

بررسی سناریوهای مختلف وضوح طیفی در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

ابراهیم باباییان^۱، مهدی همایی^{۲*}، علی‌اکبر نوروزی^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲. استاد گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران

۳. استادیار سنجش از دور پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۶)

چکیده

توابع انتقالی خاک (PTFs) روشی غیر مستقیم برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کمک اطلاعات زود یافت خاک است که غالباً شامل بافت، ماده آلی، و جرم ویژه ظاهری خاک هستند. در چند دهه گذشته، مطالعاتی در زمینه برآورد مشخصه‌های مبنایی از روی اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی و مادون قرمز نزدیک (۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر) انجام شده است. برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کمک رفتارسنجی طیفی خاک رویکرد نوینی است که چندان مد نظر قرار نگرفته است. در این پژوهش، قابلیت استفاده از توابع انتقالی طیفی (STFs) در قالب چهار سناریو شامل داده‌های طیفی در مقیاس آزمایشگاهی (سناریوی ۱)، داده‌های طیفی در مقیاس سنجنده Sentinel-2 (سناریوی ۲)، داده‌های طیفی در مقیاس سنجنده ابرطیفی EnMap (سناریوی ۳)، و مقایسه آن‌ها با نتایج کاربرد توابع Rosetta و HYPRES (سناریوی ۴) در مقیاس‌های نقطه‌ای و واحد نقشه خاک به منظور برآورد پارامترهای مدل معلم-ون گنوختن بررسی شد. به منظور اشتقاق STFها، روش رگرسیون مرحله‌ای چندگانه و روش بوت‌استرپ به کار رفت. بهترین نتایج برای برآورد پارامترهای مدل معلم-ون گنوختن به‌ازای سناریوی ۱ و ۲ (متوسط $RMSR_{val}$ برابر ۰٫۳۸۲، ۰٫۲۹، ۰٫۰۶۱، ۰٫۶۳۴ برای K_s^\dagger ، θ_s ، n ، α^\dagger) به دست آمد. همچنین، استفاده از سه سناریوی طیفی به بالاترین دقت در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی (متوسط $RMSR$ برابر ۰٫۳۳۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) و هدایت هیدرولیکی خاک (متوسط $RMSR$ برابر ۱٫۰۱۵ سانتی‌متر بر روز) در مقایسه با سناریوی چهارم انجامید. این نتایج نشان می‌دهد استفاده از اطلاعات با وضوح طیفی مختلف می‌تواند روشی غیر مستقیم و سریع و کم‌هزینه در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، به‌ویژه در مقیاس بزرگ، باشد.

کلیدواژگان: بازتاب طیفی، توابع انتقالی خاک، توابع انتقالی طیفی، منحنی مشخصه رطوبتی، معلم-ون گنوختن.

مقدمه

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، شامل منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی (غیر) اشباع خاک، از پارامترهای ورودی مهم در بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیک، به منظور مطالعه حرکت آب در خاک، انتقال املاح و آلاینده‌ها، انتقال گرما، و جابه‌جایی گازها در خاک‌اند. توابع انتقالی خاک (PTFs)^۱ یکی از روش‌های مهم و غیر مستقیم در اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است که در آن‌ها از مشخصه‌های زود یافت خاک، همچون توزیع اندازه ذرات و مقدار کربن آلی و جرم ویژه ظاهری خاک، استفاده می‌شود (Vereecken *et al.*, 1989; Vereecken *et al.*, 1990; Vereecken *et al.*, 1992; Schaap *et al.*, 1998; Jarvis *et al.*, 2002; Rawls and Pachepsky, 2002; Pachepsky *et*

al., 2004; Pachepsky *et al.*, 2006; Jana *et al.*, 2007; Weynants *et al.* 2009; Khodaverdiloo and Homaei, 2002; Ghorbani Dashtaki and Homaei, 2002; Ghorbani Dashtaki and Homaei, 2004; Ghorbani Dashtaki and Homaei, 2007; Farokhian Firouzi and Homaei, 2003; Farokhian Firouzi and Homaei, 2005; Motalebi *et al.*, 2007; Motalebi *et al.*, 2010; Navabeian *et al.*, 2004

Khodaverdiloo و همکاران (2011) توابعی را به منظور برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های آهکی و غیر آهکی ارائه کردند. آن‌ها همچنین عملکرد توابع انتقالی Rosetta (Schaap *et al.*, 2001) را در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی این خاک‌ها ارزیابی کردند. بر پایه نتایج آن‌ها، توابع انتقالی اشتقاق یافته در برخی مناطق ایران در مقایسه با توابع Rosetta در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دقت بیشتری دارند. از دلایل مهمی که آن‌ها در توجیه عملکرد پایین توابع Rosetta اعلام کردند عدم در نظر گرفتن کربنات کلسیم به مثابه متغیر ورودی

* نویسنده مسئول: mhomaee@modares.ac.ir

(SWIR)^۱ از عوارض سطح زمین تصویربرداری می‌کنند، گستره مادون قرمز دور نمی‌تواند در تخمین‌های بزرگ‌مقیاس از طریق تصاویر ماهواره‌ای استفاده شود. از طرفی، در این پژوهش‌ها طول موج‌ها یا باندهای مهم، که در حقیقت متغیرهای مؤثر طی فرایند تخمین‌اند، به طور دقیق شناسایی نشده‌اند. اخیراً، Babaeian و همکاران (2012, 2014a, 2014b) نشان داده‌اند با استفاده از اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی می‌توان توابعی تحت عنوان توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای و پارامتریک ارائه کرد که به کمک آن‌ها می‌توان ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را برآورد کرد.

به نظر می‌رسد استفاده از اطلاعات طیفی خاک می‌تواند تا حد زیادی محدودیت‌های توابع انتقالی خاک را برطرف کند. زیرا در رویکرد طیفی داده‌های ورودی توابع منحصر به متغیرهای طیفی خاک‌اند که برخلاف داده‌های زودپافت خاک منحصرأ با یک روش استاندارد طی یک مرحله و با سرعت بیشتری اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین، خطای ناشی از تنوع روش‌های اندازه‌گیری و همچنین خطای کاربر به مقدار زیادی کاهش خواهد یافت (Stenberg *et al.*, 2010). همچنین، روش طیفی روشی غیر تهاجمی است که در صورت به‌کارگیری آن از طریق دورکاوی ماهواره‌ای قابلیت کاربرد در مقیاس‌های بزرگ را دارد و می‌تواند پویایی زمانی و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را نیز مد نظر قرار دهد. علاوه بر این، به‌رغم آنکه مطالعاتی اندکی در زمینه برآورد برخی ویژگی‌های مبنایی خاک به کمک تصاویر ابرطیفی ماهواره‌ای صورت گرفته است (Gomez *et al.*, 2008b; Lagacherie *et al.*, 2008; Gomez *et al.*, 2012)، در زمینه برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کمک اطلاعات ابرطیفی ماهواره‌ای تا کنون هیچ مطالعه‌ای انجام نشده است. بنابراین، بررسی پتانسیل استفاده از تصاویر چندطیفی و ابرطیفی ماهواره‌ای در برآورد چنین ویژگی‌هایی می‌تواند اهمیت استفاده از اطلاعات طیفی خاک را دوچندان کند.

بر این اساس، هدف این پژوهش برآورد پارامترهای مدل معلم-ون‌گنوختن با استفاده از داده‌های ابرطیفی خاک در مقیاس آزمایشگاهی (سناریوی ۱) و تعمیم آن به تصاویر چندطیفی (سناریوی ۲) و ابرطیفی ماهواره‌ای (سناریوی ۳) در گستره Vis-NIR-SWIR به منظور بررسی قابلیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بود. به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد اطلاعات ماهواره‌ای در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نسبت به توابع انتقالی خاک

توابع، اثر موقعیت جغرافیایی بر تغییرپذیری ویژگی‌های خاک، و تفاوت روش‌های اندازه‌گیری این ویژگی‌ها بود. علاوه بر این، Homaei and Farrokhan Firouzi (2008) نیز نتایج مشابهی مبنی بر عملکرد پایین توابع انتقالی Rosetta در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های گچی ایران گزارش کردند. از طرفی، تا کنون دستورالعمل جامع و مشخصی ارائه نشده است که نشان دهد توابع انتقالی خاک‌های مختلف در چه مناطقی و در چه شرایطی قابلیت کاربرد دارند (Pachepsky and Rawls, 2004). مروری بر منابع (Vereecken *et al.*, 2010) نشان می‌دهد هنوز توابع انتقالی خاک با محدودیت‌هایی همچون وابستگی به نوع و میزان دقت روش‌های اندازه‌گیری، عدم در نظر گرفتن ویژگی‌های ساختمانی و کانی‌شناسی خاک، اثر عواملی همچون فرسایش و شخم بر پویایی زمانی توابع، وابستگی مکانی و کارایی نه چندان بالا در دیگر مناطق، نبود اطلاعات جانبی و تکمیلی درباره شرایطی که در آن نمونه‌برداری خاک انجام شده و نیز وضعیت پوشش گیاهی و سطح زمین روبه‌رو است.

طی سال‌های اخیر، استفاده از اطلاعات طیفی خاک در گستره‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی (۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر) به مثابه روشی غیر مستقیم، سریع، و کم‌هزینه برای برآورد برخی ویژگی‌های مبنایی خاک، همچون توزیع اندازه ذرات خاک (Gomez *et al.*, 2008; Lagacherie *et al.*, 2008; Janik *et al.*, 2009; Lopez *et al.*, 2013)، مقدار آهک (Lagacherie *et al.*, 2008; Gomez *et al.*, 2008)، کربن آلی (Nocita *et al.*, 2013; Lopez *et al.*, 2013) pH (Viscarra (Rosset and Behrens, 2010)، و ظرفیت تبادل کاتیونی (Janik *et al.*, 2009; Savvides *et al.*, 2010) مورد توجه قرار گرفته است. به‌رغم پژوهش‌های زیاد در زمینه برآورد این ویژگی‌های خاک، تا کنون مطالعات ناچیزی در زمینه برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، با استفاده از اطلاعات طیفی خاک، به عمل آمده است. Janik و همکاران (2007) و Minasny و همکاران (2008) از اطلاعات طیفی خاک در گستره مادون قرمز دور (۲۵۰۰-۲۵۰۰۰ نانومتر) برای برآورد مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ۱، ۱۰، ۳۰، و ۱۵۰ کیلوپاسکال استفاده کردند. بر اساس نتایج، تخمین‌ها در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال ($RMSE=0.05$) سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، ($R^2=0.51$) در مقایسه با مکش ۱۰ کیلوپاسکال ($RMSE=0.07$) سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب ($R^2=0.08$) دقت بالاتری نشان دادند. نکته شایان توجه آن است که به دلیل آنکه سنجنده‌های ماهواره‌ای غالباً در گستره ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر (Vis-NIR-)

1. Visible, Near-infrared, Shortwave-infrared

در شکل ۱ شمایی از منطقه مطالعاتی همراه موقعیت نقاط نمونه برداری خاک در مقیاس نقطه‌ای و واحد نقشه خاک می‌آید. نمونه‌های خاک هواخشک و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. ویژگی‌های زود یافت خاک شامل توزیع اندازه ذرات (PSD)، جرم ویژه ظاهری (ρ_b)، و مقدار کربن آلی خاک (OC) با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (Gee and Bauder, 1934; Walkley and Black, 1986). مقدار رطوبت وزنی خاک‌ها به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک ۰، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با استفاده از روش جعبه شنی و دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شدند (Vereecken et al., 2010). جرم ویژه ظاهری نمونه‌های خاک موجود در دستگاه صفحات فشاری نیز به روش پارافین (کلوخه) اندازه‌گیری شد و برای تبدیل مقادیر وزنی رطوبت به مقادیر حجمی به کار رفت. ضریب آب‌گذری اشباع خاک نیز بر اساس نوع بافت خاک به دو روش بار ثابت و افتان بر نمونه‌های دست‌نخورده خاک (رینگ‌هایی به ابعاد ۶۸ میلی‌متر قطر در ۵۰ میلی‌متر ارتفاع) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای هر نمونه خاک و به‌ازای هر روش سه تکرار انجام شد و میانگین تکرارها مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر پارامتر در نظر گرفته شد. به منظور فراهم کردن امکان ارزیابی صحیح دقت توابع، داده‌های مبنایی خاک و داده‌های هیدرولیکی و داده‌های طیفی به دو گروه داده‌های واسنجی ($n=130$) و اعتبارسنجی ($n=44$) تقسیم شدند.

اندازه‌گیری رفتار طیفی خاک

به منظور اندازه‌گیری بازتاب طیفی نمونه‌های خاک از دستگاه اسپکترورادایومتر زمینی (FieldSpec®3, ASD, FR, USA) استفاده شد. صد و هفتاد و چهار نمونه خاک هواخشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و منحنی‌های طیفی آن‌ها در دامنه مرئی و مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی (۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر) با روش‌های استاندارد طیف‌سنجی در تاریخ‌خانه اندازه‌گیری شد (Viscarra Rossel, 2008). از هر نمونه خاک بیست اسکن تهیه (ده اسکن در ابتدا و ده اسکن پس از دوران ساعت‌گرد ۹۰ درجه نمونه خاک) و در مجموع ۳۵۰۰ منحنی طیفی ثبت شد. سپس، به ایجاد کتابخانه‌ای طیفی از خاک‌های منطقه اقدام شد (Viscarra Rossel, 2008). میانگین و انحراف معیار منحنی‌های طیفی تکرارهای هر یک از نمونه‌های خاک (میانگین بیست اسکن) با نرم‌افزار ViewSpec محاسبه شد و به‌ازای هر نمونه خاک یک منحنی طیفی در تجزیه و تحلیل‌ها به

و نیز با توجه به ویژگی‌های مبنایی خاک در مقیاس‌های مختلف مکانی، یک سناریوی چهارم نیز به منزله مبنای ارزیابی در نظر گرفته شد. در این سناریو ویژگی‌های مبنایی خاک در دو مقیاس آزمایشگاهی (نقطه‌ای) و واحد نقشه خاک به مثابه ورودی دو تابع انتقالی مهم خاک‌های دنیا، شامل توابع انتقالی Rosetta (Schaap et al., 2001) و HYPRES، به منظور محاسبه پارامترهای مدل معلوم-ون‌گنوختن در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

به منظور توصیف منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک از مدل‌های رطوبتی ون‌گنوختن (رابطه ۱) و معلوم-ون‌گنوختن (رابطه ۲) استفاده شد (van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_s & h \geq 0 \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^m & h < 0 \end{cases} \quad (1)$$

h مکش ماتریک، α و n و $m = 1 - 1/n$ ($n > 1$) پارامترهای شکل منحنی رطوبتی (α بر حسب cm^{-1} و n و m بدون بعد)، مقدار رطوبت ($\theta(h)$ مقدار رطوبت ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) به‌ازای پتانسیل‌های ماتریک (h) معین (cm)، θ_s و θ_r ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) به ترتیب مقدار رطوبت باقی‌مانده و اشباع خاک است.

$$K(h) = \frac{K_s \left\{ 1 - (\alpha h)^{m \cdot n} \cdot \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha h)^n \right]^{m \cdot l}} \quad (2)$$

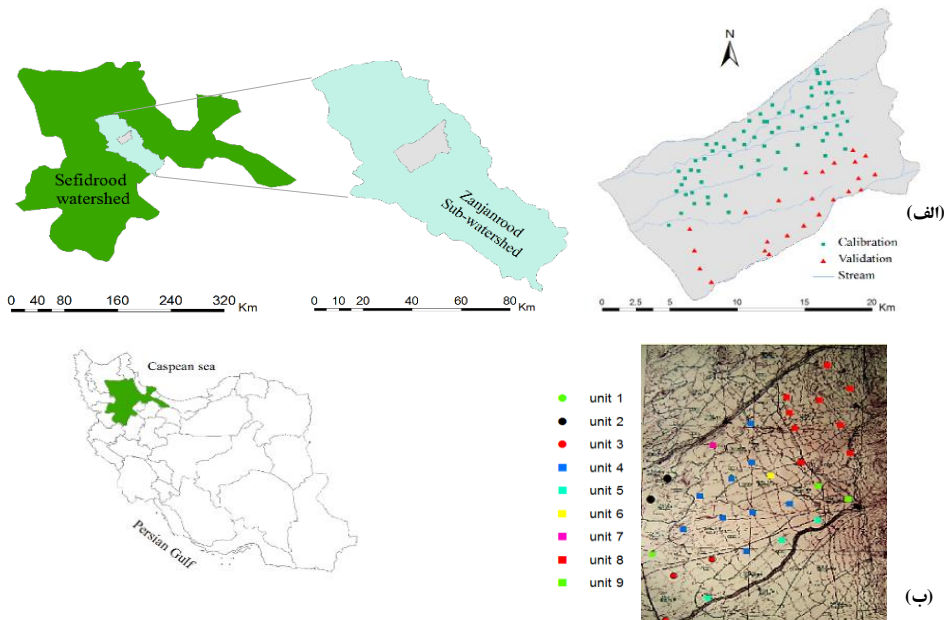
K_s و $K(h)$ به ترتیب ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) و l پارامتر اتصال (پیچ‌پیچی) منافذ خاک است؛ که بدون بعد و معمولاً برابر ۰٫۵ فرض می‌شود. بقیه پارامترها نیز مفاهیم قبل را دارند. با استفاده از کمینه‌سازی به روش حداقل مربعات خطا به کمک برنامه Solver اکسل، مدل رطوبتی ون‌گنوختن به نقاط رطوبتی اندازه‌گیری شده برازش و پارامترهای هیدرولیکی شامل α و n محاسبه شد. مقدار رطوبت باقی‌مانده (θ_r) خاک نیز تقریباً برابر ۰ در نظر گرفته شد.

نمونه برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

صد و هفتاد و چهار نمونه خاک از لایه سطحی (اعماق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر) به صورت سری‌های دست‌خورده و دست‌نخورده از بخشی از حوزه آبخیز سفیدرود جمع‌آوری شد.

شامل ۲۱۵۰ بازتاب طیفی (۲۱۵۰ طول موج) بود (Babaeian et al., 2014a and 2014b).

کار رفت. هر منحنی طیفی تفکیک طیفی برابر ۱ نانومتر داشت؛ طوری که در گستره ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر هر منحنی طیفی



شکل ۱. منطقه مطالعه شده همراه موقعیت نقاط نمونه برداری خاک در مقیاس نقطه‌ای (الف) و واحد نقشه خاک (ب)

از طول موج‌ها هستند. بسیاری از این طول موج‌ها، که در مجاور یکدیگر قرار دارند، دارای همبستگی بسیار بالا و بازتاب طیفی بسیار نزدیک به یکدیگرند. اثر این هم‌پوشانی طیفی را می‌توان از طریق تلفیق باندهای مجاور یکدیگر تا حد بسیار زیادی کاهش داد. در این سناریو میانگین هر پنج طول موج مجاور یکدیگر محاسبه و در نهایت چهارصد و ده باند در گستره ۴۰۰ تا ۲۴۵۰ نانومتر به دست آمد (Lopez et al., 2013).

سناریوی ۲. داده‌های ابرطیفی با قدرت تفکیک طیفی منطبق با

باندهای سنجنده EnMAP

در این سناریو داده‌های ابرطیفی حاصل از اندازه‌گیری توسط اسپکترورادئومتر به مقیاس طیفی سنجنده ابرطیفی EnMAP فرامقیاس شدند. سنجنده EnMAP یک تصویربردار ابرطیفی است که در کشور آلمان طراحی شده و قرار است در سال ۲۰۱۵ از عوارض زمین تصویربرداری کند. این سنجنده در گستره ۴۲۰ تا ۲۴۵۰ نانومتر با عرض باندی ۶٫۵ (در گستره ۲۴۲۰-۹۰۰ نانومتر) و ده نانومتر (در گستره ۹۰۰-۲۴۵۰ نانومتر) تصویربرداری را انجام خواهد داد. نسبت سیگنال به نویز این سنجنده در گستره مرئی برابر ۱:۵۰۰ و در گستره مادون قرمز برابر ۱:۱۵۰ است (Guanter et al., 2009). مقیاس‌سازی طیفی داده‌ها به باندهای سنجنده EnMAP به کمک رابطه ۳ انجام شد:

پیش‌پردازش داده‌های طیفی

پیش‌پردازش داده‌های طیفی خاک (همچون رفتار غیر خطی باندها، نرمال‌سازی طیف‌ها، فیلتر، بارزسازی طیفی) و ارتقای کیفی داده‌ها، روش‌های مختلف پیش‌پردازش با استفاده از نرم‌افزار Unscambler 10.3 بر داده‌های طیفی انجام شد و بر اساس روش اعتبارسنجی متقابل و بررسی دقت نتایج منحنی‌های حذف پیوستار^۱ و فیلتر Savitzky-Golay به صورت تابع چندجمله‌ای درجه دوم با سه نقطه برای صاف کردن شکستگی‌ها به کار رفت. جزئیات نحوه پیش‌پردازش داده‌های طیفی را Babaeian و همکاران (2014a and 2014b) ارائه کردند.

سناریوهای طیفی و غیر طیفی

به منظور شناسایی قابلیت و کارایی داده‌های بازتاب طیفی با وضوح طیفی مختلف در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و نیز بررسی کارایی آن‌ها در مقایسه با توابع انتقالی خاک چهار سناریو مطالعه شد.

سناریوی ۱. داده‌های ابرطیفی در مقیاس آزمایشگاهی

داده‌های ابرطیفی حاصل از اندازه‌گیری توسط دستگاه اسپکترورادئومتر زمینی حاوی اطلاعات غنی در گستره وسیعی

تحقیقات خاک و آب استفاده شدند. در پایان به محاسبه و شبیه‌سازی منحنی‌های مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک اقدام شد.

همبستگی بین متغیرها، اشتقاق توابع انتقالی

پس از محاسبه وضعیت نرمال بودن متغیرهای هیدرولیکی و هر یک از سناریوهای طیفی، همبستگی این دو گروه از متغیرها از طریق ضریب همبستگی پیرسون (R) بررسی شد. آن دسته از متغیرهای طیفی که دارای همبستگی معنادار (سطح ۰.۱٪ و ۰.۵٪) با پارامترهای هیدرولیکی خاک بودند به مثابه ورودی مدل رگرسیون مرحله‌ای چندگانه انتخاب شدند و مدل‌های تخمینگر اشتقاق یافتند. هر تابع انتقالی از نظر وجود هم‌راستایی چندگانه^۲ و نیز همبستگی‌های درونی^۳ بین متغیرها به ترتیب به کمک شاخص‌های تورم واریانس (VIF)^۴ و دوربین-واتسون (DW)^۵ ارزیابی شدند (Ho, 2006). مقادیر مطلوب برای شاخص DW باید نزدیک به مقدار ۲ و برای شاخص VIF کمتر از ۱۰ باشد. در شکل ۲ مراحل مختلف استفاده از سناریوهای طیفی و غیر طیفی به منظور شبیه‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک می‌آید.

ارزیابی دقت توابع انتقالی

از آنجا که توابع انتقالی اشتقاقی مدل‌هایی تجربی‌اند، لازم است دقت و صحت آن‌ها در مقابل سایر ورودی‌ها که قبلاً در اشتقاق توابع استفاده نشده‌اند آزموده شود. ارزیابی دقت توابع انتقالی طیفی و توابع انتقالی خاک با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها (RMSR)، میانگین خطا (ME)، میانگین نسبی خطا (MRE)، ضریب تبیین (R²)، و کارایی مدل (EF) انجام شد. بیان ریاضی این آماره‌ها به صورت روابط ۴ تا ۹ است:

$$RMSR = \sqrt{\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$ME = \frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N (E_i - M_i) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$MRE = \frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - M_i}{M_i} \right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}} \right]^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

2. Multico-linearity
3. Autocorrelation
4. Variance Inflation Factor
5. Durbin Watson

$$R_i = \frac{\sum_{w_i} R(w)}{\sum_{w_i} n_i} \quad (\text{رابطه ۳})$$

R_i مقدار بازتاب در آمین باند سنجنده، R_w مقدار بازتاب طیفی در طول موج w از داده‌های اندازه‌گیری شده در تاریخ‌خانه، wu_i مرز بالایی باند i، wl_i مرز پایینی باند i و n_i تعداد باندهاست.

سناریوی ۳. داده‌های چندطیفی با قدرت تفکیک طیفی منطبق با باندهای سنجنده Sentinel-2

در این سناریو داده‌های ابرطیفی به مقیاس سنجنده چندطیفی Sentinel-2، که مشتمل بر سیزده باند است، فرامقیاس شدند. داده‌های این سنجنده در گستره ۴۱۴ تا ۲۳۱۱ نانومتر است و تصویربرداری آن را سازمان فضایی اروپا (ESA) در سال ۲۰۱۵ آغاز خواهد کرد. این سنجنده چهار باند در گستره مرئی، هفت باند در گستره مادون قرمز نزدیک، و سه باند در ناحیه مادون قرمز دور با پهنای باند ۱۵ تا ۱۸۰ نانومتر دارد. باندهای طیفی منطبق با باندهای سنجنده Sentinel-2، شامل باند ۱ (۴۱۴-۴۷۲ نانومتر)، باند ۲ (۴۲۵-۵۵۵ نانومتر)، باند ۳ (۵۱۰-۶۱۰ نانومتر)، باند ۴ (۶۱۸-۷۰۷ نانومتر)، باند ۵ (۶۷۵-۷۲۲ نانومتر)، باند ۶ (۷۲۰-۷۶۰ نانومتر)، باند ۷ (۷۴۱-۸۱۲ نانومتر)، باند ۸ (۷۵۲-۹۲۷ نانومتر)، باند ۹ (۸۲۳-۹۰۲ نانومتر)، باند ۱۰ (۹۰۳-۹۸۲ نانومتر)، باند ۱۱ (۱۳۳۸-۱۴۱۲ نانومتر)، باند ۱۲ (۱۵۳۲-۱۷۰۴ نانومتر)، و باند ۱۳ (۲۰۳۵-۲۳۱۱ نانومتر) است. مقیاس‌سازی طیفی داده‌های ابرطیفی به باندهای سنجنده Sentinel-2 به کمک رابطه ۳ انجام شد.

سناریوی ۴. توابع انتقالی Rosetta و HYPRES

در این سناریو ویژگی‌های مبنایی خاک در دو مقیاس آزمایشگاهی-نقطه‌ای و واحد نقشه خاک به منزله ورودی دو تابع انتقالی مهم خاک‌های دنیا، شامل توابع Rosetta (Schaap et al., 2001) (مربوط به خاک‌های آمریکا و اروپا) و HYPRES (Wosten et al., 1999) (مربوط به خاک‌های اروپا)، به منظور برآورد پارامترهای مدل معلم-ون‌گونختن و ایجاد مبنایی برای ارزیابی سناریوهای طیفی استفاده شدند. متغیرهای ورودی توابع Rosetta شامل مقادیر رس، شن، سیلت، و جرم ویژه ظاهری خاک و متغیرهای ورودی توابع HYPRES شامل رس، سیلت، شن، ماده آلی، و جرم ویژه ظاهری خاک بودند. این ویژگی‌های مبنایی خاک در مقیاس واحد نقشه خاک و از روی نقشه‌های رقومی واحدهای خاک (DISM)^۱ تهیه و توسط مؤسسه

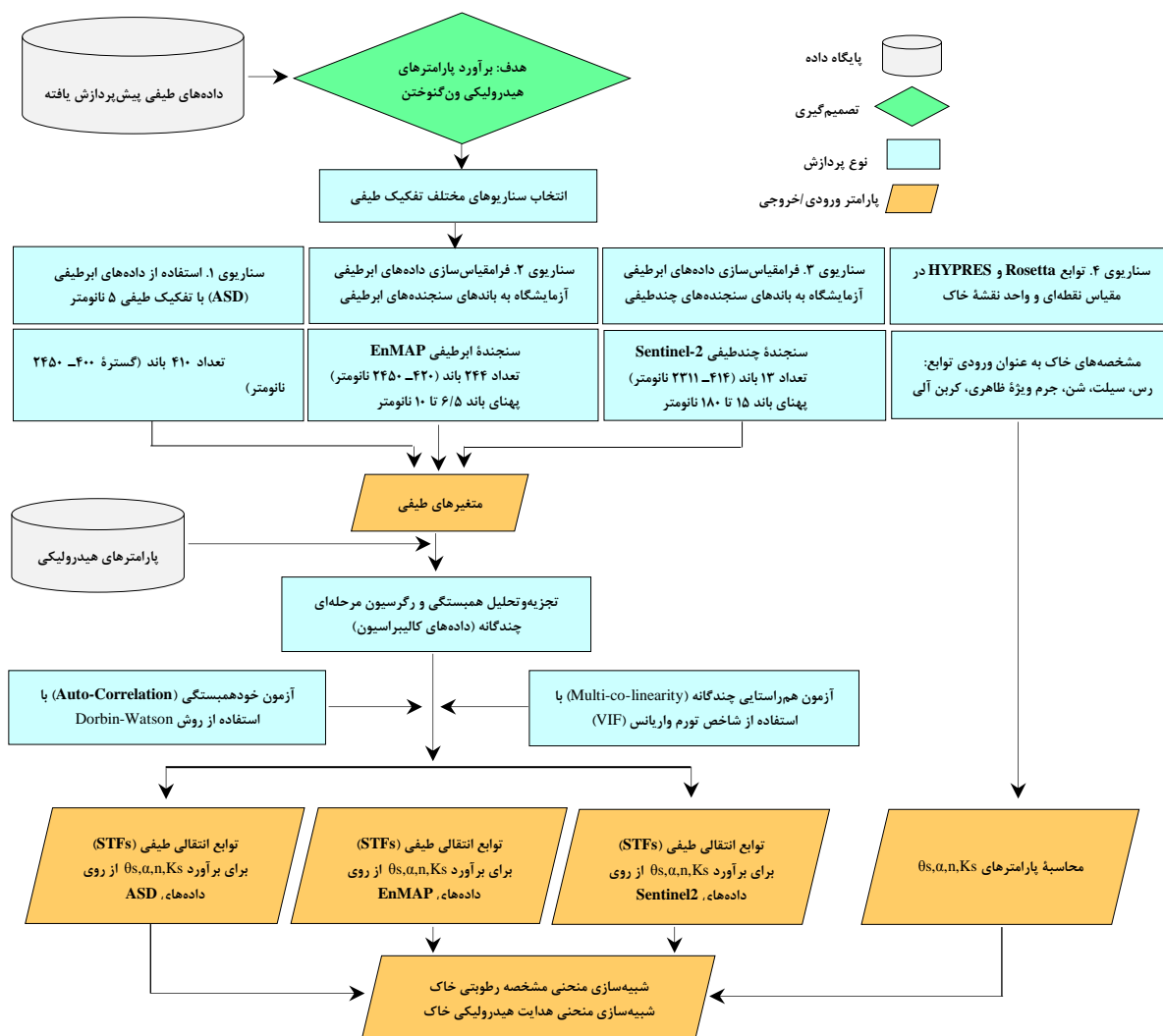
1. Digital Iran Soil Map

(رابطه ۸)

$$RPD = \left(\frac{SD}{RMSR} \right)_{Validation} \quad (\text{رابطه ۹})$$

و \bar{E} به ترتیب مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای، E_i و M_i به ترتیب میانگین مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای، SD انحراف معیار مقادیر مشاهده‌ای، P تعداد تخمینگرها، و N تعداد داده‌هاست.

$$EF = 1 - \frac{(N-1) \sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2}{N - P \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}$$



شکل ۲. چارچوب استفاده از سناریوهای مختلف طیفی و غیر طیفی در برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل معلم-ون گنوختن

ضعیف در طول موج ۹۵۰ نانومتر و نیز در طول موج‌های بین ۲۳۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر مشاهده شد. این طول موج‌های جذبی در منحنی‌های خام و منحنی‌های حذف پیوستار در انطباق با یکدیگرند؛ با این تفاوت که در منحنی‌های حذف پیوستار مشخص‌ترند. مشخصه جذبی در طول موج ۱۴۱۴ نانومتر مربوط به گروه‌های عاملی OH (رطوبت جذب شده با سطوح رس‌ها) و مشخصه جذبی در ۱۹۱۵ نانومتر مربوط به گروه‌های OH و H-O-H ملکول‌های آب محبوس شده در شبکه کریستالی

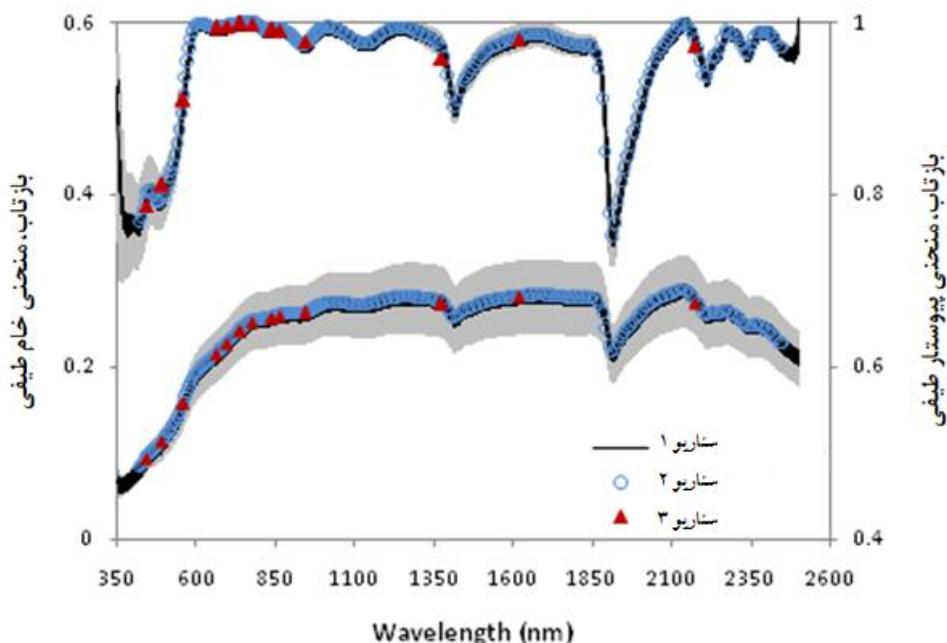
یافته‌ها و بحث

تجزیه و تحلیل طیفی

در شکل ۳ میانگین و انحراف معیار مقادیر بازتاب منحنی‌های خام طیفی و منحنی‌های حذف پیوستار طیفی خاک‌های منطقه مطالعه شده در حضور سناریوهای مختلف تفکیک طیفی می‌آید. چنین منحنی‌هایی نشان‌دهنده شکل معمول طیف‌های خاک‌اند که چهار مشخصه جذب طیفی در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲، و ۲۳۴۱ نانومتر دارند. همچنین، تعدادی باند جذبی

طیفی را دیگر پژوهشگران نیز گزارش کرده‌اند (Ben-Dor and Banin, 1995; Ben-Dor et al., 1999; Gomez et al., 2008b; Santra et al., 2009).

رس‌هاست. در حالی که باندهای جذبی در ۲۲۱۲ نانومتر مربوط به پیوند OH با فلزاتی همچون Al یا جایگزینی Fe یا Mg به جای Si است (Clark et al., 1990). این مشخصه‌های جذب



شکل ۳. میانگین و انحراف معیار مقادیر بازتاب منحنی‌های طیفی خام (منحنی پایین) و حذف پیوستار (منحنی بالا) خاک به‌ازای سه سناریوی طیفی شامل سناریوی ۱ (بازتاب طیفی در طول موج‌هایی با وضوح ۱ نانومتر، ASD)؛ سناریوی ۲ (وضوح طیفی منطبق با باندهای سنجنده ابرطیفی EnMAP)، و سناریوی ۳ (وضوح طیفی منطبق با باندهای سنجنده چندطیفی Sentinel-2)

مقادیر بازتاب طیفی به‌ویژه در طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۵، ۲۲۱۲، ۲۳۴۱ نانومتر داشتند. پارامتر شکل n روند معکوسی از نظر همبستگی با پارامتر α^{\dagger} نشان داد که می‌تواند به دلیل همبستگی قوی و منفی بین این دو پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک باشد (van Genuchten et al., 1992).

در شکل ۴ ب همبستگی بین توزیع اندازه ذرات خاک (رس، سیلت، شن) با مقادیر بازتاب طیفی در هر طول موج می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر رس و شن و سیلت همبستگی‌های معناداری (سطح ۰.۱٪) با مقادیر بازتاب طیفی در طول موج‌هایی منطبق با طول موج‌های پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان می‌دهند؛ اگرچه رس و شن نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک با مقادیر بازتاب طیفی همبستگی بیشتری داشتند (شکل ۴ الف و ب). پارامتر n روند همبستگی مشابهی با مقادیر شن و پارامتر α^{\dagger} روند همبستگی مشابهی با مقادیر رس در همه طول موج‌ها نشان دادند.

به طور مشابه، در شکل ۴ ج ضرایب همبستگی بین مقادیر بازتاب باندی حاصل از سناریوی ۲ با پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌آید. پارامترهای معلم-ون‌گنوختن (شامل

تجزیه و تحلیل همبستگی بین ویژگی‌های خاک و سناریوهای مختلف طیفی

بر پایه شکل ۴ الف، همبستگی قوی و معناداری بین پارامترهای هیدرولیکی خاک و مقادیر بازتاب طیفی به‌ازای سناریوی ۱ در گستره مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی مشاهده شد. در مورد پارامتر α^{\dagger} ، حداکثر همبستگی معنادار (سطح ۰.۱٪) در طول موج‌های ۵۵۲ و ۲۳۱۷ نانومتر و به ترتیب برابر ۰.۳۱۵- و ۰.۴۶۳ به دست آمد. در حالی که پارامتر n حداکثر همبستگی را در طول موج‌های ۵۴۷ و ۲۳۰۷ نانومتر و به ترتیب برابر ۰.۲۴۲ و ۰.۵۵۸- نشان داد. پارامترهای α^{\dagger} و K_s^{\dagger} روند همبستگی مشابهی را در گستره ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر نشان دادند. بزرگ‌ترین ضریب همبستگی ($R=۰.۴۵۶$) معنادار (سطح ۰.۱٪) برای K_s^{\dagger} در طول موج ۱۹۲۷ نانومتر به دست آمد. رطوبت اشباع خاک فقط در طول موج‌های ۲۲۴۲ نانومتر ($R=۰.۱۹۱$)، ۲۲۴۷ نانومتر ($R=۰.۱۶۰$)، و ۲۲۳۲ نانومتر ($R=۰.۱۵۱$) همبستگی معنادار (سطح ۰.۵٪) با مقادیر بازتاب طیفی خاک نشان داد (شکل ۴ الف). پارامترهای معلم-ون‌گنوختن نیز همبستگی‌های قوی و معناداری (سطح ۰.۱٪) با

می‌گذارند. ارتباط بین ویژگی‌های مبنایی خاک با مقادیر بازتاب طیفی را دیگر پژوهشگران هم گزارش کرده‌اند (Bilgili et al., 2010; Somers et al., 2010; Santra et al., 2009).

نتایج سناریوی ۱

در جدول ۱ توابع انتقالی طیفی حاصل کاربرد سه سناریوی مختلف تفکیک طیفی، به منظور برآورد پارامترهای مدل معلم-ون گنوختن می‌آید. همچنین، آماره‌های مختلف ارزیابی شامل R^2 و RMSR به‌ازای سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی محاسبه شد. بر اساس نتایج، مقادیر شاخص VIF برای همه توابع اشتقاق یافته کمتر از ۵ به دست آمد؛ هرچند مقدار عددی حداکثر برابر ۱۰ را اغلب معیار ارزیابی و نبود هم‌راستایی چندگانه بین متغیرها در نظر می‌گیرند (Ho, 2006; Khodaverdiloo et al., 2011). مقادیر شاخص DW نیز بسیار نزدیک به مقدار مطلوب ۲ به دست آمد که نشان‌دهنده عدم همبستگی درونی بین مقادیر باقی‌مانده‌هاست (Ho, 2006). بر پایه نتایج سناریوی ۱، مقادیر R^2_{val} بین ۰/۱۰ تا ۰/۵۸ و مقادیر $RMSR_{val}$ به ترتیب برابر ۰/۴۰۷، ۰/۱۰۲۹، ۰/۱۰۶۲، ۰/۱۶۱۹ برای پارامترهای α^\dagger ، n ، θ_s ، K_s^\dagger به دست آمد. STF‌ها اندکی حالت کم‌برآورد با مقدار ME بین ۰/۰۰۳- تا ۰/۱۳۰۴- نشان دادند. پارامترهای n و K_s^\dagger با برآوردهای بهتری نسبت به پارامتر α^\dagger همراه بودند. متغیرهای تخمینگر در ناحیه مرئی شامل مقادیر بازتاب در طول موج‌های ۵۵۰ نانومتر (سبز) و ۶۸۰ نانومتر (قرمز) بودند. این نشان می‌دهد تغییرپذیری در پارامترهای هیدرولیکی خاک تا حدودی توسط رنگ خاک قابل توصیف است (Stenberg et al., 2010). همچنین، مهم‌ترین تخمینگرهای طیفی شامل مقادیر بازتاب در طول موج‌های ۱۲۰۰ تا ۱۴۵۰ نانومتر، ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر، و ۲۱۵۰ تا ۲۴۵۰ نانومتر بودند. طول موج‌های نزدیک به ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر به ترتیب متأثر از گروه‌های عاملی هیدروکسیل (OH) موجود در آب آزاد خاک و گروه‌های OH موجود در شبکه کانی‌های رس (Clark, 1999; Viscarra Rossel et al., 2006c) و طول موج‌های نزدیک به ۲۳۴۱ و ۲۳۷۳ نانومتر عمدتاً مربوط به گروه‌های CO_3 موجود در کانی‌های کربناته‌اند (Gaffey, 1986; Gomez et al., 2008).

نتایج سناریوی ۱ مشابه یافته‌های Cohn و همکاران (2007) و نسبت به یافته‌های Minasny و همکاران (2008) دارای دقت بیشتر است. آن‌ها با استفاده از داده‌های طیفی در گستره NIR و MIR ضریب آب‌گذری اشباع خاک را با مقادیر R^2 به ترتیب برابر ۰/۶۲ و ۰/۴۳ برآورد کردند. دقت نسبتاً کم در

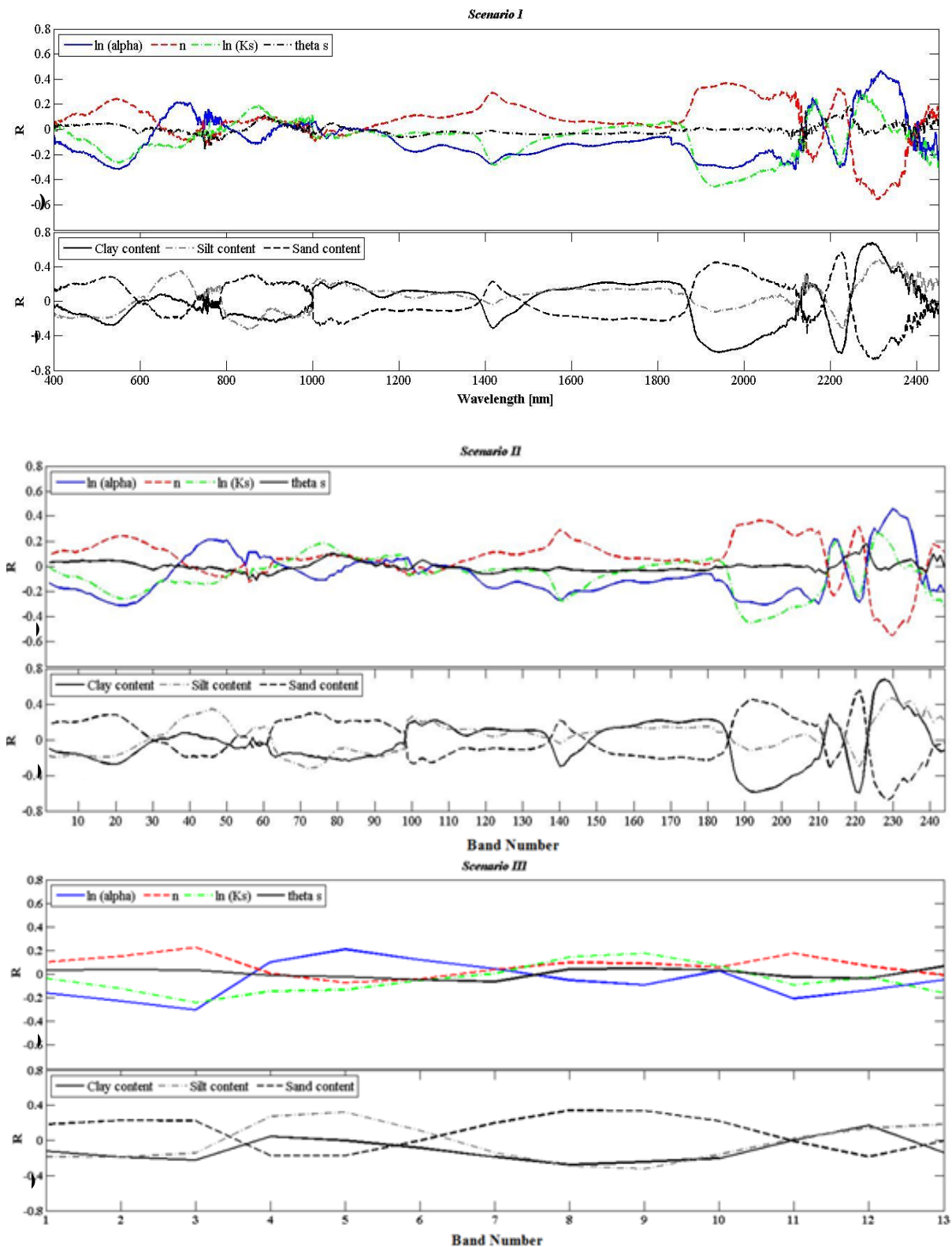
$(\alpha^\dagger, n, K_s^\dagger, \theta_s)$ همبستگی‌های بالا و معناداری (سطح ۰/۱) با باندهای طیفی، به‌ویژه باندهای بین ۱۰ تا ۶۰ و ۱۸۰ تا ۲۴۰، نشان دادند. مقادیر بازتاب طیفی در باندهای ۲۲ و ۴۵ (Vis) و ۱۹۶ و ۲۲۱ و ۲۳۰ (SWIR) همبستگی‌های معناداری با پارامترهای هیدرولیکی خاک داشتند (شکل ۴ ج). باند ۱۹۶ همبستگی معناداری (سطح ۰/۱) با مقادیر R برابر ۰/۳۶۱ و ۰/۳۰۶- با پارامترهای n و α^\dagger نشان داد. حداکثر ضریب همبستگی برای پارامترهای α^\dagger و n به ترتیب برابر ۰/۴۵۸ و ۰/۵۵۵- و در باند ۲۳۰ به دست آمد. ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز همبستگی معناداری (سطح ۰/۱) با مقادیر بازتاب طیفی در باندهای ۱۹۲ ($R=0/452$) و ۲۲۶ ($R=0/264$) نشان داد. همچنین، رطوبت اشباع خاک فقط در باندهای ۲۲۲ و ۲۲۳ با مقادیر R به ترتیب برابر ۰/۱۵۴ و ۰/۱۸۰ همبستگی معنادار (سطح ۰/۵) با مقادیر بازتاب باندی نشان داد. مقادیر رس و شن خاک نیز بیشترین ضرایب همبستگی را در باندهای ۲۲۱ (با مقادیر R به ترتیب برابر ۰/۵۹۹ و ۰/۵۵۵) و ۲۲۸ (با مقادیر R به ترتیب برابر ۰/۶۷۴ و ۰/۶۷۵) نشان دادند. در حالی که مقدار سیلت در باند ۲۳۰ با بیشترین مقدار R (۰/۴۶۷) همراه بود (شکل ۴ د).

همبستگی بین پارامترهای معلم-ون گنوختن با مقادیر بازتاب طیفی حاصل از کاربرد سناریوی ۳ در شکل ۴ ه می‌آید. از میان سیزده باند طیفی، باند ۳ بیشترین همبستگی را با پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد؛ طوری که مقادیر R مربوط به پارامترهای α^\dagger ، K_s^\dagger ، n به ترتیب برابر ۰/۳۰۵-، ۰/۱۶۸-، ۰/۲۲۵- به دست آمد. همچنین، باندهای ۲ و ۱۱ همبستگی معناداری (سطح ۰/۱) با پارامترهای α^\dagger و n داشتند. از طرفی، هیچ‌یک از سیزده باند طیفی همبستگی معنادار (سطح ۰/۵) با رطوبت اشباع خاک نداشتند.

نتایج این پژوهش با یافته‌های Santra و همکاران (2009) مطابقت دارد. آن‌ها همبستگی‌های معناداری بین پارامترهای α^\dagger ، n ، K_s با مقادیر بازتاب طیفی در باند ۲ سنجنده ETM^+ (گستره ۵۲۰-۶۰۰ نانومتر) به دست آوردند. مقادیر رس و شن بیشترین همبستگی را با باند ۸ و با مقادیر R به ترتیب برابر ۰/۲۸- و ۰/۳۴۱- نشان دادند؛ در حالی که مقدار سیلت خاک بیشترین همبستگی را با باندهای ۵ و ۹ و با مقادیر R به ترتیب برابر ۰/۳۲۱ و ۰/۳۲۴- نشان داد (شکل ۴ و). به نظر می‌رسد این همبستگی‌های بالا بین پارامترهای معلم-ون گنوختن با مقادیر بازتاب طیفی-باندی به دلیل وجود ذرات رس و شن موجود در خاک باشد که مستقیم بر رفتار طیفی خاک اثر

در طول موج‌های ۲۱۳۷ و ۲۲۳۲ نانومتر یگانه متغیرهای تخمینگر در برآورد رطوبت اشباع خاک در سطح ۵ درصد بودند (جدول ۱).

برآورد پارامترهای α^\dagger و n می‌تواند به دلیل خطای برازش پارامترهای مدل به مقادیر اندازه‌گیری شده و در برآورد پارامتر K_s^\dagger به دلیل خطاهای اندازه‌گیری باشد. مقادیر بازتاب



شکل ۴. ضریب همبستگی پیرسون (R) بین مقادیر پارامترهای مدل‌های معلم-ون‌گنوختن (الف، ج، ه) و توزیع اندازه ذرات خاک (ب، د، و) با مقادیر بازتاب طیفی-باندی حاصل از سناریوی ۱ (الف و ب)، سناریوی ۲ (ج و د) و سناریوی ۳ (ه و و)

نتایج سناریوی ۲

در جدول ۱ خلاصه‌ای از STF‌های پارامتریک حاصل از کاربرد سناریوی ۲ همراه دقت برآوردهای آن می‌آید. مقادیر R_{val}^2 و $RMSR_{val}$ به ترتیب بین ۰/۱۰ تا ۰/۵۷ و ۰/۲۹ تا ۰/۶۴۹ محاسبه شدند. مقادیر R^2 مربوط به داده‌های اعتبارسنجی اندکی بیشتر از مقادیر R^2 مربوط به داده‌های واسنجی بود؛ در حالی که مقادیر RMSE بین این دو سری تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند. مشابه چنین نتیجه‌ای در دیگر پژوهش‌ها نیز اعلام شده است (Dardanne et al., 2000; Zhang et al., 2013). مشابه سناریوی ۱، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نسبت به بقیه پارامترهای هیدرولیکی با برآورد بهتری همراه بود. جدول ۱ نشان می‌دهد سناریوی ۲ قادر به تخمین رطوبت اشباع خاک به خوبی سه پارامتر دیگر نیست و فقط ارتباط خطی ضعیفی به دست آمده است. این نتیجه با یافته‌های Tranter و همکاران (2008) مطابقت دارد که با استفاده از داده‌های طیفی در گستره MIR رطوبت حجمی خاک را در حالت اشباع با مقدار R^2 و RMSE به ترتیب برابر ۰/۰۵ و cm^3 برآورد کردند. پارامترهای α^+ و n با دقت متوسط (به ترتیب $R_{val}^2 = 0/39$ و $R_{val}^2 = 0/31$ ؛ $RMSR_{val} = 0/382$ و $RMSR_{val} = 0/29$) برآورد شدند؛ در حالی که پارامتر K_s^+ با برآوردهای بهتری همراه بود ($R_{val}^2 = 0/57$ و $RMSR_{val} = 0/649$). به طور مشابه، سناریوی ۲ به کم‌برآورد کردن پارامترهای معلم-ون‌گنوختن تمایل داشت؛ طوری که مقدار ME_{val} برابر ۰/۵۴۴- به دست آمد (جدول ۱). در مورد پارامتر α^+ ، n ، K_s^+ ، θ_s به ترتیب ۵، ۳، ۳، ۱ باند طیفی به منزله متغیرهای تخمینگر استفاده شدند. مهم‌ترین متغیرهای تخمینگر در گستره ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر متعلق به باندهای ۱۶ و ۴۴ بودند. این باندها توصیف‌کننده رنگ خاک‌اند و می‌توانند به دلیل وجود اکسیدهای آهن (مثلاً هماتیت و گئوتایت) در خاک باشند (Stenberg et al., 2010). تخمینگرهای طیفی در گستره NIR-SWIR شامل باندهای ۷۹، ۱۹۲، ۲۰۱، ۲۲۳، ۲۲۶، ۲۳۰، ۲۳۵ و ۲۴۴ بودند (جدول ۲). مقادیر بازتاب طیفی در باند ۲۳۰ مهم‌ترین متغیر در برآورد پارامترهای α^+ و n بود؛ در حالی که باند ۲۲۶ فقط برای برآورد α^+ و K_s^+ استفاده شد. این نتایج نشان می‌دهد باندهای طیفی در گستره NIR-SWIR در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک اهمیت بیشتری دارند. باندهای طیفی، که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، دارای برخی همپوشانی‌ها با طول موج‌های طیفی حاصل از سناریوی ۱ بودند؛ مثلاً، باندهای ۴۴ و ۲۳۰ (برای α^+)، باند ۱۶ (برای n)، باند ۲۲۳

(برای θ_s)، باند ۷۹ و ۱۹۲ و ۲۲۶ (برای K_s^+) به ترتیب در همپوشانی با باندهای ۶۸۷، ۲۳۱۷، ۵۵۲، ۲۲۳۲، ۸۷۷، ۱۹۳۲، ۲۲۷۷ نانومتر قرار داشتند.

از آنجا که در این سناریو پتانسیل برآورد پارامترهای معلم-ون‌گنوختن به روش مقیاس‌سازی به باندهای سنجنده‌های ابرطیفی مد نظر قرار گرفته است، این امکان نیز وجود دارد که مشخصه‌های جذب اتمسفری بر نتایج تأثیر بگذارند؛ مثلاً طول موج‌های جذب بخار در اتمسفر در مجاور باندهای ۹۴۰، ۱۱۰۰، ۱۳۸۰، ۱۸۷۰ نانومتر اتفاق می‌افتد (Peixoto and Oort, 1993). بر اساس نتایج این بخش از پژوهش، باندهای طیفی استفاده‌شده در سناریوی ۲ تحت تأثیر بخار آب موجود در اتمسفر قرار نمی‌گیرند؛ هرچند، سایر عوامل همچون پارامترهای ژئوفیزیکی (رطوبت خاک، زبری خاک، سنگ‌ریزه سطحی، پوشش گیاهی، پستی و بلندی و ناهمگنی خاک) و پارامترهای مربوط به سنجنده (تفکیک مکانی و نسبت سیگنال به نویز) که بر مقادیر بازتاب طیفی اندازه‌گیری شده به کمک سنجنده‌های هواپیمابرد و ماهواره‌برد اثر می‌گذارند در محاسبات در نظر گرفته نشده‌اند. توابع انتقالی طیفی این قابلیت را دارند که تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای هیدرولیکی خاک را که غالباً در اثر عملیات انجام‌شده بر خاک (همچون خاک‌ورزی و فرسایش) اتفاق می‌افتد، در نظر بگیرند.

نتایج سناریوی ۳

مدل‌های رگرسیونی توابع انتقالی طیفی همراه آماره‌های ارزیابی دقت سناریوی ۳ در جدول ۱ می‌آید. استفاده از سناریوی ۳ در مقایسه با دو سناریوی دیگر به پایین‌ترین دقت در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک انجامید. STF‌های پارامتریک به R_{val}^2 بین ۰/۰۹ تا ۰/۲۲ و $RMSR_{val}$ بین ۰/۳۲ تا ۰/۶۱۹ منجر شدند. همچنین، STF‌ها به کم‌برآورد کردن همه پارامترهای هیدرولیکی خاک تمایل داشتند؛ طوری که، متوسط میانگین خطا (ME_{val}) برای پارامترهای α^+ ، n ، K_s^+ به ترتیب برابر ۰/۰۴۹، ۰/۰۰۵، ۰/۰۲۳- به دست آمد. نتایج کاربرد سناریوی ۳ نشان می‌دهد باندهای چندطیفی Sentinel-2 توانایی چندان بالایی در بازگو کردن اثر ترکیبات خاک بر پارامترهای هیدرولیکی خاک ندارند. پارامتر α^+ نسبت به سایر پارامترها از دقت برآورد بهتری برخوردار بود. این دقت بالاتر می‌تواند به این دلیل باشد که طول موج‌های مهم از ناحیه مرئی در برآورد پارامتر α^+ (جدول ۱، سناریوی ۱) توسط باندهای چندطیفی Sentinel-2 (باندهای ۱، ۳، ۵) بهتر ارائه شدند؛ در حالی که تخمینگرهای مهم پارامترهای n و K_s^+ غالباً در

رطوبتی منجر شدند. در حالی که در پتانسیل‌های ماتریک زیاد دقت پیش‌بینی‌ها ضعیف بود.

بر اساس نتایج، STFها و PTFهای مبتنی بر HYPRES به کم‌برآوردی رطوبت خاک به‌ویژه در گستره خشک منحنی رطوبتی خاک تمایل داشتند. در حالی که، PTFهای مبتنی بر Rosetta باعث بیش‌برآوردی شدند (جدول ۲، شکل ۵). همه STFها و PTFها در نواحی اشباع و نزدیک به آن با دقت پایینی همراه بودند، که می‌تواند به دلیل ناتوانی داده‌های طیفی و جرم ویژه ظاهری در توصیف اثر ساختمان خاک باشد. نمودار Lab HYP و Map HYP نشان می‌دهد انحراف‌های بین مقادیر اندازه‌گیری و برآوردشده رطوبت خاک در نواحی خشک و بسیار مرطوب منحنی رطوبتی خاک زیاد است (شکل ۵). پیش‌بینی وضعیت نگه‌داشت آب در خاک به کمک PTFهای حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و واحد نقشه خاک نشان می‌دهد استفاده از رویکرد طیفی در منطقه مورد مطالعه عملکرد بهتری دارد.

در جدول ۳ معیارهای ارزیابی STFها و PTFهای مبتنی بر توابع Rosetta و HYPRES در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک می‌آید. بر پایه نتایج به‌دست‌آمده، همه سناریوهای طیفی به بیشترین مقدار R^2 و EF و کمترین مقدار RMSR با متوسط مقدار برابر $1/0.48$ (بر حسب واحد لگاریتم) منجر شدند؛ هرچند، PTFها دارای دقت متوسط با مقادیر R^2 بین 0.67 تا 0.91 و EF بین 0.27 تا 0.74 بودند. بین سناریوهای مختلف طیفی، سناریوی ۲ بر حسب همه آماره‌ها به جز متوسط خطا (ME) و متوسط خطای نسبی (MRE) بهترین نتایج را (اندکی بهتر از سناریوی ۱) ارائه کرد. همه PTFها در هر دو مقیاس آزمایشگاهی و واحد نقشه خاک پایین‌ترین دقت را فراهم کردند؛ هرچند، بسته به مقیاس داده‌ها (آزمایشگاهی یا نقشه خاک) توابع Rosetta نسبت به توابع HYPRES با دقت بالاتری همراه بودند و بالعکس (جدول ۳).

در شکل ۶، مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک به کمک سناریوهای مختلف طیفی و غیر طیفی می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، STFها نسبت به PTFها با دقت بالاتری همراه‌اند. بر اساس نتایج، PTFهای مبتنی بر HYPRES و Rosetta به بیش‌برآوردی به‌ویژه در پتانسیل‌های ماتریک کم تمایل داشتند (جدول ۳، شکل ۶). بر پایه نتایج، می‌توان استنباط کرد رویکرد طیفی در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، به‌ویژه در مقیاس‌های طیفی با تفکیک زیاد (سناریوی ۱ و ۲)، عملکرد مناسبی داشته است.

گستره NIR و SWIR قرار دارند (جدول ۱، سناریوی ۱ و ۲) که در این گستره باندهای Sentinel-2 نتوانسته‌اند پوشش طیفی کاملی ارائه کنند. از آنجا که هیچ‌یک از سیزده باند همبستگی معناداری (سطح ۰.۵٪) با مقادیر رطوبت اشباع خاک نشان ندادند، هیچ مدل رگرسیونی برای تخمین این ویژگی خاک حاصل نشد. به طور کلی، باندهای مهم در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل باندهای ۱ و ۳ (گستره Vis)، ۵ و ۹ (گستره NIR)، باند ۹ منطبق با باند ۸a سنجنده Sentinel-2 است، و ۱۱ (گستره SWIR) بودند (جدول ۱)؛ اگرچه پارامتر n فقط به کمک باند ۳ برآورد شد. این نتایج نشان می‌دهد باندهای طیفی در نواحی Vis و NIR در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک مهم‌ترند.

نتایج سناریوی ۴

در جدول ۲ معیارهای ارزیابی STFها بر اساس سه سناریوی مختلف طیفی و نیز توابع انتقالی Rosetta و HYPRES (سناریوی ۴) بر اساس دو گروه داده‌های ورودی توابع، شامل داده‌های آزمایشگاهی یا نقطه‌ای (Lab ROS و Lab HYP) و داده‌های مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map ROS و Map HYP)، در برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بر اساس آماره‌ها، بهترین نتایج هنگام استفاده از STFها و به‌ویژه در حضور سناریوی ۲ حاصل شد. متوسط مقادیر R^2 و RMSR برای STFها به ترتیب برابر 0.93 و $0.337 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ به دست آمد. نتایج توابع Rosetta و HYPRES با مقادیر سناریوهای مختلف STF قابل مقایسه است. در مقایسه با STFها، استفاده از PTFها تا حدودی به کاهش دقت تخمین در ناحیه خشک (مثلاً Lab HYP و Map HYP) و مرطوب منحنی رطوبتی، با افزایش ۳۴۳ درصد در متوسط مقدار RMSR و کاهش ۱۹ درصد در متوسط مقدار R^2 ، منجر شد (جدول ۲). این نتیجه می‌تواند به دلیل وابستگی مکانی PTFها (پایگاه داده‌ای که بر اساس آن PTFها اشتقاق یافته‌اند) باشد که باعث کاهش دقت پیش‌بینی‌ها شده است. همچنین، مقادیر RMSR حاصل از Lab ROS و Map ROS کوچک‌تر از مقادیر به‌دست‌آمده توسط Lab HYP و Map HYP بود.

در شکل ۵ مقادیر اندازه‌گیری و برآوردشده منحنی مشخصه رطوبتی خاک (رطوبت‌های مختلف به‌زای نه پتانسیل ماتریک) توسط سناریوهای مختلف STF و PTF می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سناریوهای مختلف STFها به پیش‌بینی‌هایی با دقت بالا در بخش میانی و خشک منحنی

جدول ۱. مدل‌های رگرسیونی توابع انتقالی طیفی (STFs) حاصل از سناریوهای مختلف طیفی برای برآورد پارامترهای معلم-ون گنوختن همراه نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی توابع

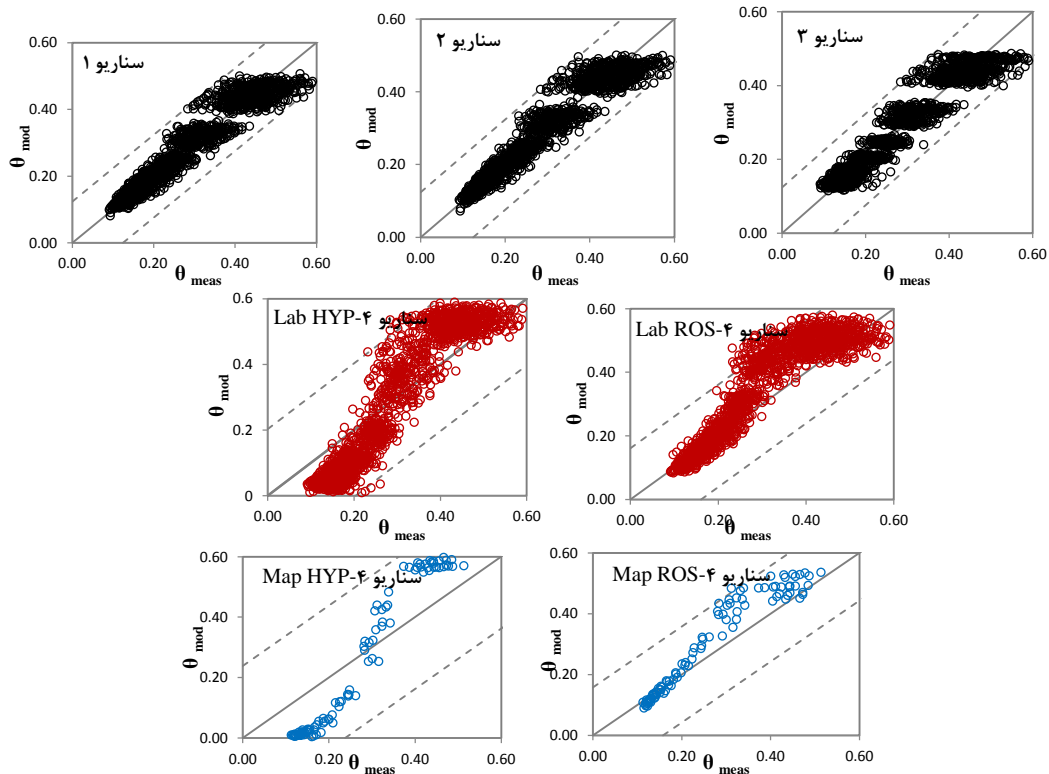
| D-Mean W VIF | RPD _{val.} | ME _{val.} | RMSR _{val.} | R ² _{val.} | ME _{cat.} | RMSR _{cat.} | R ² _{cat.} | توابع انتقالی طیفی (STFs) | سناریوی |
|-----------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| ۱,۸۰ | ۲,۶ | ۱,۲۱ | -۰,۰۰۳۰ | ۰,۴۰۷ | ۰,۳۰ | ۰,۰۰۰۵ | ۰,۳۷۲ | $\alpha^{\dagger} = -44/107 + 0/1(-2/174R_{\text{dot2}} + 48/77R_{\text{FAY}} - 0/494R_{\text{1202}} + 0/53R_{\text{1897}} - 2/608R_{\text{2333}} + 19/654R_{\text{2337}} - 21/707R_{\text{2337}})$ $n = 3/739 + 0/1(-0/2R_{\text{dot2}} + 0/116R_{\text{1317}} - 385R_{\text{1907}} - 1/885R_{\text{1202}} + 0/935R_{\text{2333}} - 2/82R_{\text{2337}} + 1/623R_{\text{2337}})$ | ۱ |
| ۱,۸۵ | ۱,۰ | ۰,۱ | -۰,۰۱۸۴ | ۰,۰۶۲ | ۰,۱۰ | ۰,۰۰۶۱ | ۰,۰۵۳ | $\theta_s = 15/811 + 0/1(-17/15R_{\text{1317}} + 1/878R_{\text{2337}})$ | |
| ۱,۷۳ | ۲,۹ | ۱,۴۹ | -۰,۱۳۰۴ | ۰,۶۱۹ | ۰,۵۸ | ۰,۰۴۳۵ | ۰,۴۸۶ | $K_s^{\dagger} = 53/569 + 0/1(-8/798R_{\text{dot2}} + 53/281R_{\text{FAY}} + 12/377R_{\text{1317}} - 24/959R_{\text{1202}} - 11/91R_{\text{1317}} - 62/276R_{\text{2333}} - 12/108R_{\text{2337}})$ | |
| ۱,۸۸ | ۲,۹ | ۱,۳۰ | -۰,۰۱۵۷ | ۰,۳۸۲ | ۰,۳۹ | ۰,۰۰۵۲ | ۰,۳۷۳ | $\alpha^{\dagger} = 2/102 + 0/1(48/335Band_{\text{dot}} - 22/502Band_{\text{1-1}} - 56/489Band_{\text{233}} + 26/883Band_{\text{233}} - 11/708Band_{\text{233}})$ | ۲ |
| ۱,۹۶ | ۳,۳ | ۱,۱۷ | -۰,۰۰۷۶ | ۰,۰۲۹ | ۰,۳۱ | ۰,۰۰۲۵ | ۰,۰۲۶ | $n = 2/62 + 0/1(-0/181Band_{\text{15}} - 4/031Band_{\text{233}} + 2/70Band_{\text{233}})$ | |
| ۱,۹۴ | ۱,۰ | ۱,۰۲ | -۰,۰۱۵۰ | ۰,۰۶۱ | ۰,۱۰ | ۰,۰۰۵۰ | ۰,۰۵۳ | $\theta_s = -2/663 + 0/1(3/266Band_{\text{233}})$ | |
| ۲,۰۰ | ۱,۹ | ۱,۴۲ | -۰,۱۷۹۳ | ۰,۶۴۹ | ۰,۵۷ | ۰,۰۵۹۳ | ۰,۵۰۲ | $K_s^{\dagger} = 35/897 + 0/1(52/137Band_{\text{15}} - 24/245Band_{\text{131}} - 64/057Band_{\text{233}})$ | |
| ۱,۶۵ | ۲,۳ | ۱,۱۴ | -۰,۰۴۸۸ | ۰,۴۳۴ | ۰,۲۲ | ۰,۰۱۶۳ | ۰,۴۱۸ | $\alpha^{\dagger} = -49/026 + 0/1(4/168Band_{\text{1}} - 16/606Band_{\text{2}} + 59/275Band_{\text{3}})$ | ۳ |
| ۱,۸۸ | ۱,۰ | ۱,۰۵ | -۰,۰۰۵۲ | ۰,۰۳۲ | ۰,۰۹ | ۰,۰۰۱۷ | ۰,۰۳۳ | $n = 0/741 - 0/1(0/471Band_{\text{2}})$ | |
| ۱,۸۵ | ۳,۲ | ۱,۲۲ | -۰,۰۲۲۸ | ۰,۶۱۳ | ۰,۱۸ | -۰,۰۲۹۹ | ۰,۵۴۹ | $K_s^{\dagger} = -45/842 + 0/1(13/707Band_{\text{1}} - 47/183Band_{\text{2}} + 63/524Band_{\text{3}} - 20/252Band_{\text{11}})$ | |

جدول ۲. نتایج ارزیابی دقت توابع انتقالی طیفی (STFs) و توابع انتقالی خاک (PTFs) در پیش‌بینی منحنی نگه‌داشت آب در خاک بر اساس سناریوهای مختلف طیفی شامل STFs-ASD (سناریوی ۱)، STFs-EnMAP (سناریوی ۲)، STFs-Sentinel2 (سناریوی ۳)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab HYP)، توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab ROS)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map HYP)، و توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map ROS). مقادیر زیرخطدار بیشترین دقت و مقادیر ایتالیک کمترین دقت را نشان می‌دهند.

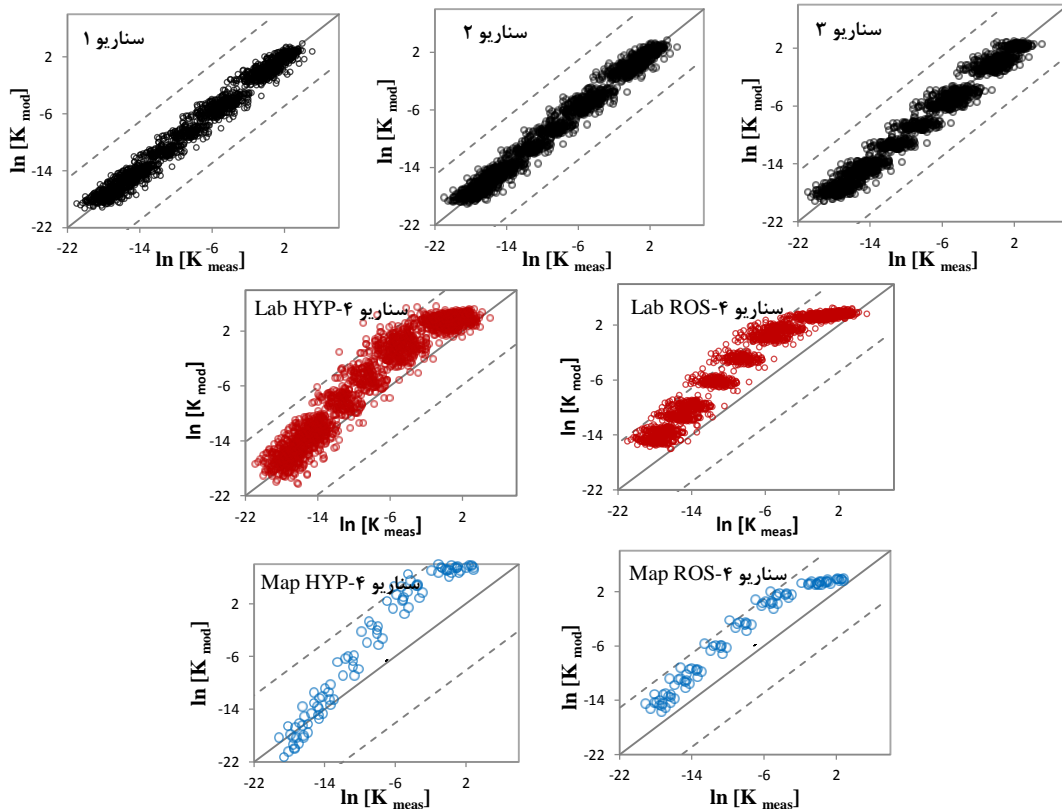
| سناریوی ۴ | | | | سناریوی ۳ | سناریوی ۲ | سناریوی ۱ | آماره ارزیابی |
|-----------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Map ROS | Map HYP | Lab ROS | Lab HYP | | | | |
| ۰,۰۶۴۴ | ۰,۱۲۷۳ | ۰,۰۷۰۰ | ۰,۰۹۴۵ | ۰,۰۳۴۹ | ۰,۰۳۲۸ | ۰,۰۳۳۳ | RMSR |
| ۰,۰۳۹۰ | -۰,۰۲۶۹ | ۰,۰۳۴۶ | -۰,۰۲۲۱ | -۰,۰۰۱۹ | -۰,۰۰۱۱ | -۰,۰۰۱۷ | Mean error |
| ۰,۱۰۱۴ | -۰,۳۶۳۴ | ۰,۰۹۳۰ | -۰,۲۳۴۶ | ۰,۰۰۴۴ | ۰,۰۰۴۲ | ۰,۰۰۲۱ | Mean relative error |
| ۰,۹۲۶۷ | ۰,۹۵۶۲ | ۰,۸۷۶۷ | ۰,۸۹۸۲ | ۰,۹۲۶۲ | ۰,۹۳۴۸ | ۰,۹۳۳۰ | R ² |
| ۰,۷۳۶۰ | ۰,۱۲۱۰ | ۰,۷۰۱۰ | ۰,۴۵۵۱ | ۰,۹۲۵۵ | ۰,۹۳۴۴ | ۰,۹۳۲۵ | EF |

جدول ۳. نتایج ارزیابی دقت توابع انتقالی طیفی (STFs) و توابع انتقالی خاک (PTFs) در پیش‌بینی منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک بر اساس سناریوهای مختلف طیفی شامل STFs-ASD (سناریوی ۱)، STFs-EnMAP (سناریوی ۲)، STFs-Sentinel2 (سناریوی ۳)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab HYP)، توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab ROS)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map HYP)، و توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map ROS). مقادیر زیرخطدار بیشترین دقت و مقادیر ایتالیک کمترین دقت را نشان می‌دهند.

| سناریوی ۴ | | | | سناریوی ۳ | سناریوی ۲ | سناریوی ۱ | آماره ارزیابی |
|-----------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Map ROS | Map HYP | Lab ROS | Lab HYP | | | | |
| ۴,۵۰۶۹ | ۵,۹۲۹۴ | ۴,۶۱۸۱ | ۳,۵۵۵۹ | ۱,۰۱۱۶ | ۱,۰۱۱۷ | ۱,۰۲۱۶ | RMSR |
| ۴,۴۴۵۴ | ۴,۷۹۲۹ | ۴,۲۳۳۳ | ۲,۸۰۹۸ | ۰,۰۲۰۵ | ۰,۰۴۱۲ | ۰,۰۴۲۶ | Mean error |
| -۰,۵۱۳۳ | -۰,۳۹۷۹ | -۱,۲۷۵۵ | -۱,۴۰۴۳ | -۰,۰۵۷۷ | ۰,۰۹۴۵ | ۰,۱۷۳۵ | Mean relative error |
| ۰,۹۱۳۱ | ۰,۷۵۲۷ | ۰,۶۷۵۸ | ۰,۸۲۶۲ | ۰,۹۷۴۸ | ۰,۹۷۹۲ | ۰,۹۷۸۸ | R ² |
| ۰,۵۷۹۵ | ۰,۲۷۲۶ | ۰,۵۶۲۹ | ۰,۷۴۰۸ | ۰,۹۷۴۶ | ۰,۹۷۹۰ | ۰,۹۷۸۶ | EF |



شکل ۵. مقادیر رطوبت خاک پیش‌بینی شده (θ_{mod}) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده (θ_{meas}) بر اساس سناریوهای مختلف طیفی شامل STFs-ASD (سناریوی ۱)، STFs-EnMAP (سناریوی ۲)، STFs-Sentinel2 (سناریوی ۳)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab HYP)، توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab ROS)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map HYP)، و توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map ROS)



شکل ۶. مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع پیش‌بینی شده (K_{mod}) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده (K_{meas}) بر اساس سناریوهای مختلف طیفی شامل STFs-ASD (سناریوی ۱)، STFs-EnMAP (سناریوی ۲)، STFs-Sentinel2 (سناریوی ۳)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab HYP)، توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی (Lab ROS)، توابع انتقالی HYPRES مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map HYP)، و توابع انتقالی Rosetta مبتنی بر واحدهای نقشه خاک (Map ROS).

نتیجه‌گیری

مشخصه‌های طیفی مرتبط‌اند، قابل مشاهده است. از سوی دیگر، دقت متوسط تا کم STFها در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌تواند به دلیل خطا در برازش مدل به مقادیر اندازه‌گیری شده (با متوسط RMSR برابر ۰/۱۴) باشد. نتایج کاربرد PTFهای مبتنی بر Rosetta و HYPRES در هر دو مقیاس آزمایشگاهی و واحد نقشه خاک با مقادیر STFها تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشت. این تفاوت نشان‌دهنده وابسته به مکان بودن PTFها و عملکرد بهتر STFها در منطقه است.

این نتایج نشان می‌دهد استفاده از سناریوی ۱ و ۲ می‌تواند روشی غیر مستقیم در برآورد پارامترهای هیدرولیکی از روی اطلاعات طیفی خاک باشد. سناریوی ۲ و ۳ می‌توانند در مقیاس‌های بزرگ برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی و به‌ویژه از طریق دورکاری ماهواره‌ای استفاده شوند؛ اگرچه لازم است با استفاده از تصاویر ابرطیفی EnMAP و Sentinel-2 به اشتقاق STFها در شرایط واقعی‌تر اقدام شود. به طور کلی و بر پایه نتایج، استفاده از بازتاب طیفی در گستره Vis-NIR-SWIR رویکرد جدیدی است که می‌تواند برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به کار رود. این روش در مورد پارامترهای هیدرولیکی، که اثر مستقیمی با بازتاب طیفی خاک ندارند (برخلاف ویژگی‌های مبنایی خاک همچون رس، شن، ماده آلی)، اهمیتی ویژه دارد. علاوه بر این، در رویکرد طیفی به در اختیار داشتن داده‌هایی همچون بافت خاک و ماده آلی نیاز نیست. این نکته در مناطقی که هیچ‌گونه اطلاعاتی از وضعیت ویژگی‌های مبنایی خاک در دسترس نیست اهمیت بسیار دارد. از سوی دیگر، برخی عوامل نظیر عملیات مدیریت خاک (همچون خاک‌ورزی) و فرسایش اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک دارند. در چنین وضعیتی، رفتارسنجی طیفی خاک روشی ارزان و سریع برای در نظر گرفتن پویایی و تغییرپذیری زمانی ویژگی‌های خاک محسوب می‌شود. به دلیل تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک و نیز اثر عواملی همچون رطوبت خاک، شوری، گچی، یا آهکی بودن خاک‌ها بر بازتاب طیفی خاک، استفاده از STFهای اشتقاقی در این پژوهش ممکن است در دیگر مناطق با عدم اطمینان همراه باشد. بنابراین، لازم است توابع اشتقاقی در دیگر مناطق قبل از استفاده ارزیابی شوند و با احتیاط بیشتری به کار روند.

در این بخش، با استفاده از داده‌های بازتاب طیفی خاک در گستره Vis-NIR-SWIR (۳۵۰-۲۵۰۰ نانومتر) و با در نظر گرفتن سه سناریوی مختلف تفکیک طیفی شامل منحنی طیفی حاصل از اندازه‌گیری با دستگاه اسپکتروراديو متر (سناریوی ۱)، مقیاس‌سازی به باندهای سنجنده ابرطیفی EnMAP (سناریوی ۲)، و مقیاس‌سازی به باندهای سنجنده چندطیفی Sentinel-2 (سناریوی ۳) اقدام به اشتقاق توابع انتقالی طیفی (STFs) به منظور برآورد پارامترهای معلم-ون گنوختن (شامل α^{\dagger} ، n ، K_s^{\dagger} ، θ_s) شد. سپس، ویژگی‌های مبنایی خاک در دو مقیاس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و داده‌های واحدهای نقشه خاک به منزله ورودی توابع انتقالی Rosetta و HYPRES (معروف‌ترین PTFهای جهان) در نظر گرفته شدند و برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک به کار رفتند. نتایج کاربرد STFها و PTFها با یکدیگر تفاوت قابل توجهی داشتند.

با استفاده از سناریوهای ۱ و ۲، مقادیر بازتاب طیفی و پارامترهای معلم-ون گنوختن با همبستگی‌های قوی و معنادار (سطح ۰/۱) همراه بودند؛ در حالی که، در سناریوی ۳ این همبستگی‌ها با کاهش زیادی همراه بودند. در مقایسه با سناریوی ۳، سناریوی ۱ و ۲ بیشترین دقت تخمین (کمترین RMSR) را داشتند. استفاده از طول موج‌ها با تفکیک طیفی زیاد (سناریوهای ۱ و ۲) اطلاعات بیشتری درباره پارامترهای هیدرولیکی خاک در مقایسه با سناریوی ۳ ارائه کرد. طول موج‌های مؤثر (سطح ۰/۱) در برآورد پارامترهای معلم-ون گنوختن شامل طول موج‌های ۵۵۲، ۶۸۷، ۱۴۱۷، ۱۹۳۲، ۲۲۷۷، ۲۳۰۷، ۲۳۱۷، ۲۴۲۷، ۲۴۴۷ نانومتر (سناریوی ۱) بود. باندهای مؤثر در تخمین پارامترهای α^{\dagger} ، n ، K_s^{\dagger} و θ_s شامل باندهای ۱۶، ۴۴، ۷۹، ۱۹۲، ۲۰۱، ۲۲۶، ۲۳۰، ۲۳۵، ۲۴۴ (سناریوی ۲) و باندهای ۱، ۳، ۵، ۹، و ۱۱ (سناریوی ۳) بود.

نتایج سناریوهای ۱ و ۲ را می‌توان به چند دلیل توجیه کرد. اولاً، این دو سناریو با مشخصه‌های جذب طیفی همراه بودند که در سناریوی ۳ قابل تشخیص و ارائه نبودند. دوم، در سناریوهای ۱ و ۲ همبستگی‌های محلی بین پارامترهای هیدرولیکی خاک و به دنبال آن ویژگی‌های مبنایی خاک، که با

REFERENCES

- Babaeian, E., Homaei, M., and Norouzi, A. A. (2014a). Evaluating point and parametric spectral transfer functions for predicting soil water characteristics. *Journal of Water and Soil Research*, Accepted. (In Farsi)
- Babaeian, E., Homaei, M., and Norouzi, A. A. (2014b). Deriving and validating parametric spectrotransfer functions in order to estimate soil hydraulic properties in VIS-NIR-SWIR range. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 3(3), 21-36. (In Farsi)
- Babaeian, E., Homaei, M., and Norouzi, A. A. (2012). Deriving and validating point spectrotransfer functions in Vis-NIR-SWIR range to estimate

- soil water retention. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 1(4), 41-27. (In Farsi)
- Ben-Dor, E. and Banin, A. (1995). Near infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 364-372.
- Ben-Dor, E., Irons, J. R., and Epema, G. F. (1999). Soil reflectance. In *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (A. N. Rencz, Ed.), Vol. 3, p. 111-188. 3rd ed. Wiley, New York.
- Bilgili, A. V., van Es, H. M., Akbas, F., Durka, A., and Hively, W. D. (2010). Visible nearinfrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. *Arid Environment*, 74: 229-238.
- Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz, A.N. (Ed.), *Remote Sensing for Earth Sciences. Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., Toronto, p. 3-58.
- Clark, R. N., King, T. V. V., Klejwa, M., Swayze, G. A., and Vergo, N. (1990). High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95: 12653-12680.
- Dardanne, P., Sinnaeve, G., and Baeten, V. (2000). Multivariate calibration and chemometrics for near infrared spectroscopy: which method? *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 8: 229-237.
- Farrokhian Firouzi, A. and Homae, M. (2005). Predicting water retention curve of Gypsiferous soils using the derived point pedotransfer functions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(24), 129-142. (In Farsi)
- Farrokhian Firouzi, A. and Homae, M. (2003). Predicting hydraulic properties of Gypsiferous soils using the derived parametric pedotransfer functions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 4(15), 57-72. (In Farsi)
- Gaffey, S. J. (1986). Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near-infrared (0.35-2.55 μm): Calcite, aragonite and dolomite. *America Mineral*. 71: 151-162.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part I. Second edition*. Agronomy Monograph, vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, p. 383-411.
- Ghorbani Dashtaki, S. and Homae, M. (2004). Estimating soil water retention using point pedotransfer functions. *Journal of Agricultural science*, 4(10): 157-166. (In Farsi)
- Ghorbani Dashtaki, S. and Homae, M. (2002). Parametric estimation of unsaturated hydraulic functions using pedotransferfunctions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 3(12), 1-16. (In Farsi)
- Gomez, C., Lagacherie, Ph., and Coulouma, G. (2012). Regional prediction of eight common soil properties and their spatial structure from hyperspectral Vis-NIR data. *Geoderma*, 189-190: 176-185.
- Gomez, C., Lagacherie, P., and Coulouma, G. (2008b). Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148:141-148.
- Guanter, L., Segl, K., and Kaufmann, H. (2009). Simulation of the optical remote-sensing sciences with application to the EnMAP hyperspectral mission. *IEEE Transection of Geoscience and Remote Sensing*, 47 (7): 2340-2351.
- Ho, R. (2006). *Handbook of Univariate and Multivariate Data Analysis and Interpretation with SPSS*. Chapman and Hall, CRC.
- Homae, M. and Farrokhian Firouzi, A. (2008). Deriving point and parametric pedotransfer functions of some gypsiferous soils. *Australian Journal of Soil Research*, 46: 219-227.
- Jana, R. B., Mohanty, B., and Springer, E. P. (2007). Multiscale pedotransfer functions for soil water retention. *Vadose Zone Journal*, 6:868-878.
- Janik, L. J., Forrester, S. T., and Rawson, A. (2009). The prediction of soil chemical and physical properties from mid-infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 97:179-188.
- Jarvis, N. J., Zavatiaro, L., Rajkai, K., Reynolds, W. D., Olsen, P. A., McGechan, M., Mecke, M., Mohanty, B., Leeds-Harrison, P. B., and Jacques, D. (2002). Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*, 108:1-17.
- Khodaverdiloo, H., Homae, M., van Genuchten, M. T., and Ghorbani Dashtaki, S. (2011). Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93-99.
- Khodaverdiloo, H. and Homae, M. (2002). Deriving pedotransfer functions to estimate soil water characteristics curve. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 10, 36-46. (In Farsi)
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J. B., Madeira Netto, J., and Robbez-Masson, J. M. (2008). Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field, and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sensing and Environment*, 112 (3): 825-835.
- Lopez, L. R., Behrens, T., Schmidt, K., Stevens, A., Alexandre, J., Dematte, M., and Scholten, T. (2013). The spectrum-based learner: A new local approach for modeling soil vis-NIR spectra of complex datasets. *Geoderma*, 195: 268-279.
- Minasny, B., Mc Bratney, A. B., Tranter, G., and Murphy, B. W. (2008). Using soil knowledge for the evaluation of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for predicting soil physical and mechanical properties. *European Journal of Soil Science*, 59: 960-97.
- Motalebi, E., Homae, M., Zarei, Gh., and Mahmoudi,

- Sh. (2010). Investigating calcium carbonate on soil water characteristics of Garmsar soils using pedotransfer functions. *Journal of Irrigation and Drainage*, 4(3), 426-439. (In Farsi)
- Motalebi, E., Homaei, M., and Pazira, A. (2007). Estimating hydraulic parameters of clayey soils using point pedotransfer functions. *Journal of Agricultural Science*, 13(2), 349-365. (In Farsi)
- Navabeian, M., Leyaghat, M., and Homaei, M. (2004). Estimating saturated hydraulic conductivity using pedotransfer functions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12, 1-16. (In Farsi)
- Nocita, M., Stevens, A., Noon, C., and van Wesemael, B. (2013). Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 199: 37-42.
- Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J., and Lin, H. S. (2006). Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 131:308-316.
- Pachepsky, Y. A. and Rawls, W. J. (2004). Development of pedotransfer functions in soil hydrology. *Developments in Soil Science*, 30, Elsevier, Amsterdam.
- Peixoto, J. P. and Oort, A. H. (1993). *Physics of Climate*. American Institute of Physics, New York.
- Rawls, W. J. and Pachepsky, Y. A. (2002). Using field topographic descriptors to estimate soil water retention. *Soil Science*, 167:423-435.
- Santra, P., Sahoo, R. N., Das, B. S., Samal, R. N., Pattanaik, A. K., and Gupta, V. K. (2009). Estimation of soil hydraulic properties using proximal spectral reflectance in visible, near-infrared, and shortwave-infrared (VIS-NIR-SWIR) region. *Geoderma*, 152: 338-349.
- Savvides, A., Corstanje, R., Baxter, S. J., Rawlins, B. J., and Lark, R. M. (2010). The relationship between diffuse spectral reflectance of the soil and its cation exchange capacity is scale dependent. *Geoderma*, 154: 353-358.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., and van Genuchten, M. Th. (2001). ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251:163-176.
- Schaap, M. G. and Leij, F. J. (1998). Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil Tillage Research*, 47:37-42.
- Somers, B., Gysels, V., Verstraeten, W. W., Delalieux, S., and Coppin, P. (2010). Modelling moisture-induced soil reflectance changes in cultivated sandy soils: a case study in citrus orchards. *European Journal of Soil Science*, 61: 1091-1105.
- Stenberg, B., ViscarraRossel, R. A., Mouazen, A. M., and Wetterlind, J. (2010). Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. In Donald L. Sparks, editor: *Advances in Agronomy*, Vol. 107, Burlington: Academic Press, 2010, pp. 163-215. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7).
- Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A. B., ViscarraRossel, R. A., and Murphy, B. W. (2008). Comparing Spectral Soil Inference Systems and Mid-Infrared Spectroscopic Predictions of Soil Moisture Retention. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5): 1394-1400.
- van Genuchten, M. Th., F. J., Leij and S. R. Yates. (1992). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Project summary, EPA'S Robert S. Kerr Environmental Research Lab., Ada, OK, USA.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., and van Genuchten, M. Th. (2010). Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten-Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone Journal*, 9: 795-820.
- Vereecken, H., Diels, J., Vanorshoven, J., Feyen, J., and Bouma, J. (1992). Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56:1371-1378.
- Vereecken, H., Maes, J., and Feyen, J. (1990). Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149:1-12.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., and Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, 148:389-403.
- Viscarra Rossel, R. A. and Behrens, T. (2010). Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158:46-54.
- Viscarra Rossel, R. A. V. (2008). ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90: 72-83.
- ViscarraRossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., and Skjemstad, J. O. (2006c). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59-75.
- Walkley A. J. and Black I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
- Weynants, M., Vereecken, H., and Javaux, M. (2009). Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-Form Hydraulic Model. *Vadose Zone Journal*, 8(1): 86-95.
- Zhang, T., Li, L., and Zheng, B. (2013). Estimation of agricultural soil properties with imaging and laboratory spectroscopy. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7:1-25.