

Assessment of the Relationship between Land Surface Temperature (LST) and Near Surface Water Vapor in Central part of Iran

Mina Moradizadeh ^{1*}, Mehdi Momeni ², MohammadReza Sarajian ³

¹ Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

³ Remote sensing Division, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Atmospheric water vapor which attenuates remotely sensed radiance is one of the most effective parameters in atmospheric-surface interactions (e.g. energy fluxes between the ground and the atmosphere), because the atmospheric water vapor is the most effective atmospheric parameter on received radiance. Total atmospheric water vapor has a critical role in Land Surface Temperature (LST) estimation. LST is one of the most important parameters in land sciences and helps the environmental studies, ecological and agriculture applications. Estimation of an accurate LST needs the atmospheric water vapor content. This paper offers Ratio algorithm for retrieving atmospheric water vapor content (W) and Near Surface Mass Mixing Ratio (MMR) water vapor using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) radiance data. Then, atmospheric water vapor content (W) is used to estimate LST. Finally, validation of the algorithm has been done using independent data sets and the effect of LST on near surface water vapor have been analyzed. As a result of this paper, MODIS data are appropriate for LST and water vapor mapping.

Key words: MODIS, Land Surface Temperature (LST), Near Surface Mass Mixing Ratio (MMR), Ratio Technique, Transmissivity.

* m.moradizadeh@trn.ui.ac

بررسی رابطه بین دمای سطحی خاک و رطوبت نزدیک به سطح در مرکز ایران

مینا مرادی‌زاده*، استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
مهدی مؤمنی، دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
محمد رضا سراجیان، دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۰/۱۱/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶، صص ۶۸-۵۹

چکیده

رطوبت اتمسفری، یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در تمام تعامل‌های بین سطح و اتمسفر مانند جریان‌های انرژی بین زمین و اتمسفر است و مقدار این شاخص، تعادل انرژی در سطح زمین را نشان می‌دهد. از آنجاکه مقدار نهایی رطوبت اتمسفر، تأثیرگذارترین شاخص اتمسفر بر رادیانس رسیده به سنجنده است، در سنجش از دور و به‌ویژه در تعیین Land Surface Temperature (LST) اهمیت بسیاری دارد. LST، یکی از شاخص‌های مهم و اساسی در علوم زمین است که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر تعیین بسیاری از شاخص‌های دیگر تأثیر می‌گذارد. از رطوبت اتمسفری و LST در بسیاری از مطالعه‌های محیطی، کاربردهای اکولوژیک و کشاورزی استفاده می‌شود. برای تخمین LST دقیق، لازم است مقدار رطوبت اتمسفری برآورد شود. در مقاله حاضر، مقدار رطوبت ستونی اتمسفر و مقدار رطوبت (MMR (Mass Mixing Ratio نزدیک به سطح با استفاده از سنجنده MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) برآورد و سپس از شاخص رطوبت ستونی اتمسفر برای تخمین LST دقیق و برای تخمین رطوبت از روش Ratio بر اساس داده‌های MODIS استفاده شد. در مقاله حاضر، دقت شاخص‌های حاصل با استفاده از سری داده‌های مستقل برآورد و نتیجه شد داده‌های MODIS برای نقشه‌سازی رطوبت و دمای سطح مناسب هستند. در نهایت، تأثیر LST بر رطوبت MMR نزدیک به سطح بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: سنجنده MODIS، دمای سطح خاک، مقدار رطوبت MMR نزدیک به سطح، روش Ratio

مقدمه

استفاده از باندهای حرارتی در مناطق دیگر برای یافتن رطوبت اتمسفر جواب بهتری می‌دهند؛ علت اینست که در مناطق بایر با تفاوت زیاد بین درجه حرارت زمین و لایه‌های مرزی، سنجش از دور IR به رطوبت لایه مرزی حساس است (Kaufman and Gao, 1992: 880). از آنجاکه ناحیه مرکزی ایران جزو مناطق بایر محسوب می‌شود، روش استفاده از باندهای Near IR برای برآورد مقدار رطوبت اتمسفر مناسب‌تر است. اگرچه در ابتدا این روش‌ها برای برآورد رطوبت ستونی پدید آمدند، از آنها برای برآورد رطوبت نزدیک سطح، درون‌سطحی با متر از کم هم استفاده می‌شود (Kaufman and Gao, 1992: 875)؛ زیرا در پژوهش‌های پیشین به این نکته پی برده شده است که رطوبت نزدیک به سطح و بخار تعلیق‌پذیر ستونی نهایی همبستگی ($r^2 = 0.79$) دارند و بیشتر رطوبت‌ها (۸۰ درصد) درون ۲ کیلومتری زمینی هستند (Kaufman and Gao, 1992: 874). در پژوهش حاضر، از روش Ratio استفاده می‌شود که Sobrino برای برآورد مقدار رطوبت ستونی استفاده کرده است؛ علت این امر، حساسیت کم این روش به نویز ناشی از خطاهای آماری کانال‌ها، تغییرات ترکیبات دیگر اتمسفر و تغییرات ویژگی‌های سطح است (Sobrino and El. Kharraz, 2003: 5170).

روش Ratio

روش Ratio برای برآورد مقدار رطوبت اتمسفری و بر اساس این واقعیت است که عبور از اتمسفر به مقدار رطوبت موجود در اتمسفر بستگی دارد. بنابراین مقدار رطوبت اتمسفر از مقایسه بین رادیانس بازتاب‌شده در کانال‌های غیرجذب و کانال‌های جذب در محدوده NIR حاصل می‌شود (Sobrino and El.

به علت محدودیت روش‌های مختلف در تعیین رطوبت اتمسفر، روش‌های سنجش از دور بسیاری در سال‌های اخیر ایجاد شده‌اند که تخمین مقدار رطوبت اتمسفر را امکان‌پذیر می‌کنند. دو روش اصلی برای تخمین مقدار رطوبت اتمسفر با داده‌های سنجش از دور وجود دارد (Schroedter and Drews, 2007: 250): در روش اول از باندهای حرارتی و در روش دوم از باندهای Near Infra Red (NIR) برای تخمین رطوبت استفاده و روش اول برای مناطق دارای پوشش گیاهی و روش دوم برای مناطق بایر استفاده می‌شود (Schroedter and Drews, 2007: 251).

در مقاله حاضر برای برآورد رطوبت اتمسفر با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS، از الگوریتم عملی مستقل از LST و به عبارتی، از الگوریتم Ratio برای برآورد رطوبت استفاده شد که بر اساس رادیانس است. این روش جزو روش‌های دسته دوم و بر اساس استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک است و دلیل استفاده از آن، بایر بودن بیشتر مناطق مرکزی ایران است. در مقاله حاضر، داده‌ها به دو دسته تقسیم شدند: دسته اول برای برآورد ضرایب معادله‌ها و دسته دوم برای آزمون کردن این ضرایب استفاده شدند.

تعیین مقدار رطوبت با داده‌های MODIS

روش‌های بسیاری برای برآورد مقدار رطوبت با استفاده از باندهای حرارتی سنجنده MODIS وجود دارند که از جمله آنها، روش‌های تفاضل Split window، روش شیب برازش، روش نسبت واریانس و روش Look-up table هستند (Kaufman and Gao, 1992: 873). تجربه نشان داده است روش استفاده از باندهای Near IR در مناطق بایر و روش

$$W = f_{17}W_{17} + f_{18}W_{18} + f_{19}W_{19} \quad (7)$$

در رابطه ۷، f_i وزن هرکدام از سه کانال در برآورد رطوبت است.

تعیین وزن کانال‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹

همان‌طور که گفته شد، سه باند ۱۷، ۱۸ و ۱۹ حساسیت‌های متفاوتی دارند و برای برآورد رطوبت، باید میانگین وزن‌دار رطوبت‌های حاصل از سه باند محاسبه شود. به این ترتیب، رطوبت اتمسفری دارای ضرایب جذب متفاوتی در کانال‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ سنجنده MODIS است (Sobrino and El. Kharraz, 2003: 5172). برای محاسبه این وزن‌ها از رابطه ۸ استفاده شد.

$$f_i = \frac{\eta_i}{\sum \eta_i} \quad (8)$$

در این رابطه، $\eta_i = \frac{|\Delta\tau_i|}{|\Delta W|}$ ، $i=17,18,19$ و ΔW تفاوت بین بیشترین و کمترین مقدار رطوبت اتمسفر در منطقه مطالعه شده است. مقدار عددی بیشترین و کمترین رطوبت از داده‌های سنجنده AIRS حاصل و ΔW محاسبه شد. $\Delta\tau_i$ تفاضل عبور در رطوبت بیشینه و کمینه در باند نام است (Kaufman and Gao, 1992: 873). مقدار عبور در باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ برای کمینه و بیشینه رطوبت با استفاده از الگوی انتقال تابشی نرم‌افزار MODTRAN 4.5 محاسبه شد. مقادیر عبور محاسبه شده در اتمسفر استاندارد Mid-latitude (Sobrino and El. Kharraz, 2003: 5163 summer) و مقدار رطوبت کمینه و بیشینه شبیه‌سازی شدند (بیشینه = 5.4 gm/cm^2 و کمینه = 0.092 gm/cm^2). نتایج این شبیه‌سازی در جدول (۲) نشان داده شده است.

در سنجنده MODIS، از کانال‌های ۲، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ استفاده می‌شود که کانال‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ کانال‌های جذب رطوبت هستند و کانال ۲ کانال غیرجذب است. ویژگی‌های این کانال‌ها در جدول (۱) دیده می‌شوند (جدول ۱).

جدول ۱. ویژگی‌های طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) سنجنده MODIS در الگوریتم تخمین رطوبت

شماره باند	مرکز باند (μm)	پهنای باند (μm)
۲	۰.۸۶۵	۰.۰۴
۱۷	۰.۹۰۵	۰.۰۳
۱۸	۰.۹۳۶	۰.۰۱
۱۹	۰.۹۴۰	۰.۰۵

در الگوریتم Ratio، نسبت‌های G_{17} ، G_{18} و G_{19} به شکل رابطه‌های ۱ تا ۳ تعریف می‌شوند:

$$G_{17} = \frac{L_{17}}{L_2} \quad (1)$$

$$G_{18} = \frac{L_{18}}{L_2} \quad (2)$$

$$G_{19} = \frac{L_{19}}{L_2} \quad (3)$$

در این روابط L_i ها رادیانس‌های حاصل از کانال‌های ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲ سنجنده MODIS هستند. مقادیر رطوبت برای کانال‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ از روابط ۴ تا ۷ محاسبه می‌شوند.

$$W_{17} = a_1 + b_1G_{17} + c_1G_{17}^2 \quad (4)$$

$$W_{18} = a_2 + b_2G_{18} + c_2G_{18}^2 \quad (5)$$

$$W_{19} = a_3 + b_3G_{19} + c_3G_{19}^2 \quad (6)$$

این سه باند حساسیت متفاوتی به رطوبت در شرایط اتمسفری یکسان دارند. بنابراین باید وزن هرکدام از کانال‌های یادشده در فرآیند تخمین رطوبت تعیین و مقدار رطوبت نهایی از رابطه ۷ تخمین زده شود.

جدول ۲. مقدار عبور در بیشینه و کمینه رطوبت برای باندهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹

τ_{17} min	τ_{17} max	τ_{18} min	τ_{18} max	τ_{19} min	T_{19} max
۰.۸۵	۰.۶۷۸	۰.۶	۰.۰۵۶	۰.۷۸	۰.۲۷۳

به این ترتیب، وزن هر باند محاسبه می‌شود. طبق نتایج، باند ۱۸ قوی‌ترین باند جذب و باند ۱۷ ضعیف‌ترین آنهاست. وزن‌های حاصل عبارتند از: $f_{19} = 0.444$ و $f_{18} = 0.415$ ، $f_{17} = 0.141$ به این ترتیب، رابطه ۷ به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$W = 0.141W_{17} + 0.444W_{18} + 0.415W_{19} \quad (9)$$

رابطه ۹، برای محاسبه رطوبت اتمسفر از تصاویر سنجنده MODIS برای ایران پیشنهاد می‌شود.

پایه‌سازی روش **Ratio** و بررسی دقت آن برآورد ضرایب چندجمله‌ای الگوریتم **Ratio** بر اساس رطوبت نزدیک به سطح ایستگاه‌های هواشناسی تنها سنجه رطوبتی که در همه ایستگاه‌های هواشناسی برداشت می‌شود، رطوبت نسبی هوای نزدیک به سطح است و از طریق داده‌های فشار جو و

فشار رطوبت که ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌کنند و با استفاده از رابطه ۱۰، رطوبت MMR نزدیک به سطح در ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه می‌شود.

$$MMR = 622 \left(\frac{e}{P - e} \right) \quad (10)$$

که P : فشار جو (میلی‌بار) و e : فشار رطوبت (میلی‌بار) است و مقادیر نسبت اختلاط بر حسب گرم بر کیلوگرم هستند (علیزاده، ۱۳۸۵: ۱۳۵). یازده سری داده (جدول ۳) برای برآورد ضرایب چندجمله‌ای در نظر گرفته شدند و برای تعیین ضرایب چندجمله‌ای از داده‌های زمینی (اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های هواشناسی) استفاده شد. پس از حذف پیکسل‌های ابری با استفاده از حد آستانه ($NDVI < 0$)، با استفاده از نه سری اول داده‌ها ضرایب روابط ۴، ۵ و ۶ با برازش بر نسبت‌های باندهای سنجنده MODIS (G_{17}, G_{18}, G_{19}) و رطوبت MMR نزدیک به سطح حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه شدند (جدول ۴).

جدول ۳. ویژگی‌های سری داده‌های استفاده‌شده در برآورد ضرایب چندجمله‌ای بر اساس رطوبت MMR نزدیک به سطح

سری داده	نام سکو	تاریخ اخذ تصویر MODIS	تاریخ اخذ داده‌های هواشناسی
سری داده ۱	Terra	۲۰۰۵/۲/۲۸	۲۰۰۵/۲/۲۸
سری داده ۲	Terra	۲۰۰۵/۳/۳	۲۰۰۵/۳/۳
سری داده ۳	Terra	۲۰۰۵/۳/۲۳	۲۰۰۵/۳/۲۳
سری داده ۴	Terra	۲۰۰۵/۵/۲۶	۲۰۰۵/۵/۲۶
سری داده ۵	Terra	۲۰۰۵/۶/۵	۲۰۰۵/۶/۵
سری داده ۶	Terra	۲۰۰۵/۶/۹	۲۰۰۵/۶/۹
سری داده ۷	Terra	۲۰۰۵/۶/۱۸	۲۰۰۵/۶/۱۸
سری داده ۸	Terra	۲۰۰۵/۶/۲۵	۲۰۰۵/۶/۲۵
سری داده ۹	Terra	۲۰۰۵/۷/۲	۲۰۰۵/۷/۲
سری داده ۱۰	Terra	۲۰۰۵/۴/۲۰	۲۰۰۵/۴/۲۰
سری داده ۱۱	Aqua	۲۰۰۵/۱۱/۲۳	۲۰۰۵/۱۱/۲۳

هواشناسی قرار داشتند و غیرابری بودند. سپس این مقادیر با اندازه‌گیری‌های رطوبت نزدیک به سطح ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه شده از رابطه ۱۰ مقایسه شدند. طبق نتایج، دقت روش Ratio برای برآورد رطوبت MMR نزدیک به سطح، حدود $1.1gm/kg$ است. از آنجا که محدوده تغییرات رطوبت MMR نزدیک به سطح در مکان‌ها و زمان‌های مختلف $18gm/Kg$ است، خطای نسبی الگوریتم پیشنهادی برای برآورد رطوبت نزدیک به سطح حدود ۶ درصد است. در نتیجه، دقت روش Ratio در مقایسه با دقت روش‌هایی که در گذشته برای برآورد رطوبت نزدیک به سطح آزمون شده‌اند (جدول ۵) پذیرفتنی است. یکی از دلایل ایجاد خطا اینست که در این مرحله، برای برآورد ضرایب چندجمله‌ای از اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شد و بنابراین لازم بود برای محاسبه رطوبت نزدیک به سطح در لحظه تصویربرداری بین اندازه‌گیری‌های فشار هوا و فشار رطوبت در ایستگاه‌های هواشناسی که هر سه ساعت یکبار انجام می‌شوند، اینترپلاسیون انجام گیرد. بنابراین خطای اینترپلاسیون هم وارد کار شد که خطای درخور توجهی است. از دیگر دلایل ایجاد این خطا نبود همسانی زمانی و مکانی بین اندازه‌گیری‌های سطحی و ماهواره‌ای است (Kaufman and Gao, 1992: 876).

جدول ۴. ضرایب چندجمله‌ای روش Ratio برای

برآورد رطوبت MMR نزدیک به سطح

a_1	۵.۰۵۲
b_1	-۹.۶۲۹
c_1	۴.۷۴۱
a_2	۰.۱۶۴
b_2	۱.۵۸۸
c_2	-۳.۲۶۶
a_3	-۰.۶۱۹
b_3	۴.۸۱۶
c_3	-۵.۶۹۹

بنابراین، الگوریتم پیشنهادی برای تعیین رطوبت MMR نزدیک به سطح در ایران مطابق روابط ۱۱ تا ۱۴ است.

$$W_{17} = 5.052 - 9.629G_{17} + 4.741G_{17}^2 \quad (11)$$

$$W_{18} = 0.164 + 1.588G_{18} - 3.266G_{18}^2 \quad (12)$$

$$W_{19} = -0.619 + 4.816G_{19} - 5.699G_{19}^2 \quad (13)$$

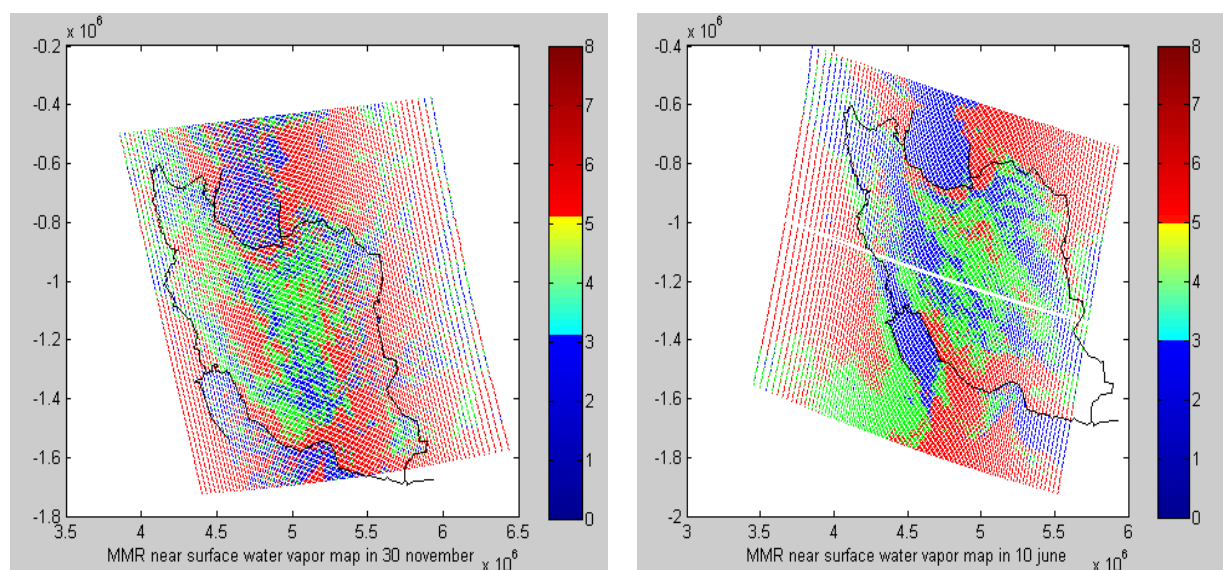
$$W = 0.141W_{17} + 0.444W_{18} + 0.415W_{19} \quad (14)$$

برآورد دقت رطوبت MMR نزدیک به سطح حاصل از الگوریتم Ratio

برای تعیین دقت رطوبت MMR نزدیک به سطح برآورد شده با روش Ratio، ضرایب حاصل از سه سری اول داده‌ها در دو سری آخر داده‌ها (سری داده‌های چک) استفاده شدند. به این منظور، برای دو سری آخر داده‌ها (جدول ۳) و با استفاده از روش Ratio (رابطه‌های ۱۱ تا ۱۴)، رطوبت نزدیک به سطح برای پیکسل‌هایی محاسبه شد که در مکان ایستگاه‌های

جدول ۵. همبستگی بین رطوبت نزدیک به سطح حاصل از روش‌های قدیمی با داده‌های زمینی

پژوهشگر	الگوریتم	همبستگی رطوبت نزدیک به سطح
Czajkowski et al., 2001: 260	شیب برازش	۰/۲
Czajkowski et al., 2001: 261	نسبت واریانس	۰/۲
Price and Goward, 1994: 2834	Look Up Table	۰/۳۶
Kleespies and McMillin, 1990: 855	Split window	۰/۷



شکل ۱. نقشه رطوبت MMR نزدیک به سطح برآوردشده با روش Ratio

انتقال تابشی برای تعیین LST استفاده می‌کنند، روش مستقیم نام دارند (Ackerman et al., 1996: 318). در پژوهش حاضر، از روش دسته اول برای تعیین LST استفاده شد.

روش Split window

روش Split window با استفاده از اختلاف رادیانس در باندهای مختلف، آثار اتمسفری را به حداقل می‌رساند و گسیلمندی، شاخص ورودی در آن در نظر گرفته می‌شود. در برخی الگوریتم‌های Split window برای افزایش دقت، شاخص رطوبت اتمسفر، تأثیرگذارترین شاخص اتمسفر در نظر گرفته

در شکل (۱)، نقشه‌های رطوبت MMR نزدیک به سطح برآوردشده با روش Ratio در ۲۰ خرداد و ۱۰ آذر ترسیم شده است.

تعیین LST و نتایج

دو دسته روش اصلی برای تعیین LST وجود دارد: روش‌های دسته اول که از دو پنجره مجزا و نزدیک به هم در محدوده حرارتی طیف مادون قرمز و دمایی تابشی سطح استفاده می‌کنند، پنجره مجزا (Split window) نامیده می‌شوند و روش‌های دسته دوم که مستقیم از رادیانس مشاهده‌شده و الگوی

برآورد ضرایب الگوریتم Split window

برای تعیین ضرایب Split window رابطه ۱۵، مقادیر LST که ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌کنند، معیار کالیبراسیون و هشت سری داده در روزهای مختلف در نظر گرفته شدند. ویژگی‌های این سری داده‌ها در جدول (۶) نشان داده شده است.

می‌شود. از سوی دیگر، دانش درباره مقدار نهایی رطوبت اتمسفر به توسعه و بهبود الگوریتم‌های LST کمک می‌کند (Sobrino and El. Kharraz, 2003: 5176). در مقاله حاضر، از داده باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده MODIS که Sobrino در سال ۲۰۰۰ پیشنهاد کرد، برای برآورد LST استفاده شد (رابطه ۱۵).

$$T_{LST} = T_{31} + A_1 + A_2(T_{31} - T_{32}) + A_3(T_{31} - T_{32})^2 + (A_4 + A_5W)(1 - \varepsilon) + (A_6 + A_7W)\Delta\varepsilon \quad (15)$$

جدول ۶. ویژگی‌های سری داده‌های استفاده‌شده در برآورد ضرایب Split window

تاریخ اخذ داده‌های هواشناسی	تاریخ اخذ تصویر MODIS	نام سکو	سری داده
۲۰۰۵/۲/۲۸	۲۰۰۵/۲/۲۸	Terra	سری داده ۱
۲۰۰۵/۳/۳	۲۰۰۵/۳/۳	Terra	سری داده ۲
۲۰۰۵/۳/۲۳	۲۰۰۵/۳/۲۳	Terra	سری داده ۳
۲۰۰۵/۵/۲۶	۲۰۰۵/۵/۲۶	Terra	سری داده ۴
۲۰۰۵/۶/۹	۲۰۰۵/۶/۹	Terra	سری داده ۵
۲۰۰۵/۷/۲	۲۰۰۵/۷/۲	Terra	سری داده ۶
۲۰۰۵/۴/۲۰	۲۰۰۵/۴/۲۰	Terra	سری داده ۷
۲۰۰۵/۶/۲۷	۲۰۰۵/۶/۲۷	Terra	سری داده ۸

گسیلمندی و تفاضل گسیلمندی سطح برای پیکسل‌هایی تعیین شوند که در برآورد این ضرایب شرکت دارند. برای تعیین شاخص رطوبت ستونی اتمسفر در پیکسل‌های غیرابری از الگوریتم Ratio استفاده می‌شود که ضرایب آن برای ایران تعیین شده‌اند (روابط ۱۶ تا ۱۹).

$$W_{17} = 3.0455 - 75.12831G_{17} + 18.8246G_{17}^2 \quad (16)$$

$$W_{18} = 9.6148 - 17.2994G_{18} + 55.9788G_{18}^2 \quad (17)$$

پیش از تعیین ضرایب Split window باید پیکسل‌های ابری از روند کار حذف شوند. برای تعیین ضرایب Split window در شرایط آب‌وهوایی ایران، باید ضرایب رابطه ۱۵ با برازش بر دمای سطح زمین که ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌کنند و همچنین درجه حرارت روشنایی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده MODIS تعیین شوند. همان‌طور که در رابطه ۱۵ دیده می‌شود، مقادیر رطوبت ستونی اتمسفر و گسیلمندی و تفاضل گسیلمندی سطح نیز باید تعیین شوند و از این رو باید رطوبت ستونی اتمسفر،

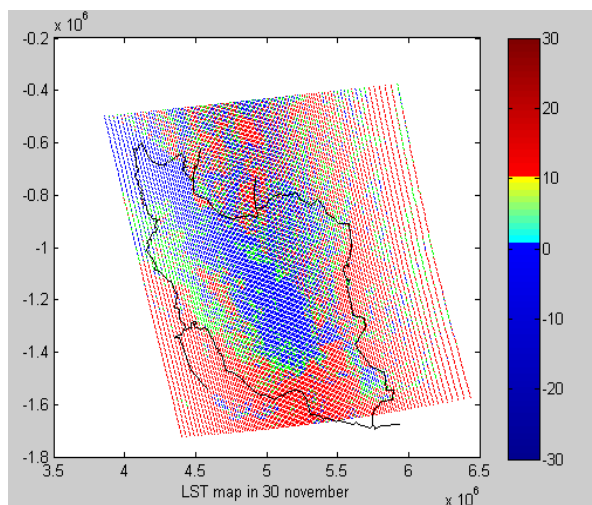
جدول ۷. ضرایب رابطه ۱۵ بر اساس LST حاصل از شش سری اول داده‌ها

A ₁	۱۸۸۰۶
A ₂	۱۵۰۱۷۱
A ₃	۱۰۸۶۰
A ₄	-۶۵۶۰۹۱۸
A ₅	-۱۳۰۰۷۸۵
A ₆	-۱۲۱۵۰۱۶۴
A ₇	۱۸۷۸۰۹۹۱

به این ترتیب، الگوریتم Split window حاصل برای محاسبه LST در اتمسفر استاندارد Mid-latitude summer مطابق رابطه ۲۰ است.

$$T_{LST} = T_{31} + 18.81 + 15.17(T_{31} - T_{32}) + 10.86(T_{31} - T_{32})^2 + (-656.92 - 130.78W)(1 - \varepsilon) + (-1215.16 + 1878.99W)\Delta\varepsilon \quad (20)$$

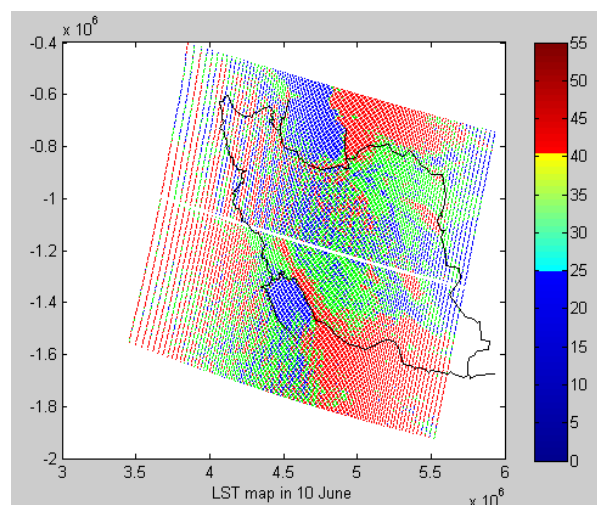
در شکل (۲)، نقشه‌های LST تعیین شده با روش Split window (رابطه ۲۰) در ۲۰ خرداد و ۱۰ آذر ترسیم شده است.



$$W_{19} = 8.9774 + 22.2689G_{19} - 54.3192G_{19}^2 \quad (18)$$

$$W = 0.141W_{17} + 0.444W_{18} + 0.415W_{19} \quad (19)$$

برای تعیین مقادیر گسیلمندی و تفاضل گسیلمندی پیکسل‌های دو باند ۳۱ و ۳۲ از روش NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) استفاده شد که مومنی (Momeni and Saradjian, 195: 2007) پیشنهاد کرده است. در نهایت، برای تعیین ضرایب Split window از شش سری اول داده‌ها (جدول ۶) استفاده شد؛ به این ترتیب، برای تعیین ضرایب رابطه ۱۵، دمای سطح خاک، مقادیر دمای تابش در باندهای ۳۱ و ۳۲، مقادیر رطوبت ستونی اتمسفر، گسیلمندی و تفاضل گسیلمندی نیاز هستند (جدول ۷). ایستگاه‌های هواشناسی در سراسر ایران، دمای سطح خاک را اندازه‌گیری می‌کنند و مقادیر دمای تابش در باندهای ۳۱ و ۳۲ نیز از راه عکس قانون پلانک محاسبه می‌شوند.



شکل ۲. نقشه LST برآورده شده با Split window تعدیل شده برای ایران

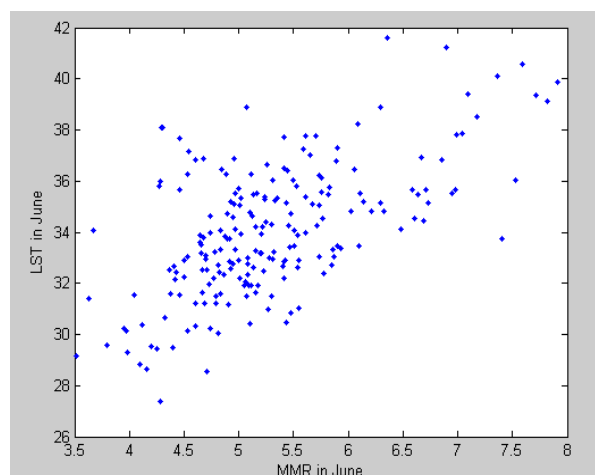
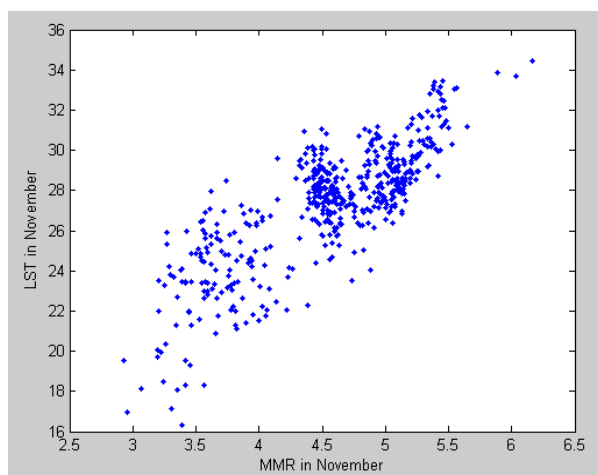
LST تا حد زیادی اثر اتمسفر را از رادیانس حذف می‌کند، هرچند آثار اتمسفری تا حدی وجود دارند. رطوبت ستونی برآوردشده نیز ممکن است خطا داشته باشد.

رابطه دمای سطح خاک و رطوبت نزدیک به سطح در نواحی مرکزی ایران

پس از محاسبه ضرایب الگوریتم Ratio برای برآورد رطوبت نزدیک به سطح و محاسبه ضرایب الگوریتم Split window برای برآورد LST، رابطه بین دو شاخص رطوبت MMR نزدیک به سطح و LST بررسی شد. در این مرحله باید پیکسل‌های ابری از روند کار حذف شوند و ارتباط بین دو شاخص با استفاده از پیکسل‌های غیرابری تعیین شود. نمودارهای ترسیم‌شده در شکل (۳)، ارتباط بین رطوبت MMR نزدیک به سطح و LST را نشان می‌دهند.

ارزیابی دقت LST برآوردشده با الگوریتم Split window

دقت الگوریتم Split window (رابطه ۲۰) محاسبه و سپس ضرایب حاصل از شش سری اول داده‌ها در دو سری آخر داده‌ها (سری داده چک) استفاده شد. به عبارتی، مقدار LST برای پیکسل‌های مختلف سنجنده MODIS با رابطه ۲۰ محاسبه و سپس مقدار LST حاصل با مقدار LST اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه شد. بر اساس نتایج این مقایسه، دقت LST برآوردشده با روش Split window در مقایسه با LST اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی حدود ۲/۲ درجه کالوین است. در مقایسه با دقت روش‌هایی که در گذشته آزمون شده‌اند، دقت این ضرایب حاصل از مشاهده‌های زمینی ایستگاه‌های هواشناسی برای برآورد LST پذیرفتنی است. یکی از دلایل ایجاد خطا اینست که استفاده از شاخص رطوبت ستونی اتمسفر به‌عنوان تأثیرگذارترین شاخص اتمسفر بر رادیانس تابشی سنجنده در الگوریتم تعیین



شکل ۳. ارتباط بین رطوبت MMR نزدیک به سطح و دمای سطح زمین در فصل‌های گرم و سرد سال

نزدیک به سطح و دمای سطح خاک وجود دارد. ضریب همبستگی (R) میان رطوبت MMR نزدیک به

مطابق شکل (۳)، در هر دو فصل سرد (آبان‌ماه) و گرم (خردادماه) سال، رابطه مستقیمی بین رطوبت

منابع

علیزاده، امین، (۱۳۸۳). اصول هیدرولوژی کاربردی، دانشگاه امام رضا، مشهد، صص ۱۴۰-۱۳۱.

Ackerman, S.A., I. Strabala, R.A. Frey, C.C.M. oeller, W.P. Menzel, (1996), Cloud mask for the MODIS Airborne Simulator (MAS): Preparation for MODIS, AMS Eighth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Atlanta, GA, 317-320.

Czajkowski, K.P., S.N. Gowardeb, D. Shireyby, A. Walz, (2001), Thermal remote sensing of near-surface water vapor, Remote Sensing of Environment, Vol. 79, 253-265.

Kaufman, J. and BO-Cia Gao, (1992), Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS, IEEE translation of geoscience and remote sensing, Vol. 30, No. 105, 871-884.

Kleespies, T.J. and L.M. McMillin, (1990), Retrieval of precipitable water from observations in split window over various surface temperatures, Journal of Applied Meteorology, Vol. 29, 851-862.

Momeni, M. and M.R. Saradjian, (2007), Evaluating NDVI-based emissivities of MODIS bands 31 and 32 using emissivities derived by Day/Night LST algorithm, Remote Sensing of Environment, Vol. 106, No. 2, 190-198.

Price, S.D. and S.N. Goward, (1994), Global net primary production: a Remote Sensing approach, Journal of Biogeography, Vol. 22, 2829-2849.

Schroedter-Homscheidt, M. and A. Drews, (2007), Total water vapor column retrieval from MSG-SEVIRI split window measurements exploiting the daily cycle of land surface temperatures, Remote sensing of environment. Vol. 12, 249-258.

Sobrino, J.A. and J.El. Kharraz, (2003), Surface temperature and vapor retrieval from MODIS data, International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No. 24, 5161-5182.

سطح و دمای سطح (LST) در آبان‌ماه و خردادماه به‌ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۴ است؛ به این معنا که با افزایش دمای سطح، رطوبت در نزدیک سطح زمین افزایش می‌یابد و این گونه توجیه می‌شود که همواره با افزایش دمای سطح، تبخیر بیشتری در سطح انجام می‌شود و در نتیجه میزان رطوبت هوا افزایش می‌یابد. توزیع رطوبت در جو با توزیع دمای هوا بستگی مستقیمی دارد و مقدار رطوبتی که هوا تحمل می‌کند تابعی از دماست؛ این موضوع باتوجه‌به روزهای گرم و مرطوب تابستان و هوای سرد و خشک زمستان بیشتر درک می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۳).

نتیجه

در پژوهش حاضر، الگوریتم‌هایی برای برآورد رطوبت اتمسفر و دمای سطح زمین (LST) ارائه شده است. مطالعه حاضر نشان داد دقت رطوبت MMR نزدیک به سطح برآوردشده با روش Ratio حدود 1.1gm/kg است. از آنجاکه محدوده تغییرات رطوبت MMR نزدیک به سطح در مکان‌ها و زمان‌های مختلف 18gm/Kg است، خطای نسبی در برآورد رطوبت نزدیک به سطح حدود ۶ درصد است. دقت تخمین دمای سطح با الگوریتم Split window تعیین شده برای ایران (رابطه ۲۰) نیز حدود $2/2$ درجه کالوین است. این روش‌ها و دقت آنها در مقایسه با روش‌هایی که پژوهشگران پیشین استفاده کرده‌اند و دقت‌های حاصل از آنها، پذیرفتنی است. همچنین این الگوریتم‌ها و ضرایبشان برای کشور ایران تعیین شده‌اند.