastic cylinders with a diameter of 10 cm and an average height of 12 cm were used. A total of 162 such elements were randomly distributed over an area of 2.4 x 0.6 square meters, equating to 112 elements per square meter. However, in this study, the area density of vegetation was kept constant at $\phi=0.004$. A straight three-dimensional pool with inlet and outlet slopes

of 10.75 and 7.96 degrees, respectively, was made to create a non-uniform decelerating and accelerating flow. These slopes were based on field observations in the Padena Marbor River. The 3D pool was placed more than 5 meters from the start of the experimental flume to ensure flow development and more than 2 meters from the end of the channel to prevent the end valve of the flume from affecting the velocity distribution. Velocity measurements began 20 cm above the 3D pool and continued in 20 cm increments to 20 cm from the pool's end downstream. Thirteen velocity profiles were taken along the channel's central line. Two cross-sections at $X/L=0.36$ and $X/L=0.71$ were used in the decelerating and accelerating flow sections, respectively, where X and L represent the distance from the pool's start and the pool's length. About 33 velocity measurement points were taken in each section, starting from 4 mm from the bed bottom and up to 5 cm below the water level. An Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) was used to measure instantaneous velocities at a frequency of 200 Hz and a sampling time of 90 seconds. The Nortek vectrino, with a frequency of 10 MHz, an accuracy of ± 1 mm/s, and a sampling volume with a height of 5.5 mm, was used. The data captured by the ADV were analyzed using WinADV package, a Windows-based preprocessor and viewing tool for ADV files. This package provides signal quality information in the form of a correlation coefficient (COR) and signal-to-noise ratio (SNR). As a general rule, instantaneous velocity data affected by acoustic noise, indicated by a COR not exceeding 70% and an SNR less than 5 dB, should be discarded. To avoid possible matching effects, data with an SNR less than 15 dB and a COR less than 70% were filtered. For each measurement point, 18,000 instantaneous velocity measurements were obtained over a 90-second data collection duration, with a sampling frequency of 200 Hz.

Findings

Throughout the experiment, the flow rate remained steady at 31.7 liters per second. As per Table 1, the flow is sub-critical and entirely turbulent. The non-uniformity

coefficient β , according to this table and the computed values, is mostly greater than -1 in decelerating flow sections and less than -1 in accelerating flow sections. However, in certain sections, such as ($X/L=0.21$) and ($X/L=0.79$), the non-uniformity coefficient β contradicts the findings of Graff and Altinakar (1998). It's worth noting that their results were obtained without the presence of vegetative elements. Figures 3 and 4 show that the maximum flow velocity occurs at $y/h=0.52$ for decelerating flow and at $y/h=0.47$ for accelerating flow. This phenomenon, known as the dip phenomenon, is due to the impact of secondary currents. These currents, caused by turbulence anisotropy resulting from sparse area vegetation and a low aspect ratio, alter the position of u_c in the velocity distribution. The Log-wake law investigation in this study indicates Π values of -2.8 and -5 in decelerating and accelerating flow sections, respectively. For the decelerating flow section with an aspect ratio $B/h < 5$, the vorticity value decreases up to a relative water depth of $y/h=0.09$, then increases again until a relative depth of 0.52, and finally decreases nearly to the water level. In contrast, Figure 8 shows that for the accelerating flow section, the vorticity remains almost constant up to a relative water depth of $y/h=0.44$. Due to the irregular distribution of rigid vegetated elements, it sharply decreases to a relative depth of 0.52 and then rises again towards the water surface in a convex shape. However, decelerating and accelerating flow sections in a three-dimensional pool with submerged rigid vegetated elements can act as flow obstructions, causing the water to curve and rotate around them. This can lead to increased vorticity generation and more complex flow patterns with swirling vortices and turbulence. Moreover, the distribution of disturbance intensities in the flow direction and perpendicular to the flow in decelerating and accelerating flow sections with rigid submerged elements suggests a convex form in the flow direction and a concave form perpendicular to the flow. However, in the accelerating flow section, the intensity distribution has changed to a convex form in both directions. Consequently, it appears that the turbulent

intensities in the accelerating flow section, both in the flow direction and perpendicular to it, are consistently higher than the corresponding values in the decelerating flow section.

Conclusion

This study aims to analyze the characteristics of turbulent flow, such as velocity distribution, the log-wake law, vorticity, and turbulence intensities in sections of decelerating and accelerating currents in the presence of rigid submerged vegetation. A three-dimensional pool with a gravel bed in a laboratory flume was utilized for this purpose. The findings of this research revealed that:

- The peak flow velocity was observed at $y/h=0.52$ for decelerating flow and at $y/h=0.47$ for accelerating flow. This suggests that the depth of validity of the logarithmic law is dependent on the measurement position of the velocity profile and the non-uniform distribution of rigid submerged vegetation in the three-dimensional pool.
- The log-wake law examination showed that the wake strength coefficient rise function in the decelerating and accelerating flow sections under experimental conditions had values of $\Pi=-2.8$ and $\Pi=-5$.
- Longitudinal vorticities are formed due to the transverse imbalance of turbulent stresses caused by positive and negative pressure gradients in the presence of an irregular distribution of rigid submerged elements. These vorticities are stretched and mixed in transverse directions, leading to the formation of large secondary currents. Sections of decelerating and accelerating currents in a three-dimensional pool with submerged rigid elements can obstruct the flow, causing the water to bend and rotate around them. This can result in increased vorticity generation and more complex flow

patterns with rotating vortices and turbulence.

- Turbulence intensity in channels with rigid submerged vegetation is a measure of the flow velocity fluctuations caused by turbulence in these channels. It appears that the turbulence intensities in the section of the accelerating flow in the direction of the flow and perpendicular to the flow are consistently higher than the corresponding values in the section of the decelerating flow. However, vertical momentum exchange has been observed in the upper part of the rigid submerged vegetation in the section of the decelerating flow in the streamwise direction. It is possible that in these sections of the flow, the presence of rigid submerged vegetation is significantly influenced by the effect of increasing flow velocity and a favorable pressure gradient.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Mohammad Hadi Fattahi, Amin Rostami Ravari, Methodology and data analysis: Mohammad Hadi Fattahi & Mohammad Hadi Mohammadi, Supervision and final writing: Mohammad Hadi Fattahi

مقاله پژوهشی

اثر متقابل غیریکنواختی جریان و پوشش گیاهی صلب مستغرق بر خصوصیات جریان آشفته

محمد هادی محمدی¹، محمد هادی فتاحی^{2*}، امین رستمی راوری³

1. دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت، ایران

2. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت، ایران

3. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت، ایران

چکیده:

ناپایداری برشی ناشی از حضور پوشش گیاهی در بستر رودخانه‌ها باعث تبادل جرم و مومنتوم بین لایه‌های داخل و فوقانی پوشش گیاهی می‌شود. حضور پوشش گیاهی باعث کاهش سرعت جریان، کاهش عرض رودخانه، افزایش رسوبگذاری در بستر رودخانه و در نتیجه کاهش دبی جریان عبوری رودخانه می‌شود. آزمایشات این پژوهش در یک کانال مستطیلی مستقیم به طول 14 متر، عرض 90 سانتی متر و عمق 60 سانتی متر تحت دبی ثابت 31/7 لیتر بر ثانیه انجام پذیرفته است. یک گودآب سه‌بعدی شنی با شیب جریان گیاهی صلب مستغرق با ارتفاع 12 سانتی متر و قطر 10 سانتی متر با تراکم ثابت سطحی 0/004 بر روی کندشونده 10/75 درجه و شیب جریان تندشونده 7/96 درجه با بستر شنی احداث شده و المان‌های شکل بستر به صورت نامنظم توزیع شده است. مولفه‌های نوسانی سرعت در 13 مقطع عرضی از مقطع جریان کندشونده تا مقطع جریان تندشونده با گام مکانی 20 سانتی متر توسط دستگاه سرعت سنج صوتی پایین‌نگر با فرکانس نمونه‌برداری 200 هرتز و زمان 90 ثانیه‌ای برداشت شده است.

یافته‌های پژوهش نشان داد حداکثر سرعت جریان در $y/h = 0.52$ برای جریان کندشونده و در $y/h = 0.47$ برای جریان تندشونده حادث شده است. بنابراین به نظر می‌رسد عمق اعتبار قانون لگاریتمی تابعی از موقعیت اندازه‌گیری پروفیل سرعت و توزیع غیریکنواخت المان‌های گیاهی صلب مستغرق بر روی شکل بستر سه‌بعدی گودآب شنی بوده است. بررسی قانون نقصان سرعت حاکی از آن بوده است که تابع برخاستگی کلز در مقاطع جریان کندشونده و تندشونده در شرایط آزمایش دارای مقادیر $\Pi = -2.8$ و $\Pi = -5$ هستند. در هر صورت، مقاطع جریان‌های کندشونده و تندشونده در یک گودآب شنی سه‌بعدی در حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق می‌توانند به عنوان مانعی در جریان عمل کنند و باعث خم شدن و چرخش آب در اطراف آن‌ها شوند. این می‌تواند منجر به افزایش تولید گردابه، ایجاد الگوهای جریان پیچیده‌تر با گرداب‌های چرخشی و آشفتگی شود. نتایج حاکی از آن است که شدت‌های آشفتگی در مقطع جریان تندشونده در راستای جریان و در راستای عمود بر جریان همواره بیشتر از مقادیر مشابه در مقطع جریان کندشونده هستند چونکه در این مقاطع جریان به شدت تحت تأثیر حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق، مازاد بر تأثیر افزایش سرعت جریان و گرادیان فشار مطلوب قرار گرفته است. الگوهای گردابی تحت تأثیر گودآب‌های سه‌بعدی و پوشش گیاهی صلب مستغرق می‌توانند پیامدهای اکولوژیکی داشته باشند، زیستگاه‌های کوچکی با سرعت جریان و سطوح تلاطم متفاوت ایجاد کنند و بر توزیع موجودات آبی و سلامت کلی اکوسیستم تأثیر بگذارد. درک اثرات این موضوع برای کاربردهای مختلف از جمله احیای رودخانه، بهبود زیستگاه و مدیریت منابع آب بسیار مهم است.

تاریخ دریافت: 1403/04/05

تاریخ داوری: 1403/04/29

تاریخ پذیرش: 1403/07/07

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/wej.2024.33599.2424](https://doi.org/10.30495/wej.2024.33599.2424)

واژه‌های کلیدی:

پوشش گیاهی مستغرق صلب، جریان‌های کندشونده و تندشونده، شکل بستر سه‌بعدی گودآب، رودخانه ماربر پادنا.

* نویسنده مسئول: محمد هادی فتاحی

نشانی: گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت، ایران.

تلفن: 09171040309

پست الکترونیکی: fattahi.mh@miau.ac.ir

مقدمه

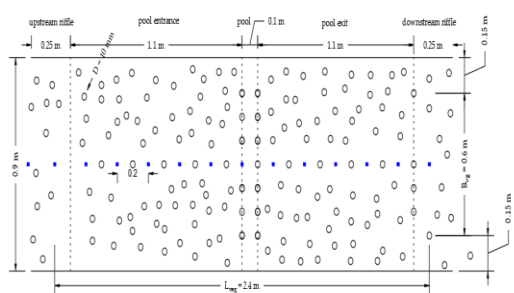
پوشش گیاهی در بستر و کناره رودخانه‌ها می‌تواند تأثیرات متعددی بر خصوصیات جریان آب از قبیل افزایش زبری مسیر جریان، کاهش سرعت، افزایش آشفتگی، کاهش فرسایش و افزایش عمق جریان را داشته باشد. به طور کلی، پوشش گیاهی یکی از عوامل مهم در تعیین خصوصیات هیدرولیکی رودخانه‌ها است و می‌تواند بر عملکرد سازه‌های هیدرولیکی موجود در مسیر اثرگذار باشد [1, 2]. آگاهی از فعل و انفعالات رسوب در بستر رودخانه، پوشش گیاهی در سواحل رودخانه و جریان غیریکنواخت برای مطالعه انتقال رسوب و ضریب اصطکاک ضروری است. در رودخانه‌ها، جریان‌های تندشونده و کندشونده پدیده‌های پیچیده‌ای هستند که به طور کامل درک نشده‌اند، اگرچه اغلب در عمل مشاهده می‌شوند [3-8]. از نقطه نظر هیدرولیک، علم جریان بر روی شکل‌های سه‌بعدی بستر (گودآب‌ها و خیزآب‌ها) نمونه‌های خوبی برای نشان دادن جریان‌های کندشونده و تندشونده هستند. مطالعات هورا و همکاران (2000) نشان می‌دهد که جریان‌های تندشونده باعث سرکوب نرخ آشفتگی شده، در حالی که جریان کندشونده اثر معکوس دارد [9]. تلاش‌هایی برای بررسی غیریکنواختی توزیع سرعت و خصوصیات جریان آشفته در کانال‌های روباز انجام شده است. کاردوسو و همکاران (1991) جریان‌های تدریجی تندشونده را در یک کانال صاف هیدرولیکی مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که توزیع سرعت برای کل عمق جریان از قانون لگاریتمی مگر در مناطق بسیار نزدیک به بستر $z/H < 0.2$ ، تبعیت نمی‌کند، جایی که z فاصله از بستر و H عمق کل جریان است [10]. سانگ و گراف (1994)، کیرونوتو و گراف (1995)، سونگ و چپو (2001) نیم‌رخ‌های سرعت، شدت آشفتگی و توزیع تنش رینولدز را برای جریان‌های تندشونده و کندشونده در کانال بستر شنی شناسایی کردند و دریافتند که: (1) حداکثر سرعت در زیر سطح آب برای تسریع سرعت جریان و در سطح آب برای کاهش سرعت جریان رخ می‌دهد. (2) میزان اعتبار قانون لگاریتمی برای $z/H < 0.2$ هم در جریان کندشونده هم جریان تندشونده برقرار است. (3) تنش رینولدز و شدت آشفتگی برای مقطع جریان تندشونده به شکل مقعر و برای مقطع جریان کندشونده به شکل محدب است [11-13]. پوشش گیاهی نقش مهمی در تحقیقات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای دارد. در دهه گذشته، مطالعات زیادی در مورد نیم‌رخ‌های سرعت و خصوصیات جریان آشفته در کانال‌های پوشش گیاهی انجام شده است [14-21]. نصیری و همکاران (2010) دریافتند که در شرایط جریان یکنواخت، حضور پوشش در کانال‌های بستر با بستر شنی، الگوی سرعت و توزیع تنش رینولدز را تغییر می‌دهند [22]. در مقاله‌ای دیگر نصیری و همکاران (2011) الگوهای مشابهی را برای سرعت و تنش رینولدز بر روی تلماسه‌های شنی یافتند. بر این اساس، حداکثر سرعت در زیر سطح آب رخ می‌دهد و توزیع تنش رینولدز از روند خطی پیروی نمی‌کند و شکل آن به فاصله از حضور پوشش گیاهی در ساحل کانال بستگی دارد [23]. افضل‌ی مهر و همکاران (2010) جریان تندشونده را در کانالی با بستر شنی و حضور پوشش گیاهی در ساحل کانال بررسی کرد و ملاحظه کردند که توزیع تنش‌های رینولدز S شکل هستند [24].

آنها دریافتند که وقوع سرعت حداکثر در زیر سطح آب (پدیده فرورفتگی جریان) و توزیع غیرخطی تنش رینولدز به دلیل جریان‌های ثانویه و ناهمسانگردی در آشفتگی است. همچنین، نتایج حاکی از آن بوده است که مقادیر منفی در توزیع تنش رینولدز در نزدیکی سطح آب و مقدار تنش برشی صفر در زیر سطح آب حادث شده است. نزو و ناکاگوا (1993) نشان دادند که مقادیر منفی تنش رینولدز در نزدیکی سطح آب با این واقعیت همخوانی دارد که du/dz نیز در این منطقه منفی است [25]. علاوه بر این، مقادیر منفی احتمالاً با نزدیکی به پوشش گیاهی مرتبط است. بررسی نیم‌رخ سرعت در بازه‌های مختلف یک رودخانه درشت‌دانه شنی-قلوه‌سنگی در حضور شکل بسترهای سه‌بعدی گوداب و خیزآب و توده‌های گیاهی پراکنده مستغرق طبیعی توسط نصرتی و همکاران (2021) نشان می‌دهد که وقوع پدیده فرورفتگی جریان در 80 درصد عمق جریان ناشی از ناپایداری‌های ناشی از حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزآب، غیریکنواخت بودن ذرات بستر و حضور توده‌های گیاهی پراکنده در بستر رودخانه است که باعث می‌شود نیم‌رخ سرعت از حالت کلاسیک و تئوریک خود فاصله بگیرد [18]. در هر صورت لکشمینارایانا و همکاران (1984) پارامتر فرورفتگی را برای جریان یکنواخت با بستر زبر تا 67 درصد عمق جریان برای نیم‌رخ‌های محور مرکزی کانال گزارش دادند [26].

اثر اشل زبری بر روی ساختار جریان از مهم‌ترین عوامل موثر در اعتبار یا عدم اعتبار قوانین توسعه یافته در هیدرولیک رودخانه است. عمده مطالعات انجام شده در این زمینه محدود به اشل زبری کوچک یعنی $h/d_{50} > 15$ است که در آن عمق جریان به طور قابل توجهی از قطر مشخصه بستر رودخانه یا کانال بزرگتر است. در حالیکه برای اشل بزرگ یعنی $h/d_{50} < 4$ مطالعه در رابطه با ساختار جریان و مشخصات توربولانس کمتر گزارش شده است [27]. اثر مقیاس زبری در جریان غیریکنواخت در کانال‌های شنی-قلوه سنگی توسط عبدالحسینی و همکاران (2009) نشان می‌دهد که قانون دیوار در بخش داخلی لایه مرزی در هر دو اشل معتبر بوده و لذا تعیین تنش برشی بستر بر اساس این قانون برای هر دو اشل به نتایج مطلوبی منتهی می‌شود. از طرف دیگر تأثیر اشل زبری بر روی تنش برشی بستر در جریان تند شونده بیشتر از جریان کند شونده است [28].

وجود المان‌های گیاهی غوطه‌ور و ماهیت جریان (تندشونده یا کندشونده) می‌تواند به طور قابل توجهی بر توزیع سرعت در یک محیط آبی تأثیر بگذارد. تراکم المان‌های گیاهی می‌تواند بر ویژگی‌های جریان تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان نشان داد که توزیع ضریب پسا در طول نوار گیاهی متفاوت بوده و تنش برشی رینولدز دارای توزیع موجی شکل تحت گرادیان فشار مطلوب در تراکم‌های گیاهی مختلف است [29]. یک مدل تحلیلی که توزیع سرعت در جهت جریان را در یک کانال باز با پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر غوطه‌ور بررسی کرده است، نشان می‌دهد، که می‌توان کل میدان جریان در راستای عمودی را به دو لایه مجزا کرد: یک لایه پوشش گیاهی و یک لایه فوقانی پوشش گیاهی. یافته‌ها نشان می‌دهد که ضرایب پسا و اصطکاک در اعماق و تراکم‌های پوشش گیاهی مختلف دارای مقادیر ثابتی نیستند [30].

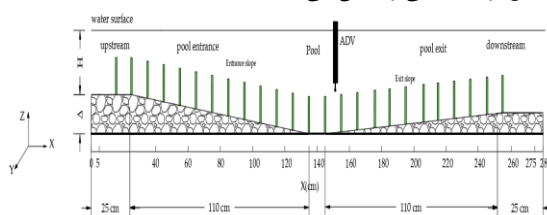
$\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}} > 1.4$ که d_{84} و d_{16} به ترتیب نشان دهنده قطری از ذرات رسوبی هستند که از 84٪ و 16٪ قطر ذرات ریزتر هستند. افضلی مهر و آنکتیل (2001) آزمایشات خود را بر روی بسترهای شنی با $k_s = 0.2d_{50}$ را اعمال کردند [27]. از سوی دیگر، تو و گراف (1993) ارتفاع زبری را $K_s = 0.25d_{50}$ را برآورد کرده‌اند [31]. مطالعات نصرتی و همکاران (2021) نشان داد است که انتخاب ارتفاع زبری $K_s = d_{50}$ در حضور شکل بسترهای سه‌بعدی گودآب به همراه توزیع نامنظم المان‌های گیاهی طبیعی مستغرق نتایج قابل قبولی را در بررسی توزیع سرعت و برآورد مقاومت جریان در رودخانه‌های طبیعی ارائه داده است [18]. به منظور شبیه‌سازی المان‌های گیاهی مستغرق از یک سری لوله‌های پلاستیکی به قطر 10 سانتی متر و ارتفاع متوسط 12 سانتی متر بهره برده شده است. بر این اساس تعداد 162 المان گیاهی در ابعادی به مساحت 2.4×0.6 متر مربع به صورت پراکنده و تصادفی به صورت شکل (1) توزیع شده است.



شکل 1- توزیع المان‌های گیاهی

بر این اساس در هر متر مربع تعداد 112 المان گیاهی توزیع گردیده است. در هر صورت تراکم پوشش گیاهی به صورت $\varphi = \pi D^2 N / (L_{veg} \times W_{veg})$ تعریف شده است که N تعداد المان‌های گیاهی، L_{veg} طول پوشش گیاهی سطحی، W_{veg} عرض پوشش گیاهی سطحی و D قطر المان گیاهی است [17]. قابل ذکر است که در این پژوهش تراکم سطحی پوشش گیاهی دارای مقدار ثابت $\varphi = 0.004$ است.

با هدف ایجاد جریان غیریکنواخت کندشونده و تندشونده در این پژوهش، از یکی گودآب سه‌بعدی مستقیم با شیب ورودی و خروجی به ترتیب 10/75 و 7/96 درجه بهره برده شده است. قابل ذکر این شیب‌ها بر اساس برداشت‌های میدانی در رودخانه ماربر پادنا صورت گرفته است. در هر صورت گودآب با شیب‌های و خروجی به ترتیب 7/4 و 4 درجه توسط نصرتی و همکاران (2022) گزارش شده است [17]. شکل (2) شماتیکی از جریان های تندشونده و کندشونده در کانال آزمایشگاهی را نشان می دهد.



علیرغم بررسی اثر متقابل غیریکنواختی جریان در حضور شکل بسترهای سه‌بعدی گودآب و خیزآب، المان‌های گیاهی و غیره بر مولفه‌های جریان آشفته، پژوهش مقایسه‌ای بین مولفه‌های آشفته‌گی جریان در مقاطع جریان کندشونده و تندشونده در حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق به که صورت نامنظم و تصادفی بر روی شکل بستر توزیع شده‌اند، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف از یک شکل بستر سه‌بعدی گودآب با بستر شنی برای شبیه‌سازی مقاطع جریان‌های کندشونده و تندشونده و المان‌های صلب در حالت مستغرق با توزیع تصادفی و پراکنده بر روی شکل بستر بهره گرفته شده است. مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند نتایج ارزشمندی را در مورد مولفه‌های آشفته‌گی در رودخانه‌های با بستر شنی در حضور المان‌های گیاهی و شکل بسترهای سه‌بعدی شنی ارائه دهند. با شبیه‌سازی شرایط رودخانه‌های طبیعی در فلوام‌های آزمایشگاهی، محققان و مهندسان هیدرولیک می‌توانند پارامترهای مختلفی مانند سرعت جریان، شدت‌های آشفته‌گی و الگوهای انتقال رسوب را تشریح کنند. با این حال، توجه به این نکته مهم است که اگرچه مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند نتایج ارزشمندی را ارائه دهند، اما ممکن است تمام جنبه‌های سیستم‌های رودخانه طبیعی را به‌طور کامل شبیه‌سازی نکنند. در هر صورت مطالعات میدانی نیز برای تایید یافته‌های آزمایشگاهی و اطمینان از کاربردی بودن این نتایج در شرایط دنیای واقعی جریان در رودخانه‌های طبیعی ضروری است. در هر صورت هدف از این مقاله بررسی اثرات توزیع پراکنده و تصادفی المان‌های گیاهی صلب مستغرق بر مولفه‌های جریان آشفته از قبیل توزیع سرعت، شدت‌های آشفته‌گی و ورتیسیته در مقطع جریان کندشونده با مقطع جریان تندشونده در کانال‌های شنی است. در هر صورت فرضیاتی در این پژوهش وجود دارند که به شرح ذیل هستند:

- مسیر جریان به صورت مستقیم و بدون پیچ و خم در پلان هستند.
- مورفولوژی اولیه کانال به صورت شکل بستر سه بعدی گودآب و ثابت در تمامی آزمایشات است.
- فرض می شود که جریان غیریکنواخت است.
- رسوبات درشت دانه نامحلول در نظر گرفته می شوند و خواص ثابتی دارند که در طول زمان بدون تغییر باقی می مانند.
- انتقال رسوب ناچیز تلقی می شود و در نتیجه نادیده گرفته می شود.
- عناصر پوشش گیاهی صلب و مستغرق هستند و ارتفاع و قطر این المان‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.
- تراکم پوشش گیاهی یکنواخت است و آرایش پوشش گیاهی از یک الگوی منظم پیروی می کند.

مواد و روش‌ها

کلیه آزمایشات در یک کانال مستطیلی مستقیم با جدارهای شیشه‌ای به طول 14 متر، عرض 90 سانتی متر و عمق 60 سانتی متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علم و صنعت ایران در تهران انجام شده است. یک دریچه در انتهای فلوام برای کنترل سطح آب در طول آزمایش استفاده شده است. همچنین، عمق جریان با استفاده از خط‌کش مدرج با افزایش 1 میلی متر اندازه گیری شده است. اندازه دانه ذرات شن دارای یک قطر میانه $d_{50} = 25 \text{ mm}$ و انحراف استاندارد هندسی

θ_m ویسکوزیته سینماتیکی جریان بر حسب مترمربع بر ثانیه در دمای 25 درجه سانتی گراد است. قابل ذکر است که عدد فرود Fr که معرف فوق بحرانی $Fr > 1$ و یا تحت بحرانی $Fr < 1$ بودن رژیم است به صورت $Fr = u/\sqrt{gD_h}$ تعریف می شود که D_h عمق هیدرولیکی جریان تعریف می شود. در طبیعت جریان به ندرت آرام ($Re < 500$) است و همواره جریان آشفته است ($Re > 12500$). گردابه های آشفتگی باعث ایجاد مولفه های نوسانی سرعت می شوند. در هر صورت در جریان آشفته سرعت جریان u دارای دو بخش متوسط $\bar{u}$ و بخش نوسانی u' است:

$$u = \bar{u} + u' \quad (2)$$

با توجه به اینکه حرکات آشفتگی در ارتباط با حرکت نامنظم و تصادفی گردابه های آشفتگی هستند، به منظور کمی سازی آشفتگی می توان از کمیت های آماری بهره جست. بر این اساس متوسط سرعت زمانی آشفتگی بین بازه های زمانی t و T به صورت زیر (به طور مثال در راستای جریان) بیان می شود که T مقیاس زمانی آشفتگی است.

$$\bar{u} = \int_t^{t+T} u(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (3)$$

بر این اساس نوسانات آشفتگی به صورت رابطه (8) تعریف می شود:

$$u'_i = u_i - \bar{u} \quad (4)$$

همچنین مقاومت آشفتگی در راستای جریان به صورت رابطه (9) تعریف می شود:

$$u_{rms} = \sqrt{u'^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u'_i)^2} \quad (3)$$

بر اساس رابطه (9) شدت آشفتگی در راستای جریان به صورت $u_{rms}/\bar{u}$ تعریف می گردد که u_{rms} در واقع همان مرتبه دوم بوده که در واقع همان انحراف معیار استاندارد مولفه های نوسانی سرعت است. هر اندازه u_{rms} بیشتر باشد سطوح آشفتگی جریان بیشتر خواهد بود. به طور مشابه سایر خصوصیات آشفتگی در راستای عرضی و عمود بر راستای جریان تعیین می شود.

سرعت سنج داپلر صوتی (ADV) برای اندازه گیری سرعت های لحظه ای با فرکانس 200 هرتز و زمان برداشت 90 ثانیه ای استفاده شده است. دستگاه سرعت سنج مورد استفاده یک Nortek vectrino با فرکانس ۱۰ مگاهرتز با پهنای باند، با دقت ± 1 میلی متر بر ثانیه و حجم نمونه برداری با ارتفاع 5/5 میلی متر است. داده های برداشت شده توسط ADV با استفاده از نرم افزار WinADV که یک ابزار مشاهده و پیش پردازنده مبتنی بر ویندوز برای فایل های ADV است، تجزیه و تحلیل شده اند. این نرم افزار اطلاعات کیفیت سیگنال را در قالب ضریب همبستگی COR و نسبت سیگنال به نویز SNR ارائه می دهد. استانداردهای این نرم افزار پیشنهاد می دهد که وقتی COR از 70 درصد تجاوز نکند و SNR کمتر از 5 دسی بل است، داده های سرعت لحظه ای تحت تأثیر نویز صوتی قرار می گیرند و به عنوان یک قانون کلی، این داده ها باید کنار گذاشته شوند. برای جلوگیری از اثر همخوانی احتمالی، داده های با SNR کمتر از 15 دسی بل و COR کمتر از 70 درصد فیلتر می شوند. برای هر نقطه اندازه گیری، مدت زمان جمع آوری داده ها 90 ثانیه بوده است، به طوری که با فرکانس نمونه برداری 200 هرتز،

شکل 2- شکل بستر سه بعدی گودآب به همراه مقاطع جریان های کندشونده و تندشونده

به منظور اطمینان از توسعه یافتگی جریان، شکل بستر گودآب به فاصله بیش از 5 متر از ابتدای کانال آزمایشگاهی و با هدف جلوگیری متاثر شدن توزیع سرعت از دریچه انتهایی فلوم، شکل بستر سه بعدی گودآب مورد مطالعه در فاصله بیشتر از 2 متر از انتهای کانال ساخته شده است [17]. اندازه گیری سرعت از 20 سانتی متر بالای شکل بستر (مقطع جریان یکنواخت در بالادست گودآب) شروع و با گام 20 سانتی متری تا 20 سانتی متر از انتهای شکل بستر گودآب در پایین دست ادامه داده شده است. بر این اساس تعداد 13 پروفیل سرعت در خط مرکزی کانال برداشت شده است. دو مقطع $X/L = 0.36$ و $X/L = 0.71$ به ترتیب در مقطع جریان کندشونده و تندشونده برای نیل به هدف این پژوهش استفاده شده است که X و L به ترتیب فاصله از ابتدای شکل بستر و طول شکل بستر است.

تعداد نقاط اندازه گیری سرعت در هر مقطع حدود 33 نقطه متغیر بوده است که از 4 میلی متری کف بستر شروع شده و تا 5 سانتی متر زیر سطح آب برداشت شده است. مقایسه خصوصیات آشفتگی جریان در مقاطع کندشونده و تندشونده یک گودآب سه بعدی با بستر شنی در این پژوهش بررسی شده است. گراف و آلتیناکار (1998) از پارامتر β جهت کمی سازی جریان غیریکنواخت استفاده کرده اند [32]:

$$\beta = \frac{h}{\tau_{bed}} \left(\gamma_w \left(-S_0 + \frac{dy}{dx} \right) \right) \quad (1)$$

که در این رابطه $\frac{dy}{dx}$ تغییرات عمق جریان در راستای جریان x ، S_0 شیب بستر کانال، γ_w وزن مخصوص آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب در دمای 25 درجه سانتی گراد، h عمق کل جریان و τ_{bed} تنش برشی بستر است از طریق معادله (2) تعیین می شود [33]:

$\tau_{bed} = \rho u_*^2 (1)$
که u_* سرعت برشی جریان ρ جرم حجمی آب در دمای 25 درجه سانتی گراد بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است. افضلی مهر و آنکتیل (2000) رابطه تجربی (3) را جهت تعیین سرعت برشی ارائه داده اند که در این پژوهش از آن بهره برده شده است [34]:

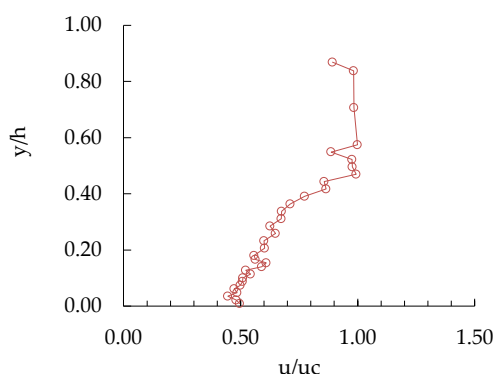
$$u_* = \frac{(\delta_* - \theta) u_c}{4.4 \delta_*} \quad (2)$$

که δ_* و θ به ترتیب ضخامت جابجایی لایه مرزی و ضخامت مومتموم لایه مرزی است که با استفاده از روابط (4) و (5) تعیین شده است که u_c سرعت حداکثر است [33]:

$$\delta_* = \int_0^h \left(1 - \frac{u}{u_c} \right) dy \quad (2)$$

$$\theta = \int_0^h \frac{u}{u_c} \left(1 - \frac{u}{u_c} \right) dy \quad (3)$$

در رابطه (1) چنانچه $\beta > -1$ جریان از نوع غیریکنواخت کندشونده و چنانچه $\beta < -1$ جریان از نوع غیریکنواخت تندشونده تعریف خواهد شد [32]. معیار اینکه جریان آشفته باشد یا آرام بستگی به میزان اهمیت ویسکوزیته یا نیروی اینرسی دارد. نسبت نیروی اینرسی به نیروی ناشی از ویسکوزیته سیال به عنوان عدد رینولدز تعریف می شود. بر این اساس در کانال های روباز عدد رینولدز به صورت $Re = uR_h/\nu_m$ تعریف می شود که u سرعت متوسط جریان، R_h شعاع هیدرولیکی جریان و



شکل 4- توزیع سرعت متوسط جریان در مقطع جریان تندشونده

مطابق اشکال (3) و (4) حداکثر سرعت جریان u_c در $y/h = 0.52$ برای جریان کندشونده حادث شده است. وقوع حداکثر سرعت در زیر سطح آب را پدیده فرورفتگی می‌گویند که ناشی از اثر جریان‌های ثانویه است. جریان‌های ثانویه با ناهمسانگردی آشفتگی ناشی از اثرات حضور پراکنده پوشش سطحی گیاهی و نسبت ابعاد کوچک ایجاد می‌شوند. این جریان‌های ثانویه موقعیت u_c را در توزیع سرعت تغییر می‌دهند. مشخص شده است که برای جریان‌های کندشونده و تندشونده در کانال‌های شنی، مشخصات سرعت در ناحیه داخلی لایه مرزی جریان محدود به عمق نسبی جریان $y/h < 0.2$ می‌تواند به صورت قانون لگاریتمی بیان شود [32]. اگرچه افضل‌ی مهر و همکاران (2011)، افضل‌ی مهر و دی (2009) دریافتند که وجود جریان‌های ثانویه و حضور پوشش گیاهی روی بستر و جداره‌های کانال بر اعتبار قانون لگاریتمی می‌تواند تأثیر نداشته باشد [37, 38]؛ نصرتی و همکاران (2019 و 2022) توضیح داده‌اند که عمق اعتبار قانون لگاریتمی در حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر و المان‌های گیاهی صلب و طبیعی مستغرق تابعی از موقعیت اندازه‌گیری سرعت جریان و تراکم پوشش گیاهی است و لزوماً محدود به $y/h < 0.2$ نیست [17, 18]. در هر صورت عمق اعتبار قانون لگاریتمی تا $y/h = 0.8$ در رودخانه‌های طبیعی و کانال‌های آزمایشگاهی در حضور پوشش گیاهی توسط نصرتی و همکاران ارائه گردیده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در لایه بیرونی ($y/h > 0.2$)، داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده از قانون لگاریتمی به دلیل عدم ثابت بودن تنش برشی در عمق کل جریان و تقریب طول اختلاط منحرف می‌شوند که توسط قانون کلز به صورت رابطه (10) تشریح می‌گردد.

$$\frac{u_c - u}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\delta} + \frac{2\pi}{\kappa} \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2\delta} \right) \quad (2)$$

که در این رابطه π تابع برخاستگی کلز، δ ضخامت لایه مرزی از بستر تا جایی که سرعت جریان حداکثر بوده و κ ضریب وون کارمن با مقدار 0/41 است.

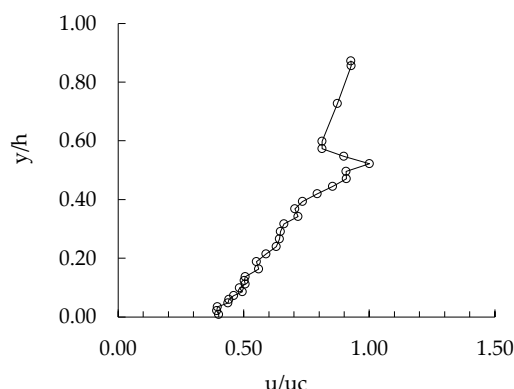
18000 اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای به دست آمد. در هر صورت استون و هوچکس (2007) نشان دادند که داده‌های سرعت ADV در زمان‌های نمونه‌برداری تقریباً 100 ثانیه و نصرتی و همکاران (2022) در زمان‌های نمونه‌برداری تقریباً 90 ثانیه تثبیت می‌شوند [16, 35].

نتایج

توزیع پروفیل سرعت

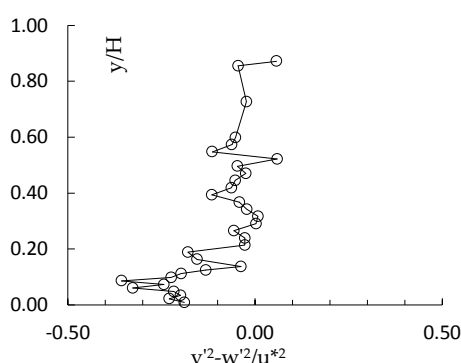
خلاصه‌ای از محاسبات هیدرولیکی جریان در جدول (1) پیوست (1) ارائه شده است. قابل ذکر است که دبی جریان از ابتدا تا انتهای آزمایش دارای مقدار ثابت 31/7 لیتر بر ثانیه بوده است. مطابق جدول (1) رژیم جریان به صورت تحت بحرانی و کاملاً آشفته است. مطابق این جدول و مقادیر محاسبه شده ضریب غیریکنواختی β در اکثر مقاطع جریان کندشونده دارای مقدار بیشتر از 1- و در اغلب مقاطع جریان تندشونده دارای مقدار کمتر از 1- است. در هر صورت در برخی از مقاطع به طور نمونه $(X/L = 0.21)$ و $(X/L = 0.79)$ عکس نتایج گراف و آلتیناکار (1998) در مورد ضریب غیریکنواختی β برآورد شده است. در هر صورت نتایج این محققان در عدم حضور المان‌های گیاهی به دست آمده است. به عنوان یک نتیجه می‌توان گفت که حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق در مقاطع جریان کندشونده و تندشونده می‌تواند شکل کلاسیک غیریکنواختی جریان را با استفاده از ضریب غیریکنواختی β تغییر دهد. در هر صورت حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق با توزیع پراکنده بر روی شکل بستر سه‌بعدی گودآب به خودی خود باعث می‌شود جریان از حالت یکنواخت خارج شده و شکل غیریکنواختی به خود بگیرد.

مطالعات آزمایشگاهی حاکی از آن است که مقاطع کندشونده و تندشونده جریان نقش مهمی در موقعیت حداکثر سرعت جریان دارند [17, 18, 32, 36]. اشکال (3) و (4) توزیع عمودی سرعت متوسط در راستای خط مرکزی کانال را به ترتیب در دو مقطع جریان کندشونده و تندشونده نمایش می‌دهد.

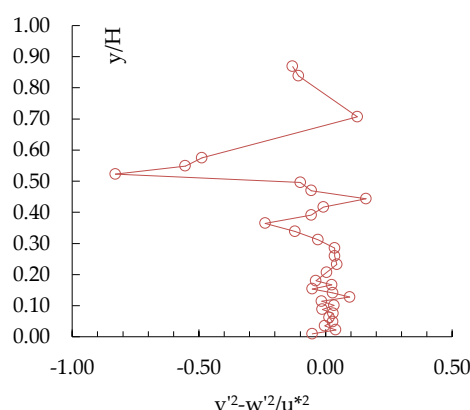


شکل 3- توزیع سرعت متوسط جریان در مقطع جریان کندشونده

راستای طولی شکل می گیرند. این ورتیسیته ها در جهات عرضی کشیده و با هم آمیخته می شوند که منجر به تشکیل جریان های ثانویه بزرگ می شوند. جریان های ثانویه در این حالت، نوع دوم جریان های ثانویه پراتل نامیده می شود [41]. مطالعات وانگ و همکاران (2005) نشان داده است که در کانال های مستطیلی، جریان های ثانویه متاثر از جداره های کانال بوده و در ابتدا در گوشه ها کانال شکل می گیرند و سپس به محور مرکزی کانال گسترش می یابند [42]. اصطلاح ناهمسانگردی آشفتگی $(v'^2 - w'^2)/u_*^2$ برای نشان دادن اثر جریان های ثانویه توسط گردابه های ناشی از سرعت طولی جریان استفاده شده است [25]. مطالعات آزمایشگاهی بر روی بستر صاف هیدرولیکی گزارش شده توسط نزو و ناکاگوا (1993) نشان می دهد که $(v'^2 - w'^2)/u_*^2$ باعث تشدید جریان های ثانویه برای نسبت ابعاد $B/h = 2$ می شود [25]. در هر صورت ترم $(v'^2 - w'^2)/u_*^2$ برای عمق نسبی آب $y/h > 6$ افزایش می یابد.

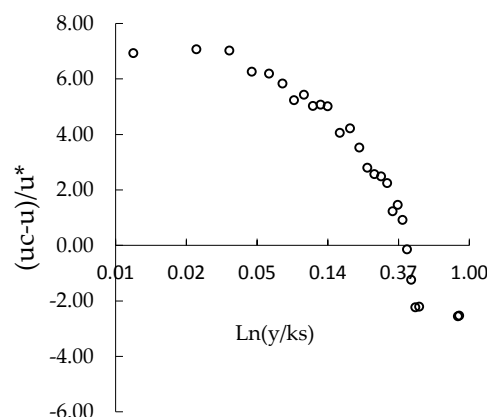


شکل 7- توزیع ورتیسیته در مقطع جریان کندشونده

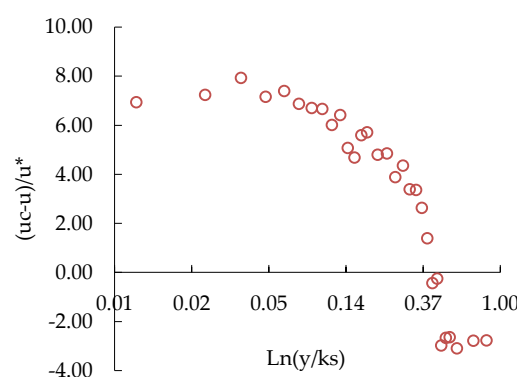


شکل 8- توزیع ورتیسیته در مقطع جریان تندشونده

مطابق شکل (7) برای مقطع جریان کندشونده و نسبت ابعاد $B/h < 5$ ، مقدار $(v'^2 - w'^2)/u_*^2$ تا عمق نسبی آب $y/h = 0.09$ کاهش می یابد و مجدداً تا عمق نسبی 0/52 افزایش یافته سپس تقریباً تا سطح آب مجدداً کاهش یافته است. با این حال در شکل (8) برای مقطع جریان تندشونده، ترم $(v'^2 - w'^2)/u_*^2$ تا عمق نسبی آب $y/h = 0.44$ تقریباً ثابت است و سپس به دلیل توزیع نامنظم



شکل 5- توزیع قانون نقصان سرعت در مقطع جریان کندشونده

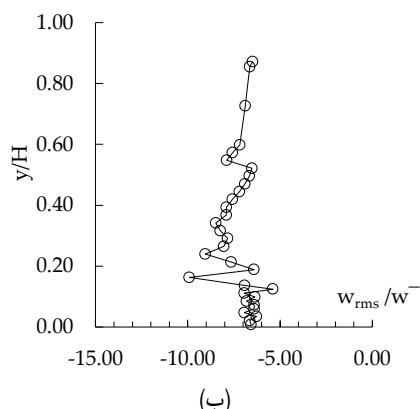


شکل 6- توزیع قانون نقصان سرعت در مقطع جریان تندشونده

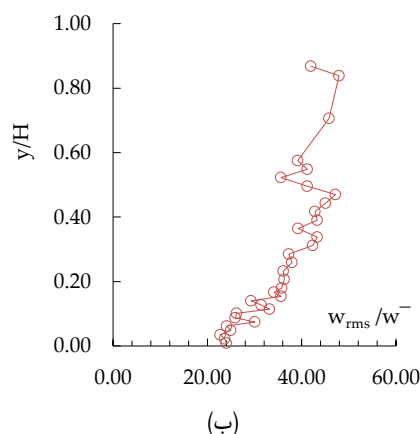
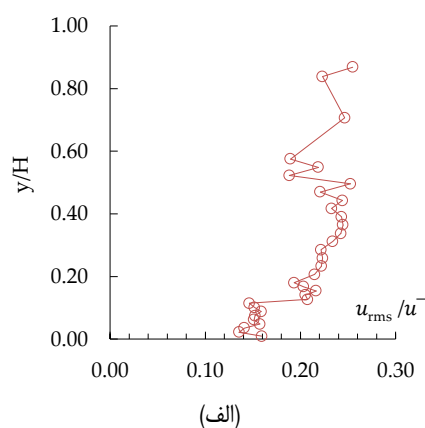
کیرنوتو و گراف (1995) [13] و سانگ و چو (2001) [12] اظهار نموده اند که قانون کولز برای مقاطع جریان های کندشونده و تندشونده همواره برقرار هستند. نصرتی و همکاران (2022) در یک مطالعه آزمایشگاهی نشان داده اند که تابع برخاستگی کلز به صورت تابعی از تراکم پوشش گیاهی در راستای شکل بستر سه بعدی گودآب شنی دارای توزیع محدب بوده به گونه ای که دارای مقدار 0/2 در جریان یکنواخت بالادست گودآب شروع شده، در مرکز گودآب به مقدار حداکثر 2 منتهی می شود و در انتهای شکل بستر و پایین دست گودآب تقریباً به 0/2 همگرا می شود [17]. در این پژوهش مطابق اشکال (5) و (6) به ترتیب در مقاطع جریان کندشونده و تندشونده دارای مقادیر $\Pi = -2.8$ و $\Pi = -5$ تخمین زده شده است.

ورتیسیته

شناخت جریان های ثانویه در هیدرولیک رودخانه ها در حضور شکل های سه بعدی بستر و توزیع نامنظم المان های گیاهی از بسیاری از جهات و به ویژه اثر آن ها بر انتقال رسوب و زیستگاه آبزیان از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از سازوکارهای تشکیل جریان های چرخشی در راستای طولی جریان، مرتبط با غیر ایزوتروپی بودن آشفتگی است [39]. [40] به دلیل عدم تعادل عرضی تنش های آشفتگی، ورتیسیته های



شکل 9- توزیع شدت‌های آشفتگی در مقطع جریان
کندشونده (الف) در راستای جریان (ب) در راستای عمود بر
جریان



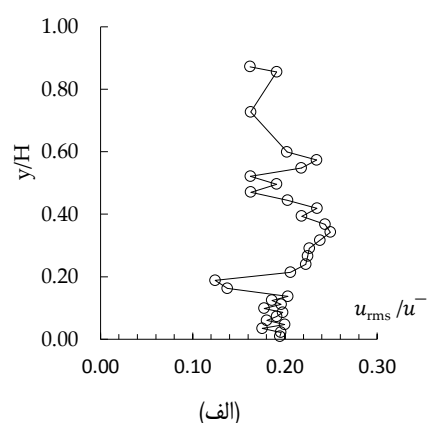
شکل 10- توزیع شدت‌های آشفتگی در مقطع جریان
تندشونده (الف) در راستای جریان (ب) در راستای عمود بر
جریان

نمودارهای اشکال (9) و (10) به ترتیب نشان‌دهنده توزیع شدت‌های آشفتگی در راستای جریان ($u_{rms}/\bar{u}$) و در راستای عمود بر جریان ($w_{rms}/\bar{w}$) در مقاطع کندشونده و تندشونده جریان در حضور المان‌های گیاهی مستغرق صلب است. مطابق شکل (9)، در

المان‌های گیاهی مستغرق به صورت زیگزاگی به شدت تا عمق نسبی 0/52 کاهش یافته و مجدداً به سمت سطح آب به شکل محدب روند صعودی پیدا می‌کند. مقاطع جریان‌های کندشونده و تندشونده در یک گودآب شنی سه‌بعدی در حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق می‌توانند به عنوان مانعی در جریان عمل کنند و باعث خم شدن و چرخش آب در اطراف آن‌ها شوند. این می‌تواند منجر به افزایش تولید گردابه، ایجاد الگوهای جریان پیچیده تر با گرداب‌های چرخشی و آشفتگی شود. الگوهای گردابی تحت تأثیر گودآب‌های سه‌بعدی و پوشش گیاهی صلب مستغرق می‌توانند پیامدهای اکولوژیکی داشته باشند، زیستگاه‌های کوچکی با سرعت جریان و سطوح تلاطم متفاوت ایجاد کنند و بر توزیع موجودات آبی و سلامت کلی اکوسیستم تأثیر بگذارد. درک اثرات این موضوع برای کاربردهای مختلف از جمله احیای رودخانه، بهبود زیستگاه و مدیریت منابع آب بسیار مهم است.

توزیع شدت‌های آشفتگی

شدت آشفتگی در کانال‌های با پوشش گیاهی به نوسانات سرعت جریان ناشی از آشفتگی در این کانال‌ها اشاره دارد. در هر صورت حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق در مقاطع تندشونده و کندشونده باعث تشدید شدت‌های آشفتگی به دلیل تحمیل کردن آشفتگی اضافی به جریان می‌شود. پوشش گیاهی می‌تواند با ایجاد چسبندگی جریان، شدت آشفتگی را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد که منجر به افزایش اختلاط می‌شود. در کانال‌های پوشش گیاهی، شدت آشفتگی معمولاً در مقایسه با کانال‌های بدون پوشش گیاهی بیشتر است [43]. این به این دلیل است که وجود پوشش گیاهی مقاومت بیشتری در برابر جریان ایجاد می‌کند و در نتیجه نوسانات آشفتگی و اختلاط بیشتری ایجاد می‌کند. درک شدت‌های آشفته در کانال‌های پوشش گیاهی از جنبه‌های انتقال رسوب، کیفیت آب و زیستگاه موجودات آبی حائز اهمیت است [44].



افزایش تولید گردابه، ایجاد الگوهای جریان پیچیده‌تر با گرداب‌های چرخشی و آشفتگی شود.

● شدت آشفتگی در کانال‌های با پوشش گیاهی صلب مستغرق به نوسانات سرعت جریان ناشی از آشفتگی در این کانال‌ها اشاره دارد. به عنوان یک نتیجه به نظر می‌رسد که شدت‌های آشفتگی در مقطع جریان تندشونده در راستای جریان و در راستای عمود بر جریان همواره بیشتر از مقادیر مشابه در مقطع جریان کندشونده هستند. در هر صورت تبادل موتوم عمودی در قسمت فوقانی المان‌های گیاهی در مقطع جریان کندشونده در راستای $u_{rms}/\bar{u}$ مشاهده شده است. احتمال در این مقاطع جریان به شدت تحت تاثیر حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق مازاد بر تاثیر افزایش سرعت جریان و گردابان فشار مطلوب قرار گرفته است.

●

پیشنهادهای

نتایج این پژوهش محدود به کانال‌های آزمایشگاهی با نسبت ظرافت 2/3 که جریان‌های ثانویه قابل توجه است، با بستر شنی و توزیع نامنظم المان‌های گیاهی صلب مستغرق بوده است. به نظر می‌رسد مطالعات آتی و تکمیلی این پژوهش می‌تواند معطوف به بررسی مولفه‌های جریان آشفته در حضور المان‌های گیاهی طبیعی با تراکم‌های مختلف در رودخانه‌های شنی-قلوه سنگی و با نسبت‌های ظرافت بالاتر خواهد بود.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی:
روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها:
نظارت و نگارش نهایی:

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Gran, K. and C. Paola, Riparian vegetation controls on braided stream dynamics. Water Resources Research, 2001. 37(12): p. 3275-3283.
2. Kean, J.W. and J.D. Smith, Flow and boundary shear stress in channels with

مقطع جریان کندشونده، شدت‌های آشفتگی $u_{rms}/\bar{u}$ همواره بیشتر از $w_{rms}/\bar{w}$ است. به نظر می‌رسد که توزیع شدت‌های آشفتگی در راستای جریان دارای شکل محدب و در راستای عمود بر جریان دارای شکل مقعر است. در مقابل در شکل (10) در مقطع جریان تندشونده، $w_{rms}/\bar{w}$ بر جریان بیشتر از $u_{rms}/\bar{u}$ است. در هر صورت در مقطع جریان تندشونده توزیع شدت‌ها در هر دو راستا به صورت محدب تغییر کرده است. به عنوان یک نتیجه به نظر می‌رسد که شدت‌های آشفتگی در مقطع جریان تندشونده در راستای جریان و در راستای عمود بر جریان همواره بیشتر از مقادیر مشابه در مقطع جریان کندشونده هستند. در هر صورت تبادل موتوم عمودی در قسمت فوقانی المان‌های گیاهی در مقطع جریان کندشونده در راستای $u_{rms}/\bar{u}$ مشاهده شده است. احتمالاً در این مقاطع جریان به شدت تحت تاثیر حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق مازاد بر تاثیر افزایش سرعت جریان و گردابان فشار مطلوب قرار گرفته است.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه مقایسه مولفه‌های جریان آشفته از قبیل: توزیع سرعت، بررسی قانون نقصان سرعت، ورتیسیته و شدت‌های آشفتگی در مقاطع جریان‌های کندشونده و تندشونده در حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق است. برای نیل به این هدف از یک شکل بستر گودآب سه‌بعدی با بستر شنی در یک کانال آزمایشگاهی استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های این پژوهش حاکی از این بوده است که:

● حداکثر سرعت جریان u_c در $y/h = 0.52$ برای جریان کندشونده و در $y/h = 0.47$ برای جریان تندشونده حادث شده است. بنابراین به نظر می‌رسد عمق اعتبار قانون لگاریتمی تابعی از موقعیت اندازه‌گیری پروفیل سرعت و توزیع غیریکنواخت المان‌های گیاهی صلب مستغرق بر روی شکل بستر سه‌بعدی گودآب شنی بوده است.

● بررسی قانون نقصان سرعت حاکی از آن بوده است که تابع برخاستگی کلز در مقاطع جریان کندشونده و تندشونده در شرایط آزمایش دارای مقادیر $\Pi = -2.8$ و $\Pi = -5$ هستند.

● به دلیل عدم تعادل عرضی تنش‌های آشفتگی ناشی از گردابان‌های فشار مطلوب و معکوس در حضور توزیع نامنظم المان‌های صلب مستغرق، ورتیسیته‌های راستای طولی شکل می‌گیرند. این ورتیسیته‌ها در جهات عرضی کشیده و با هم آمیخته می‌شوند که منجر به تشکیل جریان‌های ثانویه بزرگ می‌شوند. مقاطع جریان‌های کندشونده و تندشونده در یک گودآب شنی سه‌بعدی در حضور المان‌های گیاهی صلب مستغرق می‌توانند به عنوان مانعی در جریان عمل کنند و باعث خم شدن و چرخش آب در اطراف آن‌ها شوند. این می‌تواند منجر به

woody bank vegetation. Riparian vegetation and fluvial geomorphology, 2004. 8: p. 237-252.

3. Espín, L. and D.T. Papageorgiou, Flow in a channel with accelerating or decelerating wall velocity: a comparison between self-similar solutions and

- Navier–Stokes computations in finite domains. *Physics of Fluids*, 2009. 21(11).
4. Seddighi, M., et al., Direct numerical simulation of an accelerating channel flow. *Flow, turbulence and combustion*, 2014. 92: p. 473-502.
5. Sundstrom, L.J. and M.J. Cervantes, Laminar similarities between accelerating and decelerating turbulent flows. *International journal of heat and fluid flow*, 2018. 71: p. 13-26.
6. Mathur, A., et al., Temporal acceleration of a turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018. 835: p. 471-490.
7. Emadzadeh, A., Y.M. Chiew, and H. Afzalimehr, Effect of accelerating and decelerating flows on incipient motion in sand bed streams. *Advances in Water Resources*, 2010. 33(9): p. 1094-1104.
8. Mathur, A., Study of accelerating and decelerating turbulent flows in a channel. 2016, University of Sheffield.
9. Houra, T., T. Tsuji, and Y. Nagano, Effects of adverse pressure gradient on quasi-coherent structures in turbulent boundary layer. *International journal of heat and fluid flow*, 2000. 21(3): p. 304-311.
10. Cardoso, A., W.H. Graf, and G. Gust, Steady gradually accelerating flow in a smooth open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 1991. 29(4): p. 525-543.
11. Song, T., Non-uniform open-channel over a rough bed. *Journal of Hydroscience and hydraulic Engineering, JSCE*, 1994. 12(1): p. 1-25.
12. Song, T. and Y. Chiew, Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using acoustic Doppler velocimeter (ADV). *Journal of Engineering Mechanics*, 2001. 127(3): p. 219-232.
13. KIRONOTO, B.A., W.H. Graf, and Reynolds, Turbulence characteristics in rough non-uniform open-channel flow. *Proceedings of the institution of civil engineers-water maritime and energy*, 1995. 112(4): p. 336-348.
14. Kabiri, F., M.R.M. Tabatabai, and M. Shayannejad, Effect of vegetative bed on flow structure through a pool-riffle morphology. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2022. 86: p. 102197.
15. Parvizi, P., et al., Characteristics of Shallow Flows in a Vegetated Pool—An Experimental Study. *Water*, 2023. 15(1): p. 205.
16. Nosrati, K., H. Afzalimehr, and J. Sui, Drag coefficient of submerged flexible vegetation patches in gravel bed rivers. *Water*, 2022. 14(5): p. 743.
17. Nosrati, K., H. Afzalimehr, and J. Sui, Interaction of Irregular Distribution of Submerged Rigid Vegetation and Flow within a Straight Pool. *Water*, 2022. 14(13): p. 2036.
18. Afzalimehr, H., K. Nosrati, and M. Kazem, Resistance to Flow in a Cobble-Gravel Bed River with Irregular Vegetation Patches and Pool-Riffle Bedforms (Case study: Padena Marbor River). *Ferdowsi Civil Engineering*, 2021. 34(2): p. 35-50.
19. Tang, C., Y. Yi, and S. Zhang, Flow and turbulence in unevenly obstructed channels with rigid and flexible vegetation. *Journal of Environmental Management*, 2023. 326: p. 116736.
20. Dehrashid, F.A., et al., CFD modeling the flow dynamics in an open channel with double-layered vegetation. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2023. 9(1): p. 543-555.
21. Nicosia, A., et al., Flow Resistance of Flexible Vegetation in Real-Scale Drainage Channels. *Hydrological Processes*, 2023: p. e14883.
22. Dehsorkhi, E.N., H. Afzalimehr, and S. Jueyi, Effects of vegetation channel banks and gravel size on flow structure.

- International Journal of Sediment Research, 2010. 25(2): p. 110-118.
23. Nasiri Dehsorkhi, E., H. Afzalimehr, and V.P. Singh, Effect of bed forms and vegetated banks on velocity distributions and turbulent flow structure. Journal of Hydrologic Engineering, 2011. 16(6): p. 495-507.
24. Afzalimehr, H., E. Fazel Najfabadi, and V.P. Singh, Effect of vegetation on banks on distributions of velocity and Reynolds stress under accelerating flow. Journal of Hydrologic Engineering, 2010. 15(9): p. 708-713.
25. Nakagawa, H., Turbulence in open channel flows. 2017: Routledge.
26. Bassey, O.B. and J. Agunwamba, Derived Models for the Prediction of Cole's and Dip Parameters for Velocity Gradients Determination in Open Natural Channels. J. Civ. Environ. Res, 1998. 8: p. 1-19.
27. Afzalimehr, H. and F. Anctil, Friction velocity associated to a non-uniform flow and an intermediate scale roughness. Journal of Hydraulic Research, 2001. 39(2): p. 181-186.
28. Afzalimehr, H., V.P. Singh, and M. Abdolhosseini, Effect of nonuniformity of flow on hydraulic geometry relations. Journal of Hydrologic Engineering, 2009. 14(9): p. 1028-1034.
29. Pu, J.H., et al., Submerged flexible vegetation impact on open channel flow velocity distribution: An analytical modelling study on drag and friction. Water Science and Engineering, 2019. 12(2): p. 121-128.
30. Brahimi, M. and H. Afzalimehr, Effect of submerged vegetation density on flow under favorable pressure gradient. SN Applied Sciences, 2019. 1: p. 1-12.
31. Haizhou, T. and W.H. Graf, Friction in unsteady open-channel flow over gravel beds. Journal of Hydraulic Research, 1993. 31(1): p. 99-110.
32. Graf W. H. and Altinakar M. S. 1998, F.H., Flow and transport processes in channels of simple geometry. John Wiley and Sons, New York, p. 681.
33. Schlichting, H. and K. Gersten, Boundary-layer theory. 2016: springer.
34. Afzalimehr, H. and F. Anctil, Accelerating shear velocity in gravel-bed channels. Hydrological sciences journal, 2000. 45(1): p. 113-124.
35. Stone, M.C. and R.H. Hotchkiss, Evaluating velocity measurement techniques in shallow streams. Journal of Hydraulic Research, 2007. 45(6): p. 752-762.
36. Afzalimehr, H., E.F. Najafabadi, and J. Gallichand, Effects of accelerating and decelerating flows in a channel with vegetated banks and gravel bed. International Journal of Sediment Research, 2012. 27(2): p. 188-200.
37. Afzalimehr, H., et al., Investigation of turbulence characteristics in channel with dense vegetation. International Journal of Sediment Research, 2011. 26(3): p. 269-282.
38. Afzalimehr, H. and D. Subhasish, Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions. International Journal of Sediment Research, 2009. 24(2): p. 236-246.
39. Caroppi, G., et al., Vegetated channel flows: Turbulence anisotropy at flow-rigid canopy interface. Geosciences, 2018. 8(7): p. 259.
40. Kang, H.-S. and S.-U. Choi, Anisotropy of turbulence in vegetated open-channel flows. Journal of Korea Water Resources Association, 2005. 38(10): p. 871-883.
41. Nickel, K., Prandtl's boundary-layer theory from the viewpoint of a

- mathematician. Annual Review of Fluid Mechanics, 1973. 5(1): p. 405-428.
42. Wang, Z.-Q. and N.-S. Cheng, Secondary flows over artificial bed strips. Advances in water resources, 2005. 28(5): p. 441-450.
43. Liu, H., et al., Turbulence characteristics in partially vegetated open channels with alternating sparse and dense patches. Physics of Fluids, 2024. 36(1).
44. Patra, S., B. Kumar, and M. Pandey, Experimental study on the turbulence characteristics in a vegetated channel. Flow Measurement and Instrumentation, 2023. 94: p. 102464.

پیوست 1:

جدول 1- خلاصه پارامترهای هیدرولیکی جریان

Non-uniform flow	distance (cm)	Q(lit/s)	X/L	d50 (mm)	h(cm)	U* cm/s	u cm/s	S0	Fr	Re	β
Decelerating flow	40	31.7	0.14	25	28	1.55	14.64	0.1854	0.09	40987.44	167.8
	60	31.7	0.21	25	32	1.13	11.73	0.1854	0.07	37541.19	-864.4
	80	31.7	0.29	25	35	1.12	10.96	0.1854	0.06	38347.07	402.1
	100	31.7	0.36	25	39	1.13	12.16	0.1854	0.06	47433.65	434.5
	120	31.7	0.43	25	43	1.18	11.24	0.1854	0.05	48313.75	-1075.8
Pool center	140	31.7	0.50	25	46	1.26	11.06	0.0002	0.05	50882.16	-2845.9
Accelerating flow	160	31.7	0.57	25	44	1.23	12.13	-0.1380	0.06	53373.76	-341.1
	180	31.7	0.64	25	41	1.25	12.48	-0.1380	0.06	51157.78	-308.5
	200	31.7	0.71	25	38	1.35	13.06	-0.1380	0.07	49631.96	-246.4
	220	31.7	0.79	25	35	1.66	13.90	-0.1380	0.07	48638.30	473.2
	240	31.7	0.86	25	33	1.60	14.80	-0.1380	0.08	48841.63	480.2