

## بررسی تأثیر تشک جلبکی بر الگوی رسوب در جریان‌های تکسویه و موج‌دار

محمد همتی<sup>\*</sup>، حجت احمدی<sup>۲</sup>، استفان لانزونی<sup>۳</sup>، وحیدرضا وردی‌نژاد<sup>۴</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

۳. استاد گروه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه پادوا

۴. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۹/۱۰)

### چکیده

در این تحقیق تأثیر تشک‌های جلبکی بر الگوی رسوب به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور آزمایش‌هایی در یک فلوم بزرگ برای حالت‌های مختلف جریان تکسویه و جریان موج‌دار در شرایط بستر ماسه‌ای و بستر جلبکی انجام شد. به منظور جداسازی سرعت‌های موج از تلاطم، از روش چگالی طیف انرژی استفاده شد. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از روش چگالی طیف انرژی (PSD)، سرعت چرخشی ناشی از موج را از داده‌های تلاطم جدا نمود. نتایج الگوی رسوب حاکی از آن است که تغییرات تراز بستر در حالت بستر ماسه‌ای شدیدتر از بستر جلبکی می‌باشد. به طوری که دامنه تغییرات آن در حالت بستر ماسه‌ای به‌ویژه در جریان موج‌دار تقریباً ۳ برابر حالت پوشش‌دار می‌باشد. علاوه بر آن، با افزایش دبی جریان، متوسط تعداد تاج شکنج در هر متر طولی کاهش و طول موج نسبی شکنج افزایش یافت. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که بار بستر با وجود جلبک‌ها در شرایط جریان تکسویه و جریان موج‌دار به ترتیب حدود ۸۰ درصد و ۱۵ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تشک جلبکی، الگوی رسوب، جریان موج‌دار، جریان تکسویه، روش PSD

### مقدمه

بیشتر از جریان تکسویه می‌باشد (Nielsen, 1992). این امر می‌تواند باعث افزایش در میزان حمل رسوبات و از بین رفتن و پراکندگی مواد مغذی در صخره‌های مرجانی گردد (Reidenbach *et al.*, 2006b; Reidenbach, *et al.*, 2009). میرایی انرژی جنبشی تلاطم در تالاب خیلی بیشتر از سواحل ماسه‌ای می‌باشد (Gerbi *et al.*, 2009). همچنین میرایی آن در تالاب‌ها خیلی بیشتر از جریان‌های تکسویه بر روی حاشیه صخره مرجانی است (Reidenbach *et al.*, 2006a).

در یک جریان موج‌دار، نوسان‌های سرعت طولی  $u_x$  به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود:

$$u \equiv \bar{u} + \tilde{u} + u' \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $\bar{u}$ : سرعت متوسط طولی،  $\tilde{u}$ : سرعت چرخشی ناشی از موج و  $u'$ : نوسان سرعت می‌باشند. معادله تنش برشی  $\tau$  با استفاده از معادله (۱) به شکل معادله (۲) نوشته می‌شود (Jiang and Street, 1991):

$$-\frac{\tau}{\rho} = \overline{\tilde{u}\tilde{w}} + \overline{\tilde{u}w'} + \overline{u'\tilde{w}} + \overline{u'w'} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $\rho$ : چگالی آب و  $w$ : سرعت عمودی می‌باشند.

برای امواج پیش‌رونده غیر چرخشی (Dean and Dalrymple, 1991) مقدار اولین ترم سمت راست معادله (۲) برابر با صفر

اهمیت تأثیر ترکیب امواج سطحی با جریان بر روی حمل رسوب در بستر سواحل از سال‌های قبل شناخته شده است. در طی سالیان گذشته بیشتر مطالعات بر روی آب‌های عمیق (بین ۵۰ الی ۲۰۰ متر) فقط بر روی جریان متمرکز بوده و امواج سطحی در بین این مطالعات جایگاهی نداشته است (Grant and Madsen, 1979). نتایج مشاهدات میدانی نشان داده است که رسوبات بستر ساحل در اعماق بیشتر از ۲۰۰ متر در اثر امواج سطحی آب به حالت تعلیق در آمده‌اند (Komar *et al.*, 1972; Butman *et al.*, 1977). این بدان معنی است که داشتن دانش کافی در رابطه با تنش برشی بستر در نتیجه ترکیب امواج سطحی و جریان و تأثیر آن در حمل رسوب بسیار با اهمیت می‌باشد. امواج به تنهایی قابلیت حرکت رسوبات از بستر دریا را دارند در حالی که جریانی که قابل مقایسه با موج باشد ممکن است حتی نتواند رسوبات را از جای خود حرکت دهد (Grant and Madsen, 1979). برخی گزارش‌ها حاکی از آن است که تنش برشی بستر در جریان ناشی از موج (جریان موج‌دار)

می‌باشد. علاوه بر آن زمانی که امواج و تلاطم با هم باشند، تلاطم به عنوان حرکت تعریف می‌شود که ارتباطی با امواج ندارد، لذا دومین و سومین ترم سمت راست معادله مذکور نیز برابر با صفر می‌باشد (Jiang and Street, 1991; Thais and Magnaudet, 1995). بنابراین تنش برشی در این شرایط برابر با تنش برشی در جریان پایدار می‌باشد.

$$-\frac{\tau}{\rho} = \overline{u'w'} \quad (\text{رابطه ۳})$$

با این حال Trowbridge (1998) نشان داد که مقدار  $\overline{u'w'}$  دقیقاً برابر با صفر نمی‌باشد. روش‌های مختلفی وجود دارند که می‌توانند موج را از داده‌های تلاطم حذف نمایند از قبیل: روش Benilov and Filyushkin (1970) که در آن حرکت‌هایی که با جابجایی سطح آزاد مرتبط هستند به عنوان امواج در نظر گرفته می‌شوند، روش‌های Trowbridge (1998) و Shaw and Trowbridge (2001) که در آنها از دو سرعت اندازه‌گیری شده که در فاصله دورتر از بزرگترین مقیاس تلاطم (در حدود ۲۵ درصد عمق آب (Shaw and Trowbridge, 2001)) قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود. در این دو روش حرکت‌هایی که بین حسگرها همبستگی دارند به عنوان امواج و حرکاتی که همبستگی ندارند به عنوان تلاطم در نظر گرفته می‌شوند. روش Bricker and Monismith (2007) که در آن محاسبات با فرضیاتی از قبیل تعادل تلاطم و عدم وجود تعامل بین موج و تلاطم، انجام می‌گیرد.

هدف بسیاری از مطالعات انجام شده در دو دهه اخیر، بررسی تأثیر گیاهان مستغرق به ویژه گیاهان ریشه‌دار دریایی بر روی هیدرودینامیک جریان و مورفودینامیک بستر دریا بوده است (Venier et al, 2012). گیاهان ریشه‌دار سفت‌تر و سخت‌تر از ماکرو جلبک‌ها بوده و لایه برشی ایجاد شده در بالای ساقه گیاهان دریایی مستغرق، مشخصات سرعت تلاطمی و سرعت متوسط جریان را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. (Nepf and Vivoni, 2000). همچنین این گیاهان در حال ایستاده باعث ایجاد نیروی پسای قوی و تولید گردابه‌های بزرگتر می‌شوند (Nepf and Ghisalberti, 2008). (2004) با استفاده از استوانه‌های چوبی برای شبیه‌سازی تأثیر ساقه گیاه بر رشد محدود لایه‌های برشی، مشاهده کردند که پوشش گیاهی مستغرق باعث تغییر نیمرخ سرعت در نزدیک بستر می‌شود.

فرسایش بستر تالاب‌های قرار گرفته در کنار ساحل دریاها و اقیانوس‌ها در اثر امواج جذر و مدی یکی از معضلاتی است که در نتیجه آن اکولوژی تالاب به خطر می‌افتد. لذا وجود گیاهان دریایی از جمله جلبک‌ها با تأثیر گذاشتن بر روی

هیدرودینامیک جریان و پایداری رسوب می‌توانند به حل این معضل کمک کرده و تغییرات قابل توجهی را در اکوسیستم‌های ساحلی منجر شوند. بنابراین داشتن دانش دقیق از تأثیر تشک‌های جلبکی بر روی دینامیک جریان، کیفیت آب و پایداری رسوب، نیاز به فهم بهتر تأثیر آنها بر روی اکولوژی ساحل و محیط‌های مصب رودخانه‌ای می‌باشد (Venier et al, 2012).

Silva et al, (2004) با بررسی واکنش گیاهان دریایی و رسوبات به تغییرات فیزیکی در تالاب ساحلی Ria de Aveiro گزارش دادند که ورود جزر و مد اقیانوس اطلس از طریق کانال موجود به تالاب، اکوسیستم آن را تغییر داده و باعث شور شدن آب آن شده است. همچنین افزایش نفوذ موج جزر و مدی باعث تغییر در الگوی گیاهان دریایی شده است که این امر به نوبه خود باعث افزایش حمل و جابجایی رسوبات ماسه‌ای کف، تعلیق مواد بستی و همچنین افزایش کدورت در ستون آب شده است. همچنین آنها اعلام نمودند که بسترهای با پوشش گیاهان دریایی در تالاب‌ها، شاخص‌های مهمی از تغییرات اکوسیستم هستند و این گیاهان نقش مهمی را در پایداری رسوبات بستر ایفا می‌کنند. تشک‌های جلبکی باعث ایجاد مناطقی می‌شوند که در آن تنش برشی بستر کاهش یافته، در نتیجه آن فرسایش کاهش یافته و میزان رسوب‌گذاری رسوبات معلق افزایش می‌یابد (Lopez and Garcia, 1998; Frostick and McCave, 1979). آزمایش‌های انجام شده توسط Romano et al, (2003) نشان داد که جلبک نوع *Entremorpha Intestinalis* به‌طور قابل توجهی مقاومت در مقابل جریان را افزایش داده و سرعت متوسط جریان در محدوده ۱۸ الی ۵۶ درصد کاهش یافت که در نتیجه آن، فرسایش رسوبات بستر در پوشش‌های ۱۰ درصد و ۶۰ درصد به ترتیب ۶۰ درصد و ۹۰ درصد کاهش یافت.

با اینکه جلبک‌ها به عنوان عاملی مهم در پایداری رسوبات جزر و مدی شناخته شده است (Silva et al, 2004)؛ اما با این حال مطالعات اندکی بر روی تأثیرات تشک جلبکی بر دینامیک جریان و رسوبات بستر انجام گرفته است. مخصوصاً بررسی تأثیر تشک جلبکی بر روی شکل بستر و میزان حمل رسوبات در حالت ترکیب امواج سطحی با جریان بسیار کمیاب می‌باشد. علاوه بر آن تفکیک سرعت ناشی از موج از روی داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت تلاطم (بدون اندازه‌گیری‌های مربوط به موج) از مواردی است که کمتر به آن پرداخته شده است. لذا هدف این تحقیق، تفکیک سرعت چرخشی موج از داده‌های تلاطم و همچنین بررسی تأثیر ماکرو جلبک‌ها بر هیدرودینامیک رسوب در شرایط مختلف جریان (از جمله ترکیب موج سطحی با جریان و جریان تکسویه) می‌باشد.

می‌باشد. لازم به توضیح می‌باشد که دبی‌های جریان و سایر پارامترها بر اساس مطالعات (Venier et al., 2012) انتخاب شده‌اند.

#### نوع جلبک و رسوب

گونه جلبک انتخاب شده در این بررسی از نوع *Ulva intestinalis* می‌باشد که به‌طور فراوان در سیستم‌های ساحلی سرشار از مواد مغذی یافت می‌شود. جلبک‌ها دارای متوسط طول ۲۵ سانتی‌متر، متوسط عرض ۲/۲ سانتی‌متر، متوسط وزن ۴۹ گرم و متوسط حجم ۸ سانتی‌متر مکعب بودند. نمونه‌های جمع‌آوری شده جلبک‌ها با یک الگوی منظم و با رعایت تراکم ۱۲ گیاه در هر متر مربع و با فواصل عرضی ۲۰ سانتی‌متر و طولی ۴۰ سانتی‌متر (پوشش ۷ درصد) در ۱۰ سانتی‌متری زیر بستر دفن شدند (شکل‌های ۱ و ۲). این پوشش مشابه پوشش موجود در خلیج بادل می‌باشد (Venier et al., 2012). برای اینکه جلبک در بستر ثابت بماند ریشه هر کدام از آنها به سنگی وصل گردید (شکل ۱).

تحقیق حاضر بدون تزریق رسوب انجام گرفت و رسوب انتخاب شده برای آزمایش‌ها از نوع غیر چسبنده با قطر متوسط ذرات برابر با ۰/۱۳۵ میلی‌متر که مطابق با اندازه ذرات مواد بستری اکثر تالاب‌ها از جمله خلیج بادل می‌باشد.

#### نحوه جداسازی سرعت موج از تلاطم

برای جداسازی سرعت چرخشی ناشی از موج از داده‌های تلاطم از روش Bricker and Monismith در محیط برنامه‌نویسی متلب (Matlab) استفاده گردید. در این روش که به روش فاز معروف است، با فرض به تعادل رسیدن جریان متلاطم (تعادل تلاطم) و بدون وجود فعل و انفعالات (تعامل) بین موج و تلاطم، از تأخیر فاز بین مؤلفه‌های سرعت  $U$  (سرعت طولی) و  $W$  (سرعت قائم) برای درون‌یابی مقدار تلاطم در زیر پیک موج در زیر محدوده حرکتی دامنه طیفی، استفاده می‌شود (شکل ۳). این روش زمانی مفید است که هیچ اندازه‌گیری همزمان از سرعت موج موجود نباشد.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

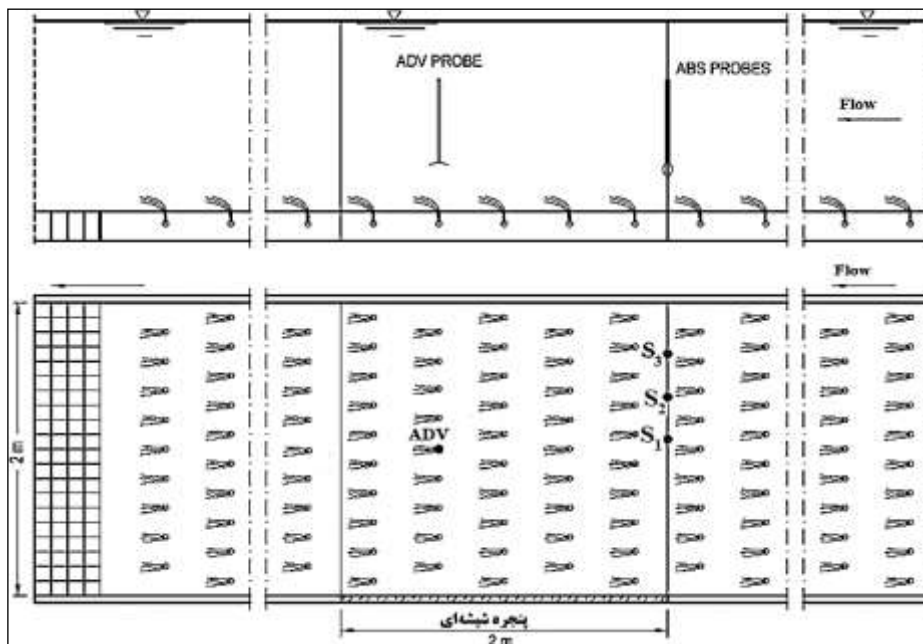
برای انجام آزمایش‌ها از یک فلوم به طول ۱۱ متر و به عرض ۲ متر در دانشگاه هال انگلیس استفاده شد. شروع اندازه‌گیری‌ها، ۶ متر پایین‌تر از ورودی جریان به فلوم انجام گرفت. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از توزیع سرعت، در این فاصله جریان کاملاً توسعه یافته بود. رسوبات به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در کف کانال به‌طور یکنواخت و صاف گسترانده شدند. برای اندازه‌گیری بار بستر از یکسری تله اندازه‌های رسوب به عرض ۲۵ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر در انتهای فلوم استفاده گردید که در پایان هر آزمایش از طریق توزین رسوبات جمع شده در تله اندازه‌ها، مقدار بار بستر تعیین می‌گردید. مدت زمان آزمایش‌ها بسته به میزان دبی جریان، ۶ الی ۸ ساعت بعد از به تعادل رسیدن بستر بود. برای بررسی الگوی رسوب بستر و یا به عبارتی شکل بستر از سه حسگر فراصوتی با نام‌های  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  مطابق شکل (۱) در بالادست محدوده مورد استفاده برای اندازه‌گیری‌ها استفاده گردید. اندازه‌گیری حسگرهای شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب با فرکانس‌های ۴، ۲ و ۱ مگا هرتز بوده و قادر به ثبت تغییرات تراز بستر با زمان و شدت مهاجرت شکل بستر بودند. لازم بذکر می‌باشد که در این تحقیق از داده‌های ثبت شده هر سه حسگر (متوسط مقادیر) برای بررسی پارامترهایی نظیر طول موج و تعداد تاج شکنج استفاده شد. اندازه‌گیری‌های سه بعدی سرعت با استفاده از سرعت سنج سه‌بعدی ADV که موقعیت آن در شکل (۱) مشخص می‌باشد، انجام گرفت.

### نحوه انجام آزمایش‌ها

بعد از آماده شدن فلوم، ابتدا جریان به آرامی وارد کانال می‌شد و بعد از اطمینان از بالا بودن تراز آب از عمق مورد نظر برای آن آزمایش، دبی به آرامی تنظیم می‌شد. آزمایش‌ها در دو بستر ماسه‌ای و بستر پوشش‌دار (با وجود جلبک) در دو حالت جریان تکسویه و ترکیب جریان با موج انجام گرفت. برای تولید موج از پاروی مخصوص ایجاد موج استفاده گردید. متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق و دامنه تغییرات آنها مطابق جدول (۱)

جدول ۱- پارامترها و دامنه تغییرات آنها در تحقیق حاضر

ردیف	پارامتر	دامنه تغییرات
۱	شرایط بستر	بستر ماسه‌ای (sandy bed) - بستر جلبکی (algae)
۲	نوع جریان	جریان تکسویه (flow) - جریان موجدار (flow+wave)
۳	دبی جریان (l/s)	۹۰ - ۱۰۲ - ۱۲۴
۴	عمق آب (m)	۰/۲ - ۰/۲۲ - ۰/۳۱۵
۵	عدد فرود	۰/۱۷ - ۰/۱۵۸ - ۰/۱۴۲
۶	$d_{50}$ رسوب (mm)	۰/۱۳۵

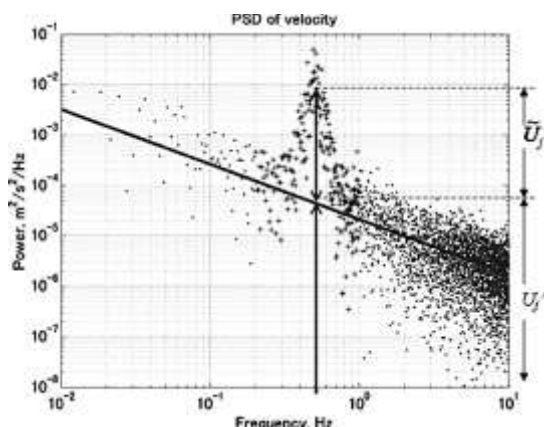


شکل ۱- تجهیزات و پلان مدل مورد استفاده



شکل ۲- نمایی از داخل فلوم و جلبک‌های قرار گرفته بر روی بستر ماسه‌ای و شکل بستر تشکیل شده

شده در شکل مذکور بیانگر متوسط مقادیر بدون در نظر گرفتن مقادیر مربوط به موج می‌باشد و برای برآورد مقدار  $\bar{U}_j$ ، در سری فوریه در زیر پیک موج استفاده می‌شود. داده‌های این شکل مربوط به سرعت اندازه‌گیری شده میدانی با استفاده از ADV می‌باشد (Bricker and Monismith, 2007).



شکل ۳- چگالی طیف انرژی (PSD) سرعت طولی، (Bricker and Monismith, 2007)

جدا کردن سرعت‌های ناشی از موج از تلاطم در دامنه طیفی مشکل است زیرا پیک موج اغلب در موجی یافت می‌شود که در آن، تلاطم نیز پر انرژی می‌باشد. بنابراین استخراج پیک موج از سری سرعت معتبر نمی‌باشد. علاوه بر آن درون‌یابی تلاطم چگالی مقطع طیفی (Cross-Spectral Density) در زیر پیک موج عملی نیست؛ زیرا بخش حقیقی (CSD) هم دارای مقادیر مثبت بوده و هم دارای مقادیر منفی می‌باشد. چگالی طیف انرژی (Power Spectral Density) مؤلفه‌های  $U$  یا  $W$  فقط دارای مقادیر حقیقی مثبت می‌باشند، بنابراین درون‌یابی طیف تلاطم در زیر پیک موج یک PSD، امکان‌پذیر می‌باشد (Bricker and Monismith, 2007). در نتیجه با جداسازی سرعت‌های چرخشی موج ( $\bar{U}_j$  و  $\bar{W}_j$ ) از تلاطم، می‌توان تنش ناشی از موج ( $\overline{UW}$ ) را محاسبه نمود. شکل (۳) نمونه‌ای از نتایج PSD سرعت طولی جریان موجدار را نشان می‌دهد که در این شکل نقاط با علامت (+) مربوط به پیک موج و دایره‌های سیاه نقاطی هستند که خارج از پیک موج می‌باشند. خط برازش داده

## نتایج و بحث

### بررسی چگالی طیف انرژی (PSD) جریان موجدار و جریان تکسویه در بسترهای ماسه‌ای و جلبکی

نتایج مربوط به چگالی طیف انرژی (PSD) سرعت طولی (U) در شکل (۴) ارائه شده است. به دلیل وجود نوسان‌های زیاد، برای بررسی هر چه بهتر نتایج سعی گردید تا متوسط مقادیر نوسان‌های انرژی محاسبه گردد که با دایره‌های مشکی رنگ در شکل مذکور مشخص می‌باشند. با توجه به شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) که به ترتیب مربوط به جریان موجدار و جریان تکسویه بر روی بستر جلبکی می‌باشند، وجود یک تغییر و جهش ناگهانی در انرژی برای حالت جریان موجدار کاملاً قابل تشخیص بوده و مربوط به قله (پیک) موج می‌باشد که این امر افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش فرسایش بستر را در پی خواهد داشت (شکل ۴-الف). اما چنین تغییری در جریان تکسویه مشاهده نمی‌شود و شیب افت انرژی در این حالت تا حدودی یکنواخت می‌باشد (شکل ۴-ب). این روندها برای بستر ماسه‌ای نیز مشابه بستر جلبکی می‌باشد (شکل‌های ۴-ج و ۴-د). اما شکل‌های (۴-الف) و (۴-ج) نشان دهنده وجود تفاوت در روند تغییرات انرژی بین دو بستر جلبکی و ماسه‌ای برای حالت موجدار می‌باشند. زیرا علاوه بر اینکه محدوده فرکانسی تغییرات انرژی موج در بستر ماسه‌ای (شکل ۴-الف) بیشتر از بستر جلبکی (شکل ۴-ج) می‌باشد، تغییرات انرژی موج در بستر ماسه‌ای نسبت به جلبکی در فرکانس‌های بیشتر رخ می‌دهد. این امر بیانگر تأثیر تشک جلبکی بر کاهش تعداد گردابه‌های بزرگ و همچنین جابجایی آنها به سمت فرکانس‌های کم می‌باشد. علاوه بر آن تشک جلبکی باعث کاهش انرژی گردابه‌های بزرگ در فرکانس‌های بالا می‌شود که این امر در شکل‌های (۴-ب) و (۴-د) برای جریان تکسویه مشخص می‌باشد.

روند تغییرات چگالی مقطع طیفی (CSD) سرعت‌های UW در جریان‌های موجدار و تکسویه بر روی بسترهای مختلف مشابه تغییرات PSD می‌باشد. نتایج مربوط به چگالی مقطع طیفی (CSD) سرعت‌های UW نشان دهنده کاهش مقدار و کاهش شیب میرایی انرژی در بستر ماسه‌ای (شکل ۵-ب) نسبت به بستر جلبکی (شکل ۵-الف) می‌باشد. علت افت ناگهانی انرژی در فرکانس‌های پایین در این روش (روش CSD)، مربوط به مؤلفه عمودی سرعت (W) می‌باشد که در ترکیب با مؤلفه طولی سرعت، باعث این تغییرات شده است. هر چند مقدار انرژی UW در بستر ماسه‌ای (شکل ۵-ب) نسبت به بستر جلبکی (شکل ۵-الف) کاهش یافته است اما وجود نوسان‌های ناگهانی و بزرگ انرژی در بستر ماسه‌ای به خوبی قابل تشخیص می‌باشد که این امر باعث ناپایداری در رسوبات بستر می‌شود.

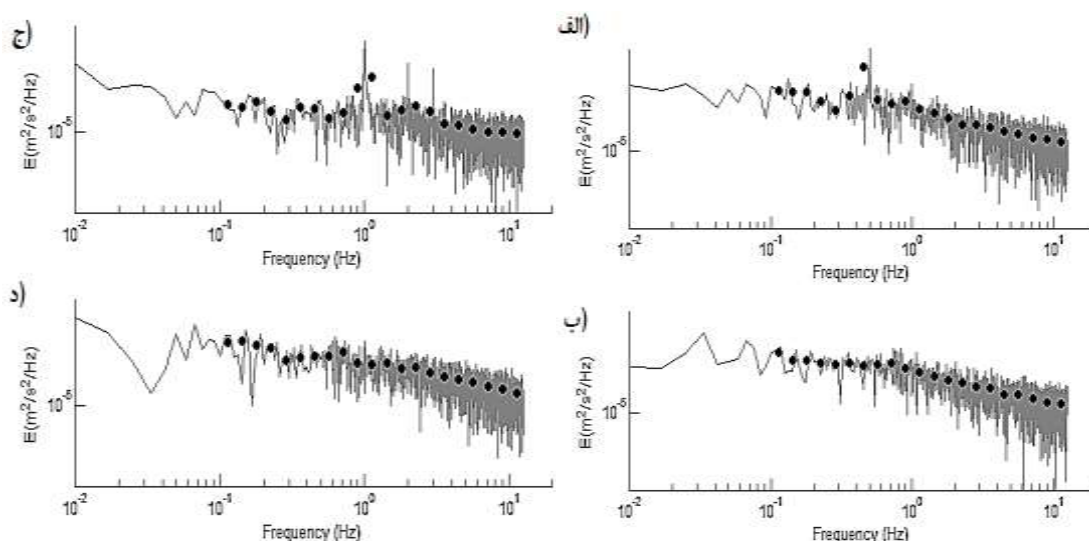
مؤلفه عمودی سرعت از عوامل تأثیرگذار بر تعلیق و ناپایداری رسوبات بستر می‌باشد و تشک جلبکی از جمله عواملی است که بر روی مؤلفه عمودی سرعت اثرگذار بوده و باعث کاهش و حتی حذف نوسان‌های انرژی آن شده است (شکل ۶-الف)؛ اما چنین روندی در بستر ماسه‌ای (شکل ۶-ب) ملاحظه نمی‌شود که این امر کارایی و مؤثر بودن جلبک‌ها بر روی مؤلفه عمودی سرعت را نشان می‌دهد. شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) به ترتیب مربوط به چگالی طیف انرژی سرعت عمودی (W) بر روی بستر جلبکی و ماسه‌ای می‌باشند. چگالی مقطع طیفی (CSD) سرعت‌های UW در قالب چگالی طیف انرژی (PSD)، مطابق شکل (۵) می‌باشد.

لذا در صورتی که هیچ اندازه‌گیری از سرعت چرخشی موج وجود نداشته باشد، روش PSD یک روش بسیار مناسب برای جدا کردن سرعت موج از تلاطم بوده که می‌تواند برای محاسبه تنش ناشی از موج (اولین ترم در معادله (۲)) بکار گرفته شود. لذا در تحقیق حاضر به صورت شماتیک به نحوه جداسازی سرعت موج از تلاطم پرداخته شده است که نشان دهد مقدار اولین ترم معادله (۲) مخالف صفر می‌باشد.

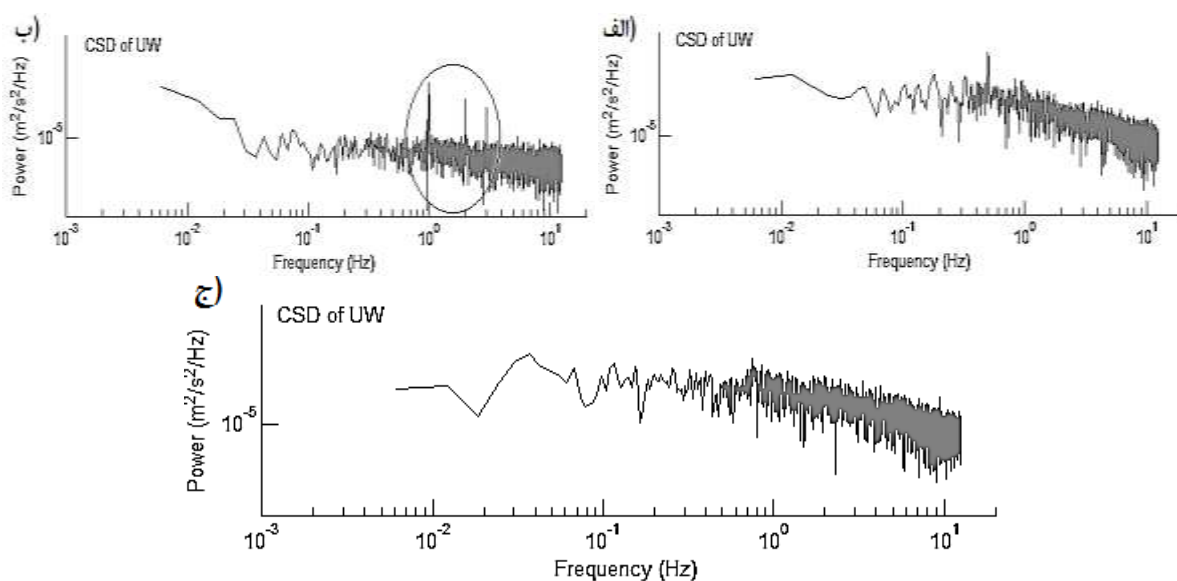
### تأثیر تشک جلبکی بر فرم بستر

نتایج تغییرات تراز بستر (dz) پس از به تعادل رسیدن بستر که مربوط به داده‌های برداشت شده از حسگر اندازه‌گیر تغییرات تراز بستری (S<sub>۲</sub> در شکل ۱) می‌باشد در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) ارائه شده است. تأثیر وجود جلبک بر روند تغییرات تراز بستر در حالت جریان موجدار (ترکیب موج سطحی با جریان) در شکل (۷-الف) نشان می‌دهد که نوسان‌های تغییرات تراز بستر ماسه‌ای شدیدتر از بستر جلبکی می‌باشد. به طوری که دامنه تغییرات تراز بستر ماسه‌ای تقریباً ۳ برابر بستر پوشش‌دار می‌باشد. نتایج فوق دلیل بر مؤثر بودن پوشش جلبکی بر پایداری رسوبات در بستر ساحل می‌باشد. زیرا جلبک‌ها به خاطر انعطاف‌پذیر بودن، می‌توانند به صورت افقی بر روی بستر قرار گیرند (شکل ۲) که این امر موجب کاهش نیروی پسا و سرعت جریان بر روی بستر می‌شود که در نتیجه آن تغییرات بستر نیز کاهش می‌یابد. شکل (۷-ب) بیانگر تأثیر قابل توجه جریان ناشی از موج (جریان موجدار) بر تغییرات بستر پوشش‌دار می‌باشد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد برای حالت جریان تکسویه، تراز بستر با گذشت زمان تغییرات معنی‌داری نداشته اما در حالت جریان موجدار این تغییرات شدید بوده و در حدود ۵ برابر آن در حالت جریان تکسویه می‌باشد. زیرا موج سطحی نه تنها در سواحل کم عمق بلکه در آب‌های عمیق نیز باعث تعلیق رسوبات بستر و همچنین باعث افزایش تنش برشی

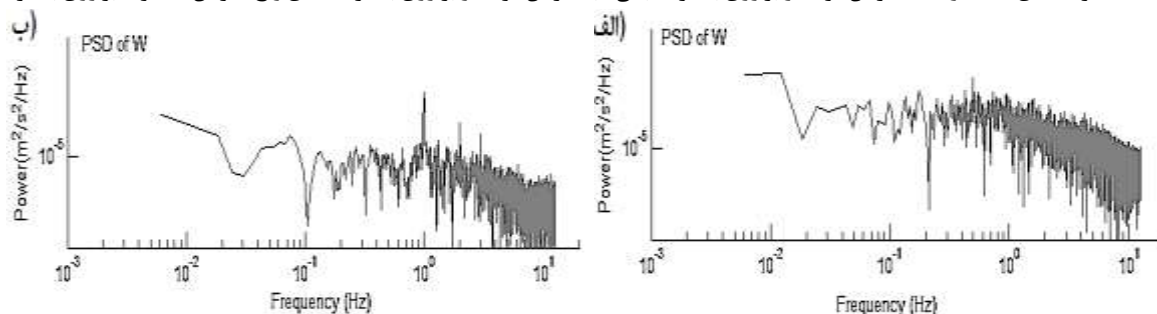
بستر شده که این امر می‌تواند در ناپایداری رسوبات بستر بخصوص در سواحل تالابها نقش مهمی را ایفا نماید. لذا می‌توان گفت که وجود جلبک‌ها می‌تواند در شرایط جزر و مدی بر پایداری رسوبات و تغییرات بستر ساحل تالابها مؤثر واقع شود.



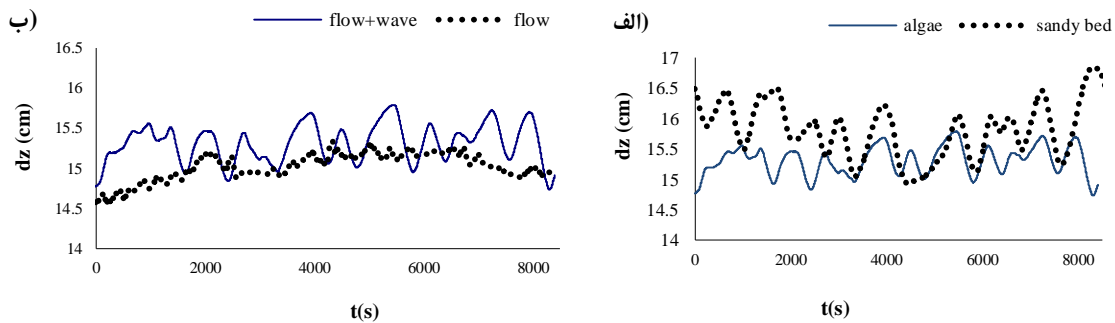
شکل ۴- بررسی طیف انرژی نوسان‌های تلاطم سرعت طولی (U) در مقابل فرکانس (محل اندازه‌گیری: ۳ سانتی متری بالای بستر) برای، الف: جریان موجدار بر روی بستر جلبکی، ب: جریان تکسویه بر روی بستر جلبکی، ج: جریان موجدار بر روی بستر ماسه‌ای، د: جریان تکسویه بر روی بستر ماسه‌ای؛ نقطه‌های مشکی رنگ (●) مربوط به متوسط مقادیر در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی می‌باشند



شکل ۵- CSD سرعت‌های UW در؛ الف: جریان موجدار بر روی بستر جلبکی، ب: جریان موجدار بر روی بستر ماسه‌ای و ج: جریان تکسویه بر روی بستر جلبکی



شکل ۶- چگالی طیفی انرژی (PSD) سرعت عمودی W؛ الف: جریان موجدار در بستر جلبکی و ب: جریان موجدار بر روی بستر ماسه‌ای



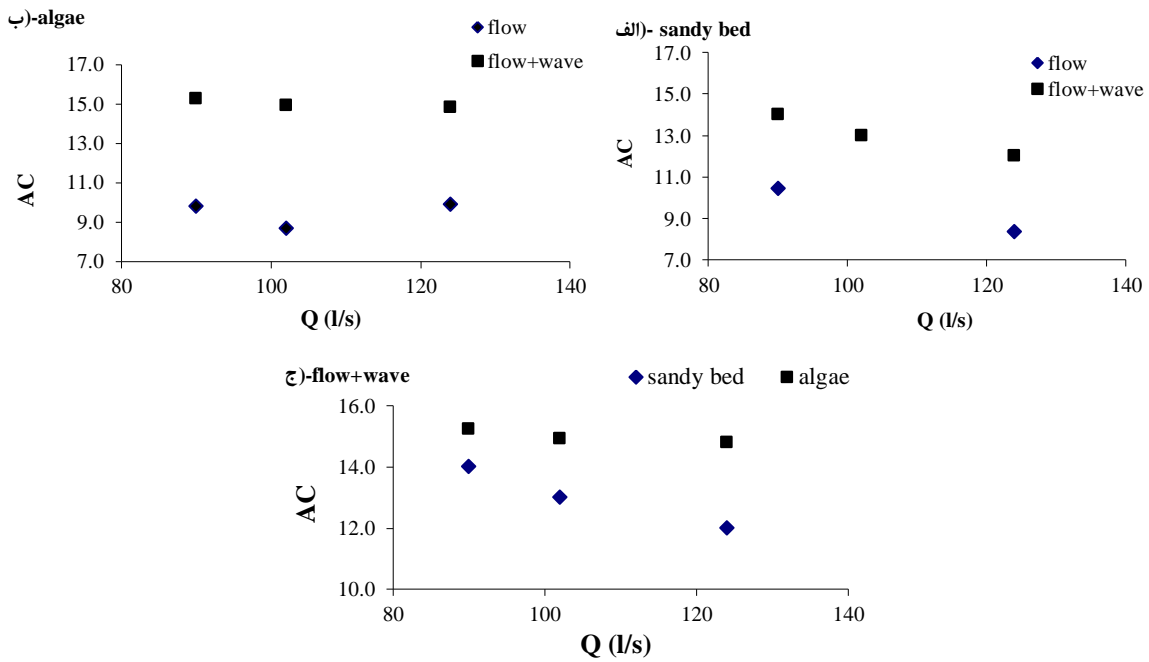
شکل ۷ - تغییرات زمانی تراز بستر (dz)، الف: در بسترهای ماسه‌ای و جلبیکی در حالت جریان موجدار، ب: بستر جلبیکی در دو حالت جریان موجدار و جریان تکسویه

جهت‌های طولی و عمقی می‌باشند) در ستون عمق جریان تکسویه که مربوط به مطالعه Venier *et al.*, (2012) می‌باشد برای دو حالت بستر ماسه‌ای و بستر جلبیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، مقادیر تنش رینولدزی در نزدیک کف برای بستر ماسه‌ای بیشتر از بستر جلبیکی می‌باشد.

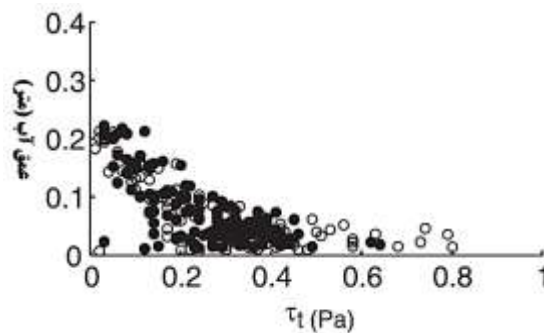
### تأثیر تشک جلبیکی بر طول موج نسبی شکنج

نتایج نسبت متوسط طول موج شکنج به متوسط طول جلبک ( $D_L/A_L$ ) در مقابل دبی جریان برای بسترهای جلبیکی و ماسه‌ای برای هر دو جریان تکسویه و جریان موجدار در شکل‌های (۱۰-الف) الی (۱۰-د) ارائه شده است. در بستر ماسه‌ای برای هر دو حالت جریان تکسویه و جریان موجدار، طول موج نسبی شکنج با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد (۱۰-الف). زیرا افزایش دبی جریان باعث افزایش سرعت و تنش برشی جریان بر روی بستر می‌شود که در نتیجه آن طول موج نسبی شکنج‌ها افزایش می‌یابد. چنین روندی برای بستر پوشش‌دار و در حالت جریان موجدار نیز تا حدودی صادق می‌باشد (شکل ۱۰-ب). همچنین مقادیر نسبت  $D_L/A_L$  برای بستر ماسه‌ای بیشتر از بستر پوشش‌دار می‌باشد (شکل ۱۰-ج) این امر در شکل (۷) نیز قابل تشخیص می‌باشد. زیرا سرعت جریان بر روی بستر ماسه‌ای بیشتر از بستر پوشش‌دار می‌باشد و به همین دلیل طول موج شکنج‌های تشکیل شده در بستر ماسه‌ای بیشتر از بستر پوشش‌دار می‌باشد. همچنین در بستر پوشش‌دار وجود نواحی جداشدگی جریان در پشت جلبک‌ها به شکل‌گیری شکنج‌ها با طول موج کوتاه نیز کمک می‌کنند. موارد اشاره شده برای هر دو حالت جریان تکسویه (شکل ۱۰-ج) و جریان موجدار (شکل ۱۰-د) صادق می‌باشند.

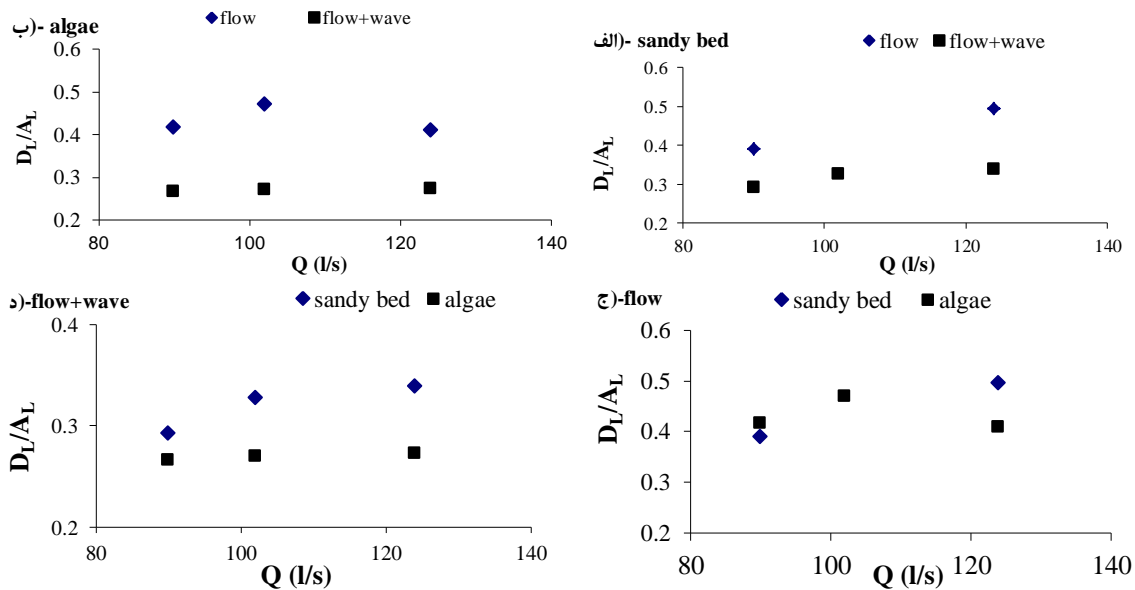
متوسط تعداد تاج شکنج در هر متر طولی (AC)، از جمله پارامترهای مربوط به فرم بستر است که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است. روند تغییرات متوسط تعداد تاج شکنج در مقابل دبی جریان برای حالت‌های مختلف شرایط جریان در شکل (۸) بیانگر کاهش مقدار آن با افزایش دبی جریان در بستر ماسه‌ای می‌باشد. زیرا با افزایش دبی جریان، قدرت حمل رسوبات و تنش برشی بستر زیاد شده و در نتیجه تعداد شکنج‌های تشکیل یافته در هر متر طولی کاهش می‌یابد (شکل ۸-الف)؛ اما افزایش دبی تأثیر قابل توجهی در کاهش تعداد تاج شکنج‌ها در بستر جلبیکی ندارد؛ زیرا وجود پوشش گیاهی باعث جابجایی تنش برشی از سطح رسوبات بستر به سطح جلبک‌ها و کاهش سرعت جریان بر روی بستر می‌شود (Madsen *et al.*, 2001). به همین دلیل، افزایش دبی تأثیر قابل توجهی بر روی تغییرات تراز بستر در حالت پوشش‌دار ندارد (شکل ۸-ب). با مقایسه مقادیر مربوط به متوسط تعداد تاج شکنج‌ها در هر متر طولی (AC) در هر دو بستر ماسه‌ای (شکل ۸-الف) و بستر پوشش‌دار (شکل ۸-ب) ملاحظه می‌گردد که مقادیر AC در شرایط جریان موجدار بیشتر از جریان تکسویه می‌باشد. لذا تأثیر ترکیب موج سطحی با جریان بر تشکیل فرم بستر شکنجی شکل و به تبع آن در حمل رسوبات بیشتر از حالتی است که در آن فقط جریان تکسویه می‌باشد. به دلیل اینکه سرعت و تنش برشی نزدیک کف برای بستر ماسه‌ای بیشتر از جلبیکی می‌باشد (شکل ۹)، تعداد تاج شکنج‌ها در بستر ماسه‌ای کمتر از بستر پوشیده شده از جلبک می‌باشد (شکل ۸-ج). علاوه بر آن وجود نواحی جداشدگی در پشت جلبک‌ها، به تشکیل تپه‌های رسوبی کوچک (شکنج) نیز کمک می‌کنند. شکل (۹) تنش رینولدز تلاطمی ( $\tau_t = -\rho u'w'$ )؛  $u'$  و  $w'$  به ترتیب نوسانات سرعت در



شکل ۸- متوسط تعداد تاج شکنج در هر متر طولی (AC) در مقابل دبی جریان الف: بستر ماسه‌ای در شرایط جریان تکسویه و موجدار، ب: بستر پوشش‌دار در شرایط جریان تکسویه و موجدار، ج: بستر پوشش‌دار و ماسه‌ای در شرایط جریان موجدار



شکل ۹- تنش رینولدز تلاطمی در ستون عمق آب جریان تکسویه، دایره‌های سفید مربوط به بستر ماسه‌ای و سیاه رنگ مربوط به بستر جلبکی می‌باشند (مطالعه Venier et al., (2012)



شکل ۱۰- نسبت طول موج شکنج به طول جلبک در مقابل دبی جریان؛ الف: بستر ماسه‌ای، ب: بستر پوشش‌دار، ج: جریان تکسویه و د: جریان موجدار

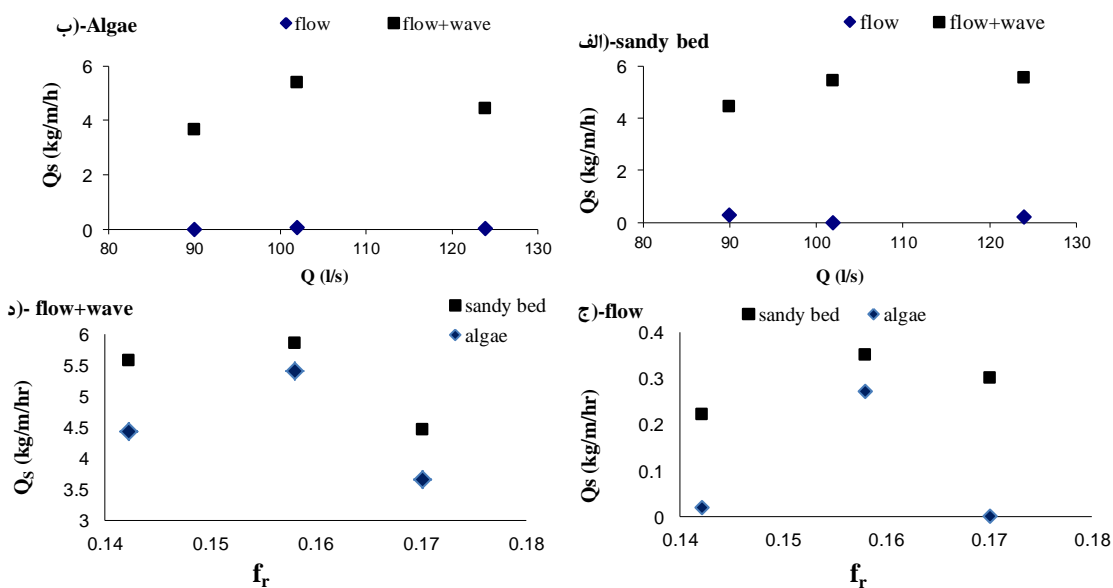


می‌باشد در حالی که مقادیر آن برای شرایط جریان موجدار در بستر ماسه‌ای برابر با ۵/۱۵ کیلوگرم در ساعت و در بستر جلبکی برابر با ۴/۶ کیلوگرم در ساعت می‌باشد. با توجه به این مقادیر ملاحظه می‌گردد که جریان موجدار تأثیر قابل توجهی بر میزان حمل و ناپایداری مواد بستری دارد و اثر تشک جلبکی در پایداری و کاهش حمل رسوبات بستر نیز معنی‌دار می‌باشد.

شکل‌های (۱۱-ج) و (۱۱-د) تأثیر عدد فرود جریان را بر میزان بار بستر به ترتیب در شرایط جریان تکسویه و جریان موجدار نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد که با افزایش عدد فرود جریان، بار بستر زیاد می‌شود و بیشترین مقدار دبی بار بستر در جریان‌های تکسویه و موجدار در هر دو بستر ماسه‌ای و پوشش‌دار در عدد فرود ۰/۱۵۸ اتفاق افتاده است. همچنین با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در تمامی حالت‌های مختلف، دبی رسوبی در بستر ماسه‌ای بیشتر از بستر پوشش‌دار می‌باشد. زیرا با وجود جلبک‌ها تنش برشی بستر از سطح رسوبات بستر به بالای جلبک‌ها منتقل می‌شود و قدرت حمل رسوبات توسط جریان کاهش می‌یابد.

### تأثیر تشک جلبکی بر میزان حمل رسوبات بستر

با توجه به اینکه وجود پوشش گیاهی بر روی بستر باعث کاهش پتانسیل تعلیق و حمل رسوبات توسط جریان می‌شود لذا در تحقیق حاضر سعی گردید تا اثر پوشش جلبکی بر میزان حمل رسوبات بستر در شرایط جریان تکسویه و موجدار به صورت کمی ارائه شود. شکل (۱۱-الف) تأثیر دبی جریان را بر روی دبی بار بستر در حالت بستر ماسه‌ای نشان می‌دهد که بیانگر افزایش میزان بار بستر با افزایش دبی جریان در هر دو شرایط جریان موجدار و جریان تکسویه می‌باشد. زیرا با افزایش دبی، سرعت و انرژی جریان افزایش یافته و در نتیجه تنش برشی بستر و قدرت حمل رسوب نیز افزایش می‌یابد. افزایش دبی جریان به دلیل پایین بودن عدد فرود جریان، تأثیر معنی‌داری بر روی حمل بار بستر ندارد اما برای حالت جریان موجدار روندی افزایشی دارد. این فرآیند برای بستر پوشیده شده از جلبک نیز صادق است (شکل ۱۱-ب). به‌طور متوسط دبی واحد بار بستر برای شرایط جریان یکنواخت در پوشش ماسه‌ای و جلبکی به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۰۹ کیلوگرم در ساعت



شکل ۱۱- الف: دبی بار بستر ماسه‌ای در مقابل دبی جریان برای شرایط مختلف جریان، ب: دبی بار بستر جلبکی در مقابل دبی جریان برای شرایط مختلف جریان، ج: دبی رسوبی در مقابل عدد فرود جریان در بسترهای مختلف برای جریان موجدار

برای درک بهتر تأثیر تشک جلبکی بر میزان حمل رسوبات بستر، از پارامتر بی‌بعد نسبت دبی بار بستر جلبکی به دبی بار بستر ماسه‌ای ( $Q_{SA}/Q_{SB}$ ) استفاده گردید که نتایج آن در شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب) ارائه شده است. این نتایج بیانگر کاهش ۸۰ درصدی دبی بار بستر در حالت جلبکی نسبت به حالت ماسه‌ای در جریان تکسویه می‌باشد (شکل ۱۲-الف). لازم به ذکر می‌باشد که در این شرایط، میزان دبی رسوب در

بستر ماسه‌ای به‌ویژه بستر پوشش‌دار بسیار ناچیز بوده و مقدار نسبت دبی بار بستر در حالت پوشش‌دار به حالت ماسه‌ای عددی بزرگ را تداعی می‌کند. همچنین نتایج مطالعات Romano et al. (2003) نیز حاکی از کاهش ۶۰ درصدی دبی بار بستر در پوشش ۱۰ درصدی جلبک برای شرایط جریان تکسویه بود؛ اما برای شرایطی که جریان موجدار در فلوم حاکم است، بطور متوسط دبی بار رسوب در بستر پوشش‌دار در حدود ۱۵ درصد

### نتیجه‌گیری

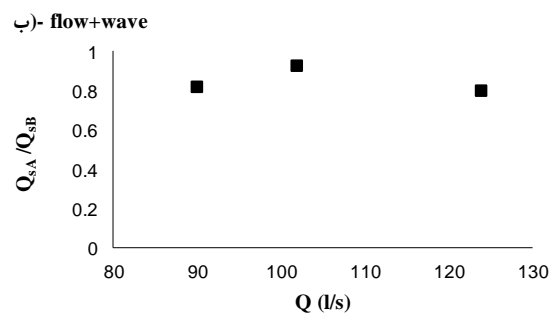
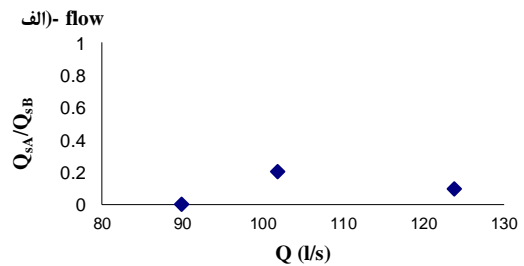
در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر وجود تشک جلبکی بر پایداری رسوبات (دبی بار بستر)، شکل بستر و تغییرات تراز بستر پرداخته شد. همچنین از روش چگالی طیف انرژی (PSD) برای جداسازی سرعت موج از تلاطم استفاده گردید. برای رسیدن به این هدف، آزمایش‌هایی در دو بستر ماسه‌ای و پوشش‌دار (با پوشش جلبکی) در سه دبی ۹۰، ۱۰۲ و ۱۲۴ لیتر بر ثانیه در دو حالت جریان تکسویه و جریان موجدار (ترکیب موج سطحی با جریان) انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات تراز بستر در حالت بستر ماسه‌ای شدیدتر از بستر پوشش‌دار می‌باشد؛ به طوری که دامنه تغییرات آن در بستر ماسه‌ای تقریباً ۳ برابر بستر پوشش‌دار می‌باشد. این تغییرات در حالت جریان موجدار نیز بیشتر از جریان تکسویه اتفاق افتاد. نتایج بررسی‌های چگالی طیف انرژی (PSD) مؤلفه‌های سرعت نشان داد در مواردی که هیچ اندازه‌گیری از سرعت موج ثبت نشده باشد، با استفاده از روش PSD می‌توان سرعت چرخشی موج را از سرعت تلاطم تفکیک نمود و در نتیجه تنش ناشی از موج را محاسبه نمود. علاوه بر آن تغییرات انرژی موج در بستر ماسه‌ای نسبت به بستر جلبکی در فرکانس‌های بالا رخ داد و وجود تشک جلبکی باعث کاهش تعداد گردابه‌های بزرگ، کاهش انرژی گردابه‌های بزرگ در فرکانس‌های بالا و همچنین جابجایی آنها به سمت فرکانس‌های کم گردید. نتایج مربوط به دبی بار بستر حاکی از آن بود که میزان حمل رسوبات کف با وجود تشک جلبکی در شرایط جریان تکسویه ۸۰ درصد و در شرایط جریان موجدار ۱۵ درصد نسبت به حالت بدون پوشش کاهش یافت. با این حال، تشک‌های جلبکی علاوه بر اینکه در شرایط جریان تکسویه تأثیر بیشتری بر کاهش بار بستر دارند حتی در شرایط جریان موجدار نیز تأثیر آنها معنی‌دار می‌باشد. این امر بیانگر تأثیر معنی‌دار جلبک‌ها بر پایداری رسوبات بستر در سواحل تالاب‌ها می‌باشد. علاوه بر آن نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان، تعداد متوسط تاج شکنج هر متر طولی کاهش و طول موج نسبی شکنج افزایش یافت.

### REFERENCES

- Benilov, A. Y., and Filyushkin, B. N. (1970). Application of methods of linear filtration to an analysis of fluctuations in the surface layer of the sea. *Journal of Izv. Atmos. Oceanic Phys*, 6, 810–819.
- Bricker, J., D., and Monismith, S. (2007). Spectral Wave-Turbulence Decomposition. *Journal of American Meteorological Society*, 1479-1487. DOI: 10.1175/JTECH2066.1
- Butman, B., Noble, M. and Folger, D. W. (1977).

نسبت به بستر ماسه‌ای کاهش یافت (شکل ۱۲-ب). بنابراین می‌توان گفت که تشک‌های جلبکی علاوه بر اینکه در شرایط عادی (جریان تکسویه) تأثیر بیشتری بر کاهش بار بستر دارند حتی در شرایط جزر و مدی (جریان موجدار) نیز تأثیر آنها معنی‌دار می‌باشد. لذا تأثیر جزر و مد بر حمل رسوبات بستر به دلیل معلق شدن ذرات رسوبی در اثر امواج و در نتیجه حمل راحت‌تر آنها توسط جریان ترکیب شده با موج، در تالاب‌ها قابل توجه بوده و وجود جلبک‌ها تا حدی باعث پایداری رسوبات بستر می‌شوند؛ اما تراکم زیاد جلبک‌ها می‌تواند به پایداری بیشتر رسوبات بستر کمک کند که در تحقیق حاضر به این مورد پرداخته نشده است. با این حال، وجود تشک جلبکی باعث کاهش تعلیق ذرات رسوبی گشته است.

به‌طور کلی می‌توان گفت که وجود تشک جلبکی در کاهش فرسایش و پایداری رسوبات بستر تالاب‌ها و سواحل در شرایط مختلف جریان مؤثر می‌باشد.



شکل ۱۲- دبی نسبی رسوبات کف در مقابل دبی جریان در شرایط الف: جریان تکسویه، ب: جریان موجدار

Observation of bottom current and bottom sediment movement on the mid-Atlantic continental shelf (abstract), *Eos Trans. AGU*, 58(6), 408.

Dean, R. G., and Dalrymple, R. A. (1991) *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific, 353 pp.

Frostick, L.E. and McCave, I.N. (1979). Seasonal shifts of sediment within an estuary mediated by algal growth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 9,

- 569-576.
- Gerbi, G. P., Trowbridge, J. H., Terray, E. A., Plueddemann, A. J. and Kukulka, T. (2009). Observations of turbulence in the ocean surface boundary layer: Energetics and transport. *J. Phys. Oceanogr.*, 39(5), 1077–1096, doi:10.1175/2008JPO4044.1.
- Jiang, J. Y., and Street, R. L. (1991). Modulated flows beneath wind-ruffled, mechanically-generated water waves. *J. Geophys. Res.*, 96, 2711–2721.
- Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2004). The limited growth of vegetated shear layers. *Water Resources Research*, 40. doi:10.1029/2003WR002776 W07502.
- Grant, W., D. and Madsen, O. S. (1979). Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 84, NO. C4.
- Komar, P. D., Neudeck, R. H. and Kulm, L. D. (1972) Observations and significant of deep-water oscillatory ripple marks on the Oregon continental shelf. In Shelf Sediment Transport, edited by Swift, D. J. P., Duane, D. B., Pilkey, O. H., 656 PP., Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., 1972.
- Lopez, F. and Garcia, M. (1998). Open-channel flow through simulated vegetation: suspended sediment transport modeling. *Water Resources Research*, 34 (9), 2341-2352.
- Madsen, J.D., Chambers, P.A., James, W. F., Koch, E. W. and Westlake, D. F. (2001). The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444:71–84
- Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000). Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical Research*, 105 (C12), 28547-28557.
- Nepf, H.M. and Ghisalberti, M. (2008). Flow and transport in channels with submerged vegetation. *Acta Geophysica*, 56 (3), 753-777. doi:10.2478/s11600-008-0017-y.
- Nielsen, P. (1992) Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport, World Sci., Singapore.
- Reidenbach, M. A., Monismith, S. G., Koseff, J. R., Yahel, G. and Genin, A. (2006a). Boundary layer turbulence and flow structure over a fringing coral reef, *Limnol. Oceanogr.*, 51(5), 1956–1968, doi:10.4319/lo.2006.51.5.1956.
- Reidenbach, M. A., Koseff, J. R., Monismith, S. G., Steinback, J. V. and Genin, A. (2006b). The effects of waves and morphology on mass transfer within branched reef corals, *Limnol. Oceanogr.*, 51(2), 1134–1141, doi:10.4319/lo.2006.51.2.1134.
- Reidenbach, M. A., Koseff, J. R. and Koehl, M. A. R. (2009). Hydrodynamic forces on larvae affect their settlement on coral reefs in turbulent, wave-driven flow, *Limnol. Oceanogr.*, 54(1), 318–330, doi:10.4319/lo.2009.54.1.0318.
- Romano, C., Widdows, J., Brinsley, M.D., Staff, F.J. (2003). Impact of Enteromorpha Intestinalis Mats on Near-bed Currents and Sediment Dynamics: Flume Studies. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 256, pp. 63e74.
- Shaw, W. J., and Trowbridge, J. H. (2001). The direct estimation of near-bottom turbulent fluxes in the presence of energetic wave motions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 1540–1557.
- Silva, J.F., Duck, R.W. and Catarino, J.B. (2004). Seagrasses and sediment response to changing physical forcing in a coastal lagoon. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 151-159.
- Thais, L., and Magnaudet, J. (1995). A triple decomposition of the fluctuating motion below laboratory wind water waves. *J. Geophys. Res.*, 100 (C1), 741–755.
- Trowbridge, J. H. (1998). On a technique for measurement of turbulent shear stress in the presence of surface waves. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 290–298.
- Venier, C., Figueiredo da Silva, J., McLelland, S. J., Duck, R. W., Lanzoni, S. (2012). Experimental investigation of the impact of macroalgal mats on flow dynamics and sediment stability in shallow tidal areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, doi:10.1016/j.ecss.2011.12.035.