

## بسط مدل زمانی و مکانی انتشار نمک در شرایط آزمایشگاهی

مریم عبداله‌زاده<sup>۱\*</sup>، احمد فاخری‌فرد<sup>۲</sup>، یعقوب دین‌پژوه<sup>۳</sup>، محرم جعفری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۷ تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۳۱

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۲-استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۳-دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۴-استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Maryam.abdolazadeh90@yahoo.com

### چکیده

در این مطالعه، مدل زمانی و مکانی انتقال نمک، با استفاده از آزمایش تونل باد، مورد بررسی واقع شد. در این مدل، از چهار عامل مهم شامل زمان، فاصله از منبع نمکی، شوری (EC) و سرعت باد استفاده شد که در آن شوری به عنوان متغیر وابسته و بقیه متغیرها به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. با استفاده از مدل آزمایشگاهی مذکور، مقدار شوری اندازه‌گیری شده و با مقدار نظیر محاسبه شده از مدل رگرسیونی مقایسه گردید. معیارهای ارزیابی شامل آماره‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط قدر مطلق خطاها (MAE) بود که در این مطالعه به ترتیب، معادل  $R^2=0.96$ ،  $RMSE=79.12 \mu\text{s/m}$  و  $MAE=46.15 \mu\text{s/m}$  بدست آمدند. با توجه به معیارهای ارزیابی فوق می‌توان نتیجه گرفت که دقت مدل رگرسیونی ارائه شده جهت ارزیابی انتقال گرد نمک در زمان‌ها و فواصل مختلف و بازای سرعت‌های مختلف باد بسیار خوب است.

واژه‌های کلیدی: انتقال نمک، تونل باد، سرعت باد، شوری، مدل رگرسیونی

## Development of Spatial and Temporal Model of Salt Emission under the Laboratory Condition

M Abdolazadeh<sup>1\*</sup>, A Fakheri-Fard<sup>2</sup>, Y Dinpashoh<sup>3</sup>, M Jafari<sup>4</sup>

Received: 2016.07.28

Accepted: 2017.06.21

1-Ph.D. Candidate, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

2-Prof., Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

3-Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

4-Assist. Prof., Dept. of Mechanic Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

\* Corresponding Author, Email: Maryam.abdolazadeh90@yahoo.com

### Abstract

In this study, temporal and spatial model of salt transfer was investigated using a wind tunnel testing. In this model, four variables namely time, distance from the salty source, salinity and wind speed were used in which salinity was considered as a dependent variable and the others remained variables were considered as the independent variables. By use of this model, the amounts of measured and calculated EC were compared with the regression model output. The evaluation criteria used here were coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE). The values of these criteria were obtained as  $R^2=0.96$ , RMSE= 79.14  $\mu\text{s/m}$  and MAE= 46.15  $\mu\text{s/m}$ . According to the mentioned criteria, it could be concluded that the precision of the proposed regression model in evaluating the salt dust transfer in different spaces and times as well as in different wind velocities was very good.

Keywords: Regression Model, Salinity, Transmission of salt, Wind speed, Wind tunnel

### مقدمه

نمک) می‌توان از مدل‌های ارائه شده برای خاک در زمینه فرسایش نمک نیز استفاده نمود. مدل‌های متعددی برای فرسایش بادی وجود دارد. در مدل‌های منطقه‌ای و مدل‌های در مقیاس جهانی، تولید گرد و غبار اغلب همراه با سه مکانیسم انتشار، فرارفت و رسوب است (شائو ۲۰۰۰). کاربرد آن‌ها شامل پیش‌بینی اثرات گرد و غبار روی اقلیم (ورنر و همکاران ۲۰۰۲)، مشکلات سلامتی (دراکسلر و همکاران ۲۰۰۱)، و آب و هوای فعلی مخصوصاً در آسیای شرقی (ژو و همکاران ۲۰۰۸) است. مدل‌های فرسایش در مقیاس حوضه‌ای برای پیش‌بینی خاک از دست رفته، سامانه‌های حفاظت از گیاه و ارزیابی

بدون شک، یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های ناشی از خشکی دریاچه ارومیه، تبدیل شدن بستر آن به یکی از کانون‌های فعال ایجاد گرد و غبار نمکی در منطقه و تبعات غیرقابل جبران آن در آینده نه چندان دور می‌باشد. ایجاد کانون ریزگرد نمکی و تشدید حرکت آن‌ها از جمله تبعات مستقیم خشکی دریاچه ارومیه بوده که به شدت سلامت ساکنین مجاور دریاچه و حتی استان‌های همجوار را تهدید می‌نماید (بی‌نام ۱۳۹۴).

اکثر تحقیقات انجام شده در ایران و جهان در زمینه فرسایش بادی مربوط به خاک می‌باشد که با توجه به یکسان بودن ماهیت فرسایش بادی (برای خاک و

<sup>1</sup> Diffusion, advection and deposition

به هم پیوند می‌دهد) ارائه کردند. از مدل فوق می‌توان برای تعیین شدت فرسایش بادی، انتشار ذرات، پیش‌بینی طوفان گرد و غبار استفاده کرد. اندازه غالب برای ذرات گرد و غبار بین ۰ تا ۱۱ میکرومتر بودند. همچنین مکان‌های اصلی انتشار ذرات و مسیرهای آن‌ها با استفاده عکس‌های ماهواره‌ای تشخیص داده شدند. در مقایسه با تعدادی مدل‌های موجود در ارتباط با انتقال ذرات، این مدل توانایی تشخیص منبع گرد و غبار را داشت. هاگن (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای مدل‌های فرسایش بادی را ارزیابی کرد. برای اندازه‌گیری خاک از دست رفته از ۴۶ رویداد در شش ایالت از مدل  $WEP^1$  استفاده شد. ضریب تعیین بین مقادیر فرسایش اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده معادل با  $R^2=0.71$  بود. مدل ارائه شده برای رویدادهای بزرگ فرسایش مناسب نبوده ولی مدل برای خاکدانه‌های کوچکتر از  $2 \text{ kg/m}^2$  قابل استفاده بوده است. هی و همکاران (۲۰۱۳)، فرآیند فرسایش بادی روی دو نوع خاک (لومی و لوم شنی) را در منطقه‌ای از مغولستان با استفاده از تونل باد، با توجه به سرعت باد و رطوبت خاک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدول فرسایش بادی خاک با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد. زمانی که سرعت باد از مقدار بحرانی تجاوز کند، فرسایش بادی خاک به‌طور ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. ایشان سرعت بحرانی برای هر دو نوع خاک را در محدوده‌ی ۷-۸ متر بر ثانیه عنوان کرد و اینکه مقدار رطوبت خاک تاثیر زیادی روی فرسایش بادی دارد. فرسایش بادی در هر دو نوع خاک با افزایش رطوبت خاک به‌صورت کاهشی گزارش شد. در مطالعه‌ای ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) از تونل باد برای اندازه‌گیری سرعت رسوب ذرات گرد و غبار با اندازه ذرات متفاوت، سطوح و سرعت‌های باد متفاوت استفاده کردند.

مسئله فرسایش بادی در خصوص پهنه خشک دریاچه ارومیه، با وجود اینکه قوانین دینامیکی فرسایش بادی در خصوص دریاچه ارومیه نیز حاکم است، متفاوت

اثرات فرسایش بادی استفاده می‌شود (هاگن ۱۹۹۱، واگنر و هاگن ۲۰۰۱).

فرسایش بادی باعث فقیر شدن خاک از مواد مغذی می‌شود و علاوه بر آن ذرات منتقل شده همانند پوششی مزاحم، سطح اراضی زراعی و غیر زراعی را فرا می‌گیرد (علیزاده ۱۳۶۸). ابعاد خسارت این پدیده بسته به شدت و دوام باد، میزان و نوع ذرات حمل شده با باد متفاوت است. وزش باد همراه با ماسه باعث بروز خسارات متعدد (مانند تخریب شدید محصولات کشاورزی، سطح ساختمان‌ها و تاسیسات، تخریب کلوخه‌های خاک و فرسایش مواد ریزدانه و رسی) می‌گردد (لیان یو و همکاران ۲۰۰۳).

تحقیقات انجام گرفته در زمینه فرسایش بادی در ایران و جهان در زیر آمده است:

پژوهش‌های اولیه انجام گرفته در زمینه فرسایش بادی با استفاده از تونل باد آزمایشگاهی بیانگر آن است که فرآیند فرسایش‌پذیری خاک، کاملاً تحت تأثیر توزیع اندازه خاکدانه‌های خشک قرار دارد (چپیل و میلن ۱۹۴۱). بریان (۱۹۶۸) با مطالعه شاخص‌های فرسایش‌پذیری در برابر آب، بهترین شاخص را پایداری خاکدانه‌ها در آب معرفی نمود. اما مقاومت خاک در مقابل فرسایش بادی را بیشتر به پایداری خاکدانه‌های خشک نسبت داد. درصد رطوبت خاک نیز یکی از عوامل مؤثر در برابر فرسایش بادی است طوری که همواره خاک‌های مرطوب از خاک‌های خشک مقاوم‌ترند. سرعت باد، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی باد، عامل انتقال ذرات با مکانیسم‌های مختلف است. ذرات خاک با سه مکانیسم غلطیدن، جهش و خزش انتقال می‌یابد (اختصاصی ۱۳۷۲). برخی از محققان در بررسی میزان فرسایش بادی، اثر ذرات فرساینده<sup>۱</sup> همراه با باد را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. چنانچه ماسه همراه باد نباشد، در عمل ساییدن ناتوان است (رفاهی ۱۳۷۸). لو و شائو (۲۰۰۱) در قاره استرالیا مدلی با سامانه یکپارچه (این سامانه فرسایش بادی با اساس فیزیکی و انتقال ذرات را

<sup>1</sup> Abraders

<sup>2</sup> Wind erosion prediction system

## مواد و روش‌ها

### مشخصات منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، واقع در شمال غرب ایران با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران است. این حوضه، بین استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان قرار دارد. دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگترین دریاچه بعد از دریاچه خزر و شورترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران و جهان به‌شمار می‌آید. از نظر شیمیایی آب دریاچه تیپ کلره بوده و باقی‌مانده خشک عناصر محلول در آب آن (TDS) در دوران پرآبی در حدود ۱۸۰ و در زمان کم آبی ۴۲۰ گرم در لیتر است (حسینی و صولتی فر ۱۳۸۸). مهم‌ترین منابع تامین آب دریاچه، بارش مستقیم بر روی آن و همچنین رواناب‌های سطحی ورودی به آن، از طریق مسیرهای مربوط به رودخانه‌های این حوضه آبریز بسته می‌باشد.

### رگرسیون غیرخطی چند متغیره

مدل‌های رگرسیونی، در واقع یک نگاشت خطی یا غیرخطی از یک متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل ایجاد می‌کنند. به‌وسیله یک رابطه رگرسیونی می‌توان با معلوم بودن مقادیر متغیرهای مستقل، مقدار متغیر وابسته را تخمین زد (رسول‌زاده و بزرگ حداد ۱۳۸۷).

در این مطالعه، داده‌ها از طریق آزمایش تونل باد در آزمایشگاه دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز اندازه‌گیری شد. سپس از رگرسیون غیرخطی چند متغیره برای تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته استفاده شد. چهار مورد اندازه‌گیری شده شامل میزان شوری آب داخل ظروف به‌عنوان متغیر وابسته، سرعت وزش باد، زمان از آغاز آزمایش و فاصله ظروف آب از منبع نمکی به‌عنوان متغیرهای مستقل بودند. در روش اول متغیرها دو به دو تحلیل و رابطه بین آن‌ها به‌دست آمد و در نهایت، با جایگذاری روابط در یک رابطه کلی بدست آمده، رابطه نهایی برای تخمین مقدار شوری بدست آمد. در روش دوم، کل داده‌های مربوط به متغیرهای وابسته و مستقل وارد نرم افزار *Datafit 9*

و پیچیده‌تر از فرسایش بادی خاک در سایر نواحی ایران می‌باشد، زیرا اثرات تخریبی زیست محیطی نمک، به مراتب بیشتر از اثرات زیست محیطی خاک خالص است. پسروی آب و خشکیدگی مداوم دریاچه ارومیه و گسترش سطح نمکی منبع مخربی برای اراضی کشاورزی، باغی و تاسیسات بوده و تهدید کیفی منابع آب شیرین منطقه را نیز فراهم می‌کند.

پدیده پودرزایی طبیعی ناشی از انحلال نمک موجود در سطح نمکی در اثر بارش‌ها و جایگذاری آن در اثر خشک شدگی سطح و همین‌طور پودر حاصل از آزادسازی آب تبلور کف نمکی دریاچه ارومیه در اثر تابش خورشید منبع عظیم نمک را برای فرسایش بادی مهیا می‌کند و موقعی اثرات تخریبی آن زیاد می‌شود که برداشت‌های بی‌رویه و غیر علمی نمک از کف دریاچه خشک و انباشت آنها انجام پذیرد. زیرا این عمل، خطر فرسایش را به‌مراتب زیاده‌تر می‌کند. پودر آماده کف نمکی توسط باد طبق فرآیندهای حاکم بر فرسایش بادی در جهت وزش باد حرکت نموده و تا مسافت‌های طولانی روی سطح مزارع، باغات و منابع آبی روباز منطقه ترسیب می‌شود و تداوم این فرآیند موجب افزایش تدریجی *EC* خاک‌ها شده و رشد گیاهان و درختان را در معرض تهدید قرار می‌دهد و به تدریج با افزایش *EC* خاک، نخست گیاهان و درختان حساس به شوری از بین می‌رود و سپس گیاهان کمتر مقاوم و در نهایت گیاهان کاملاً مقاوم نیز از بین خواهند رفت و این دورنمای ایجاد یک محیط بیابانی مرده و غیر قابل سکونت را تداعی می‌کند. افزون بر این، امراض تنفسی بدلیل استنشاق هوای آلوده به نمک و بیماری‌های سرطان ریه و فشار خون مردم ساکن اطراف دریاچه را تهدید می‌کند.

هدف از تحقیق حاضر، بسط مدل مکانی- زمانی

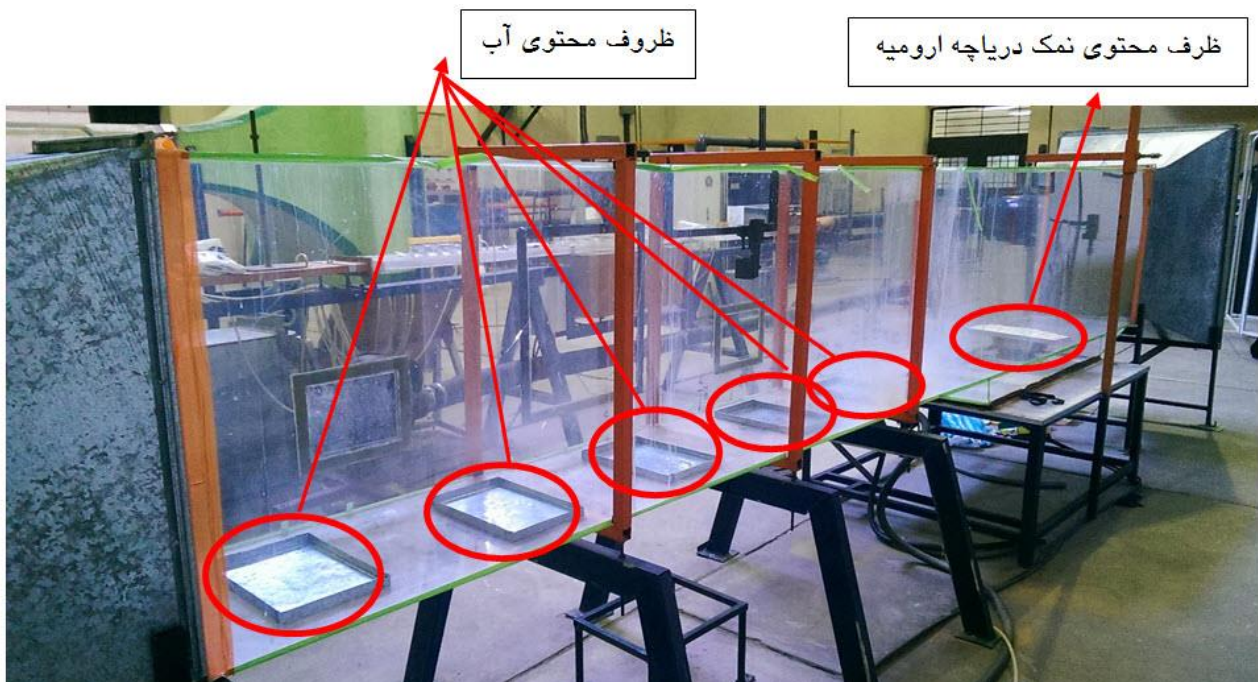
فرسایش نمک در آزمایشگاه با استفاده از تونل باد، جهت ارزیابی ترسیب ذرات نمک در فواصل، سرعت‌های باد و زمان‌های مختلف می‌باشد.

ثانیه و حداقل سرعت موثر در تغییرات  $EC$  (با توجه به نتایج آزمایش) ۷ متر بر ثانیه انتخاب شد. مراحل انجام آزمایش به این ترتیب بود که برای یک سرعت معین، مقدار  $EC$  آب درون ظروف در فواصل و زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شدند. به این صورت که در ابتدای تونل باد ظرفی از پودر نمک (تهیه شده از کف دریاچه ارومیه) حدود ۱/۵ کیلوگرم قرار داده شد. سپس ظرف‌های حاوی آب (حدود ۳۰۰ سی سی) به تعداد ۵ عدد و به فواصل ۵۰ سانتی‌متر مطابق شکل ۱ در تونل باد قرار گرفتند. مقدار  $EC$  آب ظروف مذکور پس از وزش باد با سرعت معین و مدت زمان معلوم اندازه‌گیری شد. در هر آزمایش تعداد ۲۵ داده برداشت گردید. به عنوان مثال، برای سرعت باد ۹ متر بر ثانیه، اندازه‌گیری شوری در پنج زمان مختلف (۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ دقیقه پس از شروع) انجام گرفت. در هر آزمایش به تعداد سینی‌های محتوی آب مقدار  $EC$  اندازه‌گیری می‌شد. به این ترتیب که در انتهای هر آزمایش، آب داخل سینی‌ها به ظروف استوانه‌ای مدرج انتقال و پس از به هم زدن آب مقدار  $EC$  اندازه‌گیری و ثبت می‌گردید. لازم به ذکر است که تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده در این آزمایش با توجه به شرایط آزمایشگاهی ۱۰۰ عدد بود.

شدند و معادله‌ای بین متغیرها بدست آمد. سپس دو روش فوق با هم مقایسه و روشی که دارای دقت بیشتری بود، معرفی گردید.

### تونل باد

تونل باد، ابزاری آزمایشگاهی است که در تحقیقات مربوط به حرکت گازها (در این مطالعه هوا) و تاثیر عبور آن از روی ذرات جامد، به منظور ارزیابی فرسایش خاک یا نمک و اثر ترسیب آن‌ها روی مواد مختلف استفاده می‌شود. در این مطالعه، برای ایجاد جریان هوا از روی ذرات نمک از یک فن نسبتاً قوی که دارای پره‌هایی صاف برای عبور جریان هوا بود استفاده شد. در این تحقیق، برای تعیین پروفیل ترسیب نمک از تونل باد موجود در دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز و برای اندازه‌گیری شوری آب داخل ظروف از  $EC$  متر استفاده شد. تونل باد مورد استفاده، دارای چهار متر طول و ۵۰ سانتی‌متر عرض و حداکثر سرعت وزش باد در تونل ۱۰ متر بر ثانیه بود. آزمایشات با چهار سرعت متفاوت ۷ تا ۱۰ متر بر ثانیه (با گام‌های ۱ متر بر ثانیه) انجام گردید. این چهار سرعت، با توجه به امکانات تونل باد موجود که حداکثر مقدار سرعت در آن ۱۰ متر بر



شکل ۱- محفظه تونل باد و موقعیت قرارگیری ظروف حاوی نمک و آب.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\hat{x}_i - \bar{\hat{x}})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}})^2} \quad [4]$$

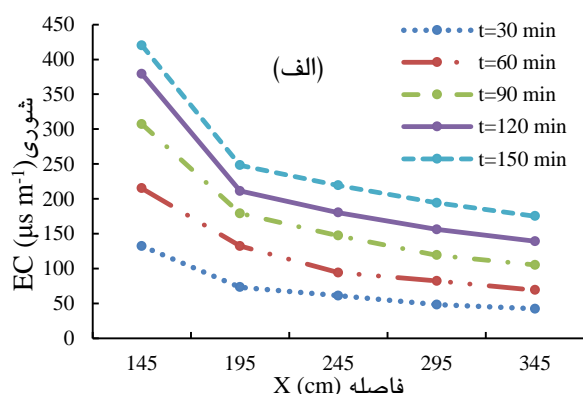
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad [5]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad [6]$$

در روابط فوق،  $x_i$  مقادیر مشاهداتی،  $\hat{x}_i$  مقادیر تخمین زده شده،  $\bar{x}$  میانگین مقادیر مشاهداتی و  $\bar{\hat{x}}$  میانگین مقادیر تخمینی مربوط به مقدار شوری، و  $n$  تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

نمودارهای حاصل از آزمایش در چهار سرعت باد ۷، ۸، ۹ و ۱۰ متر بر ثانیه در زمان‌ها و فواصل مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. در جدول ۱ مقادیر ضریب همبستگی به ازای معادلات ۱ تا ۳ در چهار سرعت وزش باد مختلف آورده شده است.



بعد از اتمام آزمایش، با توجه به داده‌های ثبت شده، رابطه بین متغیر وابسته ( $EC$ ) و سایر متغیرهای مستقل تعیین شد. مدل‌های متعددی برای این کار امتحان شد. در مدل اول، ابتدا بازای  $t$  ثابت رابطه‌ای بین  $EC$  و  $x$  از نوع نمایی بصورت رابطه ۱ برازش داده شد. رابطه ۱ با استفاده از نرم‌افزار *Curve Expert Professional* با نام نمایی اصلاح شده بدست آمد.

$$EC = ae^{\frac{b}{x}} \quad [1]$$

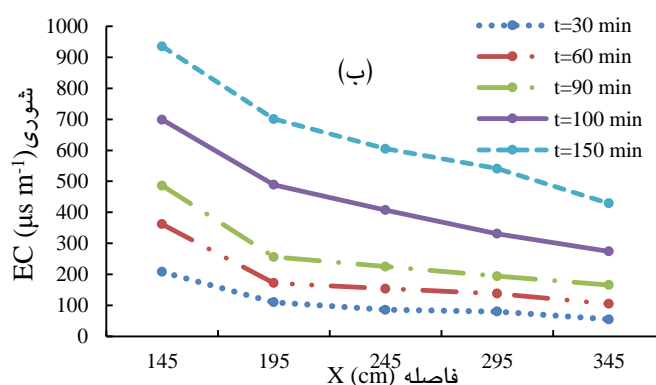
سپس بین پارامترهای معادله ۱ یعنی  $a$  و  $b$  و متغیر زمان ( $t$ ) روابطی برازش داده شدند که در آن رابطه بین  $a$  و  $t$  نمائی (معادله ۵) و رابطه بین  $b$  و  $t$  خطی (رابطه ۶) بدست آمد.

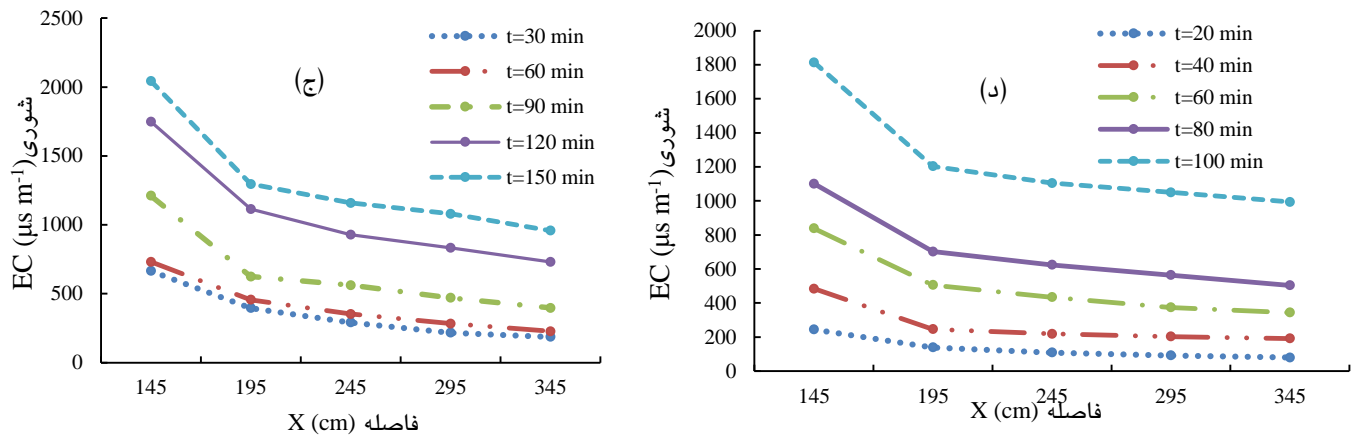
$$a = ce^{d.t} \quad [2]$$

$$b = f + g.t \quad [3]$$

### معیارهای ارزیابی

برای مقایسه‌ی دقت پیش‌بینی‌ها، از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، متوسط قدرمطلق خطاها ( $MAE$ ) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) به شرح زیر استفاده شد (راولز و همکاران ۱۹۹۱):





شکل ۳- نمودار زمان، شوری و فاصله به ترتیب در سرعت‌های باد (الف) ۰.۷، (ب) ۰.۸، (ج) ۰.۹ و (د) ۱.۰ متر بر ثانیه.

جدول ۱- ضرایب همبستگی به دست آمده از معادلات ۱ تا ۳.

سرعت (m s <sup>-1</sup> )	۷	۸	۹	۱۰
معادله ۱	۰/۶۴	۰/۵	۰/۵۸	۰/۳۹
معادله ۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
معادله ۳	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۹

$$d = \frac{a_2 + b_2.V}{1 + c_2.V + d_2.V^2} \quad [9]$$

$$f = \frac{1}{a_3 + b_3.V + c_3.V^2} \quad [10]$$

$$g = \frac{a_4.V}{b_4 + V} \quad [11]$$

در معادله‌های فوق،  $V$  سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است و مقادیر تخمینی پارامترها در جدول ۲ آمده است. با تخمین پارامترهای معادلات ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ و با جایگزینی مقادیر آنها در معادله ۷،  $EC$  از روی مدل برازش داده شده به دست آمد. نمودار پراکنندگی مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از مدل، برای  $EC$  در شکل ۴ نشان داده شده است.

با جاگذاری روابط ۲ و ۳ در ۱، رابطه زیر بین فاصله از مبدا، شوری و زمان بسط داده شد:

$$EC = ce^{d.t} e^{\frac{(f+g.t)}{x}} \quad [7]$$

در رابطه فوق،  $t$  زمان از آغاز آزمایش برحسب دقیقه،  $x$  فاصله ظرف آب از منبع نمکی بر حسب سانتی‌متر،  $EC$  شوری برحسب میکروزیمنس بر متر و  $c$ ،  $d$  و  $f$  و  $g$  پارامترهای رابطه ۷ هستند که به ترتیب، از معادله‌های زیر بدست آمدند. برای دخالت دادن سرعت باد در رابطه فوق، بین پارامترهای معادله ۷ و سرعت باد روابطی به شرح معادلات ۸ تا ۱۱ برازش داده شد:

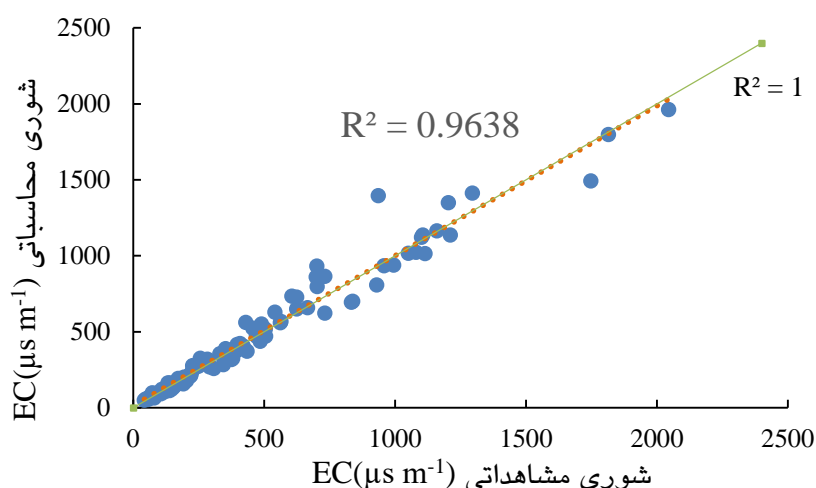
$$c = \frac{a_1 + b_1.V}{1 + c_1.V + d_1.V^2} \quad [8]$$

جدول ۲- مقادیر تخمین زده شده برای پارامترهای معادلات ۸ تا ۱۱.

پارامتر	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$d_1$	$a_2$	$b_2$
مقدار	۳۰/۳۵۵۳	-۳/۵۴۳۸	-۰/۰۰۷۴۵	-۰/۰۱۱۹۴	۰/۰۰۳۹۷۳	-۰/۰۰۰۴۷۵

(ادامه جدول ۲).

پارامتر	$c_2$	$d_2$	$a_3$	$b_3$	$c_3$	$a_4$	$b_4$
مقدار	-۰/۲۱۰۹	۰/۰۱۰۸۷	۰/۰۱۳۸	-۰/۰۰۲۵۶	۰/۰۰۰۱۵	۰/۵۵۲۷۴	-۱۳/۵۳۳

شکل ۴- نمودار پراکندگی نقاط محاسباتی و مشاهداتی  $EC$  با استفاده از معادله ۷.

در رابطه فوق،  $EC$  مقدار شوری (میکروزیمنس بر متر)،  $V$  سرعت باد (متر بر ثانیه)،  $x$  فاصله از مبدا (سانتی‌متر)،  $t$  زمان (دقیقه) و  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  پارامترهای معادله هستند. مقادیر تخمینی برای پارامترها در جدول ۳ آمده است. نمودار پراکندگی مقادیر به‌دست آمده و محاسبه شده  $EC$  در شکل ۵ قابل مشاهده است. در جدول ۴، معیارهای ارزیابی به‌دست آمده بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی بین دو روش نشان داده شده است.

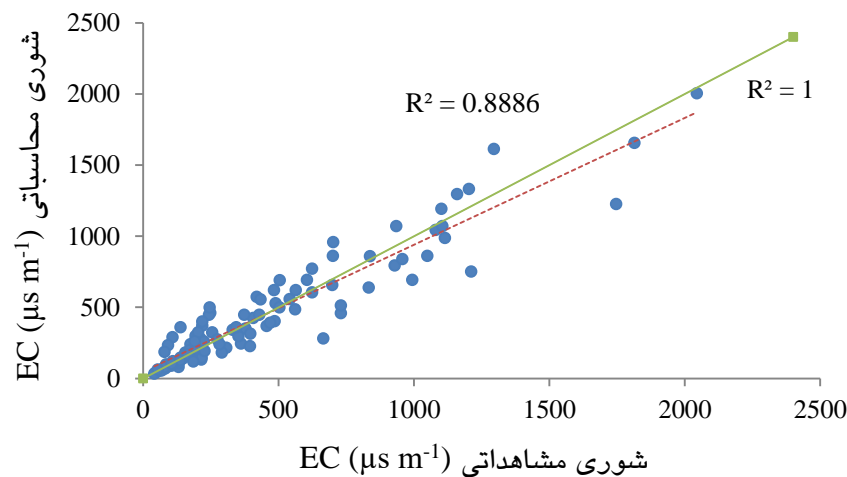
همانطور که در بخش مواد و روش‌ها به آن اشاره شد علاوه بر روش فوق، از نرم افزار *Datafit* برای بسط معادله رگرسیونی استفاده شد. در این روش، برخلاف روش قبل کل متغیرها بصورت یکجا (نه به‌صورت دو به دو) وارد نرم افزار شده و معادله ۱۲ با توجه به سه متغیر مستقل (سرعت باد، فاصله و زمان) و یک متغیر وابسته (شوری) به‌شرح زیر استخراج شد:

$$EC = \exp(a.V + b.x + c.t + d) \quad [12]$$

جدول ۳- مقادیر تخمین زده شده برای پارامترهای معادله ۱۲.

پارامتر	$a$	$b$	$c$	$d$
مقدار	۰/۶۲۶۹۹	-۰/۰۰۴۳۶	۰/۰۱۶۳۸	۰/۱۳۵۶۸





شکل ۵- نمودار پراکندگی نقاط محاسباتی و مشاهداتی  $EC$  با استفاده از معادله ۱۲.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی بدست آمده برای معادلات ۷ و ۱۲.

معیارهای ارزیابی	$R^2$	$RMSE (\mu s m^{-1})$	$MAE (\mu s m^{-1})$
رابطه ۷	۰/۹۶	۷۹/۱۲	۴۶/۱۵
رابطه ۱۲	۰/۸۹	۱۳۷/۰۵	۹۴/۶

گرد و غبار و محاسبه فرسایش با استفاده از اطلاعات جوی و سطحی و نقشه‌های  $GIS$  ارائه دادند. هی و همکاران (۲۰۱۳) فرآیند فرسایش بادی را با توجه به سرعت باد و رطوبت خاک مورد مطالعه قرار دادند که با افزایش رطوبت خاک فرآیند فرسایش کاهش می‌یافت.

#### نتیجه‌گیری کلی

رابطه ارائه شده، در زمینه فرسایش و ترسیب نمک، کمک می‌کند تا تأثیر سرعت باد در حمل نمک و رسوب آن در فواصل مختلف از منبع نمکی ارزیابی شود. در طول انجام آزمایش تونل باد، در سرعت‌های زیاد باد، مقدار نمک حمل شده نیز به تبع آن زیاد شده و در فواصل نزدیک به منبع نمک، ترسیب آن نیز نسبت به فواصل دورتر بیشتر بوده است. با انجام این آزمایش، مدل زمانی- مکانی انتشار نمک در سرعت‌های مختلف استخراج شد که نتایج رضایت‌بخشی حاصل گردید.

در مطالعه فعلی، منبع نمکی به‌عنوان منبع اصلی شوری، مقدار  $EC$  در ظروف محتوی آب (با اندازه‌های یکسان) اندازه‌گیری شد. پیشنهاد می‌شود در مطالعه

با توجه به معیارهای ارزیابی برای دو مدل رگرسیونی ارائه شده در این تحقیق، مدل ارائه شده در معادله ۷ با توجه به دقت بیشتر و خطای کمتر نتایج رضایت بخشی را ارائه داد که فیزیک مسئله را نیز بهتر از رابطه ۱۲ توصیف می‌کند، به این صورت که در رابطه ۷، با افزایش سرعت باد و در نظر گرفتن فواصل دورتر در یک زمان ثابت مقدار نمک ترسیب شده (شوری) کاهش می‌یابد و این مسئله در طبیعت نیز اتفاق می‌افتد. این نکته را نیز باید در نظر داشت که با توجه به شرایط آزمایشگاهی موجود نتایج به‌دست آمده برای حالت پتانسیل جوابگو خواهد بود و انتظار نمی‌رود که در تمام فصول سال و برای فواصل خیلی دور بتوان از معادله ارائه شده نتایج مطلوبی را حاصل کرد.

در تحقیق‌های دیگری که در رابطه با فرسایش بادی صورت گرفته است، از جمله آن‌ها می‌توان به هاگن (۲۰۰۴) اشاره کرد، ایشان مدلی برای تعیین فرسایش بادی ارائه کرد که تنها برای خاکدانه‌های کوچکتر قابل استفاده بود و مقدار ضریب تعیین بدست آمده برابر با ۰/۷۱ بود. لو و شائو (۲۰۰۱) مدلی جهت تشخیص منبع

مشابه به جای منبع نمکی از ظروف محتوی ترکیب خاک و نمک استفاده شود.

#### منابع مورد استفاده

- Alizadeh H, 1990. Soil erosion and conservation. Astaneh Quds Razavi Press. 285p (In Persian).
- Anonymous, 2015. Report of Urmia Lake restoration program, Urmia Lake - Drought and possible threats. <http://ulrp.sharif.ir/page>.
- Bryan RB, 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma* 2: 5-26.
- Chepil WS and Milne RA, 1941. Wind erosion in relation to roughness of the surface. *Soil Science* 52: 417-433.
- Draxler RR, Gillette DA and Kirkpatrick J S, 2001. Estimating PM10 concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait, and Saudi Arabia. *Atmospheric Environment* 35: 4315-4330.
- Ekhtesasi MR, 1999. Preparation of a sensitivity map for erosion of the Yazd plain lands with the help of wind erosion meter. M.Sc. Thesis. Faculty of Natural Resources, University of Tehran (In Persian).
- Hagen LJ, 1991. A wind erosion prediction system to meet user needs. *J. Soil Water Conservation*. 4(2): 105-111.
- Hagen LJ, 2004. Evaluation of the wind erosion prediction system (WEPS) erosion sub model on cropland fields. *Environmental Modeling & Software* 19: 171-176.
- He J, Cai Q and Cao W, 2013. Wind tunnel study of multiple factors affecting wind erosion from cropland in Agro-pastoral area of Inner Mongolia. China. *Journal of Mountain Science* 10: 68-74.
- Hosseini M and Solatifar S, 2010. Compilation of technical knowledge on the extraction of sodium sulfur from Lake Urmia by non-evaporative method. *Journal of Applied Chemistry Sciences* 12(4):31-23 (In Persian).
- Lian-You L, Shang-Yu G, Pei-Jun S, Xiao-Yan L, and Zhi-Bao D, 2003. Wind tunnel measurements of adobe abrasion by blown sand: profile characteristics in relation to wind velocity and sand flux. *Journal of Arid Environment* 53(3): 351-363.
- Lu H and Shao Y, 2001. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications. *Environmental Modeling & Software* 16: 233-249.
- Rasoulzadeh S and Bozorg-Hadad A, 2009. Comparison of artificial neural network and multivariate linear regression in prediction of reservoir discharge rate in Karaj dam. 3rd Iranian Water Resources Management Conference, 14-16 October, Faculty of civil engineering, University of Tabriz, Iran (In Persian)
- Rawls WJ, Gish TJ and Brakensiek DL, 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Advances in Soil Science* 9: 213-234.
- Refahi H, 2000. Wind erosion and control of it. Tehran University Press, 320p (In Persian).
- Shao Y, 2000. *Physics and Modeling of Wind Erosion*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht.
- Wagner LE and Hagen LJ, 2001. Application of WEPS generated soil loss components to assess off-site impacts. In: Stott DE, Mohtar RH and Steinhardt GC, *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Meeting held May 24- 29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*.
- Werner M, Tegen I and Harison SP, 2002. Seasonal and interannual variability of the mineral dust cycle under present and glacial climate conditions. *Journal of Geophysics* 107 (24): 4744-4763.
- Zhang J, Shao Y and Hung N, 2014. Measurements of dust deposition velocity in a wind- tunnel experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14: 8869- 8882.
- Zhou CH, Gong SL and Zhang XY, 2008. Development and evaluation of an operation SDS forecasting system for East Asia: CAUACE/DUST. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8: 787-798.