مجله علمی پژوهش‌های کاربردی در علوم زمین (سال چهارم)
شماره ۱۳ / پاییز ۱۳۹۸ / ص ۲۳-۱۴

تلفیق داده‌های ژئوالکتریکی، دورسنجی و هیدروژئوشیمیایی برای بررسی نفوذ آب‌شور به آبخوان‌ها (مطالعه موردی)

میثم داودآبادی فراهانی

نویسنده مسئول
میثم داودآبادی فراهانی

چکیده

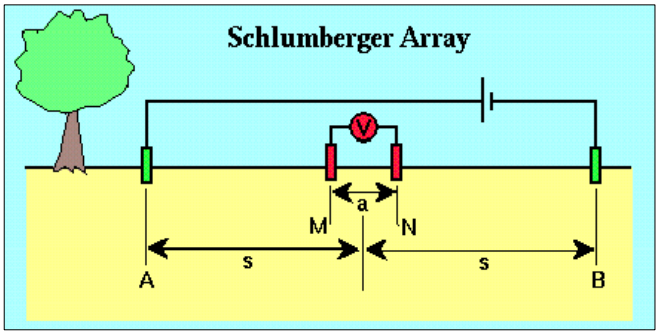
برداشت بی رویه از آب‌های زیرزمینی آب خوان‌های ساحلی باعث افت سطح آب، کاهش آب‌دهی منابع و پیش روی آب شور به داخل آب خوان‌ها می‌شود که این امر باعث شوری آب‌ها و آلودگی چاه‌های بهره‌برداری نزدیک به نوار ساحلی می‌گردد. در این پژوهش، نفوذ آب‌شور به آبخوان ارومیه با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی، ژئوالکتریک و دورسنجی مورد بررسی قرارگرفت. بنابراین ۱۶ سونداژ در نزدیک‌ترین فاصله از چاه‌های پمپاژ موجود در منطقه برداشت شد. با استفاده از شاخص کمکی SI و سایر شاخص‌های روشنایی، پوشش گیاهی و شاخص‌های توپوگرافی شیب، جهت شیب و شاخص خیسی(WI) می‌توان EC و به طبع آن مقاومت‌ویژه را پیش‌بینی کرد.

کلمات کلیدی: شوری- ژئوالکتریک – دورسنجی- **EC - SI**.

مقدمه

سواحل از مناطقی هستند که درصد قابل توجهی از جمعیت جهان را در خود جای داده‌اند. رشد جهانی جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی سبب افزایش در میزان تقاضا و بالتبع آن، برداشت آب بیشتر از آبخوان‌های ساحلی گردیده است. برداشت بی رویه از آب‌های زیرزمینی آب خوان‌های ساحلی باعث افت سطح آب، کاهش آب‌دهی منابع و پیش روی آب شور به داخل آب خوان‌ها می‌شود که این امر باعث شوری آب‌ها و آلودگی چاه‌های بهره‌برداری نزدیک به نوار ساحلی می‌گردد. نفوذ آب شور به سفره‌های ساحلی یک فرآیند هیدرودینامیکی پیچیده‌ای است که در اثر حرکت آب شور و آب زیرزمینی که دارای و یژگی‌ها و چگالی متفاوتی هستند، صورت می‌گیرد. موقعیت و میزان اختلاط به عوامل مختلفی بستگی داشته که از آن جمله می‌توان به نسبت چگالی آب شور به آب زیرزمینی، تغییر رژیم جریان آب زیرزمینی، میزان تخلیه از آب زیرزمینی و میزان پراکندگی طولی و عرضی اشاره کرد[۱ و ۲]. عوامل زیادی در پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی تاثیر دارند که در این تحقیق برخی از این عوامل بررسی شده است.

آب شور با دارا بودن مقاومت الکتریکی بسیار پایین در زمره یکی از رساناهای قوی الکتریکی می‌باشد که به صورت طبیعی در سطح زمین یافت می‌شود. در مقابل، آب شیرین دارای مقاومت الکتریکی بالایی می‌باشد. بنابراین، تغییر از آب شیرین به آب شور را می‌توان به آسانی و با استفاده از روش‌های مبتنی بر مقاومت الکتریکی مورد ارزیابی قرار داد. در واقع، تفاوت آشکار بین مقاومت محیط متخلخل اشباع از آب شور یا شیرین موجب می‌شود که روش‌های الکتریکی به عنوان انتخابی مناسب در بررسی مرز شوری مد نظر قرار گیرد[۳]. این روش‌ها شامل؛ روش سونداژ مقاومت الکتریکی جریان مستقیم[۱] [۴ و ۵]، روش مقاومت عبوری جریان مستقیم[۲] [۶ و ۷] و اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی[۸ و ۹] می‌باشد. سونداژهای الکتریکی قائم[۳](VES) با آرایه اشلامبرگر[۴] یکی از مناسب‌ترین روش‌های مطالعه نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی و شناسایی خصوصیات هیدرولوژیکی آن می‌باشد. در متد مقاومت ویژه؛ با آرایه اشلامبگر جریان الکتریکی معمولا از دو الکترود به زمین تزریق شده و توسط دو الکترود دیگر اختلاف پتانسیل اندازه گیری می گردد (شکل ۱) و سپس با توجه به رابطه ۱ می توان مقاومت ویژه ظاهری را به دست آورد.



شکل ۱- آرایش اشلامبرگر

$$\rho = \frac{\Delta v}{I} \times k \qquad (۱)$$

که در این رابطه ρ مقاومت ویژه ظاهری، k فاکتور هندسی، Δv اختلاف پتانسیل و I شدت جریان می باشد.

با استفاده از این آرایه می توان از نسبت اختلاف پتانسیل و شدت جریان اندازه گیری شده در سطح، کمیتی به نام مقاومت ویژه ظاهری را به دست آورد. از آنجا که با افزایش فاصله AB؛ جریان به عمق های بیشتری نفوذ می کند، مقاومت ویژه ظاهری نیز تغییر خواهد کرد. روند این تغییر بستگی به ویژگی های الکتریکی لایه های زیر زمینی دارد، از تحلیل مقاومت ویژه ظاهری برای عمق نفوذ های مختلف می توان به لایه بندی زیرزمینی و بی هنجاری های موجود در آنجا پی برد و مقاومت ویژه لایه های مختلف را به دست آورد.

در این بررسی از داده‌هایVES که در یک مرحله و تقریباً همزمان با افزایش برداشت آب زیرزمینی از آبخوان در تابستان ۹۳ طی طرح تحقیقاتی سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی کشور جمع آوری شده، استفاده گردید. توسعه کشاورزی و برخی ساخت و سازها

[1]Direct current resistivity soundings(DC)
[2]Direct current resistivity traversing
[3]Vertical electrical sounding
[4]Schlumberger configuration

در محدود مطالعاتی مانع از برداشت برخی نقاط VES در مناطق پیش‌بینی شده است و به این ترتیب نقاط سونداژ برداشت شده دقیقاً بر چاه‌های نمونه‌برداری آب‌زیرزمینی منطبق نشده است. در هر صورت ۱۶ سونداژ در نزدیک‌ترین فاصله از چاه‌های پمپاژ موجود در منطقه برداشت شده است(جدول ۱). پردازش و تفسیر داده‌های مقاومت ظاهری(ρ_a) در بسته نرم‌افزاری IPI2WIN انجام شده است.

در این محدوده، پیوستگی ساختارها و تشکیلات رسوبی و سنگی آبخوان از مناطق ساحلی به سمت مناطق داخلی به درستی مشخص نمی‌باشد. واحدهای زیرسطحی رسوبی و سنگی به‌ویژه در مناطق ساحلی آبخوان ارومیه با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از سازندهای زمین‌شناسی، مطالعات پیشین و بازدیدهای صحرایی مورد ارزیابی قرار گرفت. بنابراین، تغییر مقاومت الکتریکی ثبت شده در این مناطق به واحدهای سنگی و رسوبی متنوع ارتباط داده شد(جدول ۲). توزیع مقاومت الکتریکی و متعاقب آن مواد زمین‌شناسی در این منطقه ساحلی می‌تواند در بررسی وضعیت نفوذ آب شور و پتانسیل رخداد آن سودمند باشد.

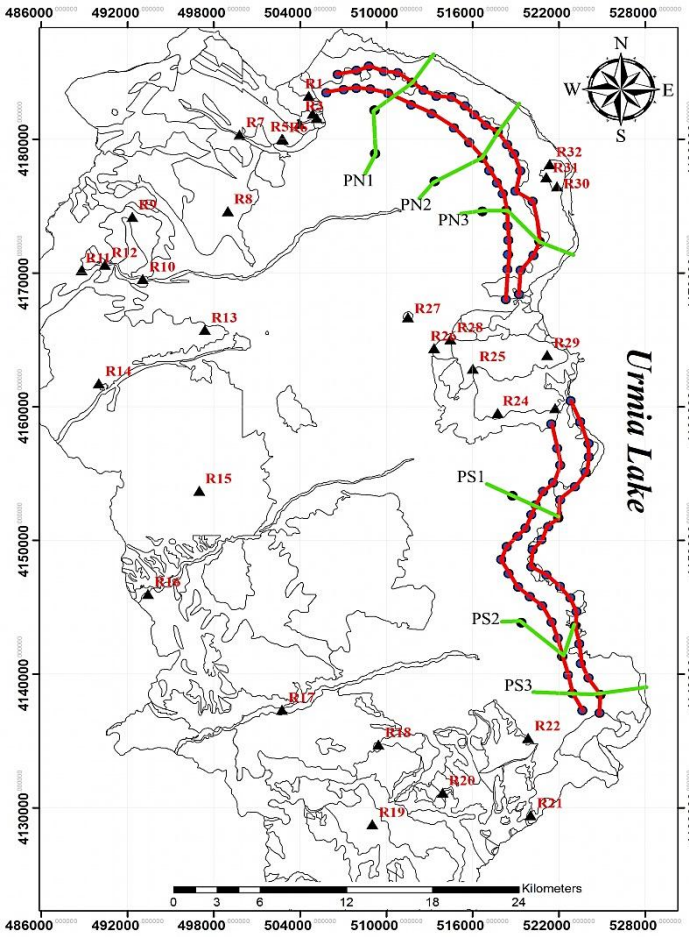
جدول ۱- نتایج به‌دست آمده از مطالعات ژئوالکتریکی در نزدیک‌ترین فاصله از نقاط نمونه‌برداری از منابع آب‌زیرزمینی در آبخوان ارومیه (فصل خشک۹۳)

Profile ID	Part	VES Point	Sampling Well	Well Depth(m)	cl(mg/l)	Salinity(‰)	EC(µS/cm)	PH	ρ(Ωm)
PN1	A	7N	N4	45	145	0.71	1430	7.08	0.36
	B	47N	N8	40	40	0.72	1444	7.43	0.68
	C	87N	N13	35	55	0.83	1670	7.01	0.38
PN2	A	14N	N17	17	750	2.8	5600	7.6	0.05
	B	34N	N20	12	55	0.84	1750	7.28	0.67
	C	68N	N25	60	31	0.4	810	7.52	0.24
PN3	A	20N	N34	50	385	1.16	2320	8.77	0.09
	B	38N	N33	16	33	0.34	750	7.5	0.39
	C	55N	N32	18	20	0.41	818	7.33	0.315
PS1	A	8S	S14	68	33.5	0.25	503	7.85	0.19
	B	50S	S13	50	14	0.38	765	7.33	0.5
PS2	A	17S	S30	10	2061.4	3.6	7180	7.21	0.34
	B	40S	S29	30	45	0.65	1305	7.35	0.18
	C	58S	S28	120	11	0.25	510	7.72	0.15
PS3	A	21S	S39	86	170	0.68	1370	7.87	0.01
	B	62S	S38	100	30	0.52	1045	7.48	0.11

مطابق جدول۱، از اطلاعات ۶ پروفیل مقاومت الکتریکی برای این مطالعه استفاده شده است. هر پروفیل شامل ۲ تا ۳ سونداژ به ترتیب A، B و C است که به ترتیب A در نزدیک‌ترین فاصله از دریاچه و C در دورترین فاصله از دریاچه واقع شده است. همچنین در جدول۱، برخی از ویژگی‌های چاه‌های پمپاژ مانند؛ عمق، غلظت کلراید، شوری، EC و PH متناظر با این سوندژها آورده شده است.

شکل **۲**، موقعیت پروفیل‌ها را در منطقه مورد مطالعاتی نشان می‌دهد.

مکانیسم‌های کنترل کننده توسعه محیط‌های شور پیچیده بوده و به میزان زیادی مرتبط با انتقال مواد در سیستم‌های آب زیرزمینی می‌باشد[۱۰]. بنابراین، فرایندهای زمین‌شناسی طبیعی نیز می‌تواند در شور شدن برخی محدوده‌های داخل آبخوان موثر باشند[۱].



شکل ۲ موقعیت پروفیل‌های برداشت مقاومت‌ویژه را در بخش شمالی و جنوبی حوضه غرب دریاچه ارومیه

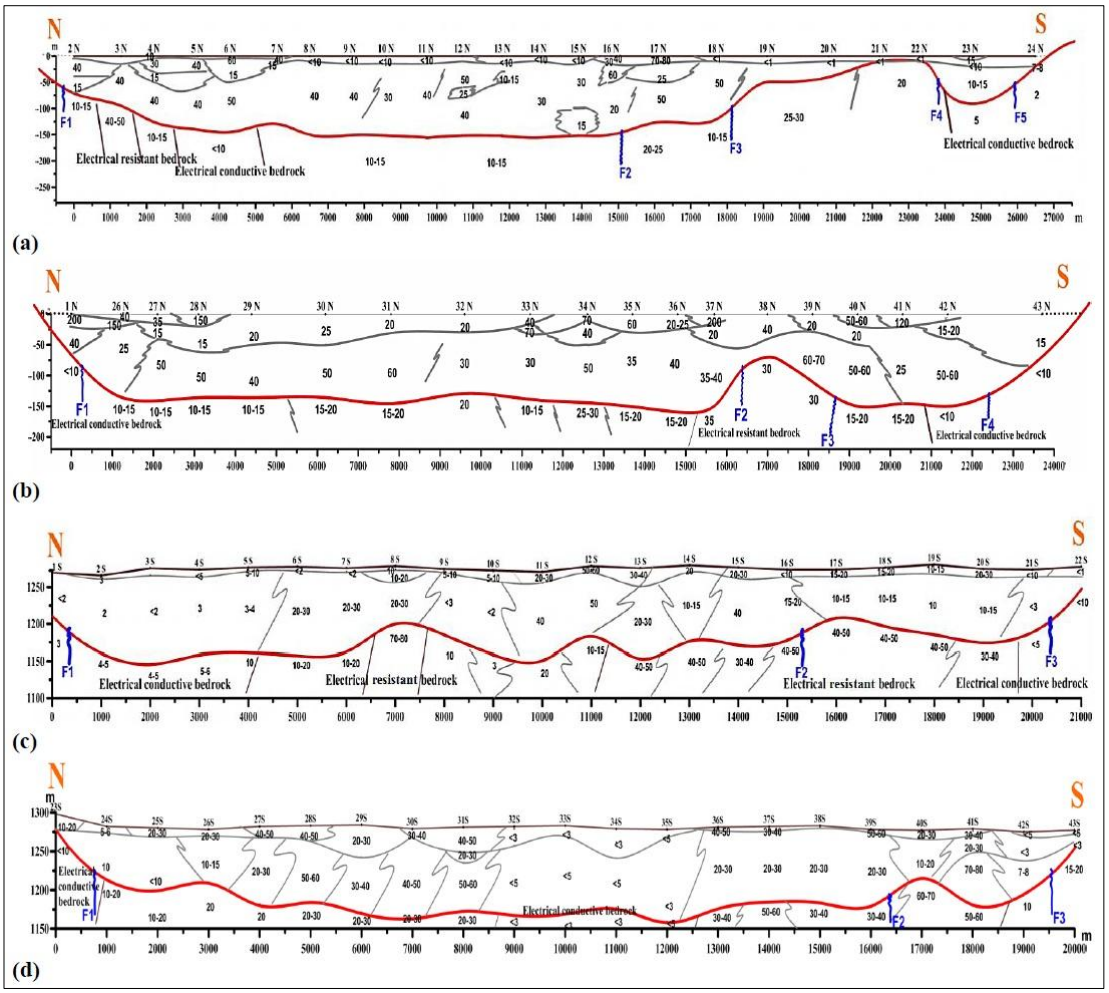
جدول ۲ تغییرات مقدار مقاومت‌ویژه الکتریکی برمبنای واحدهای لیتولوژی موجود در منطقه مورد مطالعه

Lithology		Bulk electrical resistivity, ρ (Ω m) (for sounding points)	Electrical resistivity, ρ (Ω m) (for cross sections)
Clay with salt sediment/water content		<5	<5-10
Clay with some sand		5-20	10-20
Medium sand		20-30	20-30
Coarse sand		30-60	30-100
Coarse sand with gravel		>60	>100
Bedrock	Electrical conductive	<5	<10
	Marl, sandstone, etc.	10-20	10-30
	Electrical resistant (e.g., volcanic rocks)	>30	>30

در این پژوهش، چهار مقطع ژئوالکتریکی با راستای شمالی- جنوبی در غرب آبخوان ارومیه (نزدیکترین فاصله از سواحل دریاچه ارومیه) جهت ارزیابی تأثیرات احتمالی آب شور دریاچه ارومیه بر منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. در برخی مناطق، کاهش چشم‌گیر مقاومت الکتریکی در برخی قسمت‌های سنگ بستر نیمه‌های شمالی و جنوبی آبخوان مشاهده می‌شود. در این موارد، نشت از لایه‌های نیمه تراوا از طریق سیستم‌های گسلی و جریانات عمیقی که از طریق سنگ بستر صورت می‌گیرد، می‌تواند یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش مقاومت در این سازندهای زمین‌شناسی(سنگ بستر) باشد. یک زون گسلی اغلب با کاهش خطی مقاومت الکتریکی در لایه‌های زیرین مشخص می‌شود[۱۱].

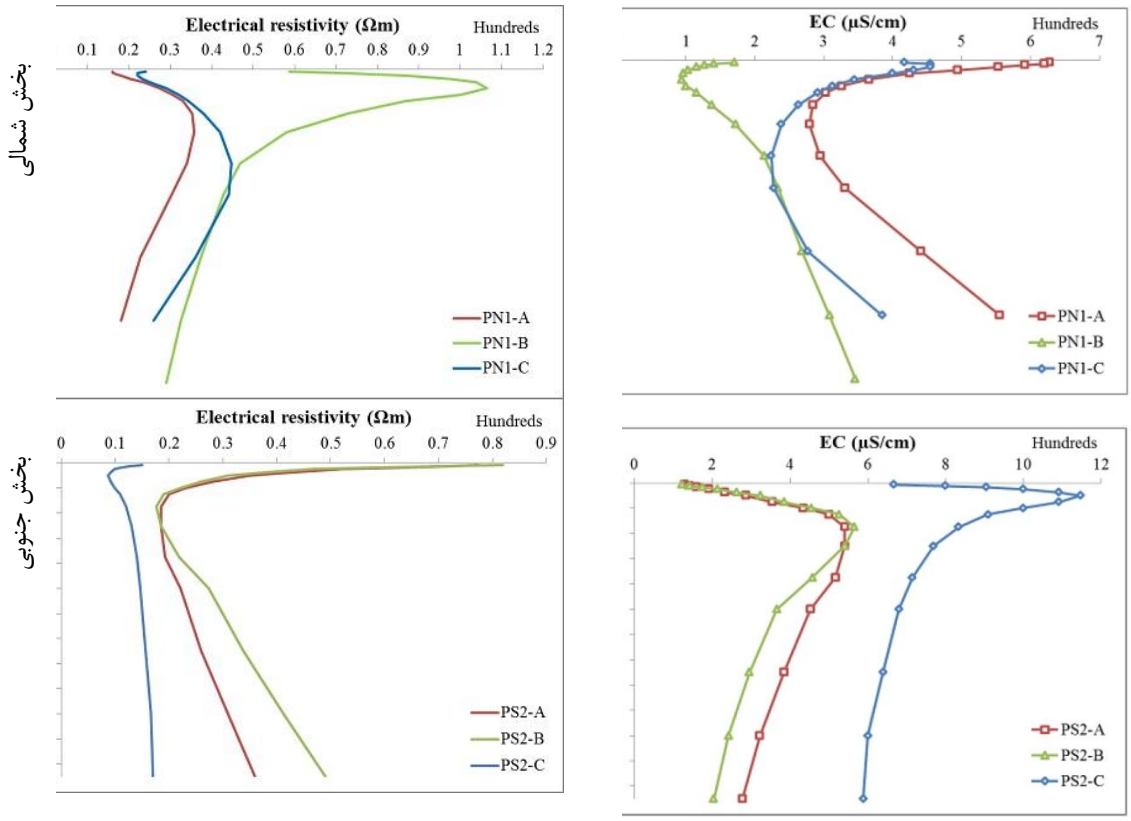
داده‌های مقاومت سنجی و مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که می‌توان برخی گسل‌های احتمالی را در بخش‌های شمالی و جنوبی شناسایی کرد(شکل۳). این سیستم‌های گسلی می‌تواند همراه با تراوش آب زیرزمینی یا نفوذ آب شور نشأت گرفته از دریاچه ارومیه یا آب‌های

لاگونی قدیمی عمیق باشد که موجب کاهش مقاومت الکتریکی در برخی نقاط می‌شود. در این چنین مواقعی، می‌توان از اصطلاح سنگ بستر هادی الکتریکی استفاده کرد. با توجه به زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، وجود برخی ساختارهای سنگی و رسوبی با مقاومت الکتریکی پایین مانند مارن و ماسه سنگ می‌تواند از جمله دیگر عوامل کاهش مقاومت در سنگ بستر باشد. مقادیر بالای مقاومت الکتریکی در برخی مناطق شمالی و جنوبی این محدوده مشاهده می‌شود(شکل ۳). مقاطع a و b به‌ترتیب NP1 و NP2 و مقاطع c و d به‌ترتیب SP1 و SP2 می‌باشد. متوسط فاصله مستقیم بین NP1 و NP2 برابر با ۱۷۰۰ متر و SP1 و SP2 برابر با ۲۰۰۰متر است. در این مقاطع؛ خط قرمز، مرز بین رسوبات و سنگ بستر، خط آبی؛ گسل احتمالی و خط خاکستری؛ مرز بین واحدهای لیتولوژی مختلف است.



شکل ۳- مقاطع ژئوالکتریک در راستای N-S برای (a,b) در قسمت های شمالی و (c,d) جنوبی برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی آبخوان ارومیه.

در شکل۲، تغییرات مقادیر مقاومت الکتریکی و الگوی EC در آبخوان آورده شده است. اکثر پروفیل‌ها در نیمه شمالی یک افزایش مقاومت در عمق‌های کم(خاک‌های غیر اشباع) و پس از آن کاهش تدریجی در عمق‌های بیشتر را نشان می‌دهند، در مقابل؛ پروفیل‌های نیمه جنوبی ابتدا کاهش مقدار مقاومت برای خاک‌های سطحی و پس از آن افزایش مقاومت الکتریکی در اعماق را نشان می‌دهند.



شکل ۴- تغییرات مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی و EC در قسمت‌های شمالی و جنوبی آبخوان

مقادیر مقاومت‌ویژه در PN1-A کمتر از سونداژهای درونی است، باتوجه به نمودار؛ افزایش آرام مقاومت‌ویژه می‌تواند ناشی از رسوبات سطحی غیراشباع باشد. مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده هدایت الکتریکی عصاره اشباع(EC) و دیگر پارامترهای هیدروشیمیایی برای سه چاه(N4، N8 و N13) واقع در نزدیکی این سه نقطه سونداژ ثبت شده است. با توجه به مقدار کلراید و EC در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، غلظت کلراید بیشتر از ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و EC بیشتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر را می‌توان به‌عنوان شواهدی از اختلاط آب شیرین با آب شیرین تا لب شور و لب شور تا شور در نظر گرفت.

در مناطق جنوبی، آب زیرزمینی کم عمق(عمق کمتر از ۴۰ متر) دارای مقدار EC بیشتری نسبت به آب‌های عمیق(عمق بیشتر از ۶۰ متر) می‌باشد. با افزایش عمق و عبور از میان لایه‌های رسی متراکم و مقطعی، آب زیرزمینی به سطح زمین راه پیدا می‌کند(سیستم آرتزین). بیشترین مقادیر EC و کلراید در قسمت جنوبی آبخوان ارومیه(EC برابر ۷۱۸۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و کلراید برابر ۲۰۶۱,۴ میل‌گرم بر لیتر) در چاه S30 متناظر با سونداژ 17S در پروفیل PS2-B می‌باشد.

پایش و مدیریت شوری یکی از مهم‌ترین مسائل کشاورزی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. به‌منظور دستیابی به این هدف بهره‌گیری از ابزار نوین مانند؛ سنجش از دور و GIS اجتناب ناپذیر است. بررسی روابط بین پارامترهای مختلف خاک با داده‌های ماهواره‌ای گامی مؤثر در پیش‌بینی هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک است. در این پژوهش با استفاده از شاخص شوری استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده لندست ۸، پیش‌بینی هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در دشت ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام پردازش‌های لازم بر روی تصاویر ماهواره‌ای، با تعیین نقاط زمینی بر روی تصاویر، ارزش پیکسل‌های نظیر نقاط زمینی در باندهای مختلف استخراج گردید.

یکی دیگر از روش‌های نوین برای مطالعه نفوذ شورابه‌ها استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های کمکی استخراج شده از این تصاویر با استفاده از ترکیب باندی در نرم‌افزار ArcGis است. یکی از این شاخص‌ها، شاخص شوری(SI) است که براساس پژوهش زارکوتژادا و همکاران(۲۰۰۵) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد[۱۲].

$$SI = \sqrt{B_2^2 + B_3^2} \qquad (۲)$$

B_2, B_3: مقادیر عددی اطلاعات رقومی باندهای ۲ و ۳

ابتدا تصویر ماهواره لندست ۸ با استفاده از رابط EarthExplorer از آرشیو سایت USGS دانلود و از نظر خطای تصویر مورد بررسی قرار گرفت و به‌وسیله تصحیحات هندسی، رادیومتریک و تکنیک بارزسازی تصاویر در نرم‌افزار ENVI ، پیش‌پردازش‌های لازم انجام و در نهایت تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقاط کنترل زمینی، زمین مرجع[5] گردید(شکل ۵).

با استفاده از رابطه (۱) و قابلیت ترکیب باندی در محیط ArcGIS، شاخص شوری محاسبه و نقشه شوری برای منطقه مورد مطالعه رسم گردید(). ماتریس همبستگی میان هدایت الکتریکی سطحی نمونه‌های خاک و شوری در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ - آماره t و همبستگی بین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و شاخص شوری

پارامترها	SI
EC	-0.59
t	-2.768

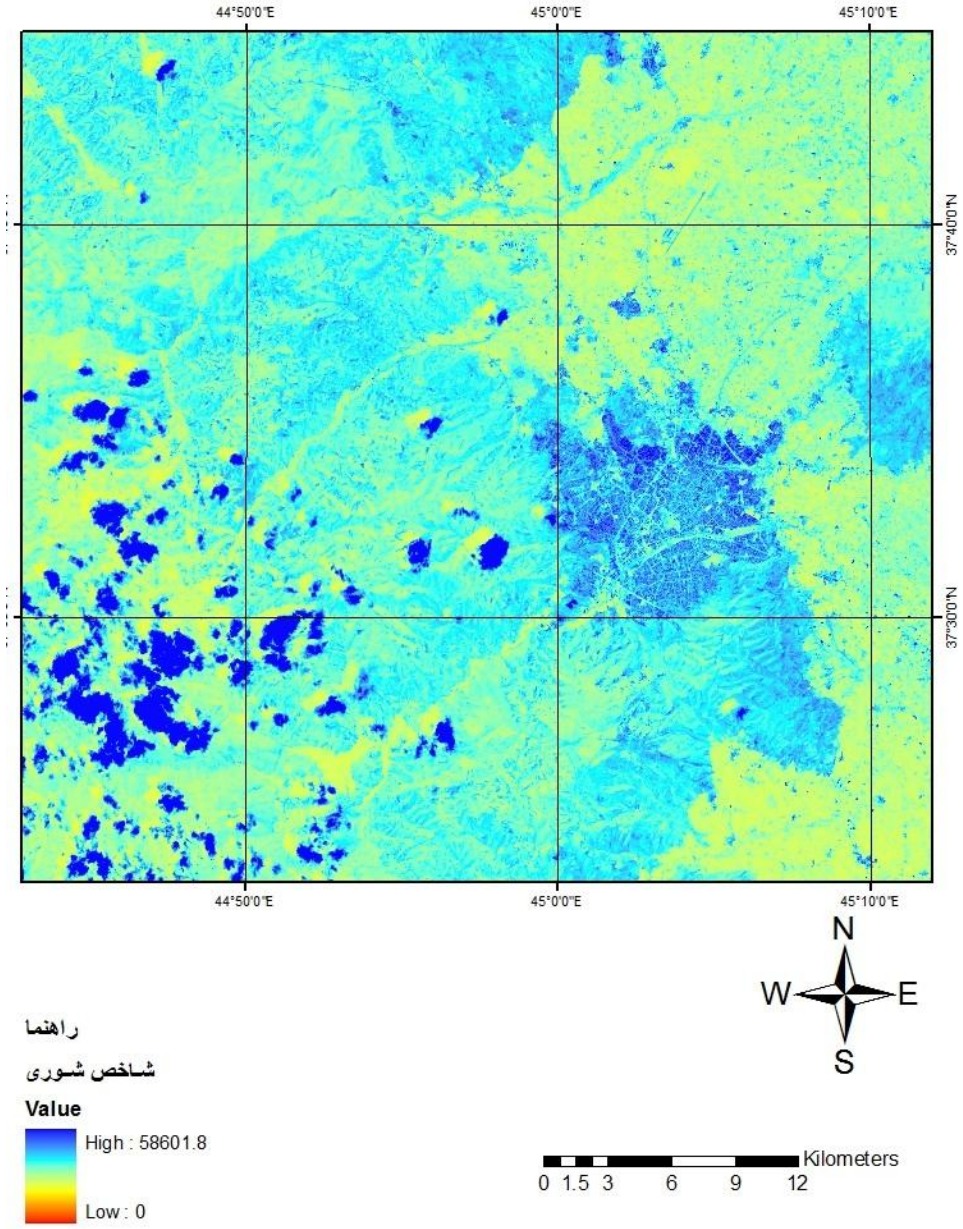
هدایت الکتریکی خاک با شاخص شوری همبستگی منفی معنی‌داری دارد، که ناشی از شرایط جوی و شوری خاک در منطقه می‌باشد. در فصل بهار و زمستان، بارش باعث شسته شدن املاح و نمک‌ها از سطح خاک به عمق و افزایش رشد پوشش گیاهی در سطح خاک می‌گردد که این امر موجب کاهش انعکاس طیفی خاک و تیره‌تر شدن تصویر می‌شود و برعکس هرچه خاک خشک‌تر باشد(فصل تابستان)، تبلور نمک‌ها و رسوب آن‌ها در سطح خاک بیشتر و انعکاس سطحی هم افزایش می‌یابد که منطبق با نتایج مختاری و همکاران (۲۰۱۲) می باشد[۱۳].

[5] Georeferenc

شکل ۵- تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

نتیجه گیری

باتوجه به نمودار تغییرات مقادیر مقاومت الکتریکی و EC، با همدیگر همبستگی منفی دارند و با افزایش EC، مقاومت‌ویژه در منطقه کاهش می‌یابد. باتوجه به اینکه سوندژئزنی در فصل خشک انجام شده ولی شاخص شوری براساس تصویر ماهواره‌ای فصل تر محاسبه گردیده، این دو پارامتر(SI و مقاومت‌ویژه) با همدیگر همبستگی مثبتی نشان می‌دهند. بنابراین با استفاده از شاخص کمکی SI و سایر شاخص‌های BI(شاخص روشنایی)، NDVI(شاخص پوشش گیاهی) و شاخص‌های توپوگرافی شیب، جهت شیب و شاخص خیسی(WI) می‌توان EC و به طبع آن مقاومت‌ویژه را پیش‌بینی کرد.



شکل ۶- نقشه شاخص شوری

بنابراین شوری در آب‌های زیرزمینی کم عمق و عمیق نمی‌تواند ناشی از نفوذ مستقیم شورابه دریاچه(که می‌تواند شوری آب زیرزمینی را به میزان بسیار زیادی افزایش دهد) باشد و رقیق‌شدگی بسیار زیاد شورابه دریاچه، نفوذ آب از رسوبات نمکی غیر اشباع و انحلال نمک موجود در آن‌ها، شستشوی گرد و غبار نمکی رسوب کرده بر روی خاک‌های مناطق ساحلی توسط بارندگی و شرایط جوی باشد.

منابع و مراجع

[1] Jones BF, Vengosh A, Rosenthal A, Yechieli Y "*Geochemical investigations. In: Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, H. (Eds.), Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-concepts, Methods, and Practices*". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 51-69, 1999.

[2] Kloppmann W, Vengosh A, Guerrot C, Millot R, Pankratov I, "*Isotope and ion selectivity in reverse osmosis desalination: Geochemical tracers for man-made freshwater*". Environ Sci Technol 42:4723-4731, 2008.

[3] Acworth RI, Dasey GR, "*Mapping of the hyporheic zone around a tidal creek using a combination of borehole logging, borehole electrical tomography and cross-creek electrical imaging*", New South Wales, Australia. Hydrogeology Journal 11:368-377, 2003.

[4] Ebraheem AAM, Senosy MM, Dahab KA, "*Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating ground-water contamination due to salt-water intrusion in the northern part of the Nile delta*", Egypt. Ground Water 35:216-222, 1997.

[5] Choudhury K, Saha DK, Chakraborty P, "*Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain*". Journal of Applied Geophysics 46:189-200, 2001.

[6] Koukadaki MA, Karatzas GP, Papadopoulou MP, Vafidis A, "*Identification of the saline zone in a coastal aquifer using electrical tomography data and simulation*". Water Resour Manag 21:1881-1898, 2007.

[7] Vinson DS, "*Radium Isotope Geochemistry in Groundwater Systems: The Role of Environmental Factors. PhD Thesis*", Duke University, 2011.

[8] Duque C, Calvache ML, Pedrera A, Martin-Rosales W, Lopez-Chicano M, "*Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (Southern Spain)*". Journal of Hydrology 349:536-547, 2008.

[9] Albouy Y, Andrieux P, Rakotondrasoa G, Ritz M, Descloitres M, Join JL, Rasolomanana E, "*Mapping coastal aquifers by joint inversion of DC and TEM soundings-three case histories*". Ground Water 39:87-97, 2001.

[10] Schwartz FW, Crowe AS, Hendry MJ, Chorley DW, "*A case study to assess the potential for saline soil. Development due to irrigation*". J Hydrol 91:1-27, 1987.

[11] Zhu T, Feng R, Jinqi H, Jianguo Z, Wang H, Shuoqin W, "*The application of electrical resistivity tomography to detecting a buried fault; a case study*". J Environ Eng Geophys 143:145-151, 2009.

[12] Zarco-Tejada, P.J., Ustin, S.L., and Whiting, M.L.,"*Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. Agron"*. J. 97: 641-653, 2005.

[13] Mokhtari D.E., Douaoui A., Yahiaoui I., "*Geomatics use in the evaluation of surface qualities degradation in saline area (The case of the lower Cheliff plain)*". Energy Procedia, Vol.18: 1557–1572, 2012.