

برآورد محصول و کاه گندم با استفاده از تصاویر Landsat-OLI

میلاذ باقری - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
علی درویشی بلورانی* - دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
سعید حمزه - دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
محمدرضا جلوخانی نیارکی - دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

چکیده

پیش‌بینی عملکرد محصول از مهم‌ترین ابزارهای برنامه‌ریزی به‌منظور تأمین به‌موقع محصولات زراعی، مخصوصاً محصول استراتژیک گندم، است. در این تحقیق پیش‌بینی عملکرد گندم در بخشی از شهرستان گیلان‌غوب با استفاده از شاخص‌های گیاهی $NDVI^1$ و $GLAI^2$ و داده‌های زمینی عملکرد گندم و کاه مربوط به ۳۵ قطعه زمین زراعی براساس ایجاد رابطه رگرسیون چندمتغیره بین شاخص‌های گیاهی و داده‌های زمینی در سال‌های زراعی ۲۰۱۴-۲۰۱۸ انجام گرفت. در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۸، نمودار دوره رشد محصول با استفاده از هر شاخص رسم شد و پارامتر هندسی مربوط به منحنی رشد گیاه مانند مساحت زیرنمودار از آن‌ها استخراج شد. نتایج این تحقیق نشان داد $GLAI$ ضریب تعیین بیشتری نسبت به شاخص $NDVI$ دارد. همچنین، رابطه رگرسیون چندمتغیره با $R^2=0.865$ برای برآورد میزان کاه و یک رابطه با $R^2=0.851$ برای گندم به‌دست آمد که در نهایت با استفاده از این روابط مقدار گندم برای کل منطقه برابر $295,606$ تن و مقدار کاه برابر $705,032$ تن برآورد شد. از بین مراحل مختلف رشد گیاه نیز مرحله تشکیل گل‌آذین با $R^2=0.65$ بیشترین ضریب تعیین جهت برآورد میزان محصول گندم و کاه را به خود اختصاص داد.

واژگان کلیدی: برآورد محصول و کاه گندم، $GLAI$ ، $NDVI$ لندست OLI

مقدمه

تولیدات کشاورزی همیشه با احتمال خطر در زمینه نوسان آب و هوا و تغییرات بازارهای بین‌المللی همراه بوده است (لابس و همکاران، ۲۰۰۲: ۴۱۷۰). شناخت پارامترهای مختلف مؤثر در رشد گیاه و تخمین میزان محصول قبل از فصل برداشت یکی از مهم‌ترین راه‌های افزایش امنیت غذایی است. امروزه، کشاورزی جهانی و منطقه‌ای موظف به پاسخ‌گویی به نیازهای جوامع مختلف است. برآورد کردن این هدف نیازمند اطلاعات دقیق و قابل اعتماد در تولید محصول است (تاگر، ۱۹۷۹: ۱۲۸). پیش‌بینی عملکرد گندم، به‌منزله محصول راهبردی، در حالی که در سال ۲۰۱۱ جمعیت کره زمین به ۷ میلیارد نفر رسیده است، اهمیت بسیاری دارد (راتر و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۷۶). سطح زیر کشت گندم در ۴۰۰۰۰۰۵ هکتار در جهان را شامل می‌شود که متوسط عملکرد آن ۷۲۱ کیلوگرم در هکتار است (جهاد، ۲۰۱۳). زیست‌توده^۳ به مواد آلی بالای سطح زمین یا زیر این سطح (زنده و مرده) از قبیل درختان، محصولات کشاورزی، چمن، و

Email: ali.darvishi@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Green Leaf Area Index
3. Biomass

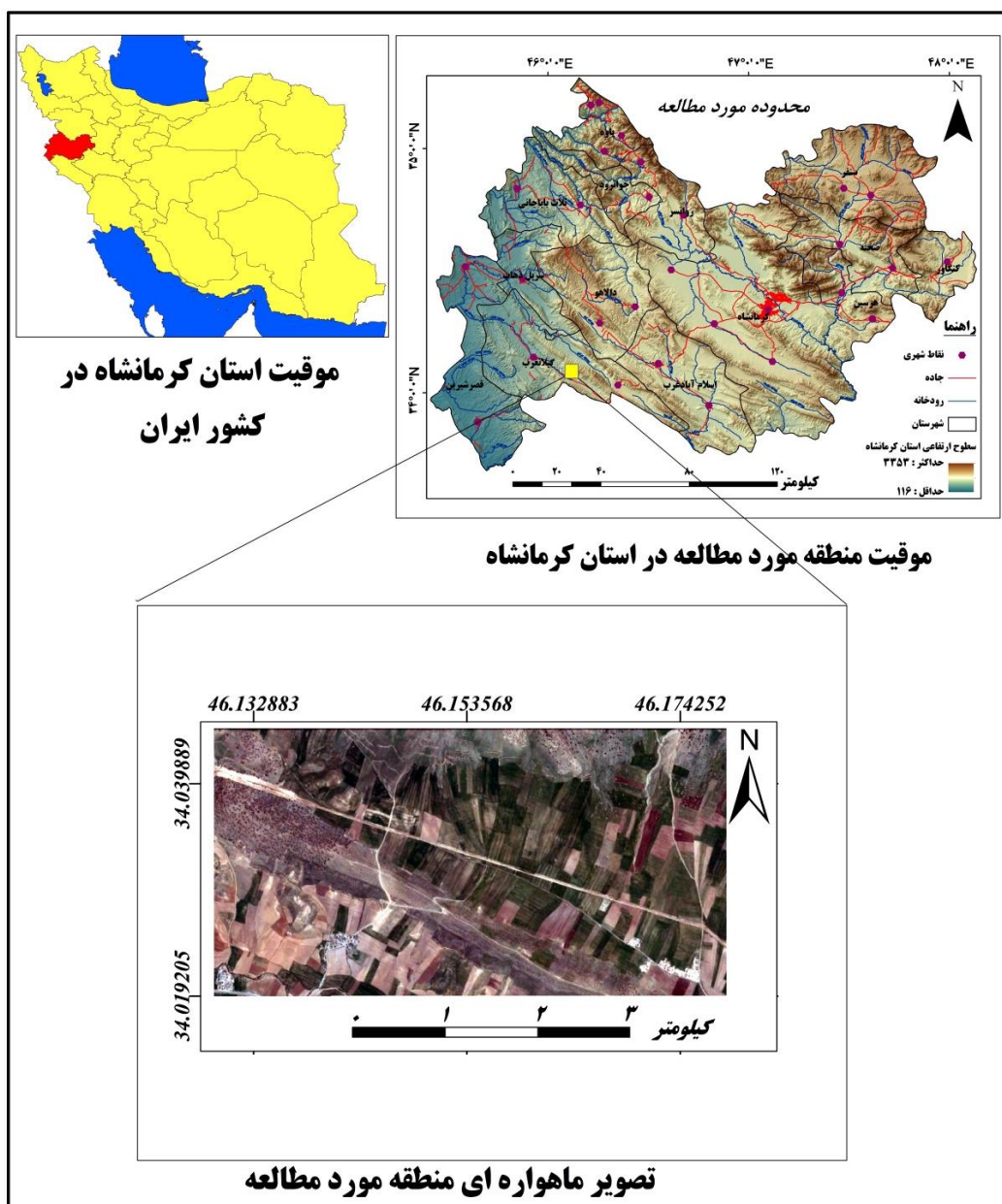
ریشه گیاهان گفته می‌شود (فائو، ۲۰۱۳). زیست‌توده به دلیل تولید ماده آلی و همچنین برگشت سالانه عناصر در جریان چرخه بیولوژیکی مواد بین بخش زنده و غیر زنده اکوسیستم از درجه اهمیت زیادی برخوردار است (زانگ و همکاران، ۲۰۰۰: ۲۹۹). با توجه به اینکه میزان کاه یکی از مهم‌ترین موارد قابل اندازه‌گیری به منظور تعیین میزان زیست‌توده است، در این کار، علاوه بر پیش‌بینی میزان محصول گندم، میزان کاه نیز بررسی شده است.

در حال حاضر، بیشترین سطح زیر کشت گیاهان زراعی در جهان به گندم اختصاص دارد. عملکرد گندم دیم تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون عوامل اقلیمی و عوامل فیزیولوژیکی قرار می‌گیرد (صدراس و مک‌دونالد، ۲۰۱۲: ۲۵) و این عوامل نیز به شدت متغیرند. بنابراین، عملکرد گندم دیم متغیر بوده و این امر نیاز به برآورد این محصول استراتژیکی را بیشتر می‌کند. تقریباً از اوایل دهه ۱۹۸۰ نشان داده شد که گیاهان سبز می‌توانند با استفاده از ویژگی‌های بازتاب طیفی پایش شوند (تاگر، ۱۹۷۹: ۱۲۸). در سال‌های اخیر استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و تصاویر سری زمانی و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در فعالیت‌های کشاورزی و به خصوص پایش مسائلی که با استفاده از سایر روش‌ها مقرون به صرفه نیست مناسب و کارآمد بوده است (فائو، ۲۰۱۱). نظارت بر شرایط رشد محصول با استفاده از پارامترهای زراعی مانند شاخص سطح برگ (LAI) در یک فصل رشد برای برآورد زیست‌توده و برداشت محصول بسیار مهم است (ژئو و همکاران، ۲۰۱۲: ۶۵). تاگر پی برد که یک رابطه خطی بین عملکرد خالص گندم با مقدار NDVI در فصل رشد وجود دارد (تاگر، ۱۹۸۰: ۶۵۹). هاتوت و کارلی در سال ۲۰۰۳ در مطالعه پیش‌بینی محصول گندم برای کشور ایران در دو فصل کوتاه (در ۱۹ استان) و فصل بلند رشد (در ۱۷ استان) تحلیل رگرسیون چندمتغیره را به کار بردند و در این مطالعه شاخص NDVI را به عنوان یک متغیر مستقل وارد مدل کردند (هاتوت و کارلی، ۲۰۰۳: ۲۲۲). بازگیر (۲۰۰۵) برای پیش‌بینی محصول در بخش‌هایی از ایالات پنجاب مدل‌های رگرسیون مختلفی ارائه کرد. بازگیر و همکاران (۲۰۰۷) با شاخص‌های مختلف هواشناسی کشاورزی برای استان‌های همدان، کردستان، و کرمانشاه به پیش‌بینی محصول گندم اقدام کردند (بازگیر و همکاران، ۲۰۰۷: ۳۴؛ بازگیر و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۷۷). هانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از شاخص سطح برگ و تصاویر مودیس و لندست برای بهبود برآورد عملکرد گندم به بهبود مدل WOFOST در کشور چین پرداختند (هانگ و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۸۸). عزیزی و یاراحمدی بر روی پارامترهای اقلیمی و عملکرد گندم دیم در دشت سیلاخور با مدل‌های رگرسیون اقدام کردند (عزیزی و یارمحمدی، ۲۰۰۳: ۳). فن شلت و همکاران مقایسه‌ای بین شاخص گیاهی NDVI حاصل از AVHRR GIMMS، MODIS Terra، و SPOT VGT با داده‌های مشاهداتی انجام دادند. با توجه به عملکرد بالای هر سه ماهواره در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، تنها تفاوت آن‌ها در روند تغییراتی شاخص NDVI در مناطق مرطوب و خشک بود (فنشولت و همکاران، ۲۰۰۹: ۳). هانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در کشور چین با ترکیب محصولات بازتابی مودیس و لندست و استفاده از الگوریتم KS به ایجاد یک مدل برای برآورد عملکرد گندم زمستانه پرداختند و به یک مدل با دقت بالا در سطح شهرستان دست یافتند (هانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۳).

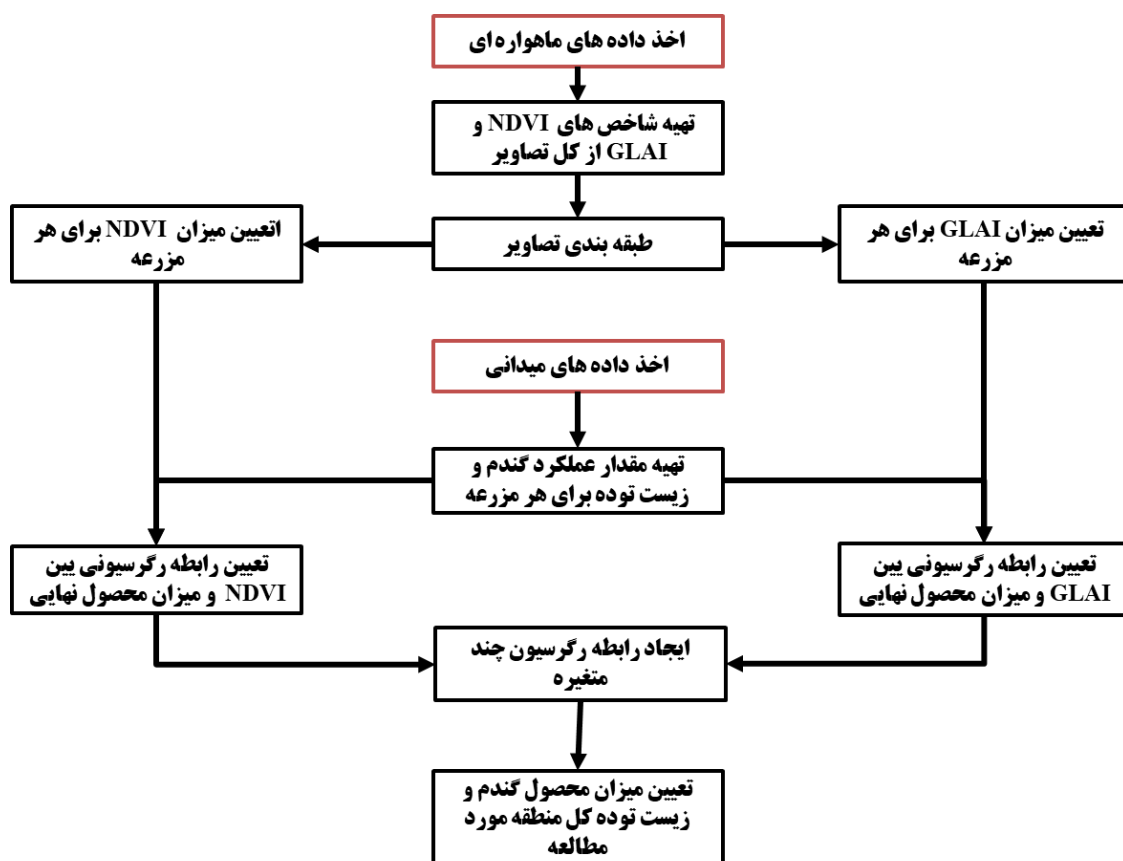
در مطالعه حاضر سعی شده است محصول گندم و کاه ناشی از آن در پنج سال متوالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست برآورد شود و با داده‌های زمینی دقت‌سنجی شود. برای اجرای این کار از شاخص گیاهی NDVI و GLAI استفاده شد. از دیگر هدف‌های این مطالعه، که نوآوری آن نیز محسوب می‌شود، بررسی روابط رگرسیون بین مراحل مختلف فنولوژیک گیاه گندم و عملکرد آن است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از شهرستان گیلان غرب واقع در جنوب غرب استان کرمانشاه است. این منطقه در طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۷ دقیقه است. شهرستان گیلان غرب دارای آب و هوای گرم و نیمه خشک است. میزان بارندگی سالیانه به طور متوسط ۳۸۴ میلی متر است (نصرالهی و همکاران، ۱۳۹۳: ۹۰). نوع کشاورزی غالب در این منطقه کشت دیم است و غالب کشت پاییزه منطقه گندم و جو بوده و در آبان ماه کشت و در تیرماه برداشت می شود.



شکل ۱. موقیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



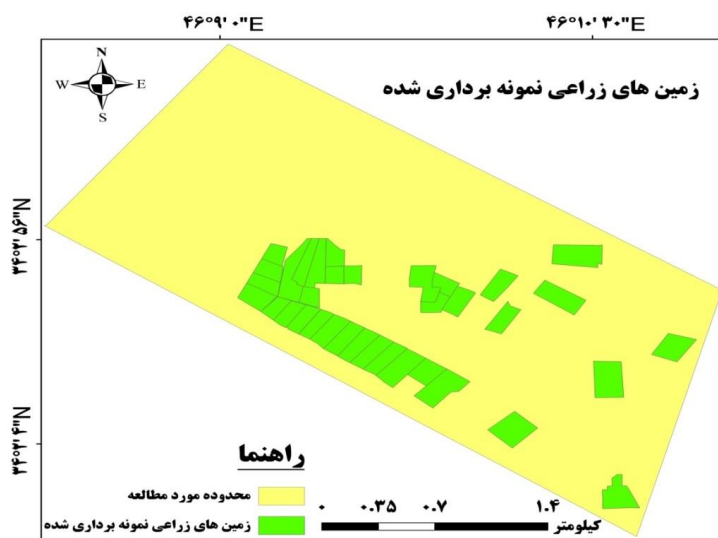
شکل ۲. فلوجارت روند اجرای تحقیق به منظور برآورد میزان محصول گندم دیم و کاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

جمع‌آوری داده‌های میدانی

داده‌های میدانی شامل اندازه‌گیری میزان کاه (بقایای گیاه گندم (مواد آلی) بالای سطح زمین) و گندم (محصول نهایی و جداشده دانه گندم) است که برحسب کیلوگرم بر هکتار در هر مزرعه اندازه‌گیری شده است (جدول ۱). این داده‌ها توسط نگارندگان با بازدید میدانی مستقیم در هنگام برداشت محصول به‌دست آمده است. هر مقدار داده‌های مربوط به سال‌های بیشتر در مطالعه تأثیر داده شود مطمئناً نتایج بهتر و دقیق‌تر خواهد بود. در مطالعه حاضر داده‌های پنج‌ساله در دسترس بود که نسبت به مطالعات مشابه از دوره زمانی بیشتری استفاده شده و از نقاط قوت مقاله محسوب می‌شود و نتایج بهتری نیز به‌دست آمده است. همچنین، به‌منظور تعیین محدوده زراعی برای کل زمین‌ها از GPS استفاده شده است و ۳۵ قطعه زمین انتخاب (شکل ۳) و مقادیر گندم و کاه آن‌ها در طی پنج سال (۲۰۱۴-۲۰۱۸) ثبت شد. تعداد زمین‌های اولیه ۵۰ قطعه بود که با توجه به مسائلی نظیر بزرگی مزرعه به‌منظور دربرگرفتن تعداد پیکسل‌های مناسب برای تصاویر لندست ۸ و شکل هندسی مناسب زمین‌ها تعداد ۳۵ قطعه انتخاب شد. با توجه به برنامه‌های تناوب کشت و دوره آیش هر مزرعه، تعداد دفعات کشت گندم در زمین‌های مورد مطالعه حداقل سه بار و حداکثر چهار بار در پنج سال مورد مطالعه بوده و هیچ زمینی به صورت پنج سال متوالی زیر کشت گندم قرار نگرفته است.

جدول ۱. داده‌های میدانی شامل میزان گندم و کاه برحسب کیلوگرم بر سال زراعی به تفکیک مزرعه

تعداد	سال ۲۰۱۴		سال ۲۰۱۵		سال ۲۰۱۶		سال ۲۰۱۷		سال ۲۰۱۸	
	گندم	کاه	گندم	کاه	گندم	کاه	گندم	کاه	گندم	کاه
1	1950	5251	0	0	1500	4501	0	0	2251	4251
2	2837	6839	1621	3800	1672	4306	0	0	2077	5319
3	748	3987	0	0	1288	4293	1104	2760	0	0
4	3196	8336	0	0	2223	5743	0	0	2362	6715
5	2053	5079	0	0	1904	3915	1481	3280	0	0
6	2747	6448	1433	2747	0	0	1314	2388	0	0
7	3122	7806	0	0	2156	5390	0	0	1859	5278
8	1239	3718	0	0	1487	5135	1239	4073	0	0
9	1959	5165	0	0	0	0	1639	3384	1959	4453
10	1315	3733	0	0	1813	4444	0	0	2666	5155
11	1541	3946	0	0	1165	2443	1691	3458	0	0
12	1544	4608	0	0	1447	3618	0	0	1447	3136
13	1065	4816	0	0	1774	4563	0	0	2281	6337
14	1791	6793	0	0	1297	3211	0	0	1420	4014
15	3865	7306	0	0	2946	6693	0	0	2710	5892
16	2105	6539	0	0	2392	5901	0	0	2408	4976
17	2057	6429	0	0	1929	4822	1800	4179	0	0
18	1542	5783	0	0	1992	5462	0	0	964	2634
19	3475	8292	0	0	2961	7107	0	0	3198	6515
20	1683	5198	0	0	1238	3465	0	0	1733	4158
21	2014	5179	1151	3741	0	0	1784	4316	0	0
22	862	4849	0	0	1796	5567	0	0	2335	4849
23	1390	4406	0	0	1729	5084	0	0	2034	4067
24	2459	6556	0	0	2322	5190	0	0	2732	6693
25	2493	4106	1540	3300	0	0	2017	4216	1467	3117
26	2685	5085	1587	2848	0	0	1221	3173	0	0
27	1969	4246	0	0	1197	2895	0	0	1351	2702
28	1609	4598	1437	3448	0	0	0	0	1782	4598
29	1412	4915	0	0	1638	4739	0	0	2042	4789
30	2238	4882	0	0	2136	3967	1933	3560	0	0
31	2798	4291	1999	3411	0	0	1492	2798	0	0
32	733	3054	1283	3176	1527	3970	0	0	1283	3359
33	2757	5457	0	0	2032	4499	0	0	2467	5457
34	1681	4146	0	0	1457	3250	0	0	2129	5155
35	2124	4957	0	0	1780	3541	0	0	1780	4148



شکل ۳. زمین‌های زراعی نمونه‌برداری‌شده در منطقه گیلان غرب استان کرمانشاه

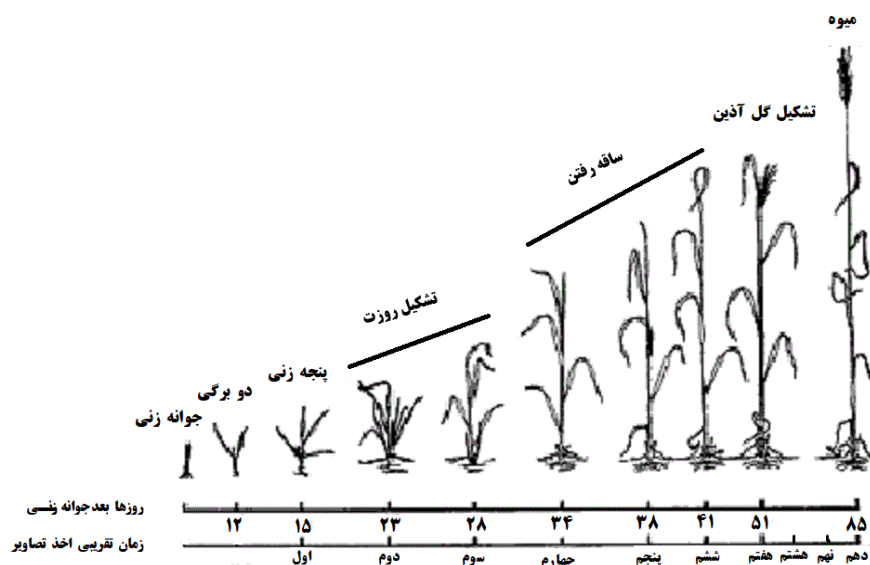
اخذ داده‌های ماهواره‌ای

با در نظر گرفتن تقویم زراعی منطقه، از تصاویر سری زمانی ماهواره لندست ۸ از اواسط فوریه (بهمن) تا اواخر می (خرداد) برای سال‌های زراعی ۲۰۱۴-۲۰۱۸ استفاده شده است (جدول ۲). این تصاویر از تصاویر سطح دو لندست که پیش‌پردازش‌های لازم روی آن‌ها اعمال شده است از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا تهیه شد (<https://earthexplorer.usgs.gov>). این داده‌ها از زمان شروع رشد تا زمان خشک شدن گیاه گندم (زمان خشک شدن گیاه گندم از لحاظ سبزیگی گیاه) را شامل می‌شوند. با توجه به اینکه منطقه مورد نظر در سه شیت ماهواره‌ای قرار گرفته است، فاصله بین دو تصویربرداری متوالی در بعضی مواقع به هشت روز کاهش می‌یابد.

جدول ۲. تقویم و شماره گذر تصاویر لندست سنجنده OLI برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸

ردیف	گذر	تاریخ	ردیف	گذر	تاریخ	ردیف	گذر	تاریخ	تعداد
1	167	2016.02.27	36	168	2015.02.25	36	168	2014.02.19	1
2	168	2016.03.12	36	168	2015.03.10	36	168	2014.03.16	2
3	167	2016.03.21	37	167	2015.03.19	37	168	2014.04.1	3
4	167	2016.04.6	37	167	2015.04.4	37	167	2014.04.8	4
5	167	2016.04.22	37	167	2015.04.20	37	167	2014.04.15	5
6	167	2016.05.8	36	168	2015.04.27	36	168	2014.04.23	6
7	168	2016.05.15	37	167	2015.05.6	37	168	2014.05.3	7
8	167	2016.05.23	37	167	2015.05.22	37	167	2014.05.10	8
9	168	2016.05.31	36	168	2015.05.30	36	167	2014.05.18	9
10	168		37	167		37	167	2014.05.26	10

ردیف	گذر	تاریخ	ردیف	گذر	تاریخ	تعداد
1	168	2018.02.27	36	167	2017.02.23	1
2	167	2018.03.11	37	167	2017.03.8	2
3	168	2018.03.18	36	168	2017.03.15	3
4	167	2018.03.27	37	167	2017.04.9	4
5	168	2018.04.3	36	168	2017.04.16	5
6	168	2018.04.19	36	167	2017.04.25	6
7	168	2018.05.5	36	168	2017.05.4	7
8	167	2018.05.14	37	167	2017.05.11	8
9	168	2018.05.21	36	168	2017.05.18	9
10	167		37	167	2017.05.27	10



شکل ۴. مراحل رشد گیاه گندم در مقایسه با زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای لندست (منبع نگارندگان مقاله)

طبقه‌بندی تصاویر

پس از تهیه تصاویر پیش‌پردازش شده، تصاویر با استفاده از طبقه‌بندی چندزمانه طبقه‌بندی شدند. روش‌های طبقه‌بندی چندزمانه با استفاده از روند تغییرات فصلی شاخص‌های پوشش گیاهی نتایج خوبی برای تفکیک کلاس‌های مختلف ارائه می‌دهند (رمبولد و ماسلی، ۲۰۰۴: ۲۶۴۳). گیاهان دارای ویژگی‌های ساختاری مختلفی هستند و این ویژگی‌ها در طی فرایند رشد آن‌ها به‌طور مداوم تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، مراحل مختلف رشد گیاه روی رفتار طیفی آن‌ها تأثیر می‌گذارد که این ویژگی اساس تفکیک انواع گیاهان در طبقه‌بندی چندزمانه است. یکی دیگر از مزایای روش‌های طبقه‌بندی چندزمانه کاهش اثر ابر و خطاهای اتمسفری است.

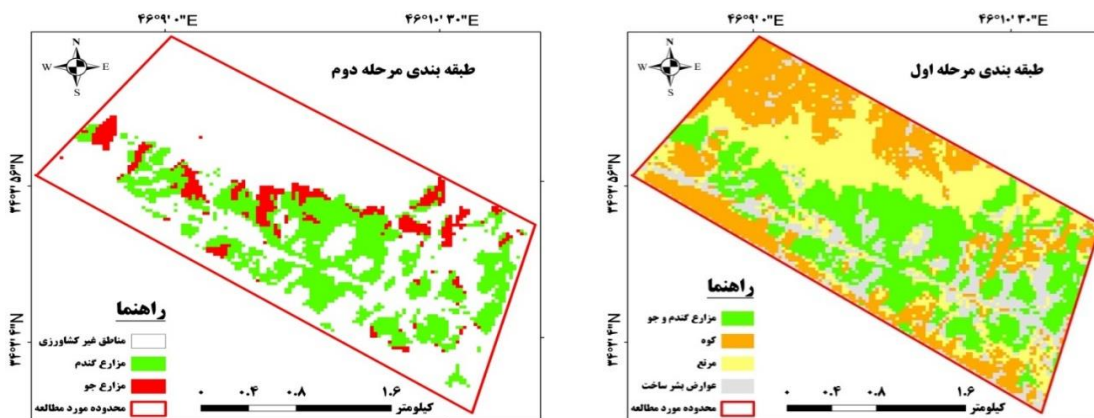
به‌منظور تفکیک کلاس گندم از سایر کلاس‌ها و نیز تطبیق مرز مزارع با نتایج خروجی از تصاویر ماهواره‌ای نیاز بود که نقشه میدانی به‌دست‌آمده با تصاویر تطبیق داده شود. بنابراین، دو طبقه‌بندی جداگانه برای سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر شباهت (*maximum likelihood*) به‌انجام رسید: در طبقه‌بندی اولیه، که با استفاده از تصویر ۲۳ مارس سال ۲۰۱۸ به‌انجام رسید، تصویر به چهار کلاس مرتع، عوارض انسان ساخت (جاده، مناطق تجاری، خانه مسکونی و غیره)، مناطق کوهستانی و زمین‌های زراعی گندم و جو تفکیک شد (شکل ۵). دلیل استفاده از تاریخ ۲۳ مارس برای طبقه‌بندی اولیه این است که با توجه به تقویم زراعی منطقه در این زمان مزارع گندم به حدی رشد کرده‌اند که به‌راحتی از سایر عوارض فاقد پوشش گیاهی مناسب قابل تفکیک باشند. طبقه‌بندی دوم به‌منظور تفکیک گندم از جو صورت پذیرفت. در این طبقه‌بندی، با توجه به اینکه جو حدوداً بیست روز زودتر از گندم به بیشینه سبزینه خود می‌رسد (با توجه به بررسی‌های نگارندگان و تجارب و آشنایی آن‌ها با منطقه) و این زمان در منطقه مقارن ۲۶ ماه می است، طبقه‌بندی قادر است آن‌ها را از هم تفکیک کند (شکل ۶).

به‌منظور ارزیابی صحت کلی طبقه‌بندی، ضریب کاپا و دقت کلی برای کلاس‌های تعریف‌شده به صورت جداگانه با استفاده از ماتریس خطای طبقه‌بندی محاسبه شد که نتایج در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. پارامترهای ارزیابی دقت طبقه‌بندی

پارامترهای آماری	طبقه‌بندی مرحله اول	طبقه‌بندی مرحله دوم
ضریب کاپا	۰٫۹۱	۰٫۶۶
دقت کلی	۰٫۹۴	۰٫۸۵

علت کاهش دقت کلی و به‌خصوص ضریب کاپا در طبقه‌بندی مرحله دوم این است که تفکیک گندم و جو، که دارای خصوصیات طیفی مشابهی‌اند، نسبت به تفکیک چهار کلاس مرتع، عوارض انسان ساخت، مناطق کوهستانی، و زمین‌های زراعی گندم و جو، خصوصیات طیفی مخصوص به خود و متفاوتی دارند. بنابراین، شباهت طیفی این دو کلاس به کاهش دقت نتایج منجر می‌شود.



شکل ۵. طبقه‌بندی مرحله اول با تصویر ۲۳ ماه مارس (۳) فروردین ۲۰۱۸

شکل ۶. طبقه‌بندی مرحله دوم ۲۶ ماه می (۵ خرداد) ۲۰۱۸

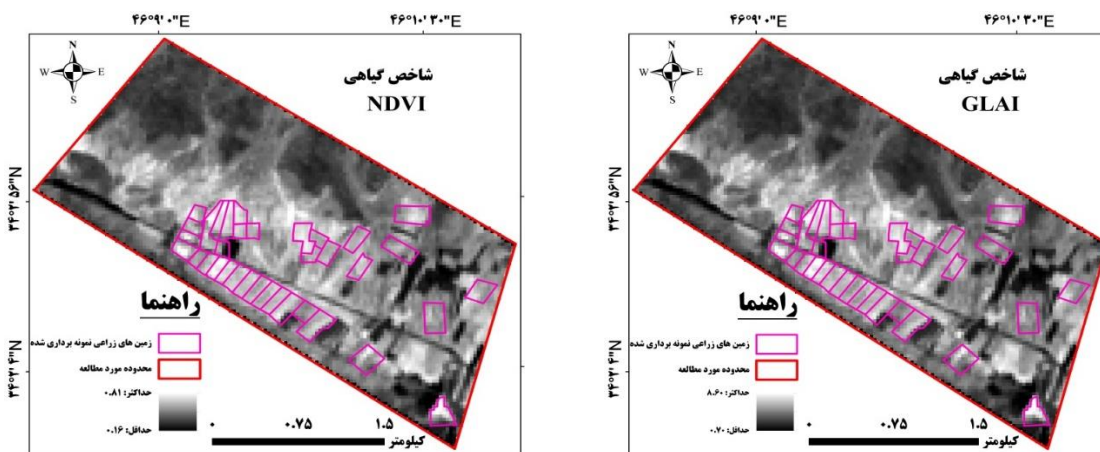
بعد از تفکیک کلاس‌ها، دو شاخص گیاهی GLAI (شکل ۷) و NDVI (شکل ۸) و با استفاده از روابط ۱ تا ۳ محاسبه شد (این دو شکل از میان تقریباً ۱۰۰ تصویر صرفاً برای نمایش شاخص‌های یادشده و موقعیت زمین‌ها گذاشته شده است). سپس، برای قطعات زراعی در زمان‌هایی که تصویر موجود بوده مقدار هر دو شاخص برای همه پیکسل‌های هر قطعه به دست آمد. در نهایت، منحنی‌های فنولوژیک گیاه با استفاده از هر دو شاخص برای هر قطعه زمین زراعی و برای هر سالی که زمین زیر کشت محصول گندم بوده است برآش داده شد.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \tag{1}$$

$$GLAI = 5.5666 * EVI2 - 0.7218 > 0 \tag{2}$$

$$EVI2 = 2.5 * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 2.4 * Red + 1)} \tag{3}$$

در اینجا، NIR و Red به ترتیب باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک سنجنده OLI ماهواره‌های لندست ۸ است.



شکل ۷. شاخص GLAI برای کل تصویر ۳ می (۱۳ اردیبهشت) سال ۲۰۱۴

شکل ۸. شاخص NDVI برای کل تصویر ۳ می (۱۳ اردیبهشت) سال ۲۰۱۴

ثبت زمانی تغییرات زیستی (چرخه حیات) گیاه را «فنولوژی» می‌گویند (موریسون و مورکرافت، ۲۰۰۶). دوره رشد غلات شامل مراحل جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، تشکیل روزت، ساقه رفتن، تشکیل گل، و تشکیل میوه است:

جوانه‌زنی: این مرحله با نفوذ ریشه در پوست دانه و غشای تخمدان آغاز می‌شود. ریشه اولیه زیاد قوی نیست؛ اما ریشه‌های ثانویه که در مراحل اولیه رشد به وجود خواهند آمد قوی‌تر بوده و قدرت کافی برای نگه‌داشتن گیاه در خاک را دارند.

پنجه‌زنی: پس از آنکه اولین برگ‌های گیاه سطح خاک را شکافت و ساقه اصلی شروع به رشد کرد، مرحله پنجه‌زنی آغاز می‌شود. **تشکیل روزت:** برگ‌های گیاه در فاصله دو مرحله پنجه‌زنی و ساقه رفتن رشد می‌کند و بلند می‌شود و مجموعه‌ای برگ را در ابتدای ساقه ایجاد می‌کند؛ این مرحله را تشکیل روزت می‌نامند. **ساقه رفتن:** در این مرحله ساقه طویل می‌شود. در اوایل این مرحله، گل‌آذین هم تشکیل می‌شود. **تشکیل گل‌آذین:** در این مرحله گل‌آذین بوته از داخل غلاف خارج می‌شود. گل‌کردن غلات معمولاً زمانی که گل‌آذین داخل غلاف است یا بلافاصله پس از تشکیل گل‌آذین انجام می‌گیرد. منظور از گل‌آذین، آرایش گل یا طرز قرارگرفتن گل روی ساقه است. **میوه:** زمانی که میوه می‌رسد، غشای تخمدان نازک می‌شود و به پوست دانه می‌چسبد. این گونه میوه‌ها را «گندمه» گویند، مثل دانه گندم، ذرت، و چاودار (زند و لعل‌نیا، ۱۳۹۳).

زمان هر یک از مراحل فنولوژیک برای منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد و در جدول ۴ و شکل ۴ درج شده است.

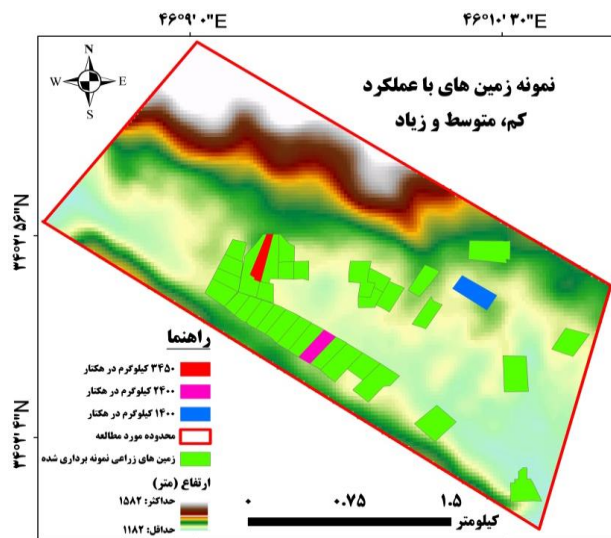
جدول ۴. زمان وقوع مراحل رشد گیاه گندم در منطقه مورد مطالعه به تفکیک سال از ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸

محصول	تشکیل گل‌آذین	ساقه رفتن	تشکیل روزت	پنجه‌زنی	جوانه‌زنی	سال
هفته آخر اردیبهشت	هفته سوم فروردین	هفته چهارم اسفند	هفته آخر بهمن	هفته دوم بهمن	—	۲۰۱۳-۱۴
هفته دوم خرداد	هفته دوم اردیبهشت	هفته سوم فروردین	هفته چهارم اسفند	هفته اول اسفند	—	۲۰۱۴-۱۵
هفته سوم خرداد	هفته دوم اردیبهشت	هفته دوم فروردین	هفته سوم اسفند	هفته آخر بهمن	—	۲۰۱۵-۱۶
هفته اول خرداد	هفته آخر فروردین	هفته اول فروردین	هفته دوم اسفند	هفته سوم بهمن	—	۲۰۱۶-۱۷
هفته چهارم خرداد	هفته سوم اردیبهشت	هفته دوم فروردین	هفته سوم اسفند	هفته آخر بهمن	—	۲۰۱۷-۱۸

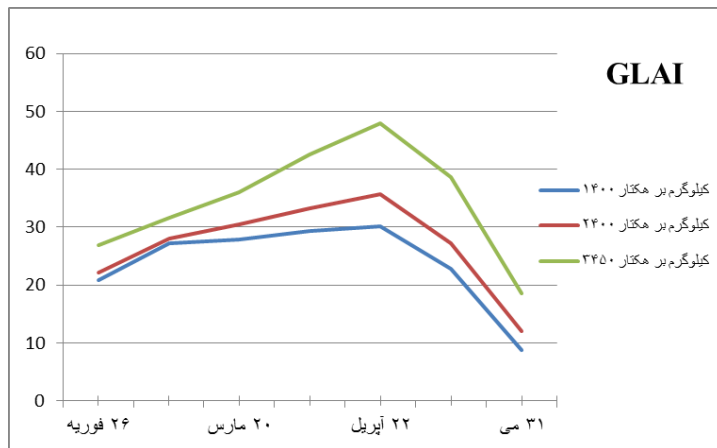
با توجه به اینکه زمان تهیه تصاویر بعد از زمان جوانه‌زنی بوده، در این مرحله پوشش گیاهی در تصاویر ماهواره‌ای به‌وضوح قابل مشاهده نیست. زمان مرحله برداشت چند هفته بعد از رسیدگی میوه است و این زمان در منطقه بسیار متغیر است که می‌توان به دلایلی همچون کمبود ماشین‌های برداشت، تحویل‌نگرفتن سیلوها، عدم دسترسی به‌موقع به زمین به دلیل بسته‌بودن راه دسترسی، عدم حضور کشاورز در منطقه اشاره کرد.

یافته‌های پژوهش

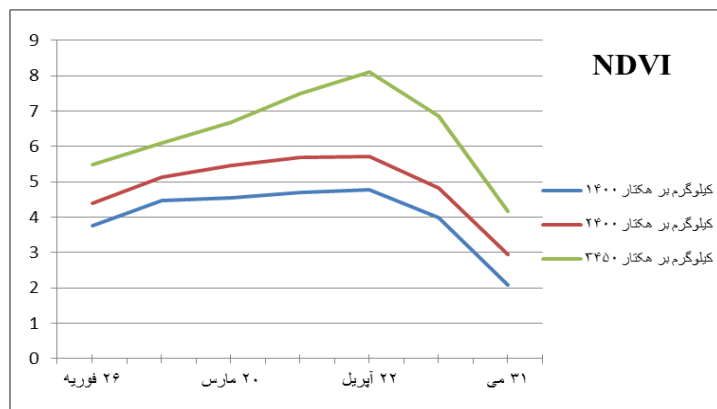
نمودارهای فنولوژیک زمین‌های زراعی در سال‌های مورد مطالعه تهیه شد. بنابراین، برای هر شاخص گیاهی ۱۰۸ نمودار به‌دست آمد. به‌منظور تحلیل میزان محصول و روند رشد گیاهان پارامترهای کمی مربوط به منحنی رشد محاسبه شد. برای نمونه، نمودار ۳ قطعه زمین هم برای GLAI (شکل ۱۰) هم برای NDVI (شکل ۱۱) به همراه مقدار عملکرد گندم آن‌ها برای سال ۲۰۱۴ نمایش داده شده است. این سه قطعه زمین، که به‌عنوان نمونه زمین‌هایی با عملکرد کم، متوسط، و زیاد انتخاب شده، در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند. در شکل ۱۲ نیز نمودارهای فنولوژیک مربوط به شاخص NDVI برای یک قطعه زمین، که چهار سال زراعی که از پنج سال مورد مطالعه کشت شده، همراه عملکرد محصول گندم آن زمین برای هر سال رسم شده است.



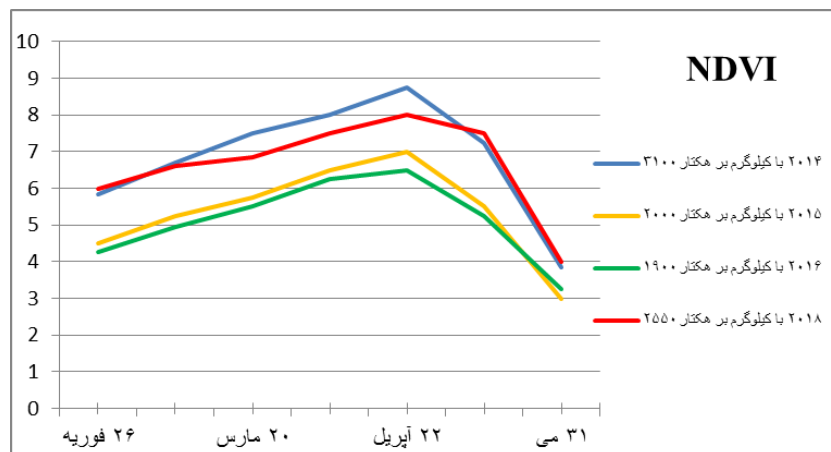
شکل ۹. نمونه زمین‌هایی با عملکرد کم، زیاد، و متوسط



شکل ۱۰. نمودار GLAI برای ۳ قطعه زمین زراعی سال ۲۰۱۴



شکل ۱۱. نمودار NDVI برای ۳ قطعه زمین زراعی سال ۲۰۱۴

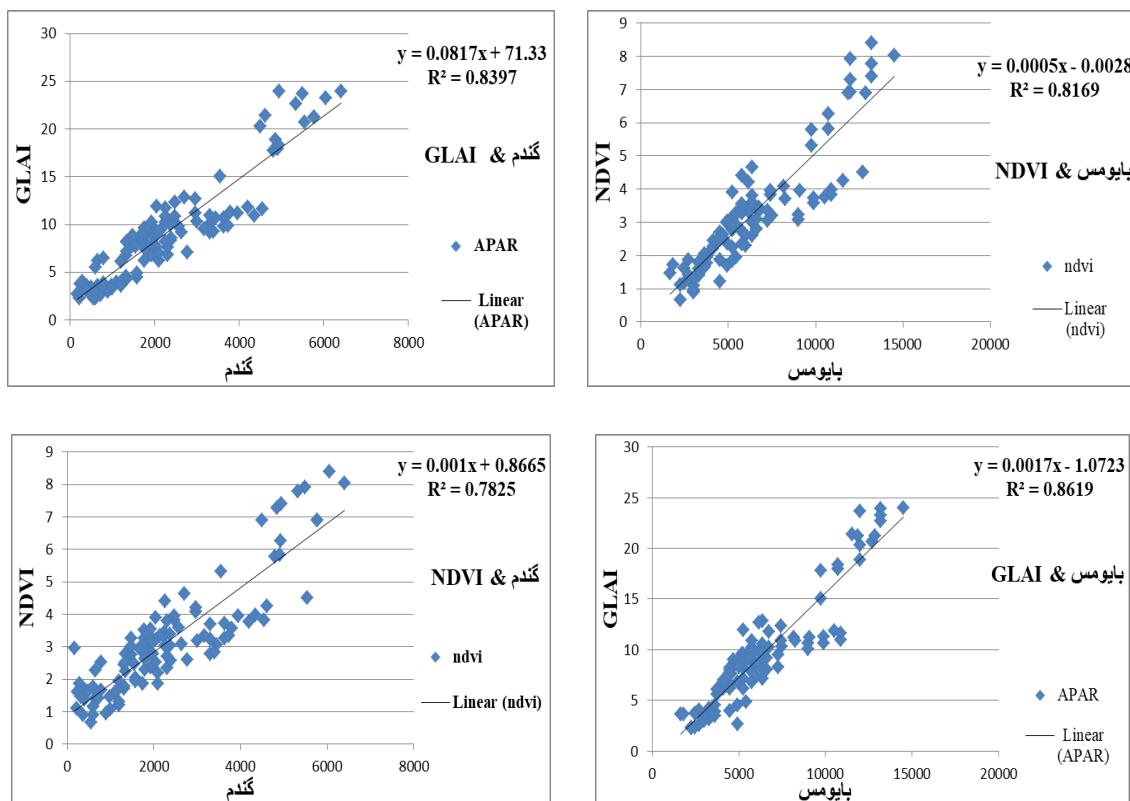


شکل ۱۲. نمودار NDVI برای یک قطعه زمین زراعی برای ۴ سال

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، نمودارهای هر دو شاخص رفتاری شبیه توزیع نرمال را دنبال می‌کنند که در ابتدای رشد مقدار هر دو شاخص حداقل بوده و با گذشت زمان و رشد گیاه گندم مقدار آن‌ها رو به افزایش می‌گذارد تا اینکه به بیشینه مقدار خود می‌رسد. بیشینه رفتار شاخص‌ها تحت تأثیر عواملی نظیر زمان کاشت، میزان بارندگی، و میزان دما قرار دارد. این زمان تقریباً مقارن ۲۰ آوریل در سال ۲۰۱۴ است. از این زمان به بعد مقدار آن‌ها رو به کاهش می‌گذارد و این کاهش تا زمان برداشت ادامه دارد. بنابراین، روند هر دو شاخص مثل هم بوده؛ ولی چون دامنه تغییرات GLAI از NDVI بیشتر است، روند تغییرات و ماکسیمم و مینیمم نمودار آن محسوس‌تر است. با توجه به مقدار عملکرد هر مزرعه که در کنار نمودار ذکر شده است و به‌وضوح مشاهده‌شدنی است، می‌توان نتیجه گرفت که هر اندازه مقدار عملکردها افزایش یابد، به همان نسبت مساحت زیرنمودار و ماکسیمم و مینیمم نمودارها نیز تغییر کرده است.

با توجه به نمودارهای فنولوژیک، پارامتر هندسی مساحت زیرنمودار هر دو شاخص برای همه زمین‌ها محاسبه شد. به همین منظور، روابط رگرسیون و ضرایب تعیین (R^2) بین شاخص‌ها و گندم و زیست‌توده ایجاد شد که مقادیر هر کدام در نمودارهای زیر نمایش داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین ضریب تعیین هم برای گندم هم برای کاه متعلق به شاخص GLAI است. پس در صورتی که بخواهیم فقط از یک شاخص برای برآورد محصول استفاده کنیم، باید از GLAI استفاده کنیم؛ اما در صورت استفاده از هر دو شاخص، ما می‌توانیم با قراردادن محصول گندم و کاه به‌عنوان متغیر مستقل و معرفی شاخص‌های گیاهی GLAI و NDVI به‌عنوان متغیر وابسته در محیط نرم‌افزاری اکسل رگرسیون خطی چندمتغیره ایجاد کنیم و ضریب تعیین را بهبود بخشیم و برآورد را با دقت بیشتری انجام دهیم. بنابراین، اجرای رگرسیون چندمتغیره و تأیید کردن هر دو شاخص به‌طور هم‌زمان به افزایش مقدار ضریب تعیین و پیوستگی نتایج منجر شد که در مقایسه با استفاده جداگانه از شاخص‌ها دقت بالاتری به‌دست آمد.



شکل ۱۳. معادلات رگرسیونی، خط برازش، و ضرایب تعیین آن‌ها

$$y = 10.2 * x_1 + 0.61 * x_2 + 13.31$$

$$R^2 = 0.851$$

رگرسیون چندمتغیره برای گندم:

$$y = 16.1 * x_1 + 31.8 * x_2 + 2897 * G$$

$$R^2 = 0.865$$

رگرسیون چندمتغیره برای کاه:

در رابطه‌های رگرسیونی چندمتغیره برای گندم و کاه X_1 و X_2 به ترتیب معادل NDVI و GLAI هستند. با توجه به داشتن کلاس گندم که در مرحله طبقه‌بندی تصویر سال ۲۰۱۸ به دست آمد، مقدار کل NDVI و GLAI برای کل زمین‌های زراعی گندم محاسبه و مقادیر به دست آمده در بهترین رابطه، که رگرسیون چندمتغیره است، قرار داده شد و مقدار گندم و کاه کل منطقه مورد مطالعه به دست آمده در مقدار کل گندم برابر ۲۹۵,۶۰۶ تن و مقدار کل کاه برابر ۷۰۵,۰۳۲ تن در منطقه برای سال ۲۰۱۸ برآورد شد. برای هر کدام از مراحل فنولوژیک ارزش شاخص NDVI از روی نمودارهای فنولوژیک این شاخص استخراج شد. بعد از به دست آوردن ارزش شاخص NDVI برای هر کدام از پنج مرحله فنولوژیک در پنج سال مورد مطالعه بین مراحل فنولوژیک و مقدار عملکرد گندم رابطه رگرسیونی برقرار شد که نتایج در قالب نمودارهای شکل ۱۴ نمایش داده شده است. با توجه به نمودارها از بین پنج مرحله فنولوژیک مورد بررسی مرحله گل‌آذین با $R^2 = 0.65$ بیشترین ضریب همبستگی را به خود اختصاص داده است.



شکل ۱۴. روابط رگرسیون بین عملکرد گندم و مراحل فنولوژیک

خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) یک معیار خطای بسیار پرکاربرد برای اندازه‌گیری دقت است. این شاخص نخست اختلاف تک‌تک مقادیر مشاهده‌شده را با مقادیر پیش‌بینی‌شده محاسبه می‌کند و به توان دو می‌رساند. از این اختلافات میانگین می‌گیرد و در نهایت جذر عدد میانگین را ارائه می‌دهد که همان RMSE است. این شاخص معیاری برای دقت نتایج است و معمولاً هرچه مدل بهتر بر داده‌ها منطبق باشد مقدار آن کمتر می‌شود. با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده با نتایج واقعی، مقدار $RMSE = 94$ برای گندم و مقدار $RMSE = 129$ برای کاه به‌دست‌آمده بدین معنی که مقدار خطا برای پیش‌بینی عملکرد گندم و کاه به ترتیب ۹۴ و ۱۲۹ کیلوگرم بر هکتار است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه هدف برآورد میزان محصول گندم و کاه با استفاده از تصاویر Landsat-OLI بود. برای بررسی ویژگی‌ها و

فرایندهای رشد در طول دوره رشد (از کاشت تا برداشت) از شاخص‌های NDVI و GLAI مستخرج از سنجنده OLI برای نمایش تغییرات زیست‌توده و گندم استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که GLAI یا شاخص سطح برگ سبز (جذب) ضریب تعیین بیشتری نسبت به NDVI دارد. بنابراین، GLAI قادر است عامل اصلی فرایند تولید در گیاه را مدل نماید. این امر باعث ترجیح این شاخص نسبت به NDVI برای برآورد میزان محصول می‌شود. با این حال، با استفاده از رابطه رگرسیون چندمتغیره، علاوه بر GLAI، از NDVI نیز استفاده شد و به افزایش مقدار ضریب تعیین و پیوستگی نسبت به استفاده جداگانه از شاخص‌ها منجر شد. بنابراین، میزان محصول و کاه با صحت بیشتری برآورد می‌شود. با استفاده از هر دو شاخص، ضریب تعیین قابل توجهی به‌خصوص برای کاه با $R^2=0.865$ به‌دست آمد. این امر منجر به این می‌گردد که مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر باشند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بررسی رفتار فنولوژی مبتنی بر شاخص‌های گیاهی، که بیانگر میزان سبزیگی گیاه است، رابطه قوی‌تری با کاه، که مستقیم با برگ و ساقه گیاه در ارتباط است، دارد و بهتر می‌تواند میزان کاه را برآورد کند. ضرایب تعیین بالایی که از طریق رابطه رگرسیون چندمتغیره هم برای گندم ($R^2=0.851$) هم برای کاه ($R^2=0.865$) به‌دست آمد نشان‌دهنده قابلیت بالای روش به‌کارگرفته‌شده در این تحقیق برای برآورد عملکرد گندم و زیست‌توده است. تفکیک و طبقه‌بندی گندم و جو مطمئناً دقت کمتری نسبت به طبقه‌بندی مرحله اول دارد. علت کاهش دقت کلی و به‌خصوص ضریب کاپا در طبقه‌بندی مرحله دوم (تفکیک گندم و جو) این است که گندم و جو به علت شباهت‌های ساختاری دارای خصوصیات طیفی و بازتابی مشابهی‌اند که باعث یکسان دیده‌شدن در تصاویر ماهواره‌ای می‌شود. از بررسی مراحل فنولوژیک با مقدار عملکرد گندم، که بخشی از نوع‌آوری مقاله محسوب می‌شود، نیز به این نتیجه رسیدیم که اولاً کل مراحل فنولوژیک نسبت به نمودارهای فنولوژیک دو شاخص گیاهی مورد مطالعه از ضرایب رگرسیون کمتری برخوردارند؛ بدین معنی که نمودار کل مراحل رشد گندم نسبت به زمان‌های حساس فنولوژیکی بر روی این نمودارها از توانایی بیشتری برای تخمین عملکرد گندم برخوردارند. از بین پنج مرحله فنولوژیک مورد بررسی، مرحله تشکیل گل‌آذین با $R^2=0.65$ بیشترین ضریب همبستگی را به خود اختصاص داد. این مرحله از لحاظ زمانی تقریباً نقطه اوج نمودار یا همان ارزش ماکسیمم نمودار فنولوژیک را شامل می‌شود.

منابع

- عزیزی، قاسم و یاراحمدی، داریوش. (۱۳۸۲). بررسی ارتباط پارامترهای اقلیمی و عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل رگرسیونی (مطالعه موردی دشت سیلاخور)، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۵(۴۴): ۲۳-۳۰.
- زند، بهنام و لعل‌نیا، علی‌اکبر. (۱۳۹۳). کتاب زراعت غلات، تهران: انتشارات پیام نور.
- نصرالهی، محمد؛ ممبئی، مریم؛ ولی‌زاده، سارا و خسروی، حسن. (۱۳۹۳). بررسی تأثیر روند تغییرات کاربری اراضی/ پوشش زمین بر وضعیت منابع آب زیرزمینی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: دشت گیلان غرب)، فصل‌نامه پژوهش‌های اطلاعات جغرافیایی، ۲۳(۹۱): ۸۹-۹۷.
- وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۸۴). راهنمای داشت گندم. سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی.
- Azizi, Gh. and Yarmohammadi, M. (2003). Investigation of relationship between climate parameters and wheat yield using linear regression model (Silakhor plain studies), Quarterly Journal of Geographic Research, PP. 1-35.
- Bazgeer, S. (2005). Land Use Change Analysis In The Submountainous Region Of Punjab Using Remote Sensing, Gis, And Agrometeorological Parameters (Doctoral dissertation, Punjab Agricultural University; Ludhiana), PP. 25-39.
- Bazgeer, S.; Kamali, GH. and Mortazavi, A. (2007). Wheat Yield Prediction through Agrometeorological Indices for Hamedan, Iran, Biaban Journal, 12: 33-38.
- Bazgeer, S.; Kamali, GH. A.; Sedaghatkarder, A. and Moradi, A. (2008). Pre-harvest Wheat Yield Prediction Using Agrometeorological Indices for Different Regions of Kordestan Province, Iran, Research Journal of Environmental Sciences, 2(4): 275-280.
- Fensholt, R.; Rasmussen, K.; Nilson, T.T. and Mbow, C. (2009). Evaluation of Earth Observation Based Long Term Vegetation Trends-Intercomparing NDVI Time series Trend Analysis Consistency of Sahel From AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT Data, Remote Sensing of Environment, PP. 1-13.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2011). Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics, Report, No. 56719-GB; FAO: Rome, Italy.
- Geng, Y.B.; Dong, Y.S. and Meng, W.Q. (2000). Progress of terrestrial carbon cycle studies. Advance in Earth Science, 19: 297-306.
- Hathout, S. and Carlyle, S. (2003). The Use of Remote Sensing and Geographical Information Systems for the Forecasting of Wheat Yield by Ostan in Iran. The Arab World Geographer, 6(4) 221-236.
- Huang, J.; Sedano, F.; Huang, Y.; Ma, H.; Li, X.; Liang, S.; ... and Wu, W. (2016). Assimilating a synthetic Kalman filter leaf area index series into the WOFOST model to improve regional winter wheat yield estimation. Agricultural and forest meteorology, 216: 188-202.
- Huang, J.; Ma, H.; Sedano, F.; Lewis, P.; Liang, S.; Wu, Q.; ... and Zhu, D. (2019). Evaluation of regional estimates of winter wheat yield by assimilating three remotely sensed reflectance datasets into the coupled WOFOST-PROSAIL model. European Journal of Agronomy, 102: 1-13.
- Jihad, M. o. A. (2014). Agronomical statistics, 2012-2013 agronomical year. (in Persian).
- Jégo, G.; Pattey, E. and Liu, J. (2012). Using leaf area index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of fiel crops. Field Crops Res. 131: 63-74.
- Labus, M. P.; Nielsen, G.; Alawrence, R.L.; Engeld, R. and Long, S. (2002). Wheat Yield Estimates Using Multi-temporal NDVI Satellite Imagery Int, Journal of Remote Sensing, 23(20): 4169-4180.

- Morison, J. I. and Morecroft, M. D. (Eds.) (2006). Plant growth and climate change.
- Rembold, F. and Maselli, F. (2004). Estimating inter-annual crop area variation using multi-resolution satellite sensor images, *International Journal of Remote Sensing*, 25(13): 2641-2647.
- Rötter, R. P.; Carter, T. R.; Olesen, J. E. and Porter, J. R. (2011). Crop-climate models need an overhaul, *Nature Climate Change*, 1(4): 175-177.
- Sadras, V. O. and McDonald, G. (2012). Water use efficiency of grain crops in Australia: principles, benchmarks and management. *Change*, 11(19): 24-33.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Tucker, C.J.; Holben, B.N.; Elgin, J.H., Jr. and McMurtrey, J.E. (1980). III Relationship of spectral data to grain yield variation. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 46: 657-666.
- UN Food and Agriculture Organization (FAO) Global Information and Early Warning System(GIEWS) (2013). Available online: <http://fao.org/giews> (accessed on 18 February 2013).
- Zend, B. and Lal Nia, A. (2014). *Crop Growing*, Tehran: Payam Noor University (in Persian).