

## بکارگیری فنون همبستگی مکانی در اندازه‌گیری گسترش بی‌رویه شهرنشینی (مطالعه موردی: شهر گرگان)

احسان رحیمی<sup>۱\*</sup>، عبدالرسول سلمان‌ماهینی<sup>۲</sup>، سید حامد میرکریمی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

Rassoulmahiny@gmail.com

۲. دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

Mirkarimi.Hamed@Gmail.com

۳. استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۳/۴

### چکیده

گسترش بی‌رویه شهرنشینی نمایانگر یکی از تهدیدهای محیط‌زیستی مهم در دهه‌های اخیر است که چندین رویکرد در تجزیه و تحلیل این پدیده اتخاذ گردیده است. به منظور توصیف الگوهای مختلف شهری و چگونگی تغییر آن‌ها در طول زمان، به معیارهایی نیاز است تا بتوان به طور پیوسته تغییرات شهرها را بررسی و همی‌سازی کرد. در این راستا، تصاویر سنجنش از دور به همراه فنون همبستگی مکانی ابزاری مفید در پایش و ارزیابی محیط‌های شهری هستند که محققان را قادر به اندازه‌گیری تغییرات مداوم رشد شهر می‌سازند. در پژوهش حاضر به منظور کمی‌سازی الگوهای گسترش شهرنشینی از داده‌های ماهواره‌های لندست‌های ۵ سنجنده TM و لندست ۷ سنجنده ETM در یک بازه زمانی ۲۴ ساله استفاده گردید. بدین منظور، شاخص پوشش گیاهی NDVI به عنوان ورودی آماره‌های همبستگی مکانی محلی Moran و Getis به کار گرفته شد. نتایج حاصل از این مقایسات نشان داد که آماره‌های همبستگی مکانی به خوبی قادر به تفکیک و شناسایی خوشه‌های مناطق شهری هستند که در این میان طبق نمودارهای تراکم حاصل از آماره Getis، میزان تراکم پیکسل‌های مناطق شهری در سال ۱۳۶۵ از ۰,۰۵ به ۰,۱۱ در سال ۱۳۸۹ می‌رسد که بیانگر کارایی بیش‌تر این شاخص به منظور اندازه‌گیری رشد شهر است.

### کلیدواژه

آماره‌های همبستگی مکانی، گسترش بی‌رویه شهرنشینی، اندازه‌گیری تغییرات مکانی-زمانی، شاخص پوشش گیاهی NDVI.

### ۱. سرآغاز

شامل کاهش فضاهاى طبیعى، افزایش تجمع وسایل نقلیه، کاهش زمین‌های کشاورزی دارای توان بالا، اثر بر زهکش‌های طبیعى و کاهش کیفیت آب می‌باشد. امروزه، تمرکز حواس مردم در مناطق شهری پرجمعیت نیز به عنوان موضوعی مهم در کشورهای در حال توسعه در نظر گرفته می‌شود (Nolè, 2012). به منظور بررسی و پیش‌بینی چنین مشکلاتی، پایش پیوسته رشد شهر و گستره تغییرات آن امری ضروری برای مدیران و تصمیم‌گیران در برنامه‌ریزی‌های آینده شهر است.

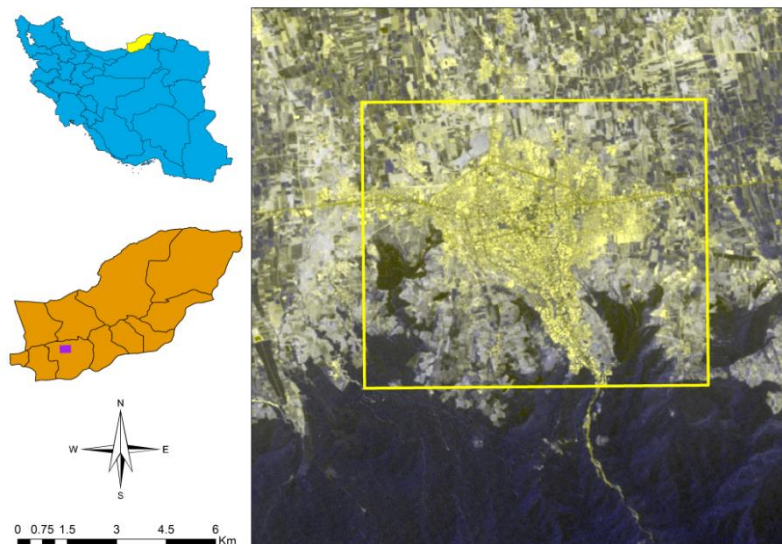
در سال ۱۹۵۰، تنها ۳۰ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کردند. در سال ۲۰۰۰ این نسبت به ۴۷ درصد رسید و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ این نرخ افزایش شهرنشینی به ۷۲ درصد برسد (United Nations, 2012). گسترش بی‌رویه شهرنشینی یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های مدیران و طراحان شهری است که باعث ایجاد اثرات گسترده اجتماعی و محیط‌زیستی می‌گردد (Yichun et al., 2007; Zhang et al., 2011). برخی از این اثرات

بینی سناریوهای آینده را بهبود ببخشد. بدون شک یکی از مهم‌ترین زمینه‌های کاربردی در پیش‌بینی تکامل پدیده‌ها می‌تواند به وسیله تجزیه و تحلیل رشد شهری نمایش داده شود (Fichera et al., 2011; Herold et al., 2003; Batty, 1997). رشد شهرسازی نمایانگر یکی از تهدیدهای محیط‌زیستی مهم در دهه‌های اخیر است که چندین رویکرد در تجزیه و تحلیل این پدیده اتخاذ گردیده است. با این وجود، نکات کلیدی به منظور درک و پیش‌گسترش شهرنشینی فراهم بودن ۱- مجموعه داده‌های چندزمانه و ۲- اطلاعات به روز شده در ارتباط با ساختار مکانی فعلی شهر برای تعیین و پی بردن به تکامل روندها هستند (Nolè, 2014). در چنین شرایطی فنون‌های سنجش از دور با داده‌هایی که از گذشته تا به امروز در اختیار کاربران قرار می‌دهند، می‌توانند مؤثر واقع شوند. مشاهده ماهواره‌ای سطح زمین در زمینه توسعه شهر ابزاری نسبتاً جدید است. در این راستا، استفاده ترکیبی از تصاویر سنجش از راه دور و شاخص‌های همبستگی مکانی می‌تواند برای پیش و اهداف طرح‌ریزی مفید باشد، به طوری که روندهای مداوم رشد شهر را به طور جزئی ارائه می‌دهند. Nolè و همکاران (۲۰۱۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴) رویکرد ترکیبی تصاویر سنجش از دور و شاخص‌های همبستگی مکانی را در سه مطالعه به طور مجزا در شهرهای مختلف کشور ایتالیا ارزیابی کردند. نتایج حاصل از این مطالعات، کارایی بسیار بالای این فن را در کمی‌سازی و تخمین الگوهای گسترش شهرنشینی تأیید می‌کند. با توجه به اینکه تاکنون در ایران این رویکرد ترکیبی برای تجزیه و تحلیل روند تغییرات شهری در زمان‌های مختلف صورت نگرفته است، بنابراین، این مطالعه گسترش شهرنشینی را در یک بازه زمانی ۲۴ ساله در شهر گرگان با استفاده از تصاویر لندست و شاخص‌های همبستگی مکانی در چارچوبی پیوسته تجزیه و تحلیل می‌کند.

موضوعات بسیار مهم در مدل‌سازی رشد شهر شامل تغییرات مکانی و زمانی، تغییرات مقیاس و تغییرات کاربری اراضی توسط انسان هستند (Nolè, 2012). تاکنون روش‌های مختلفی به منظور کمی‌سازی الگوها و روند توسعه شهر به کار گرفته شده است. به عنوان مثال، Seto and Fragkias (2005) از معیارهای سیمای سرزمین به منظور کمی‌سازی تغییرات چهار شهر در بازه زمانی ۱۱ ساله استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بررسی تغییرات زمانی شهر با استفاده از معیارهای سیمای سرزمین روشی ارزشمند در کمی‌سازی تغییرات و ارتباط آن با الگوهای مکانی است.

Zhou و همکاران (۲۰۱۴) نیز به منظور کمی‌سازی ناهمگنی مکانی در سیمای سرزمین شهری از تفسیر چشمی و تجزیه و تحلیل شی پایه استفاده کردند. نتایج حاصل از این مطالعه، مؤثر بودن این رویکرد ترکیبی در طبقه‌بندی سیمای سرزمین شهر را بیان می‌کند. با توجه به مطالبی که ذکر آن رفت، اکثر مطالعات رویکردهای گسسته را به منظور تجزیه و تحلیل گسترش و تکامل شهر اتخاذ می‌کنند. این تجزیه و تحلیل عمدتاً با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی حاصل از داده‌های سنجش از دور انجام می‌گیرد. با وجود این، طبقه‌بندی مشکلاتی را نیز به همراه دارد (Foody, 1996) که می‌توان به ۱- کاهش ضمنی محتوای اطلاعاتی ۲- کاهش اطلاعات پیوسته در مورد فرایندهای تکه‌تکه شدگی و ۳- مشکلات مربوط به زمانی که تصاویر ماهواره‌ای با وضوح مکانی مختلف طبقه‌بندی می‌شوند، اشاره کرد (Rocchini et al., 2013). امروزه تصاویر ماهواره‌ای با وضوح مکانی متوسط رایج‌ترین منبع برای پیش‌بینی تغییرات کاربری‌ها به شمار می‌رود. Cockx و همکاران (۲۰۱۴) نیز اظهار داشتند که استنتاج اطلاعات فضاهای شهری از این تصاویر امری چالش برانگیز است و موجب انواع مختلفی از عدم قطعیت می‌گردد. به نظر می‌رسد یک جهش کیفی مهم در به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی مکانی می‌تواند فرایند پیش-

مختلف پرداخته‌اند، نتایج این مطالعات بیانگر رشد روزافزون توسعه شهر در این منطقه است، به گونه‌ای که رشد سریع شهر از دهه ۱۳۶۵ شروع شده و تا دهه ۱۳۷۵ شهر به صورت فشرده رشد کرده است اما، از این سال به بعد مساحت شهر سه برابر شده است (پوراحمد و همکاران، ۱۳۸۹). کامیاب و سلمان‌ماهینی (۱۳۹۱) نیز روند تغییرات الگوی توسعه شهری گرگان را در بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۰ به سمت ایجاد لکه‌های بزرگتر با اشکال ساده‌تر با پیچیدگی کمتر توصیف کردند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان گلستان (تصویر لندست، ۱۳۸۹).

بودند. با استفاده از روی هم گذاری لایه جاده‌ها بر تصاویر ماهواره‌ای، از صحت داده‌ها اطمینان حاصل گردید.

### فنون همبستگی مکانی و داده‌های سنجش از دور

مفهوم همبستگی مکانی ریشه در اولین قانون جغرافیایی دارد که توسط Tobler (1970) معرفی شد، این قانون بیان می‌کند که هر چیزی با چیزهای دیگر در ارتباط است اما چیزهای نزدیک به هم نسبت به چیزهای دور بیشتر در ارتباط هستند. به عبارت دیگر، با در نظر گرفتن

## ۲. مواد و روش

### منطقه مورد مطالعه

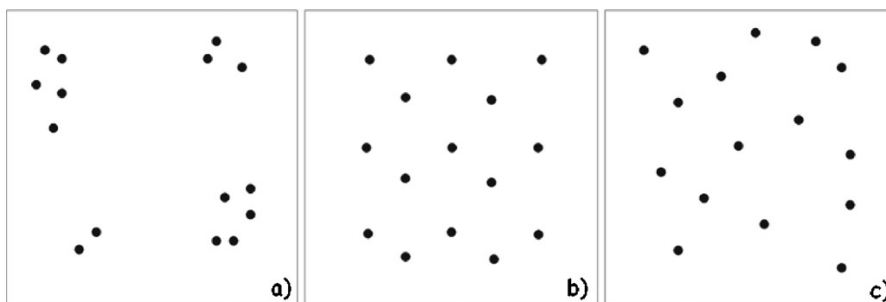
شهر گرگان از شهرهای بخش شمالی دامنه ارتفاعات البرز می‌باشد. منطقه مورد مطالعه از  $54^{\circ}10'$  تا  $54^{\circ}45'$  طول شرقی و  $36^{\circ}44'$  تا  $36^{\circ}58'$  عرض شمالی با مساحتی حدود ۱۳۱۶ کیلومتر مربع در استان گلستان قرار دارد (شکل ۱). کاربری غالب در این شهرستان کشاورزی است. این منطقه دارای آب و هوای معتدله مرطوب است و میانگین شیب در این منطقه ۲۷ درصد است. در سال‌های اخیر، چندین مطالعه به بررسی روند توسعه شهری گرگان با روش‌های

### داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده به منظور بررسی تغییرات پیوسته گسترش شهرنشینی در شهر گرگان شامل تصاویر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۸۹ هستند. شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ سنجنده TM (اردیبهشت ۱۳۶۵) و لندست سنجنده ETM+ (اردیبهشت ۱۳۸۹) حاصل گردیدند. تصاویر دارای سیستم مختصات UTM و عاری از هرگونه خطای رادیومتریک و اتمسفری

یک رویداد در یک نقطه تعریف شده با مختصات  $(X, Y)$  مستقل از احتمال وجود دیگر رویدادهای متعلق به همین متغیر است. یک توزیع می‌تواند سه نوع از همبستگی مکانی را نشان دهد (O'Sullivan and Unwin, 2002).

رویدادهای یک متغیر مکانی، همبستگی مکانی درجه وابستگی میان رویدادها و در عین حال شباهت و روابط فاصله‌ای آن‌ها را اندازه‌گیری می‌کند (Lanorte et al., 2013). در صورت نبود همبستگی مکانی، فرضیه کاملاً تصادفی بودن متغیر پذیرفتنی است، یعنی احتمال وجود



شکل ۲. توزیع‌های مکانی پدیده‌ها. (a) همبستگی مکانی مثبت (b) همبستگی مکانی منفی (c) عدم وجود همبستگی مکانی (Lanorte et al., 2013).

کلیدی به منظور درک فرایندهای مکانی توزیع یک شی یا ویژگی. مشاهدات جغرافیایی را می‌توان به وسیله مختصات جغرافیایی و در دوره‌های زمانی و به صورت زمانی و مکانی طبقه‌بندی کرد. در این زمینه، داده‌های چند زمانه مانند عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، می‌توانند داده‌های مفیدی به منظور بررسی تغییرات در طول زمان باشند. همچنین میزان ارتباط میان مقادیر همین متغیرها را در یک دوره زمانی اندازه‌گیری می‌کنند. آماره‌های همبستگی مکانی به عنوان ابزارهای مفیدی در تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای در نظر گرفته شده‌اند. از این‌رو آن‌ها نه تنها ارزش پیکسل تحت بررسی (بازتابندگی، دما و شاخص طیفی) را در نظر می‌گیرند بلکه ارتباط میان همان پیکسل و پیکسل‌های اطرافش را نیز در نظر می‌گیرند. در صورت عدم وجود همبستگی مکانی، فرض کاملاً تصادفی بودن مورد پذیرش است. وجود همبستگی مکانی این احتمال را تغییر می‌دهد. بعد از قرار دادن یک همسایگی برای هر رویداد، امکان فهمیدن اینکه چه مقدار به وسیله دیگر عناصر داخل آن همسایگی تغییر کرده است وجود دارد. اگرچه داده‌های ماهواره‌ای از پیکسل تشکیل شده‌اند

۱. هنگامی که رویدادها مشابه و نزدیک هستند (توزیع خوشه‌ای)، متغیر همبستگی مکانی مثبت را نشان می‌دهد (شکل ۲a).
۲. هنگامی که رویدادها اگر هم نزدیک باشند مشابه نیستند (توزیع یکنواخت)، متغیر همبستگی مکانی منفی را نشان می‌دهد (شکل ۲b).
۳. هنگامی که هیچ‌گونه اثرات مکانی وجود ندارد (توزیع تصادفی)، متغیر هیچ‌گونه همبستگی مکانی را نشان نمی‌دهد (شکل ۲c).

همبستگی مکانی، ویژگی‌های مکانی اشیاء جغرافیایی تحت بررسی را محاسبه می‌کند و ارتباطات و الگوهای مکانی آن‌ها را ارزیابی و امکان پی‌بردن به چنین الگوهای را در زمان‌های مختلف برای منطقه مورد مطالعه فراهم می‌کند. الگوهای مکانی به وسیله آرایش اشیاء منفرد در فضا و ارتباطات مکانی میان آن‌ها تعیین شده‌اند. همبستگی مکانی گستره‌ای را اندازه‌گیری می‌کند که در آن وقوع یک شی تحت تأثیر اشیاء مشابه به آن است. بدین ترتیب آماره‌های همبستگی مکانی موارد زیر را ارائه می‌دهند (Nolè, 2013) ۱- شاخص‌های الگوی مکانی و ۲- اطلاعات

همسایگی ثابت را بیان می‌کنند که گرایش به فاصله میان رویدادهای  $i$  و  $j$  دارد. این اثرات با کوواریانس تغییرات بیان شده به وسیله حد در فرمول زیر اندازه‌گیری شده‌اند (رابطه ۲).

(۲)

$$\gamma(s, s_i) = \lim_{ds \rightarrow 0} \left\{ \frac{E(Y(ds)Y(ds_i))}{ds ds_i} \right\}$$

با تعریف اولین و دومین نوع اثرات، مطالعه همبستگی مکانی شناخت دقیق‌تری را می‌طلبد. ۱- ماهیت کمی<sup>۳</sup> مجموعه داده که شدت فرایندهای مکانی نیز نامیده می‌شود، بدین معنی که یک متغیر در فضا با چه شدتی به وقوع می‌پیوندد (Murgante et al., 2008; Danese et al., 2009; Murgante and Danese, 2011) اگر رویدادها مشابه یا غیر مشابه باشند. ۲- ماهیت هندسی مجموعه داده<sup>۴</sup> نیازمند مفهوم ارتباطات هندسی است، معمولاً با استفاده از ماتریس‌ها انجام می‌شود: ماتریس فاصله‌ای به منظور در نظر گرفتن فواصلی که رویدادها بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند، تعیین شده است. ۲- ماتریس مجاورت یا همسایگی برای شناخت تأثیر رویدادها بر یکدیگر سودمند است. ۳- ماتریس وزن‌های مکانی شدت این تأثیرات را بیان می‌کند. در مورد ماتریس فاصله‌ای، باید یک روش برای محاسبه فواصل در معیار و جهت ایجاد شود. برای این مورد فاصله اقلیدسی بهترین معیار است (رابطه ۳).

$$d_i(s, s_i) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (۳)$$

در مورد جهت، روش‌ها اسامی خود را از بازی شطرنج می‌گیرند، که عبارتند از مجاورت قلعه‌ای، مجاورت فیلی و مجاورت وزیری. رایج‌ترین روش‌ها برای محاسبه ماتریس وزن‌های مکانی، روش‌های فاصله معکوس<sup>۵</sup> و عرض فاصله ثابت<sup>۶</sup> هستند که در مورد اول، وزن‌ها با فاصله میان رویدادها رابطه عکس دارد (شکل ۳).

اما قرارگیری این پیکسل‌ها در کنار یکدیگر به معنای گسستگی و یا عدم پیوستگی این تصاویر نیست. در مباحث سنجش از دور گسسته بودن یک داده بدین معناست که کاربر در طبقه‌بندی تصاویر مجموعه‌ای از پیکسل‌ها را که هرکدام دارای اعداد مربوط به خود هستند را به عنوان یک طبقه یا کاربری در نظر می‌گیرد و از مرزهای همگن به منظور نشان دادن الگوی مورد نظر استفاده می‌کند. باید به این نکته توجه داشت که داده‌های ماهواره‌ای از پیکسل‌های زیادی تشکیل شده‌اند که هرکدام از این پیکسل‌ها مقادیر مختص به خود را دارند و در نتیجه در فرایندها و استفاده‌های بعدی از این داده‌ها تأثیرات متفاوتی را برجای می‌گذارند. بنابراین، هنگامی که یک تصویر با طیف وسیعی از اعداد در چند طبقه کاربری اراضی خلاصه می‌شود، اطلاعات کاهش می‌یابد و در نتیجه برداشت‌های بعدی از نتایج این طبقه‌بندی نیز با مشکل همراه خواهد بود. بدین منظور در این مطالعه از شاخص پیوسته پوشش گیاهی به منظور بررسی گسترش تغییرات توسعه شهری در شهر گرگان استفاده گردید تا از معایب و نقایص مربوط به طبقه‌بندی اجتناب گردد.

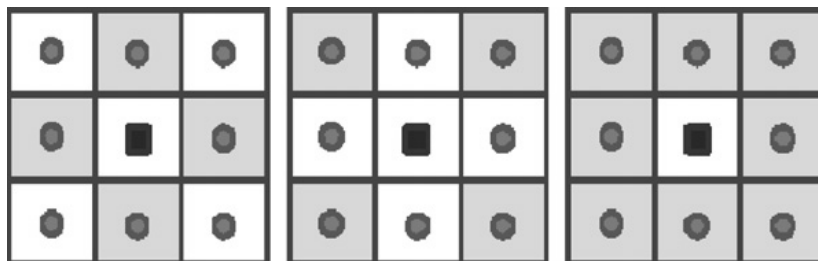
وجود همبستگی در یک توزیع مکانی به وسیله دو اثر ایجاد شده است که به طور واضح تعریف شده‌اند (Gatrell et al., 1996; Bailey and Gatrell, 1995). اما نمی‌توان در عمل آن‌ها را به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار داد.

اثرات مرتبه اول<sup>۱</sup>: بستگی به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه دارد و اینکه چگونه مقدار مورد انتظار (متوسط مقدار کمی مرتبط با هر رویداد مکانی) در فضا توسط معادله زیر تغییر می‌کند را اندازه‌گیری می‌کند (رابطه ۱).

$$\lambda_i = \lim_{ds \rightarrow 0} \left\{ \frac{E(Y(ds))}{ds} \right\} \quad (۱)$$

$ds$  همسایگی اطراف  $S$  است،  $E()$  متوسط مورد انتظار است و  $Y(ds)$  تعداد رویدادها در همسایگی است.

۲- اثرات مرتبه دوم<sup>۲</sup>: کنش‌های متقابل محلی میان یک



شکل ۳. انواع همسایگی در همبستگی مکانی: (از چپ به راست) قلعه، فیل و وزیر (Lanorte et al., 2013).

است. تفاوت اصلی این دو شاخص، عبارت حاصل ضرب در صورت است که در Moran به وسیله انحراف از میانگین محاسبه شده است در حالی که در این شاخص به طور مستقیم محاسبه شده‌اند. ریشه مربع برای حذف مقادیر منفی در فرمول ارائه گردیده است. مقادیر این شاخص بین ۰ تا ۲ تغییر می‌کند. مقادیر ۰ تا ۱ همبستگی مکانی مثبت را نشان می‌دهد و مقادیر بزرگ تر از ۱ و کوچک تر از ۲ همبستگی مکانی منفی را نشان می‌دهد. مقدار ۰ نشان دهنده همبستگی مکانی کاملاً مثبت است و مقدار ۲ نشان دهنده همبستگی مکانی کاملاً منفی است. فرمول محاسبه این شاخص به شکل زیر است (رابطه ۵).

رابطه (۵)

$$c = \frac{(N-1) \left( \sum \sum w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X}) \right)}{2 \left( \sum \sum w_{ij} \right) \sum (X_i - \bar{X})^2}$$

اگر واحدهای فضایی مجاور هم در تمام منطقه مورد مطالعه مقادیر مشابهی داشته باشند، آماره‌های Moran و Geary C Ratio همبستگی مکانی شدیداً مثبت را نشان خواهند داد. اگر واحدهای فضایی مجاور هم مقادیر بسیاری متفاوتی داشته باشند، این آماره‌ها همبستگی مکانی شدیداً منفی را نشان می‌دهند.

آماره‌های Moran و Geary C Ratio ویژگی‌های آماری خوبی برای توصیف همبستگی مکانی جهانی دارند. اما در تشخیص تیپ‌های مختلف خوشه‌بندی الگوهای مکانی کارآمد نیستند. این الگوها گاهی اوقات به عنوان نقاط داغ<sup>۷</sup> و یا نقاط سرد<sup>۸</sup> توصیف می‌شوند. به عنوان مثال، اگر مقادیر بالا نزدیک به یکدیگر باشند، Moran و Geary's

### شاخص‌های جهانی همبستگی مکانی

به منظور اندازه‌گیری همبستگی مکانی چندین شاخص توسعه داده شده است تا وجود و شدت خوشه‌ها در توزیع را مشخص کنند. شاخص‌های جهانی همبستگی مکانی مقدار همبستگی کل داده را در سرتاسر منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری می‌کنند. یکی از اساسی‌ترین شاخص‌های جهانی همبستگی، شاخص Moran است (Moran, 1948). دیگر شاخص مهم Geary c نام دارد (Geary, 1954). شاخص Moran به صورت زیر بیان می‌گردد (رابطه ۴).

$$I = \frac{N \sum \sum w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left( \sum \sum w_{ij} \right) \sum (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

N تعداد کل پیکسل‌ها،  $X_i$  و  $X_j$  مقادیر شدت‌ها در نقاط i و j هستند.

$\bar{X}$  میانگین متغیرها،  $\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})$  کوواریانس ضرب شده به وسیله عنصری از ماتریس وزنی. اگر  $X_i$  و  $X_j$  هر دو بالاتر یا پایین‌تر از میانگین باشند، این عبارت مثبت خواهد بود. اگر این دو عبارت در موقعیت‌های متضادی نسبت به میانگین مقایسه گردند، جواب نهایی منفی خواهد بود.

$w_{ij}$  عنصری از ماتریس وزنی که بستگی به مجاورت رویدادها یا پیکسل‌ها دارد. این ماتریس دقیقاً مرتبط با ماتریس مجاورت است. شاخص Moran گرایشی مشابه به ضریب همبستگی را نشان می‌دهد و مقادیر آن بین -۱ و ۱ تغییر می‌کند.

شاخص Geary C Ratio کاملاً مشابه شاخص Moran

هر آماره‌ای که از دو نیاز زیر پیروی کند جزء آماره‌های محلی است (Anselin, 1995).

۱. شاخص برای یک مشاهده واحد، نتیجه‌ای مکانی از محدوده خوشه‌های مشابه اطراف آن مشاهده تولید می‌کند.

۲. مجموع تمام مشاهدات شاخص‌ها متناسب با شاخص جهانی همبستگی مکانی است.

نمونه‌های محلی همبستگی مکانی برای اندازه‌گیری بزرگی همبستگی مکانی درون یک همسایگی ثابت استفاده می‌گردند. مقادیر نشان دهنده بزرگی همبستگی مکانی را می‌توان برای هر واحد فضایی محاسبه کرد و مکان آن‌ها را تعیین نمود. نمونه‌های محلی آماره‌های همبستگی مکانی اطلاعات فاصله‌ای را برای شناسایی خوشه‌های محلی به کار می‌گیرند و متکی به اطلاعات فاصله‌ای ایجاد شده در ماتریس فاصله‌ای هستند. نمونه محلی شاخص Moran به صورت زیر است (رابطه ۷).

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{S_i} \sum_j (w_{ij} (X_j - \bar{X})) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$\bar{X}$  میانگین شدت پیکسل‌ها،  $X_i$  شدت پیکسل  $i$ ،  $X_j$  شدت پیکسل  $j$ ،  $S_x^2$  واریانس تمام پیکسل‌ها و  $w_{ij}$  ماتریس وزنی است. انحراف معیار به شکل زیر محاسبه می‌گردد (رابطه ۸).

$$z_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{S_i} \quad \text{رابطه (۸)}$$

بنابراین، شاخص محلی Moran به شکل ترکیبی زیر نیز بیان می‌گردد (رابطه ۹).

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad \text{رابطه (۹)}$$

تابع Getis and Ord و Getis به شکل زیر است (Getis and Ord, 1992). که بسیار مشابه با شاخص Moran است، به جز در  $w_{ij}(d)$  که در این نمونه یک ماتریس وزنی را نشان می‌دهد که با توجه به فاصله تغییر می‌کند. تعریف اجزای فرمول مشابه آماره عمومی G-statistic است (رابطه ۱۰).

$$\text{رابطه (۱۰)}$$

Ratio همبستگی مکانی مثبت نسبتاً بالایی را نشان خواهند داد. این خوشه دربرگیرنده مقادیر بالا به عنوان نقاط داغ شناخته می‌شود. اما همبستگی مکانی مثبت نشان داده شده توسط Moran و Geary's Ratio به وسیله مقادیر پایین نزدیک به هم نیز ایجاد می‌شود. این نوع از خوشه را که دربرگیرنده مقادیر پایین است به عنوان نقاط سرد شناخته می‌شود. Moran و Geary's Ratio نمی‌توانند این دو نوع همبستگی مکانی را از هم تشخیص دهند. اما آماره عمومی G-statistic (Getis and Ord, 1992) برخلاف دو شاخص قبلی توانایی تشخیص وجود نقاط سرد و داغ را در کل منطقه مورد مطالعه دارد. مشابه Moran و Geary's Ratio، آماره عمومی G-statistic نیز بر اساس آماره‌های حاصل ضرب است. این حاصل ضرب اغلب به عنوان معیار پیوستگی مکانی نامیده می‌شود. فرمول آماره عمومی G-statistic به صورت زیر است. با این فرض که  $i$  با  $j$  مساوی نیست (رابطه ۶).

$$G(d) = \frac{\sum \sum w_{ij}(d) x_i x_j}{\sum \sum x_i x_j} \quad \text{رابطه (۶)}$$

آماره عمومی G-statistic براساس فاصله  $d$  تعریف گردیده است که در آن می‌توان واحدهای فضایی به عنوان همسایگان  $i$  در نظر گرفت  $w_{ij}(d)$  یک ماتریس وزنی است که اگر واحد فضایی  $j$  درون فاصله  $d$  باشد آنگاه مقدار این ماتریس یک است، در غیر این صورت مقدارش صفر است. بنابراین این ماتریس یک ماتریس دودویی متقارن است که در آن ارتباط همسایگی براساس فاصله  $d$  تعیین شده است.

### شاخص‌های محلی همبستگی مکانی

تمام آماره‌های همبستگی مکانی که تاکنون بحث شد از یک ویژگی مشترک بهره می‌برند، آن‌ها آماره‌های جهانی هستند زیرا آن‌ها تنها یک مقدار برای تمام منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهند. شاخص‌های محلی همبستگی مکانی به وسیله اندازه‌گیری میزان همگنی ویژگی‌های درون یک همسایگی ثابت، امکان یافتن پیکسل‌های خوشه‌ای را فراهم می‌سازد.

تغییرات ارزیابی گردید. تشخیص تغییرات، ارزیابی تغییرات میان چند داده یا داده‌های چندزمانه است. شاخص پوشش گیاهی NDVI که پرکاربردترین شاخص برای کاربردهای مختلف از پایش پوشش گیاهی تا توسعه شهرنشینی است در این مطالعه به منظور پایش تغییرات شهر به کارگرفته شد. اگرچه تصاویر لندست به هنگام طبقه‌بندی تصویر قابل قبولی را برای مطالعات شهری نمایش نمی‌دهند اما، از آنجا که در استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI هیچ گونه سیستم طبقه‌بندی به کارگرفته نمی‌شود و بررسی به طور مستقیم از این شاخص صورت می‌پذیرد، این شاخص نتایج قابل قبولی را در تجزیه و تحلیل الگوهای شهری ارائه می‌دهد. مطالعات بسیاری از شاخص پوشش گیاهی NDVI به منظور کمی‌سازی تغییرات و گسترش شهرها استفاده نموده‌اند که نتایج همه این مطالعات مؤثر و کارآ بودن این شاخص را تأیید می‌کنند (Nolè et al. 2012; Nolè et al. 2013; Nolè et al. 2014; Fan and Myint, 2014). شاخص پوشش گیاهی NDVI در تشخیص زیست‌توده پوشش گیاهی سبز به علت جذب قوی در منطقه قرمز (باند ۳) و بازتاب قوی در باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴) مؤثر است (Jensen, 1979; Tucker, 1986) فرمول این شاخص به شکل زیر است (رابطه ۱۱).

$$NDVI = \frac{R_{\text{near}} - R_{\text{mid}}}{R_{\text{near}} + R_{\text{mid}}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

این شاخص برای سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۸۹ محاسبه گردید، شکل ۴ نشان دهنده تصاویر شاخص پوشش گیاهی در سال‌های موردنظر است. در این تصاویر رنگ‌های روشن نشان دهنده عدم وجود پوشش گیاهی هست و رنگ‌های آبی و تیره نمایانگر پوشش گیاهی قوی است.

به کارگیری شاخص‌های همبستگی مکانی در محاسبه رشد شهر شاخص‌های پوشش گیاهی به دست آمده در تجزیه و تحلیل‌های قبلی به عنوان داده‌های ورودی در بکارگیری فنون‌های همبستگی در پردازش تصاویر استفاده گردیدند. در مطالعه حاضر آماره‌های جهانی و محلی با

$$G_i(d) = \frac{\sum w(d)x_i - x_i \sum w(d)}{S \sqrt{[(N-1)\sum w(d) - (\sum w(d))^2] / N - 2}}$$

## به کارگیری همبستگی مکانی در تصاویر سنجش از دور

در به کارگیری روش‌های همبستگی مکانی در تصاویر سنجش از دور، نیاز است تا رویدادهای مکانی، ماهیت کمی (شدت) آن‌ها و مفهوم ارتباطات هندسی تعریف شود. در زمینه پردازش تصاویر ماهواره‌ای رویداد مکانی، پیکسل است و آماره‌های همبستگی مکانی معمولاً با توجه به مختصات‌های جغرافیایی مرکز آن محاسبه شده‌اند. مورد بعدی ماهیت کمی یا شدت است که باید به طور دقیقی با توجه به ماهیت تجربی مطالعه موردی انتخاب شود. مفهوم ارتباطات هندسی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای خیلی آسان است. زیرا فاصله میان رویدادها همیشه برابر یا مضربی از اندازه پیکسل است. در پردازش تصاویر فاصله مجاورت lag distance نامیده می‌شود. معیارهای جهانی همبستگی مکانی تنها یک مقدار را ارائه می‌دهند که نشان دهنده میزان همبستگی مکانی در توزیع متغیر است، به عبارت دیگر همگنی یک متغیر در تصویر را نشان می‌دهند. معیارهای محلی همبستگی مکانی برای هر موقعیت در توزیع متغیر، یک مقدار را ارائه می‌دهند و بنابراین قادر به شناسایی الگوهای مکانی گسسته هستند (Lanorte et al., 2013). خروجی این شاخص‌ها تصویری رستری است که در آن هر پیکسل حاوی یک عدد است که میزان همبستگی این پیکسل با پیکسل‌های دیگر را بیان می‌کند.

## تجزیه و تحلیل رشد شهر با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI

برای شناسایی مناطق گسترش شهر، باید به دنبال یک تغییر در ساختار مکانی بین دو تصویر باشیم. هدف اصلی بررسی ما، ارزیابی امکان ارتقای الگوهای مکانی توسعه شهر در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۸۹ در منطقه مورد نظر بود. گسترش مناطق شهری به وسیله فنون‌های تشخیص



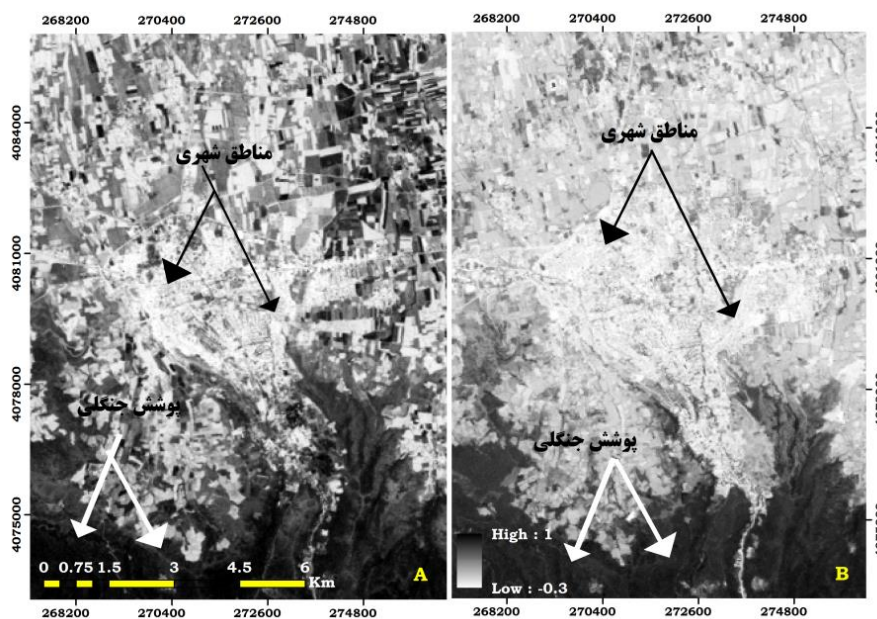
آنجا پیکسل‌های اطراف بر پیکسل مرکزی تأثیر می‌گذارند، در این پژوهش از همسایگی هشت‌تایی استفاده گردید. در نهایت به منظور بررسی کمی جزئیات روند توسعه شهری در شهر گرگان، با استفاده از نرم‌افزار آماری R ( rasterVis package, Perpignan Lamigueiro & Hijmans, 2014) تراکم هر یک از خروجی‌های حاصل از شاخص‌های Moran و Getis رسم گردید (Bowman & Azzalini, 1997).

### ۳. نتایج

#### شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI

شکل ۴ شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI حاصل از تصاویر لندست را نشان می‌دهد. مقادیر هرکدام از این شاخص‌ها از ۰/۳- تا ۱ متغیر است که عدد ۰/۳- نمایانگر عدم وجود پوشش گیاهی در مناطقی مانند شهرها است که در این شکل با رنگ سبز روشن دیده می‌شود و عدد ۱ نمایانگر پوشش گیاهی بسیار قوی در منطقه مورد نظر است که با رنگ آبی نمایش داده شده است. بیش‌ترین بازتاب ناشی از پوشش‌های جنگلی پهن‌برگ و سوزنی‌برگ در جنوب شهر گرگان می‌باشد و بعد از آن محصولات کشاورزی هستند که در حاشیه‌های شهر دیده می‌شوند.

استفاده از ترکیب‌های طیفی باندها به منظور بهتر کردن تغییرات رخ داده در طول زمان در هر دو تصویر ۱۳۶۵ و ۱۳۸۹ بکارگرفته شدند. مقایسه تنها با استفاده از دو شاخص پوشش گیاهی انجام گرفت. به منظور محاسبه شاخص‌های همبستگی مکانی از نرم‌افزار Envi 5 استفاده گردید. بدین منظور نیاز است تا نوع همسایگی و فاصله همبستگی میان پیکسل‌ها را تعیین نمود. در این مطالعه با توجه هدف بررسی و مطالعات انجام شده در این زمینه هشت‌تایی و فاصله همبستگی ۲ پیکسل در نظر گرفته شد. عدد همبستگی نیز باید با توجه به سایر مطالعات انجام شده در این زمینه در نظر گرفت شد. در اینجا عدد ۲ با مطالعات Nolè و همکاران همخوانی دارد (۲۰۱۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴). در انتخاب همسایگی به منظور محاسبه مقادیر همبستگی مکانی در داده‌های ماهواره‌ای باید به این نکته توجه داشت که چندین نوع همسایگی قابل به کارگیری است اما بیش‌ترین نوع همسایگی در داده‌های ماهواره‌ای، همسایگی هشت‌تایی است که تمامی پیکسل‌های اطراف هر پیکسل را در نظر می‌گیرد. یک پیکسل حداکثر می‌تواند با هشت پیکسل دیگر همسایه باشد (شکل ۳) بنابراین، از



شکل ۴. تصاویر شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در سال‌های ۱۳۶۵ (A) و ۱۳۸۹ (B).

## شاخص‌های محلی همبستگی مکانی Moran و Getis

مشخص است که مقدار همبستگی مکانی در کل منطقه یکدست نیست و این مقدار با توجه به مکان تغییر می‌کند. به عبارت دیگر امکان دارد که مقدار همبستگی مکانی در برخی از زیر بخش‌ها زیاد باشد اما در برخی دیگر پایین باشد. حتی ممکن است در یک بخش از منطقه همبستگی مثبتی دیده شود و در بخش دیگر همبستگی منفی دیده شود، به این پدیده ناهمگنی مکانی گفته می‌شود (Lee and Wong, 2001). به منظور اتخاذ ناهمگنی مکانی، باید از شاخص‌های دیگری استفاده کرد. در به کارگیری شاخص‌های همبستگی مکانی به منظور اندازه گیری رشد شهر باید دو نکته را مدنظر قرارداد. ۱- استفاده از شاخص‌های محلی همبستگی مکانی (مانند Getis Gi، Local Geary c و LISA) ۲- فرضیه‌ای که یک ناحیه با سکونتگاه‌های شهری به دلیل تغییرات مکانی، ساختار طیفی اجسام و ساختمان‌ها، همگنی مکانی را در پاسخ طیفی نشان خواهد داد. در این مطالعه به منظور تعیین میزان همبستگی مکانی در مقیاس محلی، از آماره‌های همبستگی مکانی LISA که نمونه محلی آماره جهانی Moran است و آماره Getis Gi که نمونه محلی آماره عمومی G-statistic است، استفاده گردید. تمام این شاخص‌ها بر اساس هم‌تاهای جهانی خود که در بالا بحث گردید هستند اما برای تشخیص همبستگی مکانی محلی به کار گرفته می‌شوند. مشابه با تفسیر Moran، مقدار بالای LISA نیز به معنی خوشه‌ای بودن مقادیر مشابه است (بالا یا پایین) که در این صورت همبستگی مکانی مثبت را نشان می‌دهد. درحالی‌که مقدار پایین آن نشان دهنده خوشه‌بندی مقادیر نامشابه است که در این صورت همبستگی مکانی منفی را نشان می‌دهد. شکل ۵ تصاویر حاصل از آماره LISA را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیش‌ترین همبستگی مکانی در هر دو تصویر مربوط به کاربری جنگل در جنوب شهر گرگان است. زیرا پوشش جنگلی در این ناحیه دارای یکنواختی و همگنی بالایی هست و از این‌رو

پیکسل‌های این پوشش بازتاب‌های یکسانی از خود نشان می‌دهند. این امر موجب بالا رفتن همبستگی مکانی در این ناحیه می‌گردد که بیانگر عدم ناهمگنی مکانی در این کاربری است. بررسی چشمی خروجی‌های حاصل از آماره LISA در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 نشان می‌دهد که محدود مقادیر همبستگی مکانی مناطق شهری در سال ۱۳۶۵ تقریباً از ۵۰ تا ۱۳۰ و در سال ۱۳۸۹ از ۴۰ تا ۱۱۰ هستند (جدول ۱). از آنجاکه مقدار بالای شاخص محلی Moran بیانگر تشابه زیاد پیکسل‌های مجاور هم است و با توجه به اینکه بالاترین مقادیر همبستگی مکانی در خروجی‌های حاصل از شاخص محلی Moran در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۸۹ به ترتیب ۴۲۱/۵۶ و ۳۴۵/۸۸ هستند (جدول ۱)، می‌توان نتیجه گرفت که کاربری شهر در منطقه مورد مطالعه دارای همبستگی مکانی متوسطی است. بدین معنی که پیکسل‌های مناطق ساختمانی دارای تشابه متوسطی هستند زیرا شهر مخلوطی از کاربری‌ها مانند پارک‌ها، فضا‌های سبز، باغات داخل و حاشیه شهر، جاده‌ها و ساختمان‌ها را در برمی‌گیرد که هرکدام از این کاربری‌ها بازتاب‌های خاص خود را دارند بنابراین، مقادیر متوسط همبستگی مکانی در این ناحیه نمایانگر شباهت متوسط پیکسل‌های شهری به یکدیگر است. کمترین میزان همبستگی مکانی در شکل ۵ متعلق به کاربری کشاورزی است که بیانگر عدم تشابه و یکنواختی در میان پیکسل‌های این کاربری است. این میزان پایین همبستگی مکانی به این دلیل است که در اطراف شهر گرگان برخی از محصولات کشاورزی نظیر گندم، جو، کلزا، سویا و سیب‌زمینی کشت می‌شود که هر کدام از این محصولات بازتاب‌های متفاوتی از خود ساطع می‌کنند، همچنین بازتاب زمین‌های آبیاری شده و تحت کشت با زمین‌های کشاورزی لخت و بدون محصول نیز فرق دارد. بنابراین، طبیعی به نظر می‌رسد که پیکسل‌های نواحی کشاورزی شباهت زیادی به یکدیگر نداشته باشند.

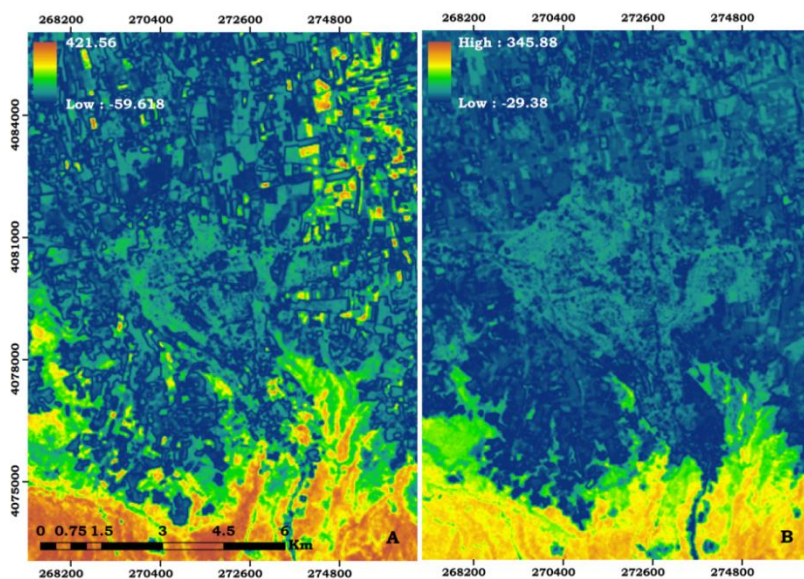
شکل ۶ خروجی‌های حاصل از آماره Getis Gi را نشان می‌دهد. تفاوت این آماره با آماره محلی Moran در این

تصاویر حاصل از آماره Getis Gi مناطق جنگلی دارای همبستگی مکانی مثبت و مناطق شهری دارای همبستگی مکانی منفی هستند. از آنجا که تصویر ورودی آماره‌های همبستگی مکانی در این مطالعه شاخص پوشش گیاهی NDVI بود (شکل ۴) و در این شاخص مناطق جنگلی دارای مقادیر مثبت و مناطق شهری دارای بازتاب منفی هستند. بنابراین، با توجه به ویژگی‌های آماره Getis Gi برخلاف آماره محلی Moran، مناطق شهری دارای همبستگی مکانی منفی هستند زیرا در شاخص پوشش گیاهی دارای بازتاب منفی بودند. بررسی‌های چشمی تصاویر حاصل از این آماره در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 نشان می‌دهد که محدوده مقادیر همبستگی مکانی در مناطق شهری تقریباً بین ۱۳- تا ۵- است (جدول ۱).

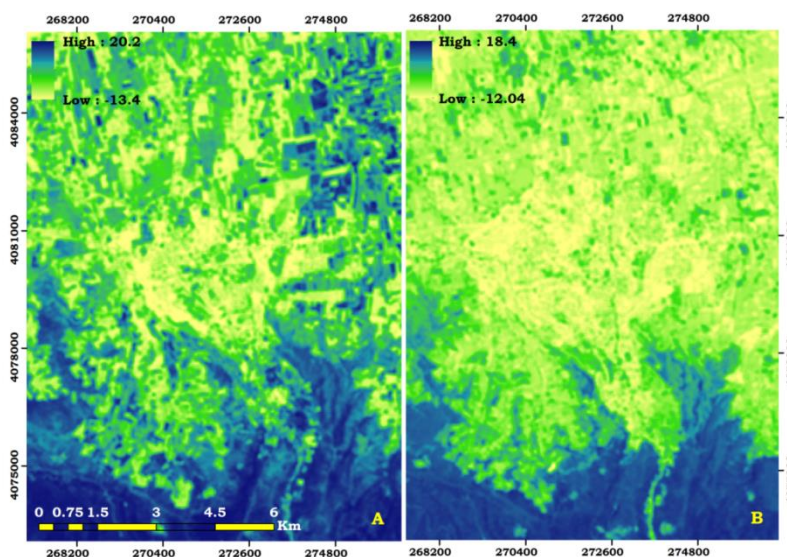
است که در شاخص Moran همبستگی مکانی مثبت و بالا تنها در مناطقی که دارای پیکسل‌های مشابه هستند، دیده می‌شود و فرقی نمی‌کند که این پیکسل‌ها دارای مقادیر بالا یا پایین باشند. اگر پیکسل‌ها مشابه یکدیگر نباشند و به عبارتی دیگر مقادیر پیکسل‌ها پراکنده باشند، این شاخص همبستگی مکانی منفی را نشان می‌دهد. در شاخص Getis تعیین همبستگی مکانی به این شکل نیست و همبستگی مکانی مثبت در مناطقی دیده می‌شود که پیکسل‌ها مشابه و دارای مقادیر بالا نیز هستند. اگر پیکسل‌ها مشابه یکدیگر باشند اما مقادیر آن‌ها پایین باشد این شاخص همبستگی مکانی منفی را نشان می‌دهد. عدم همبستگی مکانی در این شاخص هنگامی است که هیچ‌گونه خوشه با ارزش‌های بالا یا پایین دیده نشود. با توجه به مباحثی که ذکر آن رفت، در

جدول ۱. آماره‌های مربوط به تصاویر خروجی شاخص‌های همبستگی مکانی

نام شاخص	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	محدوده مقادیر شهر
Moran of NDVI 1365	-۵۹/۶۱۸	۴۲۱/۵۶	۶۶/۵۱	۷۵/۶۳	۵۰-۱۳۰
Moran of NDVI 1389	-۲۹/۳۸	۳۴۵/۸۸	۴۷/۱۱	۵۶/۶۳	۴۰-۱۱۰
Getis of NDVI 1365	-۱۳/۴۴	۲۰/۲۹	۲/۰۲	۷/۷۲	۱۳- تا ۵-
Getis of NDVI 1389	-۱۲/۰۴	۱۸/۴۲	۶/۵۵	-۱/۹۸	۱۲- تا ۵-



شکل ۴. خروجی‌های حاصل از شاخص Moran محلی بر روی شاخص‌های پوشش گیاهی در سال ۱۳۶۵ (A) و ۱۳۸۹ (B).



شکل ۵. خروجی‌های حاصل از شاخص Getis محلی بر روی شاخص‌های پوشش گیاهی در سال ۱۳۶۵ (A) و ۱۳۸۹ (B).

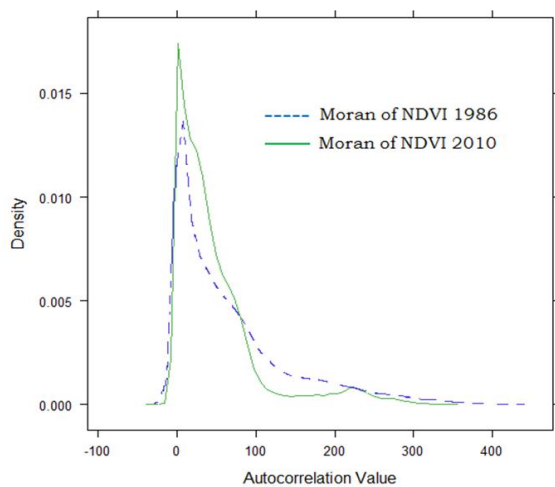
درحالی‌که این میزان در سال ۱۳۸۹ به ۰,۱۱ می‌رسد. اگرچه محدوده همبستگی مکانی ۵- تا ۱۳- کاملاً متعلق به مناطق شهری نیست و برخی از مناطق مانند زمین‌های بایر و زمین‌های کشاورز لخت و بدون محصول نیز به دلیل بازتاب منفی در شاخص پوشش گیاهی در این محدوده قرار می‌گیرند، اما تعداد پیکسل‌های متعلق به نواحی غیرشهری که در این محدوده قرار گرفته‌اند زیاد نیست و این مسئله در هر دو تصویر ۱۳۶۵ و ۱۳۸۹ صدق می‌کند. بدین معنی که تقریباً همان اندازه که در سال ۱۳۶۵ برخی از نواحی غیرشهری دارای همبستگی مکانی یکسانی با مناطق شهری هستند، در سال ۱۳۸۹ نیز این نواحی غیرشهری حضور دارند. با این وجود، تفسیر چشمی این تصاویر نشان می‌دهد که تعداد پیکسل‌هایی که در این مطالعه به عنوان عوامل ایجاد خطا در تجزیه و تحلیل رشد شهر محسوب می‌گردند، در تصویر مربوط به سال ۱۳۶۵ بیش‌تر از سال ۱۳۸۹ هستند. این موضوع نشان می‌دهد که در ترسیم نمودار تابع تراکم خروجی مربوط به آماره Getis Gi در سال ۱۳۶۵، میزان مناطق شهری در واقعیت کمتر از آن چیزی است که این نمودار (شکل ۷) نشان می‌دهد، زیرا برخی از مناطق که جزو مناطق شهری نبودند اما مقادیر

مقایسه خروجی‌های حاصل از آماره‌های همبستگی مکانی نشان می‌دهد که هر دو شاخص به خوبی قادر به تشخیص و تفکیک مناطق شهری و جنگلی هستند که در این میان آماره Getis Gi نمایش بهتری از مناطق شهری ارائه می‌دهد زیرا ارزش‌های منفی را به عنوان یک خوشه مکانی در نظر می‌گیرد.

### بررسی آماری خروجی‌های حاصل از آماره‌های همبستگی مکانی

شکل ۷ نمودار تغییرات مقادیر مربوط به آماره Getis Gi در سطح سیمای سرزمین شهری نشان می‌دهد. نیمه چپ این نمودار مقادیر همبستگی مکانی منفی و نیمه راست آن مقادیر همبستگی مکانی مثبت را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، مقادیر همبستگی مکانی مناطق شهری در این آماره تقریباً بین ۵- تا ۱۳- تخمین زده شد. این محدوده از ابتدای نمودار شروع می‌شود و تا رأس هر دو نمودار آماره Getis Gi ادامه می‌یابد. مطابق این نمودار اختلاف معنی‌داری میان نمودارهای متعلق به سال‌های ۱۳۶۵ (آبی) و ۱۳۸۹ (قرمز) مشاهده می‌شود. به طوری‌که میزان تراکم پیکسل‌های مناطق شهری در سال ۱۳۶۵ تقریباً ۰,۰۵ است،

راست آن همبستگی مکانی مثبت را نشان می‌دهد. همبستگی مکانی منفی در این شاخص توسط پیکسل‌های پراکنده و نامتشابه مانند کاربری کشاورزی ایجاد می‌گردد. با توجه به جدول ۱ محدوده مقادیر مناطق شهری بین ۵۰ تا ۱۳۰ هستند. این نمودار نیز نشان می‌دهد که محدوده مقادیر همبستگی در مناطق شهری در سال ۱۳۸۹ افزایش یافته است.



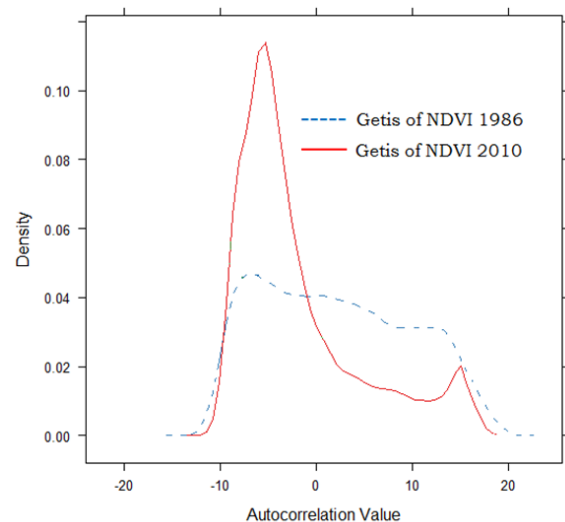
شکل ۸. تابع تراکم آماره همبستگی مکانی Moran محلی.

#### ۴. بحث

مدیریت مناسب و پایدار محیط‌های شهری نیازمند فنون پیشرفته به منظور کسب اطلاعات به روز از الگوها، وضعیت فعلی، ویژگی‌ها و توسعه محیط شهری است (Esch, 2010). در این راستا، اکثر مطالعات به منظور تحقق این موضوع از رویکردهای گسسته طبقه‌بندی استفاده می‌کنند که عمدتاً این نقشه‌های طبقه‌بندی از تصاویر ماهواره‌ای لندست حاصل می‌گردند. با توجه به اینکه تصاویر ماهواره لندست جزو داده‌های با وضوح مکانی متوسط هستند، بنابراین، تعیین کارایی وضوح مکانی این تصاویر به منظور پایش و بررسی سیمای سرزمین شهری امری ضروری به نظر می‌رسد. وضوح مکانی تابعی از ارتفاع سنجنده، اندازه آشکارسازها، اندازه کانونی و وضعیت سیستم است (Jensen, 2005). وضوح مکانی سطح

همبستگی آن‌ها با مناطق شهری یکسان بوده است، به عنوان مناطق شهری در محدوده همبستگی ۵- تا ۱۳- قرار گرفته‌اند. مقادیر ۵- تا ۱۰ در این نمودار مربوط به پیکسل‌های نامتشابه و پراکنده مانند کاربری کشاورزی هستند. طبق این نمودار مناطق کشاورزی در سال ۱۳۶۵ بیش‌تر از سال ۱۳۸۹ است که این نکته خود گویای این واقعیت است که کاهش این زمین‌های کشاورزی در نتیجه رشد روزافزون شهر در این ناحیه بوده است. مقادیر ۱۰ تا ۲۰ نمایانگر همبستگی مکانی مثبت در پیکسل‌های کاربری جنگل است. با توجه به شکل ۷، این کاربری تغییرات اندکی در بازه زمانی ۲۴ ساله در منطقه مورد مطالعه داشته است و این تغییرات شامل کاهش پوشش جنگلی در سال ۱۳۸۹ است.

در این مطالعه به منظور انتخاب بهترین شاخص همبستگی مکانی در اندازه‌گیری رشد شهر علاوه بر شاخص Getis Gi از شاخص Moran محلی نیز استفاده گردید. بنابراین، تابع تراکم تصاویر حاصل از این آماره نیز ترسیم گردید (شکل ۸) تا مقایسه این دو آماره امکان‌پذیر باشد.



شکل ۷. تابع تراکم آماره همبستگی مکانی Getis Gi.

شکل ۸ تابع تراکم آماره همبستگی مکانی Moran محلی را در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۸۹ نشان می‌دهد. نیمه چپ این نمودار نمایانگر همبستگی مکانی منفی و نیمه

مقیاسات نشان داد که این دو آماره به خوبی قادر به تفکیک و شناسایی خوشه‌های مناطق شهری هستند که در این میان آماره *Getis Gi* به دلیل اینکه مقادیر بالا و پایین را به عنوان خوشه‌هایی با همبستگی مکانی متفاوت در نظر می‌گیرد، به منظور اندازه‌گیری رشد شهر از کارایی بیشتری برخوردار است. به طور کلی، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که به کارگیری رویکردهای پیوسته اندازه‌گیری رشد شهر با استفاده از فنون همبستگی مکانی چارچوبی مناسب و کارآمد در تجزیه و تحلیل رشد بی‌رویه شهرنشینی است. بنابراین، به منظور بررسی گسترش شهرنشینی در نواحی مختلف می‌توان از شاخص‌های همبستگی مکانی استفاده کرد و از آنجا که این شاخص‌ها نیازی به طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای که بسیار وقت‌گیر، هزینه‌بر و تخصص‌خواه هستند ندارند، در نتیجه از خطاها و عدم قطعیت مرتبط با طبقه‌بندی تصاویر نیز به دور هستند. به کارگیری این شاخص‌های در اندازه‌گیری رشد شهر رویکردی نوین در مطالعات شهری است که طبق بررسی‌ها و جستجوهای ما تاکنون در ایران مورد استفاده قرار نگرفته است، بنابراین نیاز است تا این رویکرد در سایر مناطق نیز به کار گرفته شود تا کارایی و نقاط ضعف این شاخص‌ها در کمی‌سازی گسترش شهرنشینی مشخص گردد.

##### ۵. نتیجه‌گیری

به طور کلی، تشخیص تغییرات سیماهای سرزمین شهری دربرگیرنده داده‌های چندزمانه به منظور تجزیه و تحلیل کمی این تغییرات است (Lu et al. 2004). بدین منظور فنون مختلفی مانند نسبت‌گیری باندها، تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی، مقایسه بعد از طبقه‌بندی و شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور بهبود صحت تشخیص تغییرات توسعه یافته است. صرف نظر از روش‌های طبقه‌بندی شهر مانند شی‌پایه یا پیکسل‌پایه، عقیده بر این است که طبقه‌بندی دارای معایب عمده‌ای است زیرا طبقات به

جزئیات مکانی اشیا درون یک تصویر را تعیین می‌کند و اغلب با اندازه کوچک‌ترین ویژگی ممکن که می‌توان در یک تصویر تشخیص داد مرتبط است. این تعریف بدین معنی است که تنها اشیا بزرگ‌تر از وضوح مکانی یک سنجنده را می‌توان از یک تصویر جدا کرد. با این وجود، ویژگی‌های کوچک‌تر از وضوح مکانی در صورتی که بازتاب آن‌ها بر سایر بازتاب‌های درون یک پیکسل چیره شود و یا دارای شکل خاصی (مانند ویژگی‌های خطی) باشند، قابل تشخیص هستند. مفهوم وضوح مکانی شامل قابلیت تشخیص و قابلیت جداسازی اشیا است. Jensen and Cowen (1999) اظهار می‌کنند که حداقل وضوح مکانی مورد نیاز باید نصف قطر کوچک‌ترین شی مورد نظر باشد. هر پیکسل تصویر لندست دربرگیرنده ۹۰۰ متر مربع از سطح زمین است از این رو مناطق کوچک‌تر از این مساحت قابل تشخیص و جداسازی از تصاویر لندست نیستند. در این پژوهش به منظور فایق آمدن بر این مشکل از برخی ابزارهای پیوسته اندازه‌گیری ناهمگنی مانند شاخص‌های همبستگی مکانی استفاده گردید. شاخص‌های همبستگی مکانی میزان وابستگی میان پدیده‌ها را در یک فضای جغرافیایی اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل می‌کنند. تاکنون شاخص‌های همبستگی مکانی به منظور تجزیه و تحلیل جزایر حرارتی شهری (صادقی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۲)، نقشه‌سازی شدت آتش‌سوزی (Lanorte et al., 2013)، کمی‌سازی الگوهای چند مقیاسی (Permo, 2004)، مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی (Chu et al., 2013)، تعیین تکه‌تکه شذگی سیمای سرزمین (Fan and Myint, 2014) و فرایند مهاجرت (Murgante and Borruso, 2012) به کار گرفته شده‌اند. اخیراً، برخی از مطالعات کاربرد شاخص‌های همبستگی مکانی در اندازه‌گیری رشد شهر را ارزیابی کرده‌اند (Nolè et al. 2012; Nolè et al. 2014). تصاویر حاصل از آماره‌های *Getis Gi* و *Moran* محلی با استفاده از نمودارهای تابع تراکم با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج حاصل از این

بودند همخوانی دارد البته با این تفاوت که در این مطالعه زمان بسیار کمتری نسبت به سایر مطالعات صرف گردید که نکته اهمیت این مطالعه را دو چندان می کند زیرا طبقه بندی تصاویر ماهواره ای نیازمند زمان و هزینه زیادی می باشد بنابراین، محققین می توانند از نتایج رویکردهای پیوسته مانند شاخص های همبستگی مکانی به عنوان ارزیابی اولیه تغییرات الگوها در منطقه مورد نظر استفاده نموده و در صورت نیاز به اطلاعات جزئی به طبقه بندی تصاویر ماهواره ای بپردازند.

### ۶. یادداشت ها

1. First order effects
2. Second order effects
3. Quantitative nature
4. Geometric nature
5. Inverse Distance
6. Fixed Distance Band
7. Hot spot
8. Cold spot

وسيله مرزهايي گسسته از يکديگر جدا شده اند. از اين رو فرايند طبقه بندي تصاویر به دليل تبديل اطلاعات پیوسته به طبقات گسسته منجر به کاهش اطلاعات می شود ( Foody, 2000; Palmer et al., 2002). اگرچه سنجش از دور با ناهمگنی مکانی و طیفی محیط های شهری در حال چالش است (Jensen and Cowen 1999; Herold et al. 2004) اما مهم ترین منبع برای مطالعات سیمای سرزمین شهری به حساب می آید (Donnay et al., 2001). در این راستا، استفاده از تصاویر ماهواره ای به همراه فنون همبستگی مکانی را می توان به عنوان ابزاری مفید در پایش و اهداف طرح ریزی در نظر گرفت، به طوری که محققان را قادر به اندازه گیری تغییرات مداوم رشد شهر می سازد (Nolè et al. 2013). مطالعه حاضر نیز برای اولین شاخص های محلی همبستگی مکانی را در چارچوبی پیوسته به منظور کمی سازی تغییرات الگوهای توسعه شهری گرگان به کارگرفت که نتایج حاصل از این مطالعه با سایر مطالعاتی که به بررسی گسترش شهرنشینی در شهر گرگان پرداخته

### ۷. منابع

- پوراحمد، ا.، حسام، م.، آشور، ح. و محمدپور، ص. ۱۳۸۹. تحلیل بر الگوی گسترش کالبدی- فضایی شهر گرگان با استفاده از مدل های آنتروپی شانون و هلدرن. مجله پژوهش و برنامه ریزی شهری. سال اول، شماره سوم.
- صادقی نیا، ع.ر.، علیجانی، ب.، ضیائیان، پ. و خالدی، ش. ۱۳۹۲. کاربرد تکنیک های خودهمبستگی فضایی در تحلیل جزیره حرارتی شهر تهران. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال سیزدهم، شماره ۳۰. ۹۰-۶۷.
- کامیاب، ح.ر. و سلمان ماهینی، ع.ر. ۱۳۹۱. الگوهای مکانی- زمانی تغییرات سیمای سرزمین و توسعه شهری (مطالعه موردی: گرگان). مجله کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی. سال سوم. شماره دوم.
- Anselin, L. 1995. Local indicators of spatial association – LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115.
- Bailey, T.C., and Gatrell, A.C. 1995. *Interactive Spatial Data Analysis*. Longman Higher Education, Harlow.
- Batty, M. 1997. Cellular automata and urban form: a primer” *Journal - American Planning Association*, Volume 63, Issue 2, pp. 266-274.
- Bowman, A. W., and Azzalini, A., 1997. *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations*. Oxford: Oxford University Press.
- Chu, H.J. Wu, CH.F. and Lin, Y.P. 2013. Incorporating spatial autocorrelation with neural networks in empirical land-use change models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, volume 40, pages 384 – 404.
- Cockx, K., Van de Voorde, T. and Canters, F. 2014. Quantifying uncertainty in remote sensing-based urban land-use mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 31, 154–166.

- Danese, M., Lazzari, M., and Murgante, B., 2009. Geostatistics in historical macroseismic data analysis. *Transactions on Computational Sciences Journal VI LNCS vol. 5730*, 324–341.
- Donnay, J.P., Barnsley, M.J. and Longley, P.A. 2001. Remote sensing and urban analysis. In: J.P. Donnay, M.J. Barnsley and P.A. Longley (eds.), *Remote Sensing and Urban Analysis*, Taylor & Francis, London and New York, pp 3–18.
- Esch, T., Taubenböck, H., Heldens, W., Thiel, M., Wurm, M., Geiss, C. and Dech, S. 2010. Urban Remote sensing—How can earth observation support the sustainable development of urban environments? In *Proceedings of the 15th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society*, Vienna, Austria, 18–20; pp. 837–847.
- Fan, c., and Myint, s. 2014. A comparison of spatial autocorrelation indices and landscape metrics in measuring urban landscape fragmentation. *Landscape and Urban Planning* 121 117– 128.
- Fichera, C., Modica, G. and Pollino, M. 2011. GIS and remote sensing to study urban-rural transformation during a fifty-year period, *Lecture Notes in Computer Science LNCS, Volume 6782*, pp. 237-252.
- Foody, G., 1996. Approaches for the Production & Evaluation of Fuzzy Land Cover Classifications From Remotely-Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing* 17: 1317–1340.
- Foody, G.M. 2000. Estimation of sub-pixel land cover composition in the presence of untrained classes. *Computers & Geosciences* 26, 469–478.
- Gatrell, A.C., Bailey, T.C., Diggle, P.J. and Rowlingson, B.S., 1996. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. *Transaction of Institute of British Geographer* 21, 256–271.
- Geary, R., 1954. The contiguity ratio and statistical mapping. *The Incorporated Statistician*, volume 5.
- Getis, A., and Ord, J., 1992. The analysis of spatial association by distance statistics. *Geographical Analysis*, volume 24, pp. 189-206.
- Janzen, J. 1986. *Introductory digital image processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Herold, M., Goldstein, N.C. and Clarke, K.C. 2003. The spatiotemporal form of urban growth: Measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment, Volume 86, Issue 3*, 286-302.
- Herold, M., Roberts, D., Gardner, M. and P. Dennison 2004. Spectrometry for urban area remote sensing—development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, 91, 304–319.
- Jensen, J. R., and Cowen, D. C. 1999. Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socioeconomic attributes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 611–622.
- Jensen, J. R. 2005. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (Third Edition)*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Lanorte, A., Danese, M., Lasaponara, R. and Murgante, B. 2013. Multi-scale mapping of burn area and severity using multi-sensor satellite data and spatial autocorrelation analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Elsevier, Volume 20, Pages 42–51*.
- Lee, J., and Wong, D.W.S. 2001. *Statistical analysis with ArcView GIS*. John Wiley & Sons, Inc.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizios, E. and Moran, E. 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2365–2407.
- Moran, P., 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society* 10, 243–251.
- Murgante, B., Las Casas, G. and Danese, M., 2008. The periurban city: geo-statistical methods for its definition. In: Coors, M., Rumor, V., Fendal, E.M., Zlatanova, ST. (Eds.), *Urban and Regional Data Management*. Taylor & Francis Group, London, pp. 473–485.
- Murgante, B., and Danese, M., 2011. Urban versus Rural: the decrease of agricultural areas and the development of urban zones analyzed with spatial statistics. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems* 2 (2).
- Murgante, B., and Borruso, G. 2012. *Analyzing Migration Phenomena with Spatial Autocorrelation Techniques*. Lecture Notes in Computer Science vol. 7334, pp. 670–685. Springer-Verlag, Berlin.
- Nole, G., Danese, M., Murgante, B., Lasaponara, R. and Lanorte, A. 2012. Using Spatial Autocorrelation Techniques and Multi-temporal Satellite Data for Analyzing Urban Sprawl. *Computational Science and Its Applications*. 7335, 512-527.



- Nolè, G., Lasaponara, R. and Murgante, B. 2013. Applying spatial autocorrelation techniques to multi-temporal satellite data for measuring urban sprawl. *International Journal of Environmental Protection (IJEP)*, 3(7), 11-21. World Academic Publishing. ISSN: 2226-6437.
- Nole, G., Tito, C., Lasaponara, R., Lanorte, A. and Murgante, B. 2014. Quantifying Urban Sprawl with Spatial Autocorrelation Techniques using Multi-Temporal Satellite Data. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 5(2), 20-38.
- O'Sullivan, D., and Unwin, D., 2002. *Geographic Information Analysis*. John Wiley & Sons.
- Palmer, M.W., Earls, P., Hoagland, B.W., White, P.S. and Wohlgemuth, T., 2002. Quantitative tools for perfecting species lists. *Environmetrics* 13, 121–137.
- Perpinan Lamigueiro, O., and Hijmans, R., 2014. R Package rasterVis, Visualization methods for the raster package.
- Premo, L.S. 2004. Local spatial autocorrelation statistics quantify multi-scale patterns in distributional data: an example from the Maya Lowlands. *Archaeological Science* 31, 855–866.
- Rocchini, D., Metz, M., Ricotta, C., Landa, M., Frigeri, A. and Neteler, M., 2013. Fourier transforms for detecting multi-temporal landscape fragmentation by remote sensing, *International Journal of Remote sensing*, 34:24, 8907-8916.
- Seto, K.C., and Fragkias, M. 2005. Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with timer series landscape metrics. *Landscape Ecology*, 20, 871–888
- Tobler, W.R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, Volume 46, Issue 2, pp.234–240.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*. 8:127-150.
- United Nations. 2012. *World urbanization prospects. The 2011 Revision*. New York.
- Yichun, X., Fang, C., Lin, GCS., Gong, H. and Qiao, B. 2007. Tempo-spatial patterns of land use changes and urban development in globalizing china: a study of Beijing. *Sensors*, 7: 2881-2906
- Zhang, Q., Ban, Y., Liu, J. and Hu, Y. 2011. Simulation and analysis of urban growth scenarios for the Greater Shanghai Area, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35: 126-139.
- Zhou, W., Cadenasso, M.L., Schwarz, K. and Pickett, S.T.A. 2014. Quantifying Spatial Heterogeneity in Urban Landscapes: Integrating Visual Interpretation and Object-Based Classification. *remote sensing*, 6, 3369-3386.