ارزیابی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) در آبخوان لنجانات با استفاده سیستم اطلاعات جغرافیایی

مجید دشتی برمکی*، محسن رضایی، امیر صابری نصر؛
دانشگاه خوارزمی تهران، دانشکدهٔ علوم زمین

تاریخ: دریافت ۹۱/۹/۱۹ **پذیرش** ۹۲/٤/۱۸

چکیده

در این مقاله شاخص کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان لنجانات را ارزیابی می‌کنیم. شاخص کیفی آب به‌عنوان زیرشاخه‌ای منحصر به فرد برای تشریح شرایط کلی کیفیت آب با استفاده از متغیرهای چندگانه کیفی ارائه شده است. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی ٦٦ نمونه آب از این دشت ارزیابی شده است. نتایج از مقایسهٔ ویژگی‌های کیفی استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و استاندارد تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) به‌دست آمده‌اند. در محاسبه GQI، ۷ پارامتر شامل کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر، سولفات، کل مواد جامد محلول و نیترات، استفاده شده است. شاخص کیفی آب زیرزمینی نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی در منطقهٔ بررسی شده متوسط و نسبتاً زیاد است. حداقل و حداکثر ارزش محاسبهٔ شاخص در دشت به‌ترتیب ۵۵ و ۹۳ است. بررسی نقشهٔ کاربری اراضی منطقه نشان می‌دهد که در امتداد زاینده‌رود که شالیزارها را در بر می‌گیرد کیفیت به کم‌ترین حد خود می‌رسد. تکنیک فاکتور شاخص بهینه، اجازهٔ انتخاب بهترین ترکیب پارامترها برای تغییرپذیری کیفیت آب زیرزمینی را بیان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)، استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO)، استاندارد تحقیقات صنعتی ایران(ISIRI)، سیستم اطلاعات جغرافیایی

* **نویسنده مسئول** majiddashti24@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

مقدمه

افزایش روزافزون آلاینده‌های شیمیایی شهری و صنعتی و شیوه‌های نوین کشاورزی تهدیدی جدی برای محیط‌زیست به‌حساب می‌آیند. کیفیت آب از مهم‌ترین عواملی است که باید به هنگام ارزیابی توسعهٔ مناسب یک منطقه، بررسی شود [۱]. کیفیت آب باید بر اساس متغیرهای فیزیکی و شیمیایی در ارتباط با استفاده از آب، تعریف شده باشد. اگرچه مفهوم کیفیت آب زیرزمینی واضح به‌نظر می‌رسد، اما چگونگی بررسی و ارزیابی آن، نیاز به برخی ترفندها دارد [۲]، [۳]. ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، مقیاسی از تناسب آن به‌عنوان منبع آبی برای مصارف انسانی و حیوانی، آبیاری و برای اهداف صنعتی و ... را شامل می‌شود. بنا بر این، هدف، تعریف کیفیت آب نیست، بلکه استفاده مطلوب از آب در جامعه مورد نظر متخصصان است [٤]. بر اساس استانداردهای مختلف موجود، برای هر متغیر مقادیر قابل پذیرش و غیرقابل پذیرش تعریف شده است که اگر آب از این استاندارد تجاوز کند، قبل از استفاده باید تصفیه شود [۱]. در این تحقیق از دو استاندارد سازمان بهداشت جهانی [۵]، و سازمان تحقیقات صنعتی ایران [٦] بهره برده شده است.

محققان بسیاری اندازه‌گیری شاخص کیفی آب سطحی و زیرزمینی را مطرح کرده‌اند. براون و همکاران شاخص کیفی آب (WQI) را بیان کردند [۷]. هورتون [۸] پیشنهاد کرد که داده‌های مختلف کیفیت آب می‌توانند برای هم‌پوشانی شاخص به‌کار روند. در طی سالیان اخیر، شاخص‌های بسیاری برای اهداف مختلف کیفیت آب [۷]، [۸]، [۹]، آلودگی آن و بررسی‌های محیطی وابسته به آن [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳] ارائه شده است. باکمن و همکاران [١٤]، شاخصی برای ارزیابی و نقشه‌برداری درجهٔ آلودگی آب زیرزمینی و آزمایش کاربرد آن در جنوب غرب فنلاند و مرکز اسلواکی ارائه کردند. سلطان [۱۵] از شاخص کیفی آب ۹ پارامتری برای نشان دادن کیفیت آب زیرزمینی حاصل از ۱۰ چاه آرتزین نزدیک داخلا اواسیس در غرب مصر استفاده کرد. استامبوک و گیلجانوویچ [١٦]، شاخص کیفی آب تلفیقی سطحی و زیرزمینی را در ارزیابی آب دالماتیای کرواسی بیان کردند. استیگر و همکاران [۱۷] کاربرد شاخص کیفیت آب زیرزمینی به‌عنوان ابزار ارزیابی در سیاست‌های کشاورزی- محیطی را

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

بررسی کردند. ایشان با هدف مدیریت تأثیر توأم کشاورزی روی پارامترهای کلیدی شیمی و قابلیت شرب آب زیرزمینی با روش تحلیل عاملی[۱] به بررسی کیفیت آب زیرزمینی در پرتغال پرداختند. سعیدی و همکاران [۱۸]، از شاخص کیفی آب زیرزمینی برای نقشه‌برداری مناطقی که شاخص‌های نزدیک به آب معدنی دارند، استفاده کردند. هریس و همکاران [۱۹] ارزیابی تأثیر تغییر الگوی کاربری زمین بر روی کیفیت آب زیرزمینی سیستم آبخوان سازند سخت در حوضه ماهشوارام نزدیک حیدرآباد هند را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و با روش شاخص کیفیت آب زیرزمینی[۲] بررسی کردند.

شاخص کیفیت آب زیرزمینی، ترکیب داده‌های آب با کیفیت‌های مختلف در دسترس را به شکلی قابل درک در می‌آورد. این شاخص ارائه‌دهندهٔ روشی برای مختصرسازی شرایط کلی کیفیت آب است که می‌تواند به‌خوبی ارائه شود و به درک این مسئله که آیا کیفیت کلی آب زیرزمینی خطری بالقوه برای استفاده‌های مختلف آب است یا خیر، کمک می‌کند. در نهایت این روش به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و نشان دادن موفقیت در حفظ و بهبود آن کمک می‌کند. در واقع، شاخص کیفیت آب، پارامترهای مختلف کیفی آب را برای ارائه مقدار شاخص نهایی با هم ترکیب می‌کند که می‌تواند برای مقایسه‌های مکانی استفاده شود [۱۹]. در این‌جا از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، برای اجرای شاخص پیشنهادی استفاده شده است. سیستم اطلاعات جغرافیایی برای جمع‌آوری داده‌های مکانی متنوع در نشان دادن پدیده‌های مکانی متغیر با استفاده از یک سری تجزیه و تحلیل هم‌پوشانی داده‌ها طراحی شده است [۲۰].

معرفی منطقهٔ پژوهش

موقعیت زمین‌شناسی و جغرافیایی

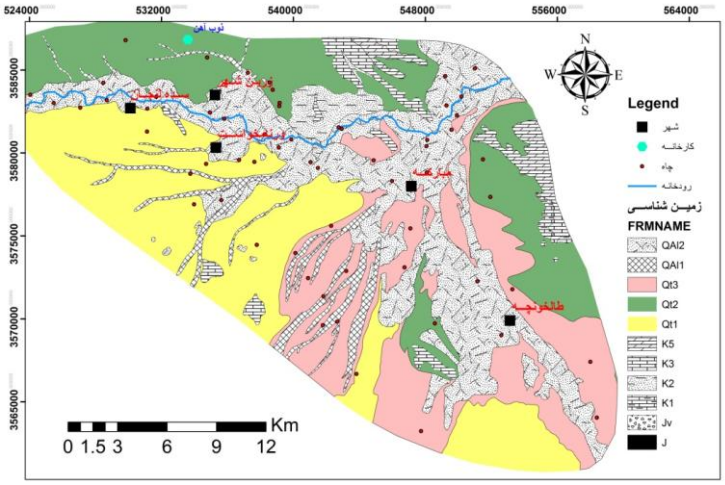
منطقهٔ پژوهش در حد طول جغرافیایی ′۱۵ °۵۱ تا ′۳۸ °۵۱ شرقی و عرض جغرافیایی ′۱۱ °۳۲ تا ′۲۵ °۳۲ شمالی بخشی از شهرستان لنجان در جنوب غرب استان اصفهان است. این محدوده به مساحت ٦٦٠ کیلومتر مربع شهرهای زرین شهر، طالخونچه، مبارکـه، سـده لنجان و

۱. Factor Analysis ۲. GQI

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

ورنامخواست را در بر گرفته و از سمت شمال به فولادشهر، از شمال غرب به باغ بهادران و چرمهین، و از جنوب غرب به مجلسی منتهی می‌گردد. در حوالی شمال و شمال غرب منطقهٔ بررسی شده کارخانهٔ ذوب آهن اصفهان قرار دارد. منطقه بیش‌تر از رسوبات کواترنری پوشیده شده است. جنس آبرفت منطقه، بر اساس لوگ چاه‌ها، شن و ماسه، رس و قلوه سنگ به‌همراه طبقات کنگلومرایی است. شکل ۱ زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده را نشان داده است. جنس سازندهای محدودهٔ پژوهش به شرح جدول ۱ است. مهم‌ترین آبخوان موجود در منطقه آبخوان آبرفتی لنجانات است. این آبخوان به‌دلیل برگشت چشم‌گیر پساب‌های صنعتی و کشاورزی از نظر کیفیت و آلودگی منابع آب زیرزمینی همواره مورد توجه قرار داشته است.



شکل ۱. زمین‌شناسی و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری منطقهٔ پژوهش

جدول ۱. سازندهای زمین‌شناسی رخنمون یافته در محدودهٔ پژوهش

سازند	زمان – جنس	سازند	زمان – جنس
Qt1	کواترنری – تراس‌های قدیمی	K5	کرتاسه – ماسه سنگ با میان لایهٔ نازک سفید – خاکستری مارنی
K1	کرتاسه- سنگ آهک با نمک نازک لایه، شیل، مارن، ماسه سنگ	J	ژوراسیک – شیل شامل مرجان‌های آمونیتی، با میان لایهٔ کنگلومرا، ماسه سنگ، سنگ آهک رادیولاریتی و آتشفشانی
Qt3	کواترنری – تراس‌های جوان و مخروط‌های شنی	K2	کرتاسه – ماسه سنگ قرمز و کنگلومرا با شیل ماسه‌ای قرمز بین لایه‌ای
K3	کرتاسه – سنگ آهک شامل اربیتولین و آمونیت	QAl1	کواترنری – دشت‌های سیلابی و رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر
Jv	ژوراسیک – آتشفشانی آندزیتی	QAl2	کواترنری – خاک کشاورزی و تراس‌ها
Qt2	کواترنری – رسوبات آبرفتی		

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

مرور پژوهش‌های پیشین

پورمقدس [۲۱] در پژوهشی با عنوان "بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقهٔ لنجانات اصفهان"، مقادیر اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی، اکسیژن محلول، کل مواد جامد محلول، و برخی آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی و فلزات سنگین در منطقه را بررسی کرد و نتیجه گرفت که آب‌های زیرزمینی شهرستان لنجان در گروه آب‌های بسیار سخت قرار می‌گیرند و چند مورد آلودگی در منطقه را گزارش داد. میران‌زاده و مامون‌پوشان [۲۲]، شیمی آب‌های زیرزمینی و سطحی منطقهٔ لنجانات را بررسی کردند. آن‌ها در پژوهش خود از مدل ویت‌وال[۱] استفاده کردند. حاجی مرادی و گندم‌کار [۲۳] به بررسی وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی دشت لنجانات پرداختند. در بررسی آنان، آب زیرزمینی منطقه به ۳ تیپ و رخساره طبقه‌بندی شد که تیپ غالب در منطقه سولفاته بود. آن‌ها، نتیجه تحقیق خود را بدین صورت بیان کردند که"میزان هدایت الکتریکی، کلرور، نیترات، و آلودگی‌های باکتریایی از جنوب و جنوب غرب محل تغذیه آبخوان به سمت مرکز و شمال افزایش می‌یابد، که دلیل آن می‌تواند زمین‌شناسی، وجود صنایع و تخلیه فاضلاب، آب برگشتی کشاورزی و نیز خشکسالی باشد". کی‌همایون و همکاران [۲٤] متغیرهای کنترل کننده انتقال نیترات در آبخوان لنجانات در محدودهٔ تمرکز فعالیت‌های کشاورزی دشت را بررسی کردند. در بررسی مدل انتقال MT3DMS نیترات مشخص شد که تغذیه نیترات از سطح زمین‌های زراعی، میزان تجزیهٔ مرتبهٔ اول یون نیترات، تخلخل مؤثر رسوب‌ها و بارش، بیش‌ترین تأثیر را در ورود و ماندگاری این آنیون در آب زیرزمینی محدودهٔ پژوهش دارد.

مواد و روش‌ها

داده‌های کیفی آب زیرزمینی

در این پژوهش از داده‌های کیفی آب زیرزمینی شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان (تابستان ۱۳۸۸) استفاده شده است. داده‌های مزبور، شامل تعداد ٦٦ نمونه آب چاه مربوط به تابستان ۱۳۸۸ در محدودهٔ بررسی شده هستند. در این پژوهش هفت پارامتر شامل: کلسیم، منیزیم

۱. Wateval

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

سدیم، کلر، سولفات، کل مواد جامد محلول و نیترات، برای تولید شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی انتخاب شده است. از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی[۱] [۵] و استاندارد تحقیقات صنعتی ایران[۲] [٦] برای مقایسه استفاده شده است. هنگامی که سلامت انسان در کنار کیفیت مطلوب آب شرب اولویت می‌یابد، استانداردهای آب آشامیدنی برای اهداف دیگر نیز مناسب هستند. در این‌جا، شش پارامتر کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر، سولفات، و کل مواد جامد محلول در دسته ترکیبات شیمیایی مشتق شده از آلاینده‌هایی که می‌توانند، مزه، بو، یا ظاهر آب را تغییر دهند قرار می‌گیرند. دستورالعمل ثابتی برای این ترکیبات شیمیایی ارائه نشده است و تنها آستانه برای حداکثر غلظت برای هر کدام در نظر گرفته شده است. نیترات که ممکن است در به خطر افتادن سلامتی مؤثر باشد در زیرشاخهٔ مواد شیمیایی قرار می‌گیرد. جدول ۲ خلاصهٔ آماری غلظت‌های اندازه‌گیری شده از هفت پارامتر بررسی شده در منطقهٔ پژوهش را نشان می‌دهد و غلظت‌های آستانه را بر حسب دو استاندارد سازمان بهداشت جهانی و سازمان استاندارد تحقیقات صنعتی ایران را بیان می‌دارد.

غلظت یون‌ها بر حسب ppm، کل مواد جامد محلول بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی بر حسب میکرومهوس بر سانتی‌متر است.

جدول ۲. اطلاعات آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی و مقایسه با مقادیر آستانه استاندارد

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین	استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO)	استاندارد تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI)
کلسیم	۷/۵	۱۰۸۰	۳۱۹/٦۷	۳۰۰	۳۰۰
منیزیم	٤/۸٦	۳۷۹/۱	۷۵/۵۰	۳۰۰	۲۰۰
سدیم	۲۱/۳	۱٤۹۲/۵	٤۲۰/٦۱	۲۰۰	۲۰۰
کلر	۱/۵	٤۲/۹٤	۲٤۹/۲۸	۲۰۰	٤۰۰
سولفات	۲۰	۲۵۲۵	۷۰۵/۷۵	۲۵۰	٤۰۰
TDS	۲۲٤	۹٤۳۳/٦	۲٤۸٤/۲۷	٦۰۰	۱۵۰۰
نیترات	۰/۹	۱٦/۱	٤/۲۱	۵۰	۵۰

۱. World Health Organization (WHO)
۲. Institute of Standards and Industrial Research of Iran

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

تحلیل مکانی کیفیت آب زیرزمینی با GIS

به‌منظور ثبت تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی در منطقهٔ پژوهش، تجزیه و تحلیل مکانی با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند Arc Map و ILWIS انجام شد. نقشه‌های زمین مرجع کاربری اراضی و توزیع مکانی داده‌های شیمیایی مربوط به تابستان ۸۸ تهیه شد.

متغیرهایی را که مقادیر گسسته در مکان‌های مختلف (مانند غلظت ترکیبات شیمیایی در آب‌های زیرزمینی) دارند، می‌توان به‌عنوان فرایندی تصادفی در نظر گرفت که درجهٔ خاصی از ارتباط با فضای اطراف را پردازش می‌کنند. ابتدا برای ارزیابی آرایش داده‌های شیمیایی و فیزیکی در فضا و این‌که آیا توزیع تصادفی دارند یا نه، و هم‌چنین نشان دادن هم‌بستگی بین نقاط و نمایش تغییرپذیری مکانی پدیده‌های بررسی شده (کیفیت آب زیرزمینی)، از تحلیل الگوی خود هم‌بستگی استفاده شده است. پس از آن، تحلیل‌های هم‌بستگی آرایش مرتبه‌ای غیرپارامتری اسپیرمن[۱] بین پارامترهای اندازه‌گیری شده برای تعیین الگوهای تطابق انجام شده است که کنترل‌کننده تغییرپذیری مکانی کلی کیفیت آب زیرزمینی هستند. این روش هم‌بستگی، زمانی ترجیح داده می‌شود که داده‌های کیفیت آب توزیع مکانی عادی ندارند.

توسعهٔ شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی (GQI)

این فرآیند شامل تغییر مکانی اندازه‌گیری‌ها و تبدیل‌های چندباره داده‌های کیفیت آب زیرزمینی به‌صورت یک مقدار رتبه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی است.

نقشه اولیهٔ (I)

در مرحلهٔ اول، نقشه‌های غلظت برای هر پارامتر از داده‌های نقطه‌ای با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ باعنوان نقشه‌های اولیه (I) تهیه شدند. دلیل استفاده از کریجینگ این بود که برخلاف دیگر روش‌های درون‌یابی (مانند نزدیک‌ترین نقطه یا میانگین متحرک)، کریجینگ مبتنی بر روشی آماری است. این روش، میانگین وزنی روی داده‌های نقطه‌ای اجـرا می‌کند جایی‌که خروجی برابر مجموع ضرایب مقادیر نقطه‌ای و وزن‌ها تقسیم بر مجموع وزن‌ها برآورد می‌شود.

۱. Nonparametric Spearman Rank-Order correlation

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

فاکتورهای وزنی در کریجینگ با استفاده از یک مدل نیم‌تغییرنما[۱] تعریف شده با کاربر مبتنی بر خروجی هم‌بستگی مکانی و تحلیل الگوی شرح داده شده در مرحلهٔ قبل تعیین شده‌اند. نرمال بودن داده‌ها بررسی شد و در صورت نرمال نبودن داده‌ها، از تبدیل‌های لگاریتمی و باکس-کاکس[۲] برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد. در صورت عدم برازش مناسب با این روش‌ها، از روش انفصالی[۳] استفاده گردید. در مرحلهٔ دوم، با آزمودن ۱۱ مدل برازش در کریجینگ، و بررسی ریشهٔ مربع میانگین استاندارد شده[۴] و میانگین استاندارد شده[۵] درون یابی اجرا شد.

نقشهٔ اولیه (II)

برای بیان کردن داده‌ها به‌صورت نرم جهانی[۶]، غلظت اندازه‌گیری شده در هر سلول، X'، در نقشهٔ اولیه، به مقدار استاندارد مطلوب آن (WHO یا ISIRI) ، X، (جدول ۱) با استفاده از شاخص اختلاف نرمالایز شده[۷] ارائه می‌شود [۲]:

$$C = (X' - X)/(X' + X) \quad (۱)$$

نقشهٔ به‌دست آمده (II) نشان می‌دهد که برای هر سلول، یک مقدار شاخص آلودگی با محدودهٔ بین ۱- تا ۱ وجود دارد. نقشهٔ بیان‌گر شاخص آلودگی است که به‌عنوان نسبت بین غلظت اندازه‌گیری شدهٔ آلاینده و حداکثر سطح آلایندهٔ قابل پذیرش محاسبه شده است.

نقشهٔ رتبه‌بندی

در این مرحله، شاخص آلودگی (نقشهٔ اولیه II)، به یک نقشهٔ رتبه‌بندی با محدودهٔ بین ۱ تا ۱۰ تبدیل می‌شود. رتبهٔ ۱ نشان‌دهندهٔ کم‌ترین تأثیر آب زیرزمینی و رتبهٔ ۱۰ بیشینهٔ آن است. در نقشهٔ جدید، کم‌ترین سطح شاخص آلودگی (۱-) برابر با ۱، سطح حدواسط (۰) برابر با ۵، و بیش‌ترین سطح (۱) معادل با ۱۰ است. بنا بر این، می‌توان از تابع چند جمله‌ای زیر با محدودهٔ تغییرات ۱ تا ۱۰ استفاده کرد. در این معادله، C، مقدار شاخص آلاینده برای هر سلول و r مقدار رتبه مربوط به آن است [۲].

---

۱. semi-variogram ۲ . Box-Cox ۳. disjunctive
۴. Root-Mean-Square Standardized ۵. Mean Standardized ۶. universal norm
۷. normalized difference index

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

$$r=۰/۵\times C^{۲}+۴/۵\times C+۵ \qquad (۲)$$

شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)

– شاخص کیفیت آب زیرزمینی از این معادله به‌دست می‌آید [۲]:

$$GQI = ۱۰۰-(\frac{r_۱w_۱ + r_۲w_۲ + ... + r_nw_n}{N}) \qquad (۳)$$

در معادلهٔ (۳)، r میزان نقشهٔ رتبه‌بندی (۱ تا ۱۰)؛ w، وزن نسبی پارامترها؛ و N، تعداد کل پارامترهای استفاده شده در تحلیل‌ها هستند. وزن نسبی هر پارامتر، به مقدار میانگین[۱] رتبه‌بندی (r) آن‌ها ارتباط دارد. در مورد پارامترهایی که اثرات بهداشتی بالقوه دارند (به‌عنوان مثال نیترات)، از رابطهٔ (۲+mean r) با شرط $r \leq ۸$ در محیط آرک‌مپ[۲] استفاده می‌شود.

قسمت اصلی شاخص کیفیت آب زیرزمینی نشان‌دهندهٔ ترکیب خطی میانگین از فاکتورهاست. وزن مختص هر پارامتر بیان‌کنندهٔ اهمیت نسبی آن پارامتر در آب زیرزمینی مربوط به مقدار رتبه‌بندی میانگین «نقشهٔ رتبه‌بندی» آن است. پارامترهایی که تأثیر بیش‌تری بر کیفیت آب‌های زیرزمینی (میزان میانگین بالا) دارند، در ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی مهم‌تر هستند. در این پژوهش، بر آلاینده‌هایی که خطر بالقوه‌ای برای سلامتی انسان دارند، تأکید ویژه‌ای شده است (مثل نیترات) (w = mean r +۲). در نهایت و با تقسیم حاصل ضرب رتبهٔ هر پارمتر در وزن میانگین آن بر تعداد کل پارامترها، شاخص کیفیت آب زیرزمینی با محدوده مقدار شاخص بین ۱ تا ۱۰۰ به‌دست می‌آید. به این ترتیب تأثیر پارامترهای به‌صورت انفرادی، تا حد زیادی کاهش می‌یابد و محاسبهٔ شاخص هرگز به تعداد معینی از پارامترهای شیمیایی محدود نمی‌گردد. ۱۰۰ در قسمت اول این معادله، باعث می‌شود که مقادیر نزدیک به عدد ۱۰۰ نشان‌دهندهٔ کیفیت مطلوب و مقادیر نزدیک به ۱ کیفیت نامطلوب را نشان دهند. طبقه‌بندی کیفیت آب در این پژوهش با توجه به رنگ‌بندی ظاهری مشخص می‌شود. رنگ‌های سرد، حداکثر کیفیت آب، سایه‌های سبزرنگ، کیفیت متوسط و رنگ‌های گرم، حداقل کیفیت را نشان می‌دهند.

۱. mean ۲. Arc Map

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

پتانسیل شاخص کیفیت آب

توزیع مکانی و ارتباط شاخص‌های کیفیت آب زیرزمینی دو نگرانی اساسی در این پژوهش محسوب می‌شود. بسیاری از پارامترهای کیفیت آب از لحاظ مکانی ثابت‌اند که می‌توان گفت سهم ناچیزی در توزیع کلی شاخص کیفیت آب در یک منطقه داشته باشند. از آن‌جا که خصوصیات داده‌های یاد شده، ممکن است بر درجهٔ اطمینان شاخص محاسبه شده تأثیر بگذارند، روشی هدفمند برای انتخاب بهترین ترکیب از پارامترهای کیفی آب در ایجاد شاخص کیفیت آب زیرزمینی پیشنهاد شده است که وضعیت واقعی کیفیت آب زیرزمینی در هر منطقه‌ای را به بهترین وجه نشان می‌دهد. از عامل شاخص بهینه[۱] [۲۵] برای انتخاب بهترین ترکیب از سه نقشه رتبه‌بندی با بیش‌ترین مقدار اطلاعات (بیش‌ترین مجموع انحراف معیار) و کم‌ترین مقدار تکرار (کم‌ترین هم‌بستگی میان زوج نقشه‌ها) استفاده می‌شود [۲۵].

$$OIF = SD_i + SD_j + SD_k / Corr_{i,j} + Corr_{j,k} + Corr_{i,k} \quad (٤)$$

در معادلهٔ (٤) i، j و k سه نقشهٔ رتبه‌بندی؛ SD، انحراف معیار؛ Corr، هم‌بستگی هستند. عامل شاخص بهینه، در اصل برای انتخاب بهترین ترکیب از سه باند تصویر ماهواره‌ای برای ایجاد ترکیب رنگی کاذب توسعه یافته است. در بررسی عامل شاخص بهینه، از نرم‌افزار ILWIS استفاده شد. در نهایت، نقشهٔ پتانسیل شاخص کیفی آب تهیه شد.

نتایج

خود هم‌بستگی مکانی و هم‌بستگی آرایش رتبه‌ای اسپیرمن

در این پژوهش از خود هم‌بستگی موران[۲] [۲٦] استفاده شده است. این عامل نشان می‌دهد که الگوی مکانی داده‌ها، به‌صورت خوشه‌ای[۳]، پراکنده[٤] (یا تصادفی) است. تحلیل خود هم‌بستگی مکانی نشان می‌دهد که تنها منیزیم توزیعی پراکنده دارد و بقیه پارامترها به‌صورت خوشه‌بندی هستند (جدول ۳). هم‌چنین، هم‌بستگی آرایش رتبه‌ای اسپیرمن نشان‌دهندهٔ اهمیت ارتباط مکانی بین هفت متغیر کیفیت آب زیرزمینی است (جدول ٤).

---

۱. Optimum Index Factor (OIF) ۲. Moran's I ۳. clustered ۴. dispersed

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

جدول ۳. خود هم‌بستگی مکانی پارامترهای تعیین کننده کیفیت آب زیرزمینی

	کلسیم	منیزیم	سدیم	کلر	نیترات	سولفات	همهٔ مواد جامد محلول
Moran's I Index	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰٤	۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۱
Z score	۲/۸۲	۰/٤۸	۳/٦۱	۱/۸۱	۲/۷۳	۵/۳۹	۲/۹۵
P value	۰/۰۰٤	۰/٦	۰/۰۰۰۳	۰/۰۷	۰/۰۰٦	۰	۰/۰۰۳
	خوشه‌ای	تصادفی	خوشه‌ای	خوشه‌ای	خوشه‌ای	خوشه‌ای	خوشه‌ای

جدول ٤. هم‌بستگی آرایش رتبه‌ای اسپیرمن

متغیر	منیزیم	نیترات	سولفات	همهٔ مواد جامد محلول	سدیم	کلر
منیزیم						
نیترات	۰/٤٥٤					
سولفات	۰/۳۸٤	۰/٤۹۷				
کل مواد جامد محلول	۰/۳۸٤	۰/٤۹۷	۱/۰۰۰			
سدیم	۰/۳٤۱	۰/٤۸٦	۰/۷۹٤	۰/۷۹٤		
کلسیم	۰/٤۲۵	۰/٤۹۵	۰/٦۸۰	۰/٦۸۰	۰/۵۵۰	
کلر	-۰/۰۲۸	-۰/۰۷۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۳۷	۰/۲۰۰

Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05

شاخص کیفیت آب زیرزمینی منطقهٔ بررسی شده

در شکل ۲ توزیع شاخص کیفی آب در دشت بر اساس دو استاندارد بررسی شده ارائه شده است. شاخص کیفیت آب زیرزمینی در بخش عمدهٔ دشت در محدودهٔ نسبتاً خوب (۷۰ تا ۸۰) قرار دارد. بر اساس دو استاندارد سازمان جهانی بهداشت و تحقیقات صنعتی ایران متوسط شاخص به‌ترتیب ۷٤/۸ با انحراف معیار ۳/٦ و ۸۰ با انحراف معیار ۳/۳ است. کم‌ترین شاخص کیفیت آب مربوط به محدوده‌های شرق شهرستان مبارکه و جنوب سده لنجان است. با در نظر گرفتن خلاصهٔ آماری نقشه‌های رتبه‌بندی ایجادکنندهٔ شاخص کیفیت آب در منطقهٔ بررسی شده (جدول ۵)، مشخص می‌شود که الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی در شکل ۲ تحت تأثیر همهٔ مواد جامد محلول، کلسیم و سدیم با توجه به مقدار رتبهٔ میانگین زیادشان است. چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در امتداد رودخانهٔ شرقی- غربی جاری در منطقه، آب زیرزمینی کیفیت کم‌تری نسبت به دیگر مناطق دارد. برای پی بردن به‌دلیل اصلی این

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

کاهش کیفیت، نقشهٔ کاربری اراضی بررسی شد. بر اساس این، با نگاهی اجمالی به نقشه کاربری اراضی منطقه، می‌توان به این نکته پی برد که این کاهش کیفیت آب ممکن است، مربوط به استفاده از کودهای شیمیایی در شالیزارهای منطقهٔ پژوهش باشد (شکل ۲). بر اساس پژوهش‌های قبلی [۲٤]، مشخص شده است که جهت جریان سطحی و زیرزمینی به‌سمت زاینده‌رود است. اخیراً فعالیت‌های کشاورزی از طریق حفر و پمپاژ زیاد چاه‌های بهره‌برداری، سبب تغییر جهت جریان به سمت بخش شرقی آبخوان شده است. این تغییر جهت، می‌تواند منجر به کاهش کیفیت آب در بخش شرقی نیز همانند بخش غربی شود.

پتانسیل شاخص کیفی آب زیرزمینی بر اساس استاندارد سازمان جهانی بهداشت با استفاده از سه پارامتر کلر، منیزم و سولفات و بر اساس استاندارد تحقیقات صنعتی ایران با استفاده از سه پارامتر کلر، منیزیم و سدیم محاسبه شد. انتخاب این پارامترها بر حسب فاکتور شاخص بهینه بوده است. توزیع این پارامتر که نشان‌دهندهٔ الگوی تغییرپذیری مکانی کیفیت آب زیرزمینی در منطقهٔ پژوهش است، در شکل ۳ نشان داده شده است.

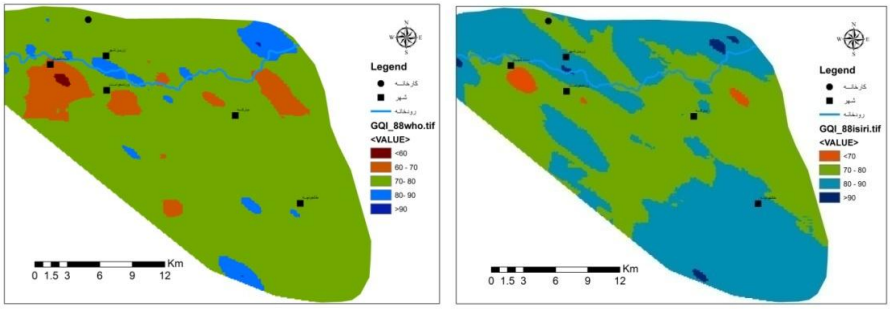
جدول ۵. خلاصهٔ آماری نقشه‌های رتبه‌بندی ایجادکننده شاخص کیفیت آب در منطقه

پارامتر	استاندارد تحقیقات صنعتی ایران				استاندارد سازمان بهداشت جهانی			
	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
کلسیم	۱/۵	۷/٦	٤/۷	۰/۳۸	۱/۵	۷/٦	٤/۷	۰/۳۹
منیزیم	۲/۱	٤/۲	۳/۲	۰/۱۱	۱/۸	۳/٤	۲/٦	۰/۰۸
سدیم	۱/٤	۸/٦	۵/۱	۰/۳٦	۱/٤	۸/٦	۵/۱	۰/۳٦
کلر	۱/۱	۸/۹	۰/٦	۰/٤٦	۱/۱	۹/٤	۵/۳	۰/٤٦
سولفات	۲/۷	۳/۱	۲/۹	۰/۰۱	۳/۵	٤	۳/۸	۰/۰۱
TDS	۱	۸/٤	٤/۷	۰/۳۲	۱/۱	۹/۳	۵/۳	۰/٤٤
نیترات	۱/۳	۲	۳/٦*	۰/۰۲	۱/۳	۱/۹	۳/٦*	۰/۰۲

(* میانگین+۲)

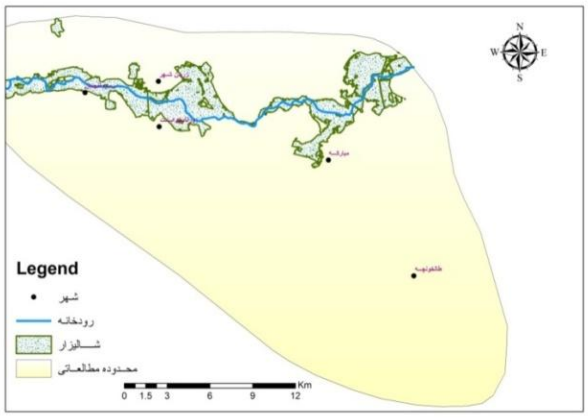
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

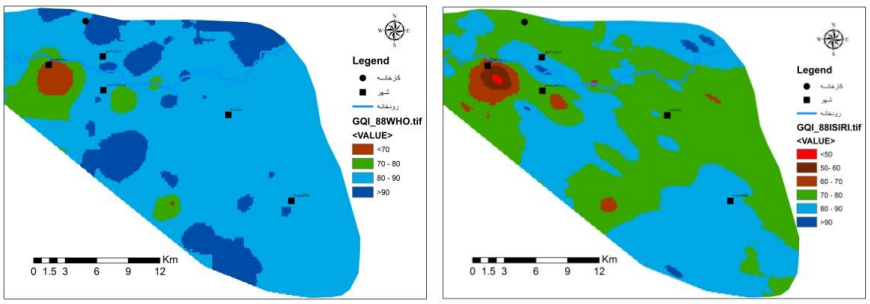


ب الف

شکل ۲. شاخص کیفی آب استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) الف) و استاندارد تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI)، ب) منطقهٔ پژوهش



شکل ۳. موقعیت شالیزارهای منطقهٔ پژوهش



ب الف

شکل ٤. پتانسیل شاخص کیفیت آب استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) الف) و استاندارد تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) ، ب) منطقهٔ پژوهش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

اطلاعات آماری نقشهٔ نهایی پتانسیل شاخص کیفیت آب ارائه شده در جدول ٦ نشان می‌دهد که به‌طورکلی میانگین شاخص در این نقشه‌ها نسبت به نقشهٔ شاخص کیفیت آب تفاوت چندانی ندارد. پتانسیل شاخص کیفیت آب در سال ۸۸، تغییرپذیری مکانی (انحراف معیار) بیش‌تری را نسبت به شاخص کیفیت آب نشان می‌دهد. بنا بر این باید توجه داشت که پتانسیل شاخص پیشنهادی در مورد نقشهٔ پتانسیل شاخص کیفیت آب سال ۸۸ با استاندارد سازمان بهداشت جهانی، نتیجهٔ مناسب‌تری را نسبت به مقدار مطلق شاخص کیفیت آب ارائه می‌کند. این موضوع به ابهام و پیچیدگی بحث کیفیت آب زیرزمینی مربوط می‌شود. ازسوی دیگر، این موضوع می‌تواند بیان‌گر این نکتهٔ مهم باشد که تنها با بررسی سه پارامتر منحصر به فرد در یک منطقه، به‌طور قطع نمی‌توان در مورد کیفیت کلی آن اظهار نظر کرد.

جدول ٦. خلاصه آماری نقشهٔ نهایی پتانسیل شاخص کیفیت آب

سال	استاندارد	میانگین	انحراف معیار
۸۸	سازمان بهداشت جهانی	۸٦/٦	٤/٤
۸۸	تحقیقات صنعتی ایران	۷۹/۱	٤/٤

نتیجه‌گیری

در سراسر جهان، منابع مهم آب زیرزمینی به‌دلیل افزایش جمعیت، کاربری‌های جدید (صنعتی و کشاورزی) و تقاضا برای تأمین آب، در سال‌های اخیر، هم از لحاظ کمی و هم کیفی به‌خطر افتاده‌اند. با این حال، با توجه به تغییرپذیری مکانی آلاینده‌های مختلف و طیف گسترده شاخص‌هایی که ممکن است اندازه‌گیری شوند (شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی)، توصیف کیفیت آب به‌طورکلی دشوار است. این پژوهش، از شاخص کیفیت آب زیرزمینی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده کرده است، که داده‌های کیفیت آب موجود (کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر، سولفات، همهٔ مواد جامد محلول و نیترات) را به شکلی قابل فهم بیان می‌دارد. این شاخص، راهی برای خلاصه کردن شرایط کیفی کلی آب که برای مخاطب قابل درک باشد ارائه می‌کند، و می‌تواند برای درک این‌که آیا کیفیت کلی آب زیرزمینی،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

تهدیدی برای مصارف مختلف آب خواهد بود یا نه، بیان شود. در نهایت می‌توان مناطق کم کیفیت آب‌های زیرزمینی را برای بررسی‌های دقیق‌تر و برنامه های نظارت هدف قرار داد.

شاخص کیفیت آب پیشنهادی با تشریح تغییر مکانی کیفیت آب زیرزمینی در منطقهٔ پژوهش، نشان می‌دهد که کیفیت آب حوضه نسبتاً خوب است (شاخص کیفیت آب بیش از ۷۰). در امتداد زاینده‌رود، آب زیرزمینی کیفیت کم‌تری نسبت به دیگر مناطق دارد. با توجه به جهت جریان سطحی و زیرزمینی به‌سمت زاینده‌رود و قرارگیری شالیزارهای منطقهٔ پژوهش در اطراف این رودخانه، کاهش کیفیت آب می‌تواند قابل انتظار باشد.

تحلیل عامل شاخص بهینه نشان می‌دهد که بیش‌ترین و جامع‌ترین اطلاعات در مورد کیفیت آب زیرزمینی در سال ۸۸ در استاندارد تحقیقات صنعتی ایران توسط سه پارامتر کلر، منیزیم و سدیم ارائه می‌شود. در حالی‌که در استاندارد سازمان بهداشت جهانی، این امر مهم به پارامترهایی مانند کلر، منیزیم و سولفات مربوط می‌شود. به هر حال، تأثیر کلر و منیزیم در کیفیت آب این منطقه مشهود است.

منابع

1. Cordoba E., Martinez A., Ferrer E., "Water quality indicators: comparison of a probabilistic index and a general quality index, The case of the confederacion hidrografica del jucar (spain)", Ecological Indicators 10 (2010) 1049-1054.
2. Babiker I., Mohamed M., Hiyama T., "Assessing groundwater quality using GIS", Water Resources Management, 21(2007) 699-715.
3. Chenini I., Khemiri S.,"Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling", Int. J. Environ. Sci. Tech., 6 (3) (2009) 509-519.
4. Elamassi K. S., "Assessment of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in Gaza governorate-Palestine. The Islamic

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

University-Gaza", Faculty of Science, Master's Degree Program, Environmental science, June (2012).

5. World Health Organization (WHO), "Guidelines for Drinking-Water Quality", Second addendum. Vol. 1, Recommendations, -3rd ed. (2008), ISBN 9789241547604

٦. آب آشامیدنی. *ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی*، مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ۱۰۵۳، تجدید نظر پنجم (۱۳۸۸).

7. Brown R. M., McClelland N. I., Deininger R. A., Tozer R., "GA water quality index: Do we dare?", Water & Sewage Works, 117 (1970) 339-343.

8. Horton R. K., "An index number system for rating water quality", Journal-Water Pollution Control Federation, 37 (1965) 300-305.

9. Couillard D., Lefebvre Y., "Analysis of water quality indices", Journal of Environmental Management, 21 (1985) 161-179.

10. Prati L., Pavanello R., Pesarin F., "Assessment of surface water quality by a single index of pollution", Water Resources, 5 (1971) 741-751.

11. Walski T. M., Parker F. L., "Consumer's water quality index", Journal of the Environmental Engineering Division, 100 (1974) 259-611.

12. Provencher M., Lamontagne J., "A method for establishing a water quality index for different uses. Quebec: Gouvernment du Quea' bec, Ministea", redes richesses naturelles, le Service de la qualitea' des eaux, Bibliotequea, nationale du Quea, bec (1979).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

13. Shaefer D. J., Janardan K. G., "Communicating environmental information to the public a new water quality index", The Journal of Environmental Education, 8 (1977) 18-26.

14. Backman B., Bodis D., Lahermo P., Rapant S., Tarvainen T., "Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia", Environmental Geology, 36 (1–2) (1998) 55-64. doi:10.1007/s002540050320.

15. Soltan M. E., "Evaluation of groundwater quality in Dakhla Oasis (Egyptian Western Desert)", Environmental Monitoring and Assessment, 57 (2) (1999) 157-168. doi: 10.1023/A:1005948930316.

16. S'tambuk-Giljanovic N., "Water quality evaluation by index in Dalmatia", Water Resources, 33 (16) (1999) 2440-3423.

17. Stigter T.Y., Ribeiro L., Carvalho Dill A. M. M., "Application of a groundwater quality index as an assessment and communication tool in agro-environmental policies-Two Portuguese case studies", Journal of Hydrology, 327 (2006) 578-591.

18. Saeedi M., Abessi O., Sharifi F., Meraji H., "Development of groundwater quality index", Environ Monit Assess, 163 (2010) 327-335, DOI 10.1007/s10661-009-0837-5.

19. Haris H. Khan, Arina Khan, Shakeel Ahmed, "Jerome Perrin GIS-based impact assessment of land-use changes on groundwater quality: study from a rapidly urbanizing region of South India", Environmental Earth Sciences, Volume 63(6) (2011) 1289-1302.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]

20. Bonham-Carter GF., "Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS computer methods in the geosciences", vol. 13 Elsevier Science Ltd, Pergamon (1996) 1–50.

۲۱. پورمقدس حسین، *بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقهٔ لنجانات اصفهان*، مجلهٔ دانشکدهٔ بهداشت و انستیتو تحقیقات بهداشتی(۱۳۸۱)۴۰-۳۳.

۲۲. میران‌زاده م.، مامون پوشان ع.، *شیمی آب‌های زیرزمینی و سطحی منطقه لنجانات در استان اصفهان*، مجلهٔ آب و فاضلاب، شمارهٔ ٤٤ (۱۳۸۱) ۳۷-۲٤.

۲۳. حاجی‌مرادی ا.، گندمکار ا.، *بررسی وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی دشت لنجانات اصفهان*، چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست (۱۳۸۹).

۲٤. کی‌همایون ز.، ناصری ح.، نخعی م.، *متغیرهای کنترل کننده انتقال نیترات در آبخوان لنجانات*، سی‌امین گردهمایی علوم زمین، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۰).

25. ITC-ILWIS, "Ilwis 3.0 academic user's guide", International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), The Netherlands, (2001) 428-456.

26. Moran P. A. P., "Notes on Continuous Stochastic Phenomena", Biometrika, 37 (1) (1950) 17-23, doi:10.2307/2332142.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.4.2]