

# ارائه مدل FCD محلی جدید مبتنی بر آستانه‌گذاری محلی به منظور بر آورد تاج پوشش جنگل در مناطق بزرگ

سعید آزادنژاد<sup>۲</sup>

مسعود طایفی فیجانی<sup>۱</sup>

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۳/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۱۳

\*\*\*\*\*

## چکیده

مدل نگارگر انبوهی تاج پوشش جنگلی (FCD) یکی از روش‌های مرسوم سنجش از دوری در ارزیابی تراکم جنگل است. دو ضعف بزرگ این مدل عدم امکان پیاده‌سازی برای سنجنده‌های فاقد باند حرارتی و دقت مکانی پایین نتایج حاصل از آن در جنگل‌های جلگه‌ای بخصوص در محدوده‌های مطالعاتی بزرگ مقیاس می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش گسترش و بهبود این مدل بر اساس دو ایده می‌باشد. در ایده اول شاخص حرارت مورد استفاده در این مدل با دو شاخص NLI و GNDVI، که بر اساس یک آزمون آماری مناسب تشخیص داده شدند، جایگزین شدند. بدین ترتیب اجرای این مدل برای سنجنده‌های فاقد باند حرارتی ممکن شد. در ایده دوم، به منظور غلبه بر چالش متغیر بودن شرایط جوئی و دمایی یک منطقه با وسعت بزرگ، یک مرحله حد آستانه‌گذاری محلی به این مدل افزوده شد تا دقت مدل برای مطالعات بزرگ مقیاس بهبود یابد. به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، از داده‌های لندست ۵ مربوط به سال ۱۳۶۶ و داده‌های لندست ۸ مربوط به سال ۱۳۹۶ برای محاسبه تراکم تاج پوشش جنگل‌های هیرکانی شمال کشور استفاده شد. انتخاب این منطقه و این داده‌ها ضمن روبرو کردن مدل پیشنهادی با یک منطقه مطالعاتی وسیع، امکان بررسی تغییرات مساحت تاج-پوشش جنگل‌های هیرکانی در طی ۳۰ سال گذشته (از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶) را فراهم کرد. نتایج نشان داد دقت کلی و ضریب کاپای مدل FCD بهبود یافته نسبت به مدل FCD اولیه به ترتیب حدود ۱۰ و ۱۴ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین نتایج این بررسی نشان داد مساحت جنگل‌های هیرکانی از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۹۶ در ارتفاعات پایین دست کاهش چشمگیری داشته است.

واژه‌های کلیدی: مدل FCD، شاخص NLI و GNDVI، حد آستانه‌گذاری محلی، جنگل‌های هیرکانی.

\*\*\*\*\*

۱- مربی گروه سیستم‌های فضایی، پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا m\_taefti@ari.ac.ir  
۲- کارشناس ارشد سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول). saeedazadnezhad@email.kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

یکی از جنبه‌های مهم مدیریت و نظارت طولانی مدت جنگل‌ها، ارزیابی تراکم آن‌ها است که مستلزم داشتن اطلاعات دقیق و به‌هنگام و صرف زمان و هزینه زیاد می‌باشد. سه استراتژی عمده در تعیین مشخصه‌های بیوفیزیکی و هندسی یک منطقه جنگلی روش‌های اندازه‌گیری مستقیم زمینی<sup>۱</sup> (Korhonen, Korhonen, Rautainen, & Stenberg, 2006) روش‌های غیر مستقیم نمونه‌برداری آماری و برآورد<sup>۲</sup> (Wani, Joshi, & Singh, 2015) و در نهایت روش‌های سنجش از دوری<sup>۳</sup> (Managhebi, Maghsoudi, & Zoj, 2018; Mette, Papathanassiou, & Hajnsek, 2004; Simard, Rivera-Monroy, Mancera-Pineda, Castañeda-Moya, & Twilley, 2008) جمع‌آوری داده‌های آماربرداری زمینی جنگل به صورت جامع و به‌هنگام، به‌ویژه برای مناطق وسیع و دور از دسترس پرهزینه و زمان‌بر است (Lu, 2006; Tsui, Coops, Wulder, & Marshall, 2013; Tsui, Coops, Wulder, Marshall, & McCardle, 2012). این در حالی است که ابزار سنجش از دور به عنوان روشی برای مطالعه اهداف در سطح وسیع، این امکان را فراهم می‌کند که مطالعات در سطح وسیع و با سرعت و دقت مناسبی پی گرفته شود (Azadnejad, Maghsoudi, & Perissin, 2019, 2020; e Silva, Xavier, da Silva, & Santos, 2020; Pepe et al., 2019; Reis, Dutra, Sant'Anna, & Escada, 2020).

در پژوهش‌های پیشین، از داده‌های نوری (Ottoen, Petch, Chen, Wang, Ren, Zhang, & Wang, 2019; Guimarães, Galo, da Silva Narvaes, & da Silva, 2019) رادار<sup>۴</sup> (Liu, Shen, Cao, Wang, & Cao, 2018; Tang et al., 2019; Forkuor et al., 2020) و یا ترکیبات آن‌ها (Wang, Ginzler, & Waser, 2020) برای نقشه برداری و نظارت بر پوشش‌های جنگلی و تغییرات زمانی آن‌ها استفاده شده است. مدل چگالی تاج‌پوشش جنگل<sup>۴</sup> یک روش سنجش از دوری ساده و در عین حال کارا برای محاسبه تاج-پوشش

جنگل‌ها است. به دلیل مزایایی مانند سهولت اجرا، عدم نیاز به داده آموزشی و عدم وابستگی به الگوی تاج‌پوشش مورد اقبال متخصصین سنجش از دور جنگل قرار گرفته است (Azizi, 2008; Deka, Tripathi, & Khan, 2013; Godinho, Gil, Guiomar, Neves, & Pinto-Correia, 2016; MIRZAEI, NIKNEJAD, & HOJJATI, 2015; Pal, Chakraborty, Malik, & Das, 2018; Sahana, Sajjad, & Ahmed, 2015; Sharma & Singh, 2018; Taefi Feijani, Azadnejad, Homayouni, & Moradi, 2019).

پال<sup>۵</sup> و همکاران از این مدل و داده‌های قدرت تفکیک مکانی بالای ماهواره LISS-4 برای محاسبه تاج-پوشش جنگل حوضه رودخانه سلی، منطقه بانکورا، بنگال غربی استفاده کردند (Pal et al., 2018). نتایج آن‌ها نشان داد ۷/۴۸ درصد از جنگل این ناحیه دارای تراکم بسیار کم، ۲/۶۳ درصد از تراکم کم، ۲۴/۸۴ درصد از تراکم متوسط، ۲۳/۹۲ درصد از تراکم بالا و ۳۱/۱۳ درصد از تراکم خیلی بالا برخوردار است. شرما<sup>۶</sup> و همکاران از داده‌های ماهواره LISS-4 برای ارزیابی تراکم جنگل‌های منطقه یامونانگار<sup>۷</sup> در ناحیه شمالی ایالت هاریانا با مدل FCD استفاده نمودند (Sharma & Singh, 2018). نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بیشتر سطح این منطقه از جنگل‌های با تراکم متوسط با مساحت ۲۳۹۴۸/۰۸ تشکیل شده است. همچنین حدود ۲۴/۲ درصد از مساحت این منطقه شامل جنگل‌های باز است که نیاز به برنامه‌ریزی برای افزایش تراکم و احیاء جنگل دارد. فیترینتو و همکاران با کمک مدل FCD و داده‌های لندست ۸ تراکم جنگل‌های دو منطقه کیمولانگ<sup>۸</sup> و کیکاسونگکا<sup>۹</sup> را برآورد کردند (Fitrianto, Darmawan, Tokimatsu, & Yoshikawa, 2019). شاهولی کوهشور و همکاران از مدل تراکم تاج-پوشش جنگل برای محاسبه تراکم جنگل‌های زاگرس استفاده کردند. در مطالعه آن‌ها طبقه‌بندی تراکم تاج‌پوشش در سه حالت ۶، ۴ و ۳ (طبقه ۳: کم تراکم، طبقه ۴: تراکم متوسط

5- Pal

6- Sharma

7- Yamunanagar

8- Cimulang

9- Cikasungka

1- Ground Measurement

2- Indirect Statistical Approach

3- Remote Sensing Approach

4- Forest Canopy Density (FCD)

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( ... )  
 ارائه مدل FCD محلی جدید مبتنی بر آستانه‌گذاری ... / ۳۹

شدن مدل برای سنجنده‌های فاقد باند حرارتی، شاخص حرارت با دو شاخص NLI و GNDVI بر اساس یک آزمون آماری جایگزین شد. بدین ترتیب دو شاخص گیاهی NLI و GNDVI به مدل کمک خواهند کرد تا پوشش گیاهی و سایه ناشی از آن با دقت بالاتری شناسایی شود. بنابراین، این کار می‌تواند ضعف مدل ناشی از ادغام خاک سیاه با پوشش گیاهی را جبران کند. همچنین در راهکار دوم، به منظور بهبود عملکرد مدل در محاسبه شاخص سایه پیشرفته، یک مرحله حد آستانه‌گذاری محلی به این مدل افزوده شد. حسن تعریف حد آستانه محلی، غلبه بر تغییرات شرایط جوی در مناطق وسیع می‌باشد. همچنین تعریف حد آستانه‌های متفاوت برای جنگل‌های واقع در ارتفاعات و جنگل‌های جلگه‌ای می‌تواند به بهبود تفکیک پوشش گیاهی جنگل از پوشش گیاهی غیرجنگل در مناطق جلگه‌ای کمک کند. به منظور بررسی و ارزیابی مدل بهبود یافته، این مدل برای داده‌های لندست ۵ سال ۱۳۶۶ و داده‌های لندست ۸ سال ۱۳۹۶ مربوط به جنگل‌های هیرکانی ایران پیاده شد. انتخاب داده لندست در این مطالعه به منظور مقایسه دقت نتایج رویکرد استفاده از باند حرارتی (مدل FCD بهبودیافته) با رویکرد عدم استفاده از این باند (مدل FCD اولیه) بود.

نگاهی به مطالعاتی که تاکنون در مطالعه و پایش جنگل‌های هیرکانی انجام گرفته است (Attarchi, 2014; Attarchi & Gloaguen, 2014; Khosrow & Reza, 2017; Ronoud & Darvishsefat, 2016) نشان می‌دهد در این مطالعات از داده‌های ماهواره‌ای سری لندست استفاده شده است. تصاویر لندست از دقت مکانی بالایی برای پایش تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی برخوردار نمی‌باشد. از طرفی دیگر برخی از مدل‌ها مانند مدل FCD کاملاً وابسته به باند حرارتی سنجنده می‌باشد و امکان پیاده سازی آن برای داده‌های با رزولوشن مکانی بالا مانند Sentinel-2 وجود ندارد. به همین دلیل نتایج بدست آمده در مطالعات پیشین در مورد کاهش یا افزایش مساحت جنگل‌های هیرکانی با یکدیگر همخوانی ندارد. در حالی که مدل ارائه شده در تحقیق حاضر می‌تواند برای تصاویر

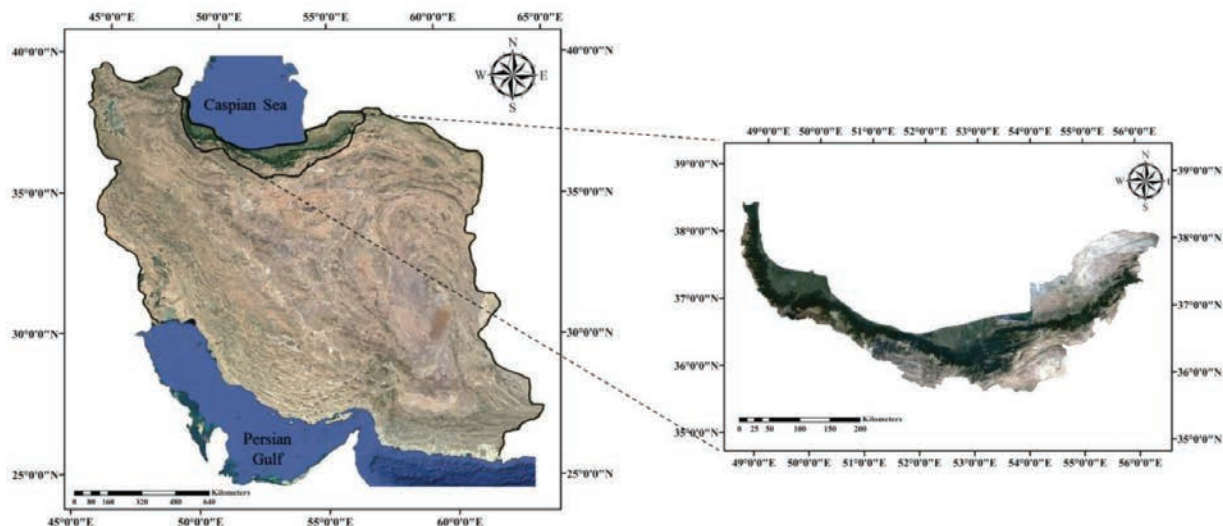
و طبقه ۶: با تراکم زیاد) طبقه صورت گرفت (Shaholi et al., 2014). نتایج آن‌ها نشان داد این مدل از دقت کافی برای پایش جنگل‌های زاگرس برخوردار است.

مدل FCD از چهار شاخص پوشش گیاهی<sup>۱</sup>، حرارت<sup>۲</sup>، سایه<sup>۳</sup> و خاک بایر<sup>۴</sup> استفاده می‌کند (Rikimaru, Roy, & Miyatake, 2002). با استفاده از این شاخص‌ها، شاخص تراکم پوشش گیاهی<sup>۵</sup> و شاخص پیشرفته سایه<sup>۶</sup> محاسبه و در نهایت نقشه تراکم تاج پوشش جنگل بدست می‌آید. در این مدل شاخص ASI از ترکیب دو شاخص SI و TI با استفاده از انتخاب یک حد آستانه محاسبه می‌شود. همچنین شاخص VD از ترکیب دو شاخص BI و AVI محاسبه می‌شود.

علی‌رغم همه مزایا، هنوز دو نقص وجود دارد که گسترش کاربرد این مدل را محدود می‌کند. از آنجا که این مدل از یک شاخص حرارتی استفاده می‌کند، نمی‌تواند برای سنجنده‌هایی که باند حرارتی ندارند (مانند Sentinel-2 یا Spot-5,6) اجرا شود. در مدل FCD، شاخص حرارتی به منظور تفکیک جنگل‌های متراکم از جنگل‌های کم تراکم و همچنین تفکیک خاک سیاه از سایه پوشش گیاهی استفاده می‌شود. از طرفی، با توجه به اینکه در اکثر سنجنده‌ها رزولوشن مکانی این باند نسبت به دیگر باندها کمتر است استفاده از آن در مدل باعث کاهش دقت نتایج می‌شود. ضعف دوم این مدل این است که در مناطق بزرگ، تغییرات مکانی در شرایط حرارتی و جوی امکان تعریف مقدار آستانه عمومی و دقیق را برای کل منطقه محدود می‌کند. زیرا در این مناطق تغییرات شرایط جوی و دمایی سبب می‌شود تا تعریف یک حد آستانه سراسری برای ترکیب دو شاخص SI و TI و محاسبه ASI منجر به کاهش دقت نتایج شود.

در تحقیق حاضر، به منظور برطرف نمودن این دو چالش دو راهکار ارائه شد. در راهکار اول به منظور کارا

- 1- Advanced Vegetation Index (AVI)
- 2- Thermal Index (TI)
- 3- Shadow Index (SI)
- 4- Bare soil Index (BI)
- 5- Vegetation Density (VD)
- 6- Advanced Shadow Index (ASI)



نگاره ۱: جنگل‌های ناحیه رویشی هیرکانی به عنوان محدوده مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق

سنجنده	تاریخ میلادی تصویر	ردیف	مسیر	سنجنده	تاریخ میلادی تصویر	ردیف	مسیر
OLI	2017-08-28	34	162	TM	1987-08-10	34	162
OLI	2017-06-25	35	162	TM	1987-08-10	35	162
OLI	2017-07-18	34	163	TM	1987-07-16	34	163
OLI	2017-07-18	35	163	TM	1987-08-14	35	163
OLI	2017-08-10	35	164	TM	1987-07-23	35	164
OLI	2017-09-02	34	165	TM	1987-09-16	34	165
OLI	2017-06-30	35	165	TM	1987-09-16	35	165
OLI	2017-08-08	34	166	TM	1987-07-05	34	166
OLI	2017-08-15	33	167	TM	1987-07-28	33	167

مورد مطالعه قرار گرفت. کشیدگی شرقی-غربی این حوضه شرایط متفاوت دمایی و اتمسفری را باعث می‌شود. این شرایط تنوع گونه‌ای و به تبع آن تیپولوژیک جنگل‌های هیرکانی را سبب شده است که خود چالشی بزرگ برای مدل FCD است.

Sentinel-2 نیز پیاده‌سازی شود و گزارش دقیق‌تری از روند تغییرات سطح این جنگل‌ها ارائه دهد.

## ۲- مواد و روش‌ها

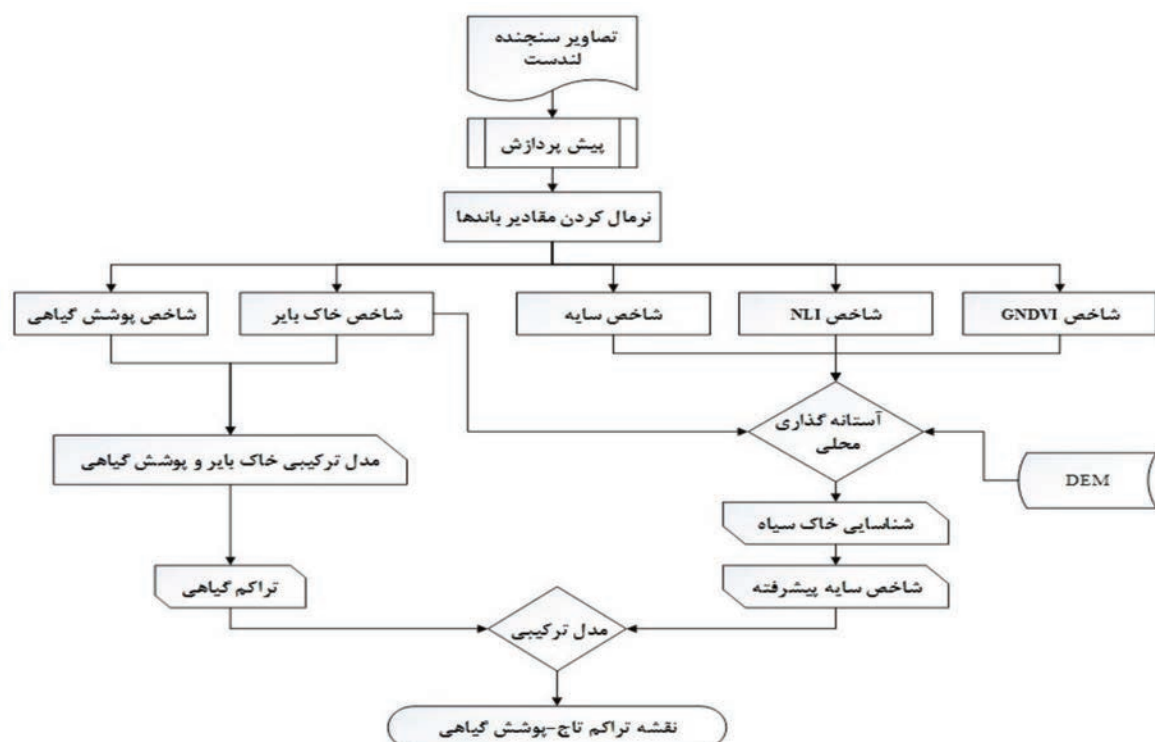
### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی حوضه آبخیز خزر می‌باشد. حوضه آبخیز در مطالعات محیط طبیعی به عنوان واحد مطالعاتی استاندارد قلمداد می‌شود. از همین روی و با توجه به ماهیت کاربردی پژوهش حوضه آبخیز خزر به عنوان منطقه مطالعاتی لحاظ شد (نگاره ۱). جنگل‌های هیرکانی یا خزری واقع در این حوضه

### ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر لندست ۵ مربوط به سال ۱۳۶۶ و داده‌های لندست ۸ مربوط به سال ۱۳۹۶ استفاده شد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مشخصات تصاویر مورد استفاده در این تحقیق آمده است.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )  
 ارائه مدل FCD محلی جدید مبتنی بر آستانه گذاری ... / ۴۱



نگاره ۲: روندنمای مدل FCD بهبودیافته

### ۳-۲- رویکرد پیشنهادی

دو شاخص سایه و حرارت با حد آستانه گذاری محاسبه می شود. فلسفه استفاده از شاخص حرارت در مدل FCD اولیه، جدا کردن سایه پوشش های گیاهی از خاک سیاه است (Jamalabad, 2004). زیرا حرارت خاک سیاه بسیار بیشتر از سایه پوشش گیاهی است و بدین ترتیب جداسازی سایه از خاک سیاه به راحتی امکان پذیر است.

در مدل FCD بهبودیافته به منظور غلبه بر این محدودیت، شاخص حرارت با دو شاخص NLI و GNDVI جایگزین شد و بدین ترتیب از ترکیب چهار شاخص سایه، خاک بایر، NLI و GNDVI تفکیک بین خاک سیاه و سایه پوشش گیاهی انجام شد.

در واقع پیکسل هایی از شاخص سایه که در شاخص های NLI و GNDVI مقادیر بالایی را دارند به عنوان سایه پوشش گیاهی در نظر گرفته می شوند. همچنین، پیکسل هایی از شاخص سایه که در شاخص های NLI و GNDVI مقادیر پایین و در شاخص خاک بایر مقادیر بالایی دارند به عنوان خاک سیاه در نظر گرفته می شوند. بنابراین در مدل بهبودیافته

همانطور که قبلاً بیان شد، هدف اصلی در این پژوهش ارائه مدل FCD بهبودیافته بر اساس افزودن رویکرد جایگزینی شاخص حرارتی با دو شاخص NLI و GNDVI و همچنین افزودن مرحله حد آستانه گذاری محلی است. نگاره ۲ روندنمای توسعه مدل FCD بهبودیافته را نشان می دهد.

روند محاسبه مدل FCD بهبودیافته که در این تحقیق ارائه شده است، به جز مرحله محاسبه شاخص سایه پیشرفته، همانند روند محاسبه مدل FCD اولیه می باشد (Rikimaru et al., 2002). به همین دلیل در ادامه فقط مراحل جدیدی که به مدل FCD اولیه افزوده شد توضیح داده می شود.

### ۳-۳-۱- حذف شاخص حرارتی

یکی از محدودیت های مدل FCD اولیه عدم امکان پیاده سازی آن برای داده های سنجنده هایی است که فاقد باند حرارتی می باشند. این محدودیت به این دلیل است که شاخص سایه پیشرفته در مدل FCD اولیه از ترکیب

جدول ۲: انحراف از معیار ۲۵ نقطه در محدوده جنگل متراکم در بخش‌های مختلف منطقه برای شاخص‌های کاندید

انحراف از معیار	توضیحات	شاخص	ردیف
1.86	Non-Linear Index	NLI	1
1.91	Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	2
2.04	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	3
2.33	Difference Vegetation Index	DVI	4
2.41	Blue-normalized difference vegetation index	BNDVI	5
2.48	Red-Blue NDVI	RBNDVI	6
2.59	Normalized Difference Infrared Index	NDII	7
2.64	Visible-Band Difference Vegetation Index	VDVI	8
2.77	Advanced Normalized Vegetation Index	ANVI	9
2.81	Ratio Vegetation Index	RVI	10
2.84	Perpendicular Vegetation Index	PVI	11
2.94	Atmospherically Resistant Vegetation Index	ARVI	12
3.01	Green Chlorophyll Index	CI	13

شاخص سایه پیشرفته از ترکیب چهار شاخص سایه، خاک بایر، NLI و GNDVI بدست می‌آید. دلیل جایگزینی شاخص حرارت با دو شاخص مذکور افزایش دقت در محاسبه شاخص سایه پیشرفته بود. زیرا در این حالت یک پیکسل با سختگیری بیشتر برای انتخاب شدن در شاخص سایه مواجه خواهد شد. همچنین انتخاب دو شاخص NLI و GNDVI بر اساس یک آزمون آماری انجام شد. در این آزمون آماری، ۲۵ نقطه در محدوده جنگل متراکم در مناطق مختلف در منطقه مطالعاتی (مطابق نگاره ۳) انتخاب شد و انحراف از معیار چندین شاخص، که قابلیت استفاده در محاسبه شاخص سایه را داشتند، برای این ۲۵ نقطه محاسبه شد.



نگاره ۳: موقعیت ۲۵ نقطه انتخابی در منطقه مطالعاتی به منظور انجام آزمون آماری

شاخص NLI طبق رابطه ۱ قابل محاسبه است (Goel &

Qin, 1994)

$$NLI = \frac{NIR^2 - Red}{NIR^2 + Red} \quad (1)$$

همچنین شاخص GNDVI از طریق رابطه ۲ بدست

می‌آید (Louhaichi, Borman, & Johnson, 2001).

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green} \quad (2)$$

### ۲-۳-۲- حد آستانه‌گذاری محلی

شناسایی خاک سیاه و بهبود شاخص سایه (محاسبه شاخص سایه پیشرفته) در مدل FCD اولیه بر اساس ترکیب دو شاخص سایه و حرارت به کمک حدآستانه‌گذاری محاسبه می‌شود (Rikimaru et al., 2002). روند اجرایی بدین ترتیب است که یک عدد به عنوان حد آستانه شاخص حرارت انتخاب می‌شود و پیکسل‌هایی از شاخص سایه که مقادیر شاخص حرارت آن‌ها از این حد آستانه کمتر باشد به عنوان خاک سیاه در نظر گرفته می‌شوند. انجام چنین روندی برای تعریف حدآستانه و محاسبه شاخص

دلیل در نظر گرفتن این آزمون آماری این بود که شاخص‌هایی به این مدل اضافه شوند که نسبت به تغییرات جوی (بخش‌های مختلف محدوده مطالعاتی) حساسیت کمتری داشته باشند. جدول ۲ مقادیر انحراف از معیار ۲۵ نقطه برای شاخص‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۲، از بین این شاخص‌ها دو شاخص NLI و GNDVI انحراف از معیار کمتری نسبت به بقیه شاخص‌ها دارند. بنابراین این دو شاخص برای شناسایی خاک سیاه و محاسبه شاخص سایه پیشرفته انتخاب شدند.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )  
 ارائه مدل FCD محلی جدید مبتنی بر آستانه‌گذاری ... / ۴۳

جلگه‌ای متفاوت از جنگل‌های واقع در ارتفاعات انتخاب شد (نگاره ۴). در این راستا، از مدل رقومی ارتفاعی منطقه برای جداسازی مناطق با ارتفاع پست و مناطق مرتفع استفاده شد. مطابق این شکل، مناطق بالای مرز (خط قرمز) نشان دهنده جنگل‌های واقع در مناطق هموار و مناطق پایین آن جنگل‌های واقع در ارتفاعات می‌باشد. انتخاب حد آستانه مناطق هموار نسبت به مناطق مرتفع سختگیرانه‌تر بود تا زمین‌های کشاورزی که اغلب در مناطق هموار قرار دارند به اشتباه به عنوان جنگل شناسایی نشوند.

جدول ۳: دقت کلی نتایج و زمان محاسبات به ازای تعداد بخش‌بندی‌های مختلف

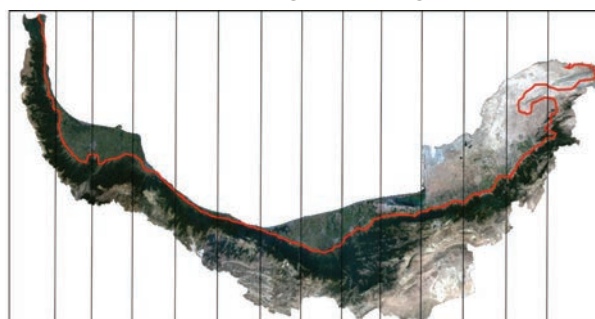
تعداد بخش‌بندی	دقت کلی نتایج	زمان محاسبه (دقیقه)
۱	٪ ۸۶/۲۴	۲۵
۲	٪ ۸۶/۹۸	۲۶
۳	٪ ۸۷/۵۲	۲۹
۴	٪ ۸۸/۲۰	۳۲
۵	٪ ۸۸/۸۴	۳۵
۶	٪ ۸۹/۴۴	۳۷
۷	٪ ۸۹/۹۱	۳۹
۸	٪ ۹۰/۵۸	۴۳
۹	٪ ۹۱/۲۴	۴۵
۱۰	٪ ۹۱/۹۰	۴۸
۱۱	٪ ۹۲/۶۷	۵۱
۱۲	٪ ۹۳/۳۵	۵۳
۱۳	٪ ۹۴/۱۵	۵۶
۱۴	٪ ۹۵/۰۴	۵۸
۱۵	٪ ۹۵/۰۹	۶۱
۱۶	٪ ۹۵/۱۴	۶۴

۳- نتایج و ارزیابی

۳-۱- بررسی حد آستانه گذاری محلی

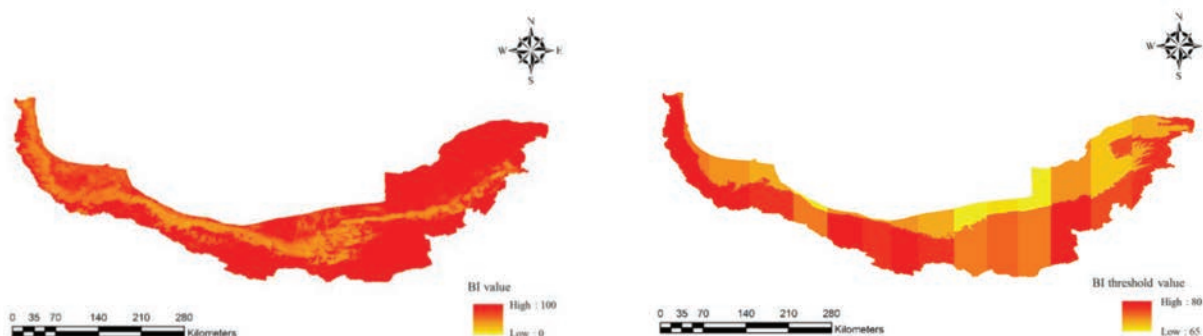
نگاره‌های ۵، ۶ و ۷ نتایج حاصل از حد آستانه‌گذاری محلی بر روی سه شاخص خاک بایر، NLI و GNDVI برای محاسبه شاخص سایه پیشرفته را نشان می‌دهند.

سایه پیشرفته برای مناطق با وسعت زیاد عملاً غیرممکن است. زیرا انتخاب یک حد آستانه سراسری برای کل منطقه به دلیل تغییرات در شرایط جوی و دمایی امکان‌پذیر نیست و ممکن است حد آستانه تعریف شده برای یک منطقه کاملاً مناسب باشد در حالیکه برای منطقه‌ای دیگر از دقت کافی برخوردار نباشد. یک روش کم دقت برای جبران این ضعف می‌تواند انتخاب میانگینی از چندین حد آستانه در مناطق مختلف محدوده مطالعاتی به عنوان نماینده حد آستانه سراسری باشد. اما یک روش بسیار دقیق‌تر برای حد آستانه‌گذاری، که در مدل FCD بهبودیافته بکار برده شد، انجام حد آستانه‌گذاری محلی است. در این روش تصویر محدوده مطالعاتی به ۱۴ بخش تقسیم شد و برای هر بخش یک حد آستانه مناسب برای سه شاخص خاک بایر، NLI و GNDVI به منظور محاسبه شاخص سایه پیشرفته انتخاب شد. نگاره ۴ بخش بندی منطقه مطالعاتی به منظور حد آستانه‌گذاری محلی را نشان می‌دهد.

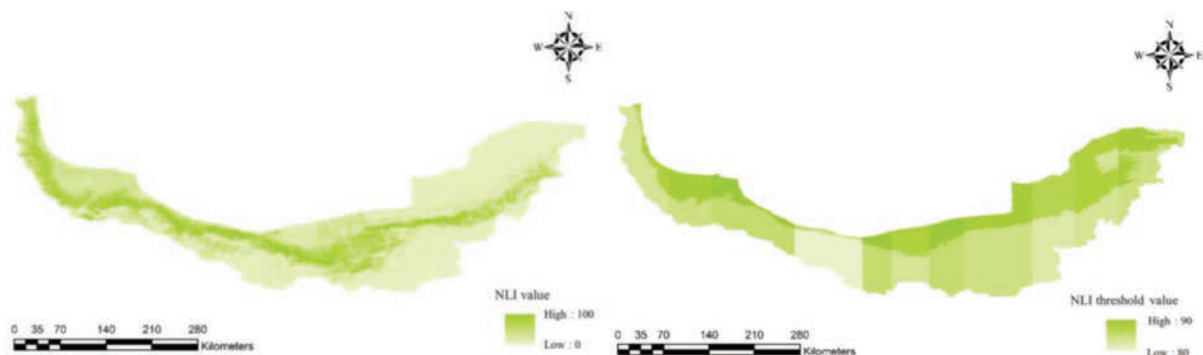


نگاره ۴: بخش‌بندی منطقه مطالعاتی به منظور حد آستانه گذاری محلی. خط قرمز مرز بین حد آستانه‌گذاری محلی در جنگل‌های مرتفع و جنگل‌های جلگه‌ای را نشان می‌دهد.

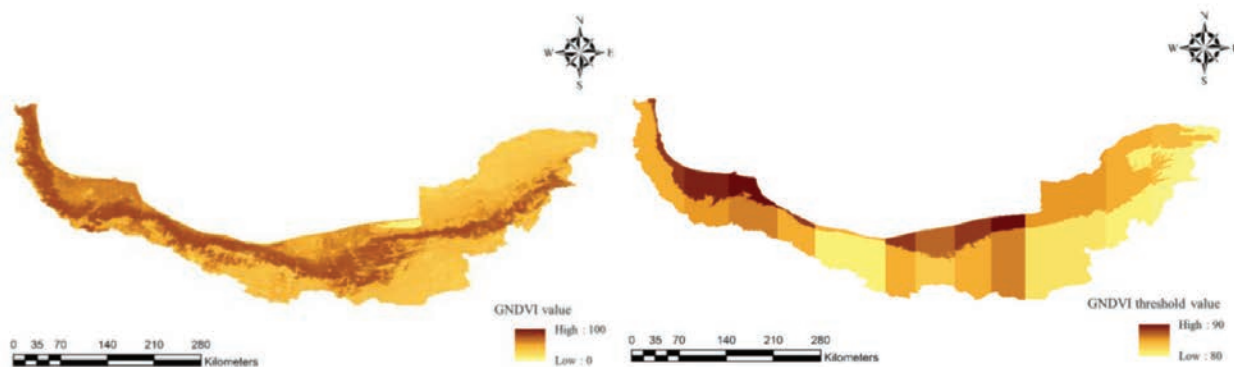
مطابق نگاره ۴، با توجه به طول منطقه مطالعاتی ( ۸۰۰ کیلومتر)، به ازای هر ۵۷ کیلومتر یک حد آستانه محلی انتخاب شد. تقسیم کردن محدوده مطالعاتی به ۱۴ بخش بر اساس trade-off بین دقت نتایج و همچنین زمان محاسبات، مطابق جدول ۳، انجام گرفت. البته ذکر این نکته ضروری است که مبنای انتخاب تعداد بخش‌بندی، حداکثر دقت نتایج بود. همچنین در این تحقیق حد آستانه جنگل‌های



نگاره ۵: نقشه حد آستانه گذاری محلی برای شاخص خاک بایر (راست) و نقشه شاخص خاک بایر برای جنگل‌های هیرکانی (چپ)



نگاره ۶: نقشه حد آستانه گذاری محلی برای شاخص NLI (راست) و نقشه شاخص NLI برای جنگل‌های هیرکانی (چپ)



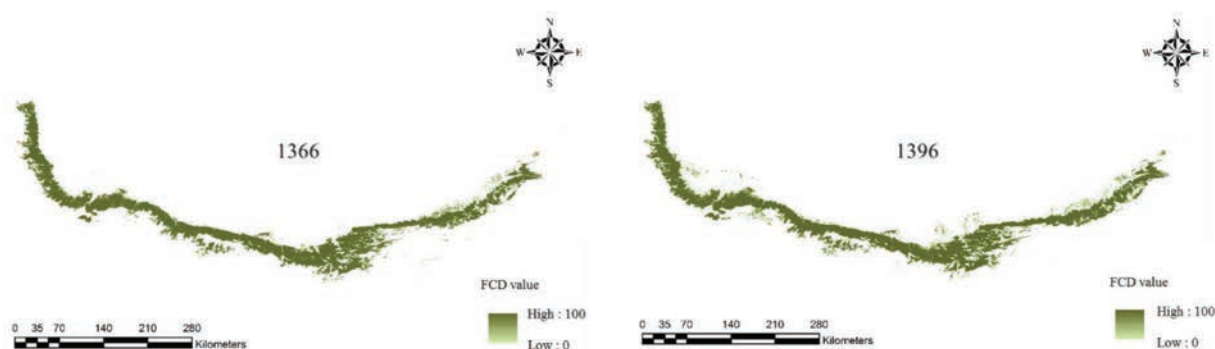
نگاره ۷: نقشه حد آستانه گذاری محلی برای شاخص GNDVI (راست) و نقشه شاخص GNDVI برای جنگل‌های هیرکانی (چپ)

از بازه تغییرات شاخص خاک بایر (بین ۶۵ تا ۸۰) است. این نشان می‌دهد انحراف از معیار این دو شاخص نسبت به تغییرات منطقه، که با آزمون آماری وارد مدل شدند، در مقایسه با شاخص خاک بایر، که در مدل FCD اولیه وجود دارد، کمتر است.

همانطور که نگاره‌های ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهند مقادیر حد آستانه برای جنگل‌های مرتفع و جنگل‌های جلگه‌ای متفاوت در نظر گرفته شد تا از انتخاب اشتباه پوشش‌های گیاهی غیرجنگلی به عنوان جنگل جلوگیری شود. نکته دیگر قابل برداشت این است که بازه تغییرات حد آستانه (بین ۸۰ تا ۹۰) دو شاخص NLI و GNDVI کمتر



فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( SID )  
 ارائه مدل FCD محلی جدید مبتنی بر آستانه‌گذاری ... / ۴۵



نگاره ۸: نقشه تاج پوشش جنگل‌های هیرکانی برای سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۶

جدول ۴: مساحت جنگل‌های هیرکانی (هکتار) به تفکیک استان‌های گیلان، مازندران و گلستان

سال	مساحت کل	مساحت حوضه آبخیز گیلان	مساحت حوضه آبخیز مازندران	مساحت حوضه آبخیز گلستان
۱۳۶۶	۱,۸۱۰,۶۲۱/۵۴۲	۵۴۷,۵۱۱/۸۴۲	۸۸۷,۹۹۴/۶۰۵	۳۷۵,۱۸۰/۴۸۰
۱۳۹۶	۱,۹۷۲,۵۸۴/۳۷۵	۵۹۷,۳۹۰/۶۷۳	۹۶۶,۹۵۲/۹۴۱	۴۰۸,۳۱۷/۹۴۶

همچنین در مورد حوضه آبخیز گلستان، مساحت جنگل‌ها در سال ۱۳۹۶ نسبت به سال ۱۳۶۶ افزایش حدود ۳۳ هزار و ۱۳۷ هکتاری داشته است.

با توجه به اینکه در این مطالعه حد آستانه‌گذاری و در واقع شرایط اجرای مدل برای جنگل‌های جلگه‌ای (تراز ارتفاعی پایین‌تر از ۱۰۰ متر) و جنگل‌های کوهستانی (تراز ارتفاعی بالاتر از ۱۰۰ متر) متفاوت بود، میزان تغییرات مساحت جنگل‌های بالاتر و پایین‌تر از این تراز نیز در این ۳۰ سال مطابق جدول ۵ مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۵: مساحت جنگل‌های هیرکانی (هکتار) پایین‌تر و بالاتر از تراز ارتفاعی ۱۰۰ متر برای داده‌های سال ۱۳۶۶ و ۱۳۹۶

سال	مساحت پایین‌تر از تراز ارتفاعی ۱۰۰ متر	مساحت بالاتر از تراز ارتفاعی ۱۰۰ متر
۱۳۶۶	۷۳/۴۶۸	۱,۸۱۰,۵۴۷/۷۴
۱۳۹۶	۶۱/۱۲۴	۱,۹۷۲,۵۲۳/۲۵۱

نتایج این بررسی نشان داد از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶ مساحت جنگل‌های واقع در تراز ارتفاعی کمتر از ۱۰۰ متر حدود ۱۲۰۰۰ هکتار (۱۶ درصد) کاهش داشته است، در حالیکه برای جنگل‌های واقع در تراز ارتفاعی بیشتر از ۱۰۰

۲-۳- بررسی نتایج تغییرات مساحت جنگل‌های هیرکانی  
 در این بخش بررسی نتایج حاصل از روند تغییر مساحت کل جنگل‌های هیرکانی و همچنین بررسی این تغییرات به تفکیک استانی انجام گرفت. نگاره ۸ نقشه تاج پوشش جنگل‌های هیرکانی برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۶۶ را نشان می‌دهد. از لحاظ بصری تغییرات مساحت در نقشه تاج پوشش جنگل‌های هیرکانی محسوس نیست. به منظور بررسی آماری تغییرات سطح تاج پوشش از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۹۶، مساحت تاج پوشش کل جنگل‌های هیرکانی و همچنین به تفکیک سه استان مازندران، گیلان و گلستان برای سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۶ محاسبه شد. در جدول ۴ مساحت کل جنگل‌های هیرکانی و مساحت به تفکیک استان‌های گیلان، مازندران و گلستان برای سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۶ ارائه شده است.

مطابق جدول ۴، مساحت کل جنگل‌های هیرکانی از سال ۱۳۶۶ تا سال ۱۳۹۶ حدود ۱۶۱ هزار و ۹۶۳ هکتار افزایش داشته است. مساحت در حوضه آبخیز مازندران افزایش حدود ۷۸ هزار و ۹۵۸ هکتاری و در حوضه آبخیز گیلان افزایش حدود ۴۹ هزار و ۸۷۹ هکتاری داشته است.

جدول ۷: دقت کلی و ضریب کاپای حاصل از مدل FCD بهبودیافته برای سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۶

سال	دقت کلی	ضریب کاپا
۱۳۶۶	٪۹۷/۳۲	٪۹۲/۸۷
۱۳۹۶	٪۹۶/۹۸	٪۹۲/۳۱

متر حدوداً ۱۶۱۹۷۵ هکتار (۹ درصد) افزایش داشته است. این نتایج نشان از تخریب جنگل‌های هیرکانی در ارتفاعات پایین دست و حومه‌های شهری دارد که این موضوع برای این میراث کهن زنگ خطری بزرگ به شمار می‌رود.

### ۳-۳- ارزیابی نتایج

در این بخش نتایج حاصل از دو مدل FCD اولیه و FCD بهبودیافته ارزیابی و مقایسه شدند. همچنین این ارزیابی برای نتایج حاصل از مدل FCD بهبودیافته در هر یک از سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۶ انجام شد. پس از اجرای مدل FCD و در نظر گرفتن حد آستانه ۵، ۲۵ و ۵۰ درصد جهت تفکیک طبقه‌های جنگل انبوه، جنگل نیمه انبوه، جنگل تنک و فاقد جنگل (مطابق استاندارد FAO)، نتایج به دست آمده ارزیابی شدند. برای ارزیابی نتایج از داده زمین مرجع و داده‌های تست بدست آمده از گوگل ارث در قالب همین چهار طبقه استفاده شد. جدول ۶ دقت کلی و ضریب کاپای حاصل از مدل FCD اولیه و مدل FCD بهبودیافته برای داده‌های سال ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد.

جدول ۶: دقت نتایج پیاده‌سازی مدل FCD اولیه و مدل FCD بهبودیافته برای داده‌های سال ۱۳۹۶

مدل FCD	دقت کلی	ضریب کاپا
اولیه	٪۸۶/۲۴	٪۶۸/۴۳
بهبودیافته	٪۹۶/۹۸	٪۹۲/۳۱

مطابق جدول ۶، دقت کلی و ضریب کاپای حاصل از مدل FCD اولیه به ترتیب ٪۸۶/۲۴ و ٪۶۸/۴۳ و برای مدل FCD بهبودیافته ٪۹۶/۹۸ و ٪۹۲/۳۱ بدست آمد که بیانگر بهبود عملکرد مدل از نظر آماری است. همچنین جدول ۷ دقت کلی و ضریب کاپای حاصل از مدل FCD بهبودیافته برای سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، دقت کلی و ضریب کاپا در این دو سال حدوداً یکسان و از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. این نتایج صحت نتایج بدست آمده را تضمین می‌کند.

### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

استقلال نسبی از داده‌های آموزشی از مزایای مدل FCD است. هرچند در تعیین حدود آستانه به نحوی از داده‌های آموزشی استفاده می‌شود که البته عموماً مبتنی بر تفسیر چشمی صحنه تصویر برای تعیین حدود آستانه است. از سوی دیگر جنگل‌های هیرکانی با تنوع گونه‌ای و تیپولوژی بسیار بالا فاقد داده آموزشی منسجم و منظم است. تغییرات شدید جنگل‌های هیرکانی به ویژه در مناطقی که فرکانس تغییرات بسیار بالاست نیاز به یک سامانه جامع پایش تراکمی جنگل دارد. این مدل نیز در همین چارچوب انتخاب و بهینه شده است. تلاش شد که یکی از محدودیت‌های اصلی مدل که وابستگی به باند حرارتی است با استفاده از دو شاخص NLI و GNDVI به نحوی جبران شود.

استراتژی مبنای این مسأله امکان استفاده از نسل جدید ماهواره‌های سنجنش از دوری به ویژه منظومه ماهواره‌های سنتیل است. در نتیجه مدل NLFCFD طراحی و ارایه شد که در مقایسه با مدل FCD افزایش ۱۰ و ۱۴ درصدی در مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا نشان داد.

نتایج حاصل از اعمال مدل NLFCFD بر تصاویر لندست ۵ و لندست ۸ در یک بازه زمانی سی ساله (۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶) حاکی از آن است که مساحت جنگل‌های هیرکانی در مناطق پایین دست (ترازهای ارتفاعی کمتر از ۱۰۰ متر) حدود ۱۲۰۰۰ هکتار کاهش یافته است. همچنین در عرصه‌های جنگلی بالادست (ترازهای ارتفاعی بیش از ۱۰۰ متر) حدود ۱۶۱۹۷۵ هکتار افزایش داشته است.

در ادامه نتایج تحقیقات پیشین در زمینه پایش تغییر سطح جنگل‌های هیرکانی (جدول ۸) ارائه شده است. بررسی نتایج

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)  
 ارائه مدل FCD محلی جدید مبتنی بر آستانه‌گذاری ... / ۴۷

جدول ۸: مساحت جنگل‌های هیرکانی در سال‌های مختلف براساس منابع رسمی (Mirakhrolou and Akhavan, 2017)

ردیف	منبع	سال	مساحت (هکتار)	توضیح
۱	استاندارد فائو	۱۳۶۹	۱۷۷۱۰۰۰	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۲	سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور	۱۳۷۳	۱۸۴۷۸۸۶	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۳	مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور	۱۳۸۲	۱۸۱۱۷۸۸	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۴	استاندارد فائو	۱۳۸۴	۱۸۴۷۸۸۶	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۵	استاندارد فائو	۱۳۸۹	۱۸۴۷۸۸۶	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۶	سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور	۱۳۹۴	۲۰۷۳۳۶۸	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۷	استاندارد فائو	۱۳۹۴	۱۹۳۹۴۹۴	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد
۸	مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور	۱۳۹۵	۱۶۵۰۴۹۸	تاج-پوشش بیش از ۵ درصد

است. اما با این وجود نتایج این تحقیق با مطالعات FAO همخوانی نسبتاً بیشتری نسبت به سایر مطالعات دارد.

این تناقض بین نتایج گزارش‌های مختلف به این دلیل است که برای ارزیابی سطح جنگل‌هایی با مساحت بسیار زیاد و گونه‌ها و تیپ‌ها جنگلی مختلف نیاز به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا و انجام عملیات میدانی کافی می‌باشد و تصاویر ماهواره‌ای با دسترسی رایگان و قدرت تفکیک مکانی پایین به هیچ عنوان نمی‌تواند منبع موثقی برای ارزیابی تخریب یا احیاء جنگل‌ها باشد.

این پژوهش امکان کاربست یک روش کم‌هزینه به ویژه از جنبه داده آموزشی و مرجع را که فقدان آن به شدت احساس می‌شود برای پایش مستمر تغییرات تراکمی جنگل‌های هیرکانی تا حدودی اثبات کرد. همچنین پیاده‌سازی مدل NLFCD بر روی تصاویر با قدرت تفکیک مناسب‌تر نظیر سنتینل-۲ قابل توصیه است.

#### ۵- منابع و مآخذ

- Attarchi, S. (2014). Complex land cover classification and physical properties retrieval of the hyrcanian forest: A Multi-Source Remote Sensing approach. Verlag nicht ermittelbar,
- Attarchi, S., & Gloaguen, R. (2014). Improving the estimation of above ground biomass using dual polarimetric PALSAR and ETM+ data in the Hyrcanian mountain forest (Iran). *Remote Sensing*, 6(5), 3693-3715.
- Azadnejad, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D.

مطالعات پیشین حاکی از آمار و اطلاعات مختلف و بسیار متفاوتی از روند تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی دارد.

نتایج حاصل از گزارشات سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور و استاندارد فائو احیاء جنگل‌های هیرکانی در ۳۰ سال گذشته را نشان می‌دهند، در حالیکه بررسی نتایج حاصل از گزارشات مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور حاکی از تخریب جنگل‌های هیرکانی دارد. در همین زمینه مطالعه نسبتاً کامل‌تری توسط میرآخورلو و همکاران در سال ۱۳۹۶ انجام گرفت (Mirakhrolou and Akhavan, 2017). در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و لندست ۸ ارزیابی تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی در یک بازه ۱۲ ساله، از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵ انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که طی ۱۲ سال گذشته ۱۶۱ هزار و ۲۹۰ هکتار از پوشش جنگلی محدوده جنگل‌های هیرکانی از معیارهای تعریف جنگل (اراضی با مساحت حداقل ۰/۵ هکتار، پوشش درختی به ارتفاع بیش از ۵ متر و تاج پوشش بیش از ۵ درصد) تخریب شده است.

همانطور که اشاره شد نتایج تحقیق حاضر حاکی از تخریب جنگل‌های هیرکانی در ارتفاعات پایین دست و احیاء در ارتفاعات بالا دست می‌باشد. در این تحقیق مقایسه نتایج برای ترازهای ارتفاعی بالادست و پایین دست به صورت مجزا انجام گرفت، در حالیکه در سایر مطالعات مقایسه‌ها بین کل محدوده جنگل‌های هیرکانی انجام گرفته

- indices and LAI and FPAR: A computer simulation. *Remote Sensing Reviews*, 10(4), 309-347.
13. Guimarães, U. S., Galo, M. d. L. B. T., da Silva Narvaes, I., & da Silva, A. d. Q. (2019). Cosmo-SkyMed and TerraSAR-X datasets for geomorphological mapping in the eastern of Marajó Island, Amazon coast. *Geomorphology*, 106934.
14. Jamalabad, M. (2004). Forest canopy density monitoring using satellite images. Paper presented at the Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004.
15. Khosrow, M., & Reza, A. (2017). Forest density and orchard classification in Hyrcanian forests of Iran using Landsat 8 data. *Journal of Forest Science*, 63(8), 355-362.
16. Korhonen, L., Korhonen, K. T., Rautiainen, M., & Stenberg, P. (2006). Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques.
17. Liu, K., Shen, X., Cao, L., Wang, G., & Cao, F. (2018). Estimating forest structural attributes using UAV-LiDAR data in Ginkgo plantations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 465-482.
18. Louhaichi, M., Borman, M. M., & Johnson, D. E. (2001). Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*, 16(1), 65-70.
19. Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International journal of remote sensing*, 27(7), 1297-1328.
20. Managhebi, T., Maghsoudi, Y., & Zoej, M. J. V. (2018). An improved three-stage inversion algorithm in forest height estimation using single-baseline polarimetric sar interferometry data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(6), 887-891.
21. Mette, T., Papathanassiou, K., & Hajnsek, I. (2004). Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain. Paper presented at the IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
22. Mirakhorlou, Kh, Akhavan (2017). Area changes of Hyrcanian Forests during 2004 to 2016. *Journal of Iran Nature*, 2(3), 40-45.
23. MIRZAEI, Z. V., NIKNEJAD, M., & HOJJATI, S. M. (2015). ESTIMATION OF FOREST CANOPY DENSITY USING FCD.
24. Ottosen, T.-B., Petch, G., Hanson, M., & Skjøth, (2019). Investigating the effect of the physical scattering mechanism of the dual-polarization sentinel-1 data on the temporal coherence optimization results. *International journal of remote sensing*, 1-15.
4. Azadnejad, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2020). Evaluation of polarimetric capabilities of dual polarized Sentinel-1 and TerraSAR-X data to improve the PSInSAR algorithm using amplitude dispersion index optimization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101950.
5. Azizi, Z. (2008). Forest canopy density estimating using satellite images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 8.
6. Chen, L., Wang, Y., Ren, C., Zhang, B., & Wang, Z. (2019). Assessment of multi-wavelength SAR and multispectral instrument data for forest aboveground biomass mapping using random forest kriging. *Forest Ecology and Management*, 447, 12-25.
7. Deka, J., Tripathi, O. P., & Khan, M. L. (2013). Implementation of forest canopy density model to monitor tropical deforestation. *Journal of the indian society of remote sensing*, 41(2), 469-475.
8. e Silva, L. P., Xavier, A. P. C., da Silva, R. M., & Santos, C. A. G. (2020). Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00811.
9. Fitrianto, A. C., Darmawan, A., Tokimatsu, K., & Yoshikawa, K. (2019). Spatial distribution of empty fruit bunch production as potential electric resource using remote sensing technique. *Energy Procedia*, 158, 3565-3571.
10. Forkuor, G., Zougrana, J.-B. B., Dimobe, K., Ouattara, B., Vadrevu, K. P., & Tondoh, J. E. (2020). Above-ground biomass mapping in West African dryland forest using Sentinel-1 and 2 datasets-A case study. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111496.
11. Godinho, S., Gil, A., Guiomar, N., Neves, N., & Pinto-Correia, T. (2016). A remote sensing-based approach to estimating montado canopy density using the FCD model: a contribution to identifying HNV farmlands in southern Portugal. *Agroforestry systems*, 90(1), 23-34.
12. Goel, N. S., & Qin, W. (1994). Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation

- to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Remote Sensing of Environment, 112(5), 2131-2144.
34. Taefi Feijani, M., Azadnejad, S., Homayouni, S., & Moradi, M. (2019). INVESTIGATION OF FOREST CANOPY DENSITY CHANGES IN HYRCANIAN FOREST RESOURCES DURING 1987 TO 2002 USING REMOTE SENSING TECHNOLOGY. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences.
35. Tang, H., Armston, J., Hancock, S., Marselis, S., Goetz, S., & Dubayah, R. (2019). Characterizing global forest canopy cover distribution using spaceborne lidar. Remote Sensing of Environment, 231, 111262.
36. Tsui, O. W., Coops, N. C., Wulder, M. A., & Marshall, P. L. (2013). Integrating airborne LiDAR and spaceborne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass. Remote Sensing of Environment, 139, 340-352.
37. Tsui, O. W., Coops, N. C., Wulder, M. A., Marshall, P. L., & McCardle, A. (2012). Using multi-frequency radar and discrete-return LiDAR measurements to estimate above-ground biomass and biomass components in a coastal temperate forest. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 69, 121-133.
38. Walshe, D., McInerney, D., Van De Kerchove, R., Goyens, C., Balaji, P., & Byrne, K. A. (2020). Detecting nutrient deficiency in spruce forests using multispectral satellite imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 86, 101975.
39. Wang, D., Wan, B., Liu, J., Su, Y., Guo, Q., Qiu, P., & Wu, X. (2020). Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast Hainan Island in China using an upscaling method from field plots, UAV-LiDAR data and Sentinel-2 imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 85, 101986.
40. Wang, Z., Ginzler, C., & Waser, L. T. (2020). Assessing structural changes at the forest edge using kernel density estimation. Forest Ecology and Management, 456, 117639.
41. Wani, A. A., Joshi, P. K., & Singh, O. (2015). Estimating biomass and carbon mitigation of temperate coniferous forests using spectral modeling and field inventory data. Ecological Informatics, 25, 63-70.
- C. A. (2020). Tree cover mapping based on Sentinel-2 images demonstrate high thematic accuracy in Europe. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 84, 101947.
25. Pal, S. C., Chakraborty, R., Malik, S., & Das, B. (2018). Application of forest canopy density model for forest cover mapping using LISS-IV satellite data: a case study of Sali watershed, West Bengal. Modeling Earth Systems and Environment, 4(2), 853-865.
26. Pepe, S., De Siena, L., Barone, A., Castaldo, R., D'Auria, L., Manzo, M., . . . Bianco, F. (2019). Volcanic structures investigation through SAR and seismic interferometric methods: The 2011-2013 Campi Flegrei unrest episode. Remote Sensing of Environment, 234, 111440.
27. Reis, M. S., Dutra, L. V., Sant'Anna, S. J. S., & Escada, M. I. S. (2020). Multi-source change detection with PALSAR data in the Southern of Pará state in the Brazilian Amazon. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 84, 101945.
28. Rikimaru, A., Roy, P., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. Tropical Ecology, 43(1), 39-47.
29. Ronoud, G., & Darvishsefat, A. (2016). Estimating aboveground woody biomass of Fagus orientalis stands in Hyrcanian forest of Iran using Landsat 8 satellite data (Case study: Khyroud forest). A thesis of Master Student in forest science, University of Tehran, 103p.
30. Sahana, M., Sajjad, H., & Ahmed, R. (2015). Assessing spatio-temporal health of forest cover using forest canopy density model and forest fragmentation approach in Sundarban reserve forest, India. Modeling Earth Systems and Environment, 1(4), 49.
31. Shaholi et al., (2014). Forest Canopy Density Assessment Using FCD model: a case study of Marivan forests. Journal of RS and GIS in Natural Resources, 6, 28-21.
32. Sharma, R., & Singh, T. (2018). Forest Canopy Density Assessment Using High Resolution LISS-4 Data in Yamunanagar District, Haryana. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, 5.
33. Simard, M., Rivera-Monroy, V. H., Mancera-Pineda, J. E., Castañeda-Moya, E., & Twilley, R. R. (2008). A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: Application

