



# سَنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران | سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۳  
Iranian Remote Sensing & GIS | Vol. 6, No. 3, Autumn 2014

۱۱۵-۱۰۳

## استفاده از عکس هوایی و قابلیت‌های GIS در برآورد رشد طولی فرسایش خندقی مطالعه موردی: حوزه آبخیز سمل، استان بوشهر

فاطمه توکلی‌راد\*<sup>۱</sup>، حسن احمدی<sup>۲</sup>، علی‌اکبر نظری سامانی<sup>۳</sup>، غلامرضا راهی<sup>۴</sup>، اسماعیل عباسی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۲. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۳. استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۴. استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی بوشهر
۵. کارشناس ارشد بیابان‌زدایی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی بوشهر

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۲۰

### چکیده

فرسایش خندقی یکی از مخرب‌ترین انواع فرسایش آبی است که ارائه مدلی فراگیر و جهانی با توجه به جنبه‌های مختلف آن دشوار است. کسب اطلاعات از سابقه رفتار خندق و نحوه گسترش آن نیازمند پایش مستقیم سالانه است، که به دلیل هزینه و زمان عملاً در شرایط ایران امکان‌پذیر نیست. سنجش از دور و GIS و داده‌های حاصل از این فناوری می‌توانند با فراهم آوردن داده‌های مکانی در ابعاد وسیع، در چنین ارزیابی‌هایی نقش اساسی داشته باشند. هدف از پژوهش حاضر برآورد رشد طولی خندق‌ها با استفاده از عکس‌های هوایی دو دوره زمانی و به وسیله روش رقومی سازی سختگیرانه مبتنی بر هندسه فریم (با استفاده از دیپازتو و اطلاعات و علائم حاشیه‌ای عکس) است. مدل رقومی مورد استفاده برای اورتکتیفای کردن عکس‌های هوایی، از خطوط توپوگرافی اصلی و فرعی، نقاط ارتفاعی، آبراهه‌ها، مناطق سایه، صخره‌ها و سطوح آبی در محیط PCI و با ابعاد سلول ۷×۷ متر به دست آمد. با توجه به اندازه‌گیری‌ها، میانگین رشد طولی خندق‌ها به وسیله عکس هوایی، ۱/۳ متر در سال به دست آمد. براساس یافته‌های پژوهش حاضر مشخص شد که با استفاده از عکس‌های هوایی و GIS می‌توان مقدار رشد طولی خندق‌ها را با دقت خوبی به دست آورد. آنالیزهای رگرسیونی انجام شده نشان دادند که بین مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق، فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز، ارتفاع هدکت و SAR (نسبت جذب سدیم) با گسترش طولی خندق رابطه معنادار وجود دارد.

**کلیدواژه‌ها:** آنالیز رگرسیونی، فرسایش خندقی، عکس هوایی، رقومی سازی سختگیرانه، بوشهر.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: بوشهر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی. تلفن: ۰۹۳۹۰۷۸۰۴۱۹

## ۱- مقدمه

Poesan et al., 2003). دلیل نادر بودن مطالعات فرایند فرسایش خندقی و مدل‌سازی آن می‌تواند همین امر باشد (Siderchuk, 2005; Gomez et al., 2003).

پیشینه اقدامات انجام‌شده، درباره مدل‌سازی فرسایش خندقی نشان می‌دهد که پژوهش‌های جدی در زمینه مدل‌سازی فرسایش‌های شیاری و خندقی عملاً از دهه ۱۹۷۰ در جهان آغاز شده و اکثر مدل‌های ارائه‌شده نیز از نوع مدل‌های استوکاستیک و محدود به مناطق تحت فرسایش هزار دره بودند. اگرچه عوامل مؤثر در رخداد فرسایش خندقی تا حدودی همگون و مشابه‌اند، اما رشد و گسترش فرسایش خندقی در هر منطقه یا ناحیه متفاوت است و از عوامل یکسان، همگون و مشترکی تبعیت نمی‌کند. چه‌بسا به همین دلیل تا کنون به‌رغم تلاش‌های فراوان انجام‌شده در نقاط مختلف جهان، مدل فراگیری برای پیش‌بینی شکل‌گیری، رشد و گسترش طولی این نوع فرسایش ارائه نشده است (قدوسی، ۱۳۸۲).

اگرچه خندق‌ها به‌علت کوچک‌بودن ابعادشان در بسیاری از نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی نیستند، اما با استفاده از GPS و داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا به‌همراه GIS می‌توان حجم خندق‌ها را به‌طور دقیق و مؤثر اندازه گرفت. سامانه اطلاعات جغرافیایی ابزار قدرتمندی برای جمع‌آوری اطلاعات مفید و مناسب در زمینه پراکندگی مکانی فرسایش و عوامل مؤثر بر آن به‌منظور تفکیک و پهنه‌بندی مناطق است (Manchanda & Kudrat, 2012).

خندق آبراه‌های نسبتاً دائمی است که هنگام بارندگی جریان‌های موقت آب از آن می‌گذرد و مقدار بسیار زیادی رسوب از طریق آن تخلیه می‌شود (رفاهی، ۱۳۷۴). شروع و ایجاد خندق نتیجه مجموعه‌ای از فرایندهاست، به‌طوری‌که در هر منطقه با توجه به شیب، نوع و ضخامت خاک، و نوع و تراکم پوشش، فرایندهای مختلفی حاکم است. ولی فرایند غالب و سازوکار ایجاد بالاکنند به‌صورت فرایندی آستانه‌ای عمل می‌کند (نظری سامانی، ۱۳۸۷)<sup>۱</sup>. این نوع فرسایش در شیب‌های حداکثر تا ۱۵ درصد و در مناطقی که سازندهای زمین‌شناسی دارای املاح گچ یا سایر املاح محلول در آب باشند، روی دشت‌ها و دشت‌سرها و کمتر روی دامنه‌ها ایجاد می‌شود (احمدی، ۱۳۷۸). فرسایش خندقی عمدتاً در مطالعات نادیده گرفته می‌شود، زیرا فرایندهای تشکیل فرسایش خندقی هم برای مطالعه و هم برای کنترل بسیار دشوار است. پژوهش‌های بسیار زیادی در مورد حساسیت خاک به فرسایش شیاری و بین‌شیاری انجام شده، که منجر به ایجاد و بسط مدل‌های زیادی مانند USLE، RUSLE، WEPP شده است. اما پیش‌بینی توسعه و گسترش فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های ریاضی بسیار دشوار است، زیرا مؤلفه‌های درگیر در افزایش این نوع فرسایش به‌آسانی قابل تشخیص و مطالعه نیستند (Ehiorobo & Audu, 2012). بررسی نوع و به‌ویژه توزیع عمودی مقاومت افق‌های مختلف خاک به فرسایش که تا حد زیادی روی اندازه، عمق و شکل مقطع عرضی خندق‌ها تأثیر دارد، نشان داده است که بسیاری از خندق‌ها ابتدا به سرعت ابعاد خود را توسعه می‌دهند و این موضوع کنترل فرسایش خندقی را از لحاظ فنی بسیار مشکل و پرهزینه ساخته است (Valentin et al., 2005, Thomas et al., 2004, )

۱. بررسی سازوکارهای مؤثر بر فرسایش خندقی به‌منظور تعیین آستانه‌های توپوگرافی، رواناب و سهم رسوب حاصل از آن، پایان‌نامه دکتری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.  
۲. مدل‌سازی، مورفولوژی فرسایش خندقی و پهنه‌بندی خطر آن، پایان‌نامه دکتری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.

به‌همراه فناوری‌های سنجش از دور و GIS، نقش مؤثری در شناسایی و مطالعه فرسایش خندقی دارد. بنابراین هدف پژوهش حاضر، بررسی کارایی قابلیت‌های GIS و عکس‌های هوایی رقومی شده در برآورد گسترش طولی فرسایش خندقی است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

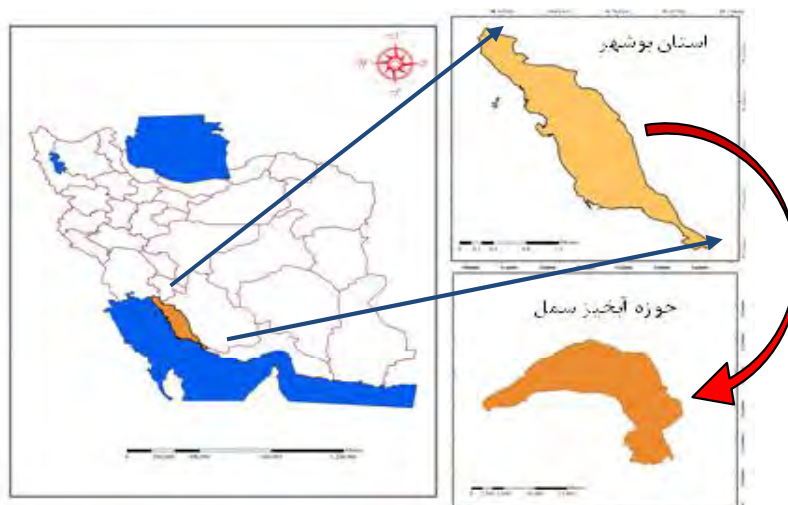
پژوهش حاضر در حوزه آبخیز سمل در نزدیکی روستای سمل واقع در ۱۵ کیلومتری شهرستان برازجان واقع در استان بوشهر انجام شد. محدوده مطالعاتی بین طول جغرافیایی ۷' - ۵۱° تا ۲۵' - ۵۱° شرقی و عرض جغرافیایی ۵۹' - ۲۸° تا ۱۱' - ۲۹° شمالی واقع شده است. مساحت این حوزه بر مبنای نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰ برابر ۲۹۷۵۰ هکتار است و طبق مطالعات آبخیزداری سال ۱۳۷۲ به سه حوزه کوچک‌تر تقسیم شده است. اقلیم منطقه از نوع بیابانی (طبقه‌بندی دو مارتن) است و بارندگی آن منشأ مدیترانه‌ای دارد، با مقدار متوسط سالانه ۲۲۰ میلی‌متر که اکثر آن در طول ماه‌های آبان تا اردیبهشت (طی ۳ الی ۶ واقعه) ریزش می‌کند. موضوع درخور توجه در این زمینه بارندگی‌های ۲۴ ساعته منطقه است که براساس تحلیل‌های آماری دارای مقدار متوسط ۶۰ میلی‌متر است و نشان از میزان بارندگی بالا در منطقه دارد. براساس نقشه‌های زمین‌شناسی، حوزه در محدوده زون زاگرس واقع شده است. سازندهای موجود در منطقه شامل گروه فارس (آجاجاری و میشان) در قسمت ارتفاعات کنگلومرای بختیاری و در محدوده دشت آبرفت‌های کواترنر است که حاصل تخریب و فرسایش سازندهای مارنی است.

۱۹۹۹). با تحلیل‌های انجام‌شده در GIS می‌توان مساحت و گسترش طولی و حجمی خندق‌ها و همچنین تغییرات آنها را با جزئیات و دقت کافی به‌منظور نشان‌دادن فرایندهای درگیر محاسبه کرد (Marzloff & Poesen, 2009). پایش و مطالعات تجربی و میدانی از شروع گسترش خندق باید در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی انجام شود (Vandekerckhove et al., 2003, Oostwoudt- (Wijdense & Bryan, 2001).

در برخی مطالعات از عکس‌های هوایی برای تعیین حجم خاک از دست‌رفته از طریق فرسایش خندقی استفاده شده است (Ries & Marzloff, 2003). هارلی و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده از اطلاعات رقومی و اعمال آنها روی سه سری عکس هوایی در دو منطقه از نیوزلند، متوسط رشد خندق‌های منطقه مورد بررسی را ۰/۷۳ تا ۰/۱ متر در سال محاسبه کردند. آنها دریافتند که عکس‌های هوایی قابلیت مناسبی برای بررسی رشد طولی خندق‌ها دارند. بسیاری از پژوهشگران، از جمله وندرکوف<sup>۱</sup> و همکاران (2000, 2003) و مارتینز - کازاسنوا<sup>۲</sup> و همکاران (2004)، استفاده از عکس‌های هوایی رقومی شده با دقت مکانی بالا را برای بررسی گسترش طولی خندق بسیار مفید می‌دانند.

یکی از روش‌های متداول که به تازگی در مطالعه فرسایش خندقی به کار گرفته می‌شود، ادغام GPS، GIS و فناوری سنجش از دور است (Ehiorobo & Izinyon, 2012). مطالعات در نیجریه نشان دادند که برداشت‌های میدانی به‌وسیله GPS در ترکیب با GIS و سنجش از راه دور می‌تواند برای پایش مورفولوژی و گسترش خندق‌ها استفاده شوند (Ehiorobo & Audu, 2012). GIS و تکنیک‌های سنجش از دور در شناسایی خندق‌ها قابل استفاده‌اند، البته سطح دقت آن به قدرت تفکیک مکانی، طیفی و زمانی تصاویر بستگی دارد (Dondofema, 2007).<sup>۳</sup> بررسی نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از عکس هوایی

1. Vandekerckhove
2. Martinez - Casanovas
3. Relationships between Gully Characteristics and Environmental Factors in the Zhulube Meso-Catchment, M.Sc. Thesis, University of Zimbabwe



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان بوشهر و کشور

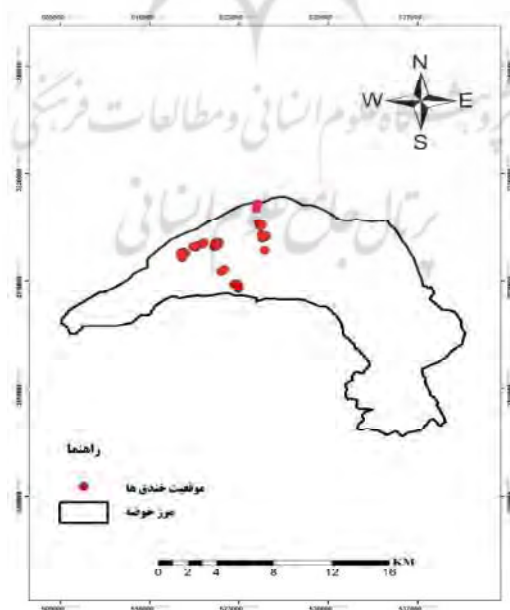
## ۲-۲- نحوه انجام پژوهش

### ۲-۲-۱- تهیه نقشه اولیه پراکنش خندق‌ها با

#### استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی

با تفسیر چشمی عکس‌های هوایی و استفاده از پایگاه اطلاعات زمینی Google Earth، نقشه اولیه زمین‌ها خندقی تعیین شد (شکل ۲). در این تفسیر با

بهره‌گیری از ویژگی‌هایی از جمله حضور و شناسایی بالاکند و تیره بودن دیواره خندق‌ها (در اثر عمودبودن و وجود رطوبت) - که پژوهشگران دیگر نیز به آن اشاره کرده‌اند - موقعیت خندق‌ها روی عکس هوایی و تصاویر ماهواره‌ای شناسایی شد (شکل ۳).



شکل ۲. نقشه پراکنش خندق‌ها در منطقه مطالعه‌شده



شکل ۳. نمایی از خندق‌های مطالعاتی روی زمین و تصویر ماهواره (Earth Google)

انجام عمل ارتوفتو مجموع عکس‌های هوایی که در مرحله اول نشان‌دهنده فرسایش خندقی بودند به صورت موزاییک کنار هم قرار داده شدند و تصویری با دقت مکانی  $1 \times 1$  متر و خطای (RMSE) کمتر از یک پیکسل به دست آمد. در نهایت نقشه وضعیت پراکنش خندق‌ها به همراه مرز حوزه روی هر کدام از عکس‌های هوایی تعیین شد.

#### ۲-۲-۴- بازدید زمینی برای تدقیق اطلاعات

##### عکس هوایی

از آنجاکه عکس‌های هوایی سال ۱۳۷۲ با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ تهیه شده‌اند، برای اطمینان بیشتر، تمامی مناطق شناسایی شده به وسیله برداشت زمینی مورد بازبینی و اطمینان قرار گرفت. برای بررسی و کشف عیوب تصاویر ارتوشده با انتخاب نقاط شاهد، پس از موزاییک‌کردن عکس‌های هوایی از انطباق لبه‌ها و بررسی عوارض مختلف بهره گرفته شد.

#### ۲-۲-۵- تعیین رشد طولی خندق‌ها

برای اندازه‌گیری گسترش طولی فرسایش خندق طی دو دوره ۱۳۷۲-۱۳۴۶ و ۱۳۸۷-۱۳۷۲، خندق‌هایی

#### ۲-۲-۲- تهیه مدل رقومی ارتفاع

در پژوهش حاضر برای محاسبه مدل رقومی با دقت بالا، با موزاییک‌کردن نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ کلیه اطلاعات اعم از خطوط توپوگرافی اصلی و فرعی، نقاط ارتفاعی، آبراهه‌ها، مناطق سایه، صخره‌ها و سطوح آبی در محیط PCI حاصل شد و مدل رقومی با ابعاد سلول  $7 \times 7$  متر به دست آمد. این مدل برای اصلاح رقومی عکس‌های هوایی به کار برده شد.

#### ۲-۲-۳- تهیه ارتوفتو عکس‌های هوایی

برای رقومی‌کردن عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۶ با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ و عکس‌های هوایی سال ۱۳۷۲ با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰، با استفاده از دیپازتیو<sup>۱</sup> و اطلاعات و علائم حاشیه‌ای عکس به همراه مختصات نقاط شاهد به عنوان نقاط کنترل زمینی (GCP) عمل شد. در این روش با حل مدل ریاضی عکس‌های هوایی، به منظور ارتباط دادن پیکسل‌ها در یک تصویر به محل واقعی آنها روی زمین، به روش مدل سخت‌گیرانه<sup>۲</sup> بر پایه هندسه فریم دوربین عمل شد. در این مدل با محاسبه محل و جهت دوربین در زمان عکسبرداری، عوارض روی زمین و اعوجاج‌های ذاتی دوربین (انحنای لنز، فاصله کانونی، آثار سه‌بعدی و جابه‌جایی حاشیه‌ها) شبیه‌سازی و جبران می‌شود (PCI Userguid). پس از انجام مراحل گفته‌شده، برای هر کدام از عکس‌های هوایی منطقه با

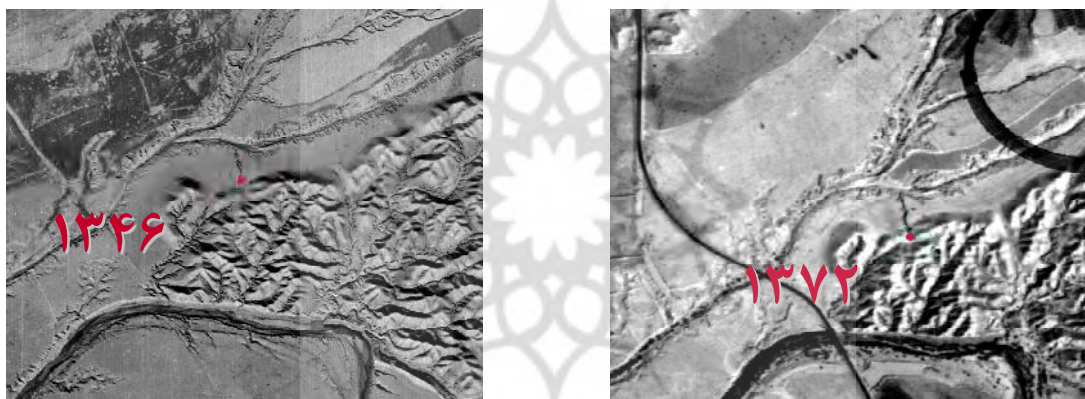
1. Diapositive  
2. Rigorous Method

هوایی رقومی شده، مشخص گردید که عکس‌های هوایی با دقت پذیرفتنی (زیر ۱/۵ پیکسل یا ۱ متر) قادر به ارائه میزان رشد طولی خندق‌ها هستند (شکل ۴). همچنین مشخص شد که می‌توان فرسایش خندقی را در قسمت‌های مختلف حوزه با شدت و تراکم‌های مختلف مشاهده کرد. برخی از خصوصیات توپوگرافی، ژئومورفولوژی و کاربری اراضی در حوزه آبخیز خندق‌ها، و ویژگی‌های مورفولوژی خندق‌های انتخابی پس از تفسیر عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرایی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

انتخاب شدند که روی هر دو عکس هوایی سال‌های ۱۳۴۶ و ۱۳۷۲ قابل تشخیص باشند. سپس، موقعیت رأس خندق‌ها مشخص شد و با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و Arcview گسترش طولی خندق در دوره ۱۳۴۶-۱۳۷۲ محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری گسترش طولی خندق در دوره ۱۳۷۲-۱۳۸۷ موقعیت رأس تا خروجی خندق‌ها در سال ۱۳۸۷ با دستگاه GPS به‌طور مستقیم در عرصه برداشت شد و روی عکس‌های هوایی رقومی شده سال ۱۳۷۲ منتقل شد.

### ۳- نتایج

براساس یافته‌های اولیه و بصری حاصل از عکس‌های



شکل ۴. موقعیت رأس خندق و میزان جابه‌جایی آن روی دو عکس هوایی ۱۳۴۶ (چپ) و ۱۳۷۲ (راست)

جدول ۱. ویژگی‌های توپوگرافی، ژئومورفولوژی و کاربری خندق‌های انتخابی در حوزه آبخیز سمل

فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز L (متر)	درصد سنگ و سنگریزه حوزه آبخیز خندق R	شیب کانال بالادست خندق S <sub>g</sub> %	ارتفاع هدکت H (متر)	کاربری	مساحت حوزه آبخیز خندق (مترمکعب) A <sub>t</sub>	خندق
۹۷	۴/۵	۵	۱/۲	کشاورزی	۳۶۲۳/۳	۱
۳۳	۴/۸	۴	۱/۴	کشاورزی	۶۸۰۵	۲
۱۵	۱/۵	۱۳/۸	۲/۷	مرتع	۱۶۴۱/۷	۳
۳۰	۱/۸	۱۳/۳	۲/۴	مرتع	۲۵۹۴/۱	۴
۷۸	۱/۵	۱/۶	۱/۳	مرتع	۵۹۵۵/۸	۵
۸۰	۱/۶	۴/۴	۱/۳	مرتع	۴۴۷۲/۲	۶
۱۱۰	۱/۲	۱۹/۵	۲/۵	مرتع	۸۷۸۶/۹	۷

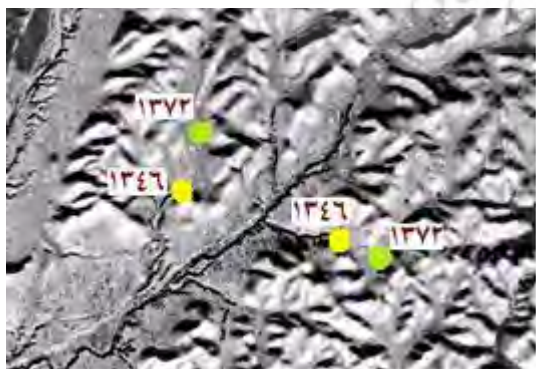
استفاده از عکس هوایی و قابلیت‌های GIS در برآورد رشد طولی فرسایش خندقی مطالعه موردی: حوزه آبخیز سمل، استان بوشهر

ادامه جدول ۱. ویژگی‌های توپوگرافی، ژئومورفولوژی و کاربری خندقی‌های انتخابی در حوزه آبخیز سمل

ارتفاع خندق	مساحت حوزه آبخیز خندق (مترمکعب) $A_p$	کاربری	ارتفاع هدکت (متر) H	شیب کانال بالادست خندق $S_g$ %	درصد سنگ و سنگریزه حوزه آبخیز خندق R	فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز (متر) L
۸	۲۷۰۶/۹	مرتع	۱/۶	۵/۵	۱/۴	۳۸
۹	۱۰۹۳/۸	کشاورزی	۰/۵	۱۷/۵	۱/۲	۱۰
۱۰	۲۸۷۸/۷	کشاورزی	۰/۶	۹/۵	۱/۳	۲۸
۱۱	۷۳۱۵/۵	کشاورزی	۰/۶	۷	۱/۵	۱۲۵
۱۲	۱۶۲۷/۴	کشاورزی	۱/۳	۵	۲۸/۵	۴۰
۱۳	۶۳۱۸/۸	مرتع	۱/۷۵	۸/۵	۱۵/۶	۱۳۵
۱۴	۲۳۷۰/۷	مرتع	۲/۲	۳/۳	۲/۸	۳۸
۱۵	۵۰۱۹/۲	مرتع	۱/۱	۲۰/۵	۲/۲	۲۰
۱۶	۲۸۸۴/۴	مرتع	۰/۹۵	۱۵/۸	۲/۵	۲۲
۱۷	۱۵۹۳/۵	مرتع	۲/۲	۹/۴	۲/۵	۲۵
۱۸	۲۵۶۰/۸	مرتع	۱/۱	۱۸/۳	۲/۳	۲۸
۱۹	۳۵۰۰/۴	مرتع	۱/۱	۲۲/۵	۳	۱۵
۲۰	۲۲۰۷/۸	مرتع	۰/۵	۲۵	۲/۴	۱۴
۲۱	۲۵۸۶/۵	مرتع	۱/۵۵	۹	۴/۵	۲۸
۲۲	۵۴۲۸/۵	مرتع	۱/۸	۴	۵/۸	۱۳۰
۲۳	۵۹۵۱/۵	مرتع	۰/۸	۳	۶/۵	۱۰۵
۲۴	۳۷۹۹/۹	مرتع	۱/۳	۶/۵	۷/۱	۶۷
۲۵	۴۸۸۰/۶	مرتع	۰/۷	۶/۵	۳/۸	۴۰

۳-۱- نتایج حاصل از اندازه‌گیری رشد طولی خندق‌ها

مقایسه با خندق‌های دیگر می‌تواند دلیل بیشتر بودن گسترش طولی این خندق باشد.



شکل ۵. بررسی میزان گسترش طول خندق‌ها در دوره زمانی ۱۳۴۶-۱۳۷۲

با توجه به انتقال موقعیت رأس خندق‌ها از روی عکس‌های سال ۱۳۴۶ روی عکس‌های سال ۱۳۷۲ مقدار گسترش طولی خندق‌ها در دوره ۱۳۴۶-۱۳۷۲ محاسبه شد (شکل ۵). همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، متوسط گسترش طولی خندق‌ها ۱/۳۶ متر در سال و بیشترین میزان گسترش طولی خندق مربوط به خندق ۷ با میزان ۲/۷ متر در سال است. بیشترین مساحت حوزه آبخیز (۸۷۸۶/۹ مترمربع) به‌همراه بالابودن ارتفاع هدکت (۲/۵ متر) و فاصله هدکت این خندق تا مرز حوزه آبخیز (۱۱۰ متر) در

فاطمه توکلی‌راد و همکاران

جدول ۲. میزان رشد طولی اندازه‌گیری‌شده خندق‌ها و مقدار متوسط سالانه و کل آن

خندق	گسترش طولی محاسبه‌شده در دوره ۱۳۷۲-۱۳۸۷		گسترش طولی محاسبه‌شده در دوره ۱۳۴۶-۱۳۷۲		متر
	متر در سال	متر	متر در سال	متر	
۱	۱/۲۱	۳۱/۴۶	۱/۷۶	۲۶/۴	۲۸/۹۳
۲	۱/۳	۳۳/۸	۱/۴۳	۲۱/۴۵	۲۷/۶۳
۳	۱/۷۲	۴۴/۷۲	۰/۷۲	۱۰/۸	۲۷/۷۶
۴	۱/۴۵	۳۷/۷	۱/۱۸	۱۷/۷	۲۷/۷
۵	۲/۵	۶۵	۱/۸۴	۲۷/۶	۴۶/۳
۶	۲/۶	۶۷/۶	۲/۴۹	۳۷/۳۵	۵۲/۴۸
۷	۲/۸۴	۷۳/۸۴	۲/۵۷	۳۸/۵۵	۵۶/۲
۸	۱/۴۵	۳۷/۷	۱/۷۷	۲۶/۵۵	۳۲/۱۳
۹	۰/۳۳	۸/۵۸	۰/۱۵	۲/۲۵	۵/۴۲
۱۰	۱/۶۷	۴۳/۴۲۲	۱/۷۲	۲۵/۸	۳۴/۶۱
۱۱	۱/۵۸	۴۱/۰۸	۱/۷۱	۲۵/۶۵	۳۳/۳۷
۱۲	۰/۷۹	۲۰/۵۴	۰/۳۹	۵/۸۵	۱۳/۲
۱۳	۰/۶۵	۱۶/۹	۰/۳۲	۴/۸	۱۰/۸۵
۱۴	۰/۶۹	۱۷/۹۴	۱/۱۲	۱۶/۸	۱۷/۳۷
۱۵	۲/۱۵	۵۵/۹	۱/۹۵	۲۹/۲۵	۴۲/۵۸
۱۶	۰/۲۲	۵/۷۲	۰/۶۶	۹/۹	۷/۸۱
۱۷	۰/۷۱	۱۸/۴۶	۱/۶۷	۲۵/۰۵	۲۱/۷۶
۱۸	۱/۳۸	۳۵/۸۸	۱/۶	۲۴	۲۹/۹۴
۱۹	۱/۳۶	۳۵/۳۶	۱/۰۶	۱۵/۹	۲۵/۶۳
۲۰	۱/۴	۳۶/۴	۰/۴۴	۶/۶	۲۱/۵
۲۱	۰/۸۵	۲۲/۱	۰/۵۶	۸/۴	۱۵/۲۵
۲۲	۱/۳۱	۳۴/۰۶	۱/۵۴	۲۳/۱	۲۸/۵۸
۲۳	۱/۲۳	۳۱/۹۸	۰/۲۲	۳/۳	۱۷/۶۴
۲۴	۱/۳۳	۳۴/۵۸	۱/۳۶	۲۰/۴	۲۷/۴۹
۲۵	۱/۲۹	۳۳/۵۴	۰/۷	۱۰/۵	۲۲/۰۲
متوسط	۱/۳۶	۳۵/۳۷	۱/۲۳	۱۸/۵۵	۲۶/۹۶



سنگریزه، رشد طولی کاهش می‌یابد. رابطه شیب کانال بالادست منتهی به خندق با میانگین رشد طولی به صورت مثبت است و با افزایش شیب بالادست خندق، رشد طولی افزایش می‌یابد.

### ۳-۳- تأثیر کلیه پارامترهای توپوگرافی، مورفولوژی خندق و فیزیکی - شیمیایی خاک بر گسترش طولی خندق

به منظور بررسی تأثیر کلیه پارامترهای توپوگرافی، مورفولوژی خندق و فیزیکی - شیمیایی خاک بر گسترش طولی خندق، از رگرسیون خطی چندمتغیره بین میانگین گسترش طولی در دوره ۱۳۸۷-۱۳۴۶ و مؤلفه‌های توپوگرافی، مورفولوژی خندق و پارامترهای فیزیکی - شیمیایی خاک استفاده شد. نتایج جدول ۴، معنادار بودن تأثیر SAR، مساحت کل حوزه آبخیز خندق ( $A_1$ )، مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق ( $A_1$ ) و فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز ( $L$ ) در سطح ۱ درصد و ارتفاع هدکت ( $H$ ) در سطح ۵ درصد بر میانگین گسترش طولی خندق دو دوره است.

کمترین میزان گسترش طولی خندق مربوط به خندق ۹ به میزان ۰/۲۴ متر در سال است. با توجه به نتایج به دست آمده، کمترین مساحت حوزه آبخیز (۱۰۹۳/۸ مترمربع)، کمترین فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز (۱۰ متر) و کمترین ارتفاع هدکت (۰/۵ متر) مربوط به این خندق است، که می‌تواند باعث کمتر شدن گسترش طولی این خندق در مقایسه با خندق‌های دیگر شده باشد.

### ۳-۲- تأثیر پارامترهای توپوگرافی و مورفولوژی خندق بر گسترش طولی خندق

نتایج حاصل از رگرسیون خطی چندمتغیره بین میانگین گسترش طولی در دوره ۱۳۸۷-۱۳۴۶ و مؤلفه‌های توپوگرافی و مورفولوژی خندق در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج جدول، معنادار بودن تأثیر درصد سنگ و سنگریزه موجود در حوزه آبخیز بالادست خندق ( $R$ ) و شیب کانال بالادست منتهی به خندق ( $Sg$ ) را بر میانگین گسترش طولی دو دوره در سطح ۵ درصد نشان می‌دهند. رابطه درصد سنگ و سنگریزه حوزه آبخیز بالادست خندق با میانگین رشد طولی به صورت منفی است و با افزایش درصد سنگ و

جدول ۳. رگرسیون خطی چندمتغیره بین میانگین گسترش طولی خندق در دو دوره و مؤلفه‌های توپوگرافی و مورفولوژی خندق

مدل	B	T	Sig.	$R^2$
Constant	۱/۴۵۸	۸/۹۵۲	۰/۰۰۰	۰/۱۷۴
R	-۰/۰۴۹	-۲/۲۰۴	۰/۰۳۸	
Constant	۱/۹۰۵	۷/۵۳۷	۰/۰۰۰	۰/۳۲۴
R	-۰/۰۰۶	-۲/۸۲۸	۰/۰۱	
Sg	۰/۰۴۱	۲/۲۰۵	۰/۰۳۸	

فاطمه توکلی‌راد و همکاران

جدول ۴. نتیجه رگرسیون خطی چندمتغیره بین میانگین گسترش طولی خندق در دو دوره و مؤلفه‌های توپوگرافی، مورفولوژی خندق و فیزیکی - شیمیایی خاک

مدل	B	T	Sig	R <sup>2</sup>
۱	Constant	۸/۱۲۲	۰/۰۰۰	۰/۲۶
	SAR	۲/۸۶۴	۰/۰۰۹	
۲	Constant	۲/۴۶	۰/۰۲۲	۰/۴۱۹
	SAR	۳/۵۹	۰/۰۰۲	
	At	۲/۴۳	۰/۰۲۴	
۳	Constant	۱/۴۴۸	۰/۱۶۲	۰/۷۱۲
	SAR	۲/۹۷۱	۰/۰۰۷	
	At	۵/۵۳۸	۰/۰۰۰	
	A1	۴/۶۳	۰/۰۰۰	
	Constant	۰/۲۹۴	۰/۷۷۲	
۴	SAR	۳/۷۱	۰/۰۰۱	۰/۸۰۵
	At	۶/۸۸۲	۰/۰۰۰	
	A1	۶/۱۱۸	۰/۰۰۰	
	L	۳/۰۸۲	۰/۰۰۶	
	Constant	-۱/۸۶۲	۰/۰۷۸	
	SAR	۳/۵۱۶	۰/۰۰۲	
	At	۸/۲۲	۰/۰۰۰	
۵	A1	۷/۴۰۱	۰/۰۰۰	۰/۸۵۶
	L	۳/۷۵۳	۰/۰۰۱	
	H	۲/۵۹۳	۰/۰۱۸	
		۴/۶۲	۰/۰۰۰	

۴- بحث و نتیجه‌گیری

براساس یافته‌های پژوهش حاضر مشخص شد که با استفاده از عکس‌های هوایی و قابلیت‌های GIS می‌توان مقدار رشد طولی خندق‌ها را با دقت پذیرفتنی (زیر ۱/۵ پیکسل یا ۱ متر) به‌دست آورد. شناسایی پدیده فرسایش خندقی که عارضه‌ای زمینی و دارای توزیع

مکانی است، رابطه‌ای قوی با دقت مکانی داده‌های مورد استفاده دارد. مطالعات در نیجریه نشان داده است که GIS و تکنیک‌های سنجش از دور در شناسایی تشکیل و گسترش خندق‌ها کاربرد دارند. البته سطح دقت آن به قدرت تفکیک مکانی، طیفی و زمانی تصاویر بستگی دارد ( Dondofema, 2007, Ehiorobo & Ehiorobo & )

(۱۳۸۵)، مالیک (۲۰۰۷)، هارلی و همکاران (۱۹۹۹) و مارتینز - کازاسنوواز (۲۰۰۳) می‌توان به حساس بودن خاک منطقه (رسوبات حاصل از تخریب سازندهای گروه فارس) و بارندگی‌های ۲۴ ساعته با شدت بالا (۱۶۶ میلی‌متر در ۲۴ ساعت) و منطبق بودن خندق‌های منطقه بر شبکه زهکش حوزه مرتبط دانست.

بررسی و ارزیابی نقش مؤلفه‌های مختلف توپوگرافی و مورفولوژی خندق، وجود ارتباط معنادار بین این متغیرها و رشد طولی خندق را نشان می‌دهد. وجود رابطه مثبت بین شیب کانال بالادست منتهی به خندق، مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق، فاصله هدکت تا مرز حوزه آبخیز و ارتفاع هدکت با رشد طولی خندق نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل در رشد طولی خندق‌ها، میزان رواناب دریافتی از طریق هر خندق است. انتظار می‌رود با افزایش طول هر خندق و کاهش مساحت و فاصله تا رأس آبخیز خندق از میزان رواناب کاسته شود و در طول زمان از رشد طولی خندق‌ها کم شود (نظری، ۱۳۸۷، Poesen et al., 2003). معکوس بودن رابطه با درصد سنگ و سنگریزه موجود در حوزه آبخیز بالادست خندق (R)، حاکی از تأثیر آن بر زبری زمین و کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش اثر رواناب است. بنابراین با افزایش زبری در آبخیز بالادست خندق‌ها به وسیله پوشش گیاهی یا سنگریزه سطحی می‌توان رشد طولی خندق‌ها را کاهش داد.

وندکرکوف و همکاران (۲۰۰۳) در بررسی پیشروی طولی خندق‌ها در جنوب اسپانیا دریافتند که حجم فرسایش خندقی رابطه توانی با مساحت آبخیز بالادست خندق‌ها دارد. سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۸۶) درصد کم سنگ و سنگریزه و افزایش درصد خاک لخت در

Izinyon, 2012). استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا به همراه قابلیت‌های GIS، ابزارهای قدرتمندی در مطالعه این شکل از فرسایش به‌شمار می‌آیند. کسب اطلاعات از سابقه رفتار یک خندق و نحوه گسترش آن نیازمند پایش مستقیم سالانه است که به دلیل هزینه و زمان عملاً در شرایط ایران امکان‌پذیر نیست. عکس‌های هوایی به همراه قابلیت‌های GIS با فراهم کردن بستری برای درک شرایط قبلی می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار آبی و برآورد گسترش طولی خندق‌ها مناسب باشد. پژوهشگران قبلی از جمله وندکرکوف و همکاران (۲۰۰۰ و ۲۰۰۳)، مارتینز - کازاسنوواز و همکاران (۲۰۰۴) و هارلی و همکاران (۱۹۹۹)، استفاده از عکس‌های هوایی رقومی شده با دقت مکانی بالا را برای بررسی گسترش طولی خندق بسیار مفید می‌دانند.

با توجه به اندازه‌گیری‌های میانگین رشد طولی خندق‌ها به وسیله عکس هوایی، میانگین رشد طولی خندق‌ها ۱/۳۶ متر در سال به دست آمد. محمدی (۱۳۸۵) متوسط رشد طولی خندق‌ها را در طول دوره ۱۳۸۵-۱۳۳۵، ۰/۲۰۶ متر در سال در حوزه آبخیز حبله‌رود اندازه‌گیری کرد. هارلی و همکاران (۱۹۹۹) متوسط رشد طولی خندق‌ها را در منطقه‌ای در نیوزیلند ۰/۱-۰/۷۳ متر در سال محاسبه کردند. مالیک (۲۰۰۷) در پژوهش‌های خود در لهستان نرخ متوسط رشد طولی خندق‌های کوچک را ۰/۶۳ متر در سال، نرخ متوسط رشد فرسایش خندقی در شیب‌ها را ۰/۵۲-۰/۲۱ متر در سال و نرخ متوسط فرسایش خندقی در کف دره‌ها را ۰/۱۸-۱/۹۸ متر در سال برآورد کرد. مارتینز - کازاسنوواز (۲۰۰۳) با اندازه‌گیری نرخ فرسایش خندقی بین سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۹۳ به وسیله عکس‌های هوایی، میزان پیشروی خندق‌ها را ۰/۲ متر در سال و حداکثر نرخ پیشروی هدکت خندق‌ها را ۰/۷ تا ۰/۸ متر در سال برآورد کرد. دلایل زیاد بودن گسترش طولی خندق‌ها در منطقه مطالعه شده را در مقایسه با پژوهش‌های محمدی

۱. واسنجی چهارم مدل پیش‌بینی رشد طولی فرسایش خندقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

- Gomez, B., Banburg, K., Marden, M., Trustum, N.A., Peacock, D.H. and Hoskin, P.J., 2003, **Gully Erosion and Sediment Production TC Weraroa Strem, New Zealand**, Water Resources, V. 39(7), P. 1187.
- Harley, D., Ronald, B. and Rose, C., 1999, **Digital Elevation Models as a Tool for Monitoring and Measuring Gully Erosion**, ITC, Vol. 1, P. 101.
- Malik, I., 2007, **Dating of Small Gully Formation and Establishing Erosion Rates in Old Gullies Under Forest by Means of Anatomical Changes in Exposed Tree Roots (Southern Poland)**, PP. 41-82.
- Manchanda, M.L. and Kudrat, M., 1999, **Present and Alternate Land use Base on Natural Resources Role of Remote Sensing and GIS**, Pre-conference Proceedings, Geomatics Beyond 2000, 9-11 March, Indian Institute of Remote sensing (IIRS), Dehrandun.
- Martinez-Casasnovas, J.A., 2003, **A Spatial Information Technology Approach for the Mapping and Quantification of Gully Erosion**, Catena, V. 50, PP. 293-308.
- Martinez-Casasnovas, J.A., 2004, **Assessment of Sidewall Erosion in Large Gullies Using Multitemporal DEMs and Logistic Regression Analysis**, Geomorphology, V. 58, PP. 305-321.
- Marzolf, I. and Poesen, J., 2009, **The Potential of 3D Gully Monitoring with GIS Using High-Resolution Aerial Photography and a Digital Photogrammetry System**, Geomorphology, V. 111, PP. 48-60.
- حوزه آبخیز بالادست خندق را موجب افزایش تولید رسوب ذکر کردند. بیشتر پژوهشگران نقش عوامل توپوگرافی را در توسعه خندق‌ها مورد توجه و تأکید قرار داده‌اند.
- یافته‌های پژوهش حاضر با یافته‌های محققان ذکر شده انطباق دارد. برای بررسی فرسایش خندقی با اتکا به ویژگی‌های توپوگرافی و اطلاعات حاصل از پیشینه آن به وسیله عکس‌های هوایی با قدرت مکانی بالا به همراه قابلیت‌های GIS می‌توان رفتار آبی آن مناطق حساس به این نوع فرسایش را تعیین کرد.
- ۵- منابع**
- احمدی ح، ۱۳۷۸، ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- رفاهی ح.ق، ۱۳۷۵، فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- سلیمان‌پور س. م. صوفی، ح. احمدی، ۱۳۸۶، بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی، تولید رسوب و هدررفت خاک در منطقه گوراسپید استان فارس، کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست.
- Ehiorobo, O.J. and Audu, H.A.P., 2012, **Monitoring of Gully Erosion in an Urban Area Using Geoinformation Technology**, Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, V.3 (2), PP. 270-275.
- Ehiorobo, O.J. and Izinyon, O.C., 2012, **Monitoring Gully Formation and Development for Effective Remediation and Control**, FIG Working Week 2012, Rome, Italy, 6-10 May.

- Ostwood Wijdenes, D. and Bryan, R.B., 2001, **Gully-head Erosion Processes on a Semi-arid Valley Floor in Kenya: A Case Study Into Temporal Variation and Sediment Budgeting**, Earth Surface Processes and Landforms, V. 26(9), PP. 911-933.
- Poesen, J.J., Nachtergale, J. and Verstrac, G., 2003, **Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs**, Catena, V. 50, PP. 91-133.
- Ries, J.B. and Marzloff, H.L., 2003, **Monitoring of Gully Erosion in the Central Ebro Basin by Large Scale Aerial Photographs taken from a Remotely Controlled Blimp**, Catena, V. 50, PP. 309- 328.
- Siderchuk, A., 2005, **Stochastic Component in the Gully Erosion Modeling**, Catena, V. 63, PP. 299-317.
- Thomas, J.T., Iverson, N.R., Burkest, M.R. and Kramer, L.A., 2004, **Long Term Growth of a valley – both Gully**, Earth Surface Processed and Land Forms, V. 2, PP. 995-1009.
- Valentin, C., Poesen, J. and Young, Li., 2005, **Gully Erosion: Impact, Factors and Control**, Catena, V. 63, PP. 132-153.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J. and Govers, G., 2003, **Medium Term Gully Headcut Rates in Southeast Spain Determined From Aerial Photographs and Ground Measurements**, Catena, V. 50, PP. 329-352.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., Oostwoud-wijdenes, D., Nachtengaele, J., Kosmas, C., Roxd, M.J. and Figueiredo, T.De., 2000, **Thresholds for Gully Initiation and Sedimentation in Mediterranean Europe**, Earth surface Processes and Land Forms, V. 25, PP. 1201-1220.

