عوامل مؤثر بر تغییرات شوری در بخشی از اراضی دشت میان رودان، جنوب شرق اهواز

سیروس جعفری*، حسین حمیدی و عباس عبدشاهی

گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، اهواز، ایران

*مسئول مکاتبه، رایانامه: siroosjafari@asnrukh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱٤۰۵/۰۵/۰٦ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۵/۰٦/۲۵

DOI: 10.30470/jsp.2026.2095911.1039

چکیده

شناسایی عوامل مؤثر بر روند تغییرات شوری در اراضی زراعی برای اعمال شیوه‌های مدیریتی مناسب از اولویت‌های مهم کشاورزی است. این پژوهش به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر شور شدن قسمتی از اراضی جنوب شرق اهواز انجام شد. پنج مسیر در امتداد شرقی_غربی و شمالی_جنوبی انتخاب و شوری خاک و ویژگی‌هایی از قبیل بافت خاک، شوری و عمق آب زیرزمینی در آن ها بررسی شد. نتایج نشان داد که میانگین شوری در پنج مسیر، ۵۱/۲ دسی زیمنس بر متر است که بیانگر وجود اراضی شدیداً شور در منطقه است. شوری خاک در منطقه به‌شدت تابع سطح آب زیرزمینی و سطح آب نیز تأثیر از اثرات طبیعی و انسانی بود. حداقل و حداکثر شوری مسیرها در دامنه ٤ تا ۱۵۲ دسی زیمنس بر متر می‌باشد. بیشترین شوری در مسیر شمالی جنوبی F بود که به اثرات زهکش بزرگ نیشکر در ممانعت از تخلیه زه‌آب‌های اراضی مذکور مربوط است. همچنین در امتداد مسیر شرقی_غربیC، به‌دلیل کشت مداوم، شوری خاک به حداقل رسیده است. این پژوهش نشان داد که اثرات دخالت انسان در شور شدن اراضی جنوبی دشت خوزستان به مراتب از عوامل طبیعی بیشتر است که منجر به حذف پوشش گیاهی، تشدید فرسایش بادی و رخداد گرد و غبار در منطقه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: آبشویی، زهکش، خاک، شوری، کانال

Factors affecting salinity variations in the Mesopotamia plain (southeast of Ahvaz)

S. Jafari*, H. Hamidi, A. Abdeshahi

Department of Soil Science and Engineering, Agriculture Sciences and Natural Resources University of Khouzestan, Mollasani, Khouzestan, Iran

*Corresponding Author, Email: siroosjafari@asnrukh.ac.ir

Received: August 2026 Accepted: Sepember 2026

DOI: 10.30470/jsp.2026.2095911.1039

Extended Abstract

Aim

Salinity accumulation in arid and semi-arid regions due to irrigation is a significant issue leading to depletion of food resources and environmental hazards like soil erosion and elevated air dust levels. Studying the key factors that influence the increase or decrease in soil salinity in these regions is a priority for agricultural advancement and risk mitigation. Salinity development can be categorized into natural processes and those expedited by human activities. Natural salinity arises from phenomena such as weathering, saltwater springs, and salt domes (Darvishzadeh, 2003). Human activities such as irrigation, mining, land drainage, runoff into water streams, fertilizer use, road salt application, and oil extraction contribute to increased salinity. This research aims to analyze how natural and human factors impact salinity development in a section of the southern Khuzestan plain.

Materials and methods

This study started in March 2017 in a southeastern region of Khuzestan. The research area covers a portion of the southeast of Ahvaz, situated in Khuzestan province, spanning approximately 20000 hectares and located 40 km from the Ahvaz-Abadan road. Sampling was conducted along 5 routes, with three running east-west (perpendicular to the Karun River) and two running north-south (parallel to the river). Sampling sites were 300 meters apart, and samples were collected from depths of 0-50, 50-100, 100-150, and 150-200 cm, totaling 600 soil samples from 150 points. The ECe and EC of groundwater were assessed using an EC meter, followed by determining the correlation between ECe and ground water EC.

Results

From the west, represented by the Karun River, to the east, characterized by the Shadgan marshland, there was a noticeable decrease in soil salinity (Figure 2). Additionally, the groundwater levels in the areas increased as they neared the marshland. This outcome can be attributed to the impact of the wetland as well as the influence of the river in draining the bordering lands. In 2002, a substantial drain channel with a capacity of approximately 50 m^3/s was constructed to facilitate the drainage of water from the sugarcane-cultivated lands of the Salman Farsi and Daabl Khazai units. This drainage system has fed the water table of the adjacent lands and led to surface salinity due to evaporation. A strong relationship was observed between surface-layer soil salinity and groundwater salinity across all transects ($R^2 = 0.83$), suggesting that groundwater contributes to surface soil salinization (Figure 3). While surface salinity variations in relation to groundwater salinity did not show a clear pattern from north to south, groundwater salinity changes followed a similar trend to soil salinity along the three east-west routes. In contrast to the prior east-west routes, significant fluctuations in salinity were noted along this specific route. The average salinity across five routes was 51.2 dS/m (classified as C4). Salinity ranged from 4 to 152 dS/m, with the highest salinity observed in the E route, running north-south. Various factors such as drainage conditions, soil texture, and human activities like altering drainage pathways or constructing new

channels play a significant role. Jafari (2018) linked a considerable rise in soil salinity in some lands near this area to human interventions like dam construction and diverting river water away from the plain. An additional contributing factor to the elevated salinity along this transect is its location east of the region, parallel to the drainage water conveyance canal of the sugarcane agro-industrial complexes. This configuration has led to a rise in the water table, thereby exacerbating soil salinization. In contrast, transect C (east–west direction) exhibited the lowest salinity among all transects, attributable to continuous cultivation and leaching practices. A highly significant positive correlation was observed among soil salinity measurements across all four investigated soil depths. However, the correlation coefficient between groundwater salinity and soil salinity at these depths was consistently low and statistically non-significant. These findings contrast with the depth-specific salinity relationships when analyzed per transect individually. In general, soil salinity is influenced by groundwater salinity and water table depth, but this relationship is modulated by various factors including soil texture, vegetation cover, and drainage discharge conditions. Salinity levels in the study area are strongly governed by drainage conditions. The obstruction of traditional agricultural drain outfalls to Shadegan marshland caused by the construction of large-scale drainage systems for sugarcane plantations represents the most significant anthropogenic factor driving increased soil salinity in the eastern part of the region. Substantial spatial heterogeneity in groundwater and soil salinity is evident from east to west and from north to south. Key determinants include land drainage status, soil textural properties, and human-induced modifications such as altered water flow paths and the installation of various drainage networks. The Karun River serves as the primary natural agent improving drainage in these lands, effectively lowering the water table and thereby reducing groundwater and soil salinity in the western sector. Ghobadian (15) reported that, 50 years ago, the water table along the Ahvaz–Mahshahr corridor (present-day Persian Gulf Highway), from Ahvaz to the northern margin of Shadegan marshland, was substantially higher than at the time of the present study. Based on Ghobadian (1970), the average water table depth during 1968–1969 was less than 1 m, whereas in the current study it exceeded 1 m. Over this five-decade interval, the water table has declined by an average of 60 cm, accompanied by an increase in groundwater salinity. Soil salinization both results from and contributes to the reduction in vegetation cover. As salinity surpasses the tolerance thresholds of even salt-resistant species, the exposed surface soil becomes bare, leading to increased surface heating and elevated evaporative demand. This, in turn, promotes capillary rise, perpetuating a vertical salinity gradient from depth to surface.

Conclusion

The highest salinity levels were observed in the eastern sector, as well as in parts of the northern and southern portions of the study area. This spatial pattern underscores the significant role of drainage in mitigating soil salinization. Drainage and consequently salt export was either enhanced or restricted by both natural and anthropogenic factors. A strong relationship was observed between soil salinity and water table depth, although this relationship varied across different transects. The primary drivers of increased salinity is anthropogenic activity, particularly the construction of large-scale drainage systems associated with sugarcane cultivation units. In contrast, the Karun River exerts a counteracting influence by improving local drainage flow, thereby reducing salinity in adjacent lands. The results indicate that land salinization in the region has been intensified by human interventions. The construction of embankments along the Karun River has prevented floodwaters from inundating adjacent agricultural lands; on the other hand, lateral seepage from drainage canals into surrounding areas has raised the water table. This vegetation loss has, in turn, intensified wind erosion and contributed to the occurrence of dust storms, particularly over the last two decades. As a result, the study area located in the southeastern part of Ahvaz has become one of the active dust source regions in the country. It is recommended that land salinization be recognized as one of the most critical environmental hazards threatening the region. Continuous monitoring and systematic management efforts are urgently needed both to prevent further land degradation and to mitigate associated threats such as dust emission through targeted salinity reduction measures.

Keywords: Canal, Drain, Leaching, Salinity, Soil

مقدمه

شـور شـدن خـاک به‌عنوان یک تهدید جهانی یکی از جنبه‌های تخریب اراضی است که آبیاری غیر اصولی می‌تواند آن را تشدید کند (Qureshi et al., 2007). برخی از منابع، عامل مهم از بین رفتن تمدن بین‌النهرین را شوری ناشی از آبیاری بی‌رویه و عدم زهکشی اراضی عنوان نموده‌اند (Rangzan and Jafari, 2017). برخی از منابع نیز حذف آن را به خشکسالی‌های طولانی مدت نسبت داده‌اند. باوجوداین، شوری خاک فرآیندی است که در حال حاضر نه تنها منبع غذای بشر، بلکه سلامت بشر را نیز به‌دلیل حذف پوشش گیاهی و رخداد گرد و غبار مورد تهدید جدی قرار داده است (Jafari, 2018). حدود نیمی از اراضی زیرکشت آبی دنیا در معرض تهدید شوری و سدیم قرار دارند (Flagella et al., 2002). ایران پس از هند و پاکستان، با ٦/٨ میلیون هکتار اراضی شور، در معرض این تهدید جدی است (Rangzan and Jafari, 2017; Rhoades, 1996; Southwest Geological authority, 2018). شور شدن آب و خاک به‌دلیل دو عامل طبیعی و انسانی صورت می‌گیرد که مهم‌ترین عوامل طبیعی آن خشکسالی، سازندهای زمین‌شناسی و گنبدهای نمکی و عوامل انسانی آن به آبیاری بی‌رویه، استفاده از آب‌های شور، زهکشی نامناسب، سوء مدیریت و الگوی نامناسب کشت مربوط .می‌شود (Jafari, 2014; Jorenush and Sepaskhah, 2003). بخش زیادی از نمک‌های موجود در سطح زمین از گنبدهای نمکی حاصل شده است که در دوره پالئوزیک یا مزوزیک در زیر ضخامت زیادی از رسوبات مدفون شده‌اند، ولی به‌دلیل وزن کم نمک، به صورت قارچ از عمق به سطح آمده‌اند (Darvishzadeh, 2003). سری هرمز در ایران مهم‌ترین نمونه این سازند است (Darvishzadeh, 2003). در استان خوزستان، معروف‌ترین گنبد نمکی در حد فاصل کوه آسماری تا شهر لالی در بستر دریاچه سد گتوند رخنمون دارد. این سازند در سرشاخه‌های رودخانه کارون قرار دارد (Darvishzadeh, 2003). حل شدن املاح این سازند، منجر به شوری زیاد در اراضی اطراف و اراضی که با این آب آبیاری می‌شوند، می‌گردد (Rangzan and Jafari, 2017).

دشت خوزستان بخشی از دشت میان رودان است که در گذشته به‌طور پیوسته و گسترده از شرق خوزستان یعنی بهبهان و هندیجان تا کشور عراق، اردن و سوریه در اثر جریان های سیلاب رودخانه ای، آبیاری و همزمان به صورت سطحی آبشویی می‌شده است (Jafari, 2018; UNEP/UN, 2001). سیلاب‌های دائمی به‌ویژه در طول زمستان و بهار این دشت‌ها را آبیاری نموده و سبب رشد گیاهان مختلفی در منطقه شده است. این سیلاب‌ها سبب بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در این دشت‌ها شده و نیاز رطوبتی بخشی از درختان یا درختچه‌هایی چون گزشوره و غیره را تأمین می‌نموده‌اند (Ejrami et al., 2023; Flagella et al., 2002). رشد گیاهان و ایجاد پوشش سطحی، از یک سو مانع از برخورد مستقیم باد به سطح زمین می‌شود که مانع از ایجاد گرد و غبار می‌گردد. از سوی دیگر، در اثر گرمای زیاد سطح زمین و در نتیجه بالا آمدن نمک در اثر خیز مویینگی، سبب تشدید شوری شده است (Jorenush and Sepaskhah, 2003; Ejrami et al., 2023). در گذشته، نمک‌هایی که در طول فصول بهار، تابستان و اوایل پاییز در اثر خیز مویینگی در سطح خاک تجمع پیدا می‌نمودند با جریان‌های سیلابی سال بعد شسته شده و از منطقه خارج می‌شدند (Jafari, 2018) و به‌این ترتیب، مانع از تجمع املاح در سطح خاک می‌گردید. در سال‌های اخیر، در اثر سدسازی در بالادست رودخانه‌ها و تغییر رژیم هیدرولوژی رودخانه‌ها، دبی آب رودخانه‌ها به حدی کاهش یافته که سیلابی در بین‌النهرین رخ نمی‌دهد (Rangzan and Jafari, 2017). عامل مهم دیگر، خاکریزهایی است که در ساحل این روخانه‌ها به‌منظور کاهش اثرات سیل بر زندگی ساکنین احدث گردیده اما مانع از ورود سیل به این دشت‌ها شده است. در اثر این تغییرات هیدرولوژیکی و کاهش کیفیت آب رودخانه‌ها از

یک سو و نبود آبشویی سطحی و دخالت انسان و به‌ویژه آبیاری از سوی دیگر، شوری خاک تشدید شده است. آبیاری از دیگر فعالیت‌های بشر است که باعث افزایش املاح خاک می‌شود. تمام آب‌های مورد استفاده برای آبیاری دارای املاح بوده و در صورت نبود نیاز آبشویی مناسب، باعث شوری اراضی می‌شود (Ayers and Westcot, 1976). این فرآیند در اراضی جنوبی استان از شهر اهواز تا بخش‌های جنوبی با شدت بیشتری رخ داده است (Jafari, 2018). فرآیند شور و سدیمی شدن این اراضی نه تنها بر عدم استفاده از اراضی برای کشت و کار اثر گذاشته، بلکه تجمع زیاد شوری در خاک و نبود پوشش گیاهی، سبب رخداد فرسایش بادی شدید در این اراضی شده که اوج آن در سال ۱۳۹۵ بوده است (Southwest Geological authority, 2018).

هدف از این تحقیق، بررسی عوامل مؤثر بر شور شدن اراضی در بخش‌های جنوبی استان خوزستان بوده که بیشترین تهدید را طی سالیان اخیر از لحاظ فرسایش بادی تجربه نموده و منشأ ایجاد گرد و غبار زیادی نیز شده است و در مطالعات گذشته به آن پرداخته نشده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

این پژوهش از اسفندماه سال ۱۳۹۷ در بخشی از اراضی جنوب شرقی خوزستان آغاز شد. منطقه مورد مطالعه، قسمتی از اراضی جنوب شرق اهواز واقع در استان خوزستان به وسعت تقریبی ۲۰۰۰۰ هکتار و در ۴۰ کیلومتری جاده اهواز-آبادان است (شکل ۱). مطالعات اخیر نشان داده است که این منطقه متأثر از عوامل مختلف، بیشترین میزان شوری را طی سالیان اخیر تجربه کرده است (Jafari, 2014; Jafari, 2018). این منطقه از شمال به شرکت‌های نیشکر فارابی و سلمان فارسی، از شرق به تالاب شادگان، از غرب به رودخانه کارون و از جنوب به جاده دارخوین-شادگان محدود می‌شود (شکل ۱). در منطقه مورد مطالعه با توجه به آمار آب و هوایی دارخوین، میانگین درجه حرارت سالیانه هوا ۲۵/۵ درجه سلسیوس، میانگین بارندگی سالیانه ۱۹۷ و میزان تبخیر نیز ۳۶۰۰ میلی متر در سال است (Anonymous, 2023). منطقه دارای رژیم‌های رطوبتی یوستیک و رژیم حرارتی هایپرترمیک است. اراضی منطقه مورد مطالعه شامل واحد فیزیوگرافی دشت آبرفتی و سیلابی است. منطقه از رسوبات دانه ریز دوره کواترنر تشکیل شده است (٤) که ارتفاع آن از سطح دریا به ۲-۳ متر بالغ می‌گردد. تنوع گیاهی بومی منطقه شامل گرامینه‌ها، خارشتر، خارزرد، سالیکورنیا، سالسولا، گز و درمنه است. محصولات کشاورزی عمده منطقه نخل خرما، گندم، جو، برنج و صیفی جات بوده که عمدتاً در حاشیه رودخانه کارون کشت می‌شوند.

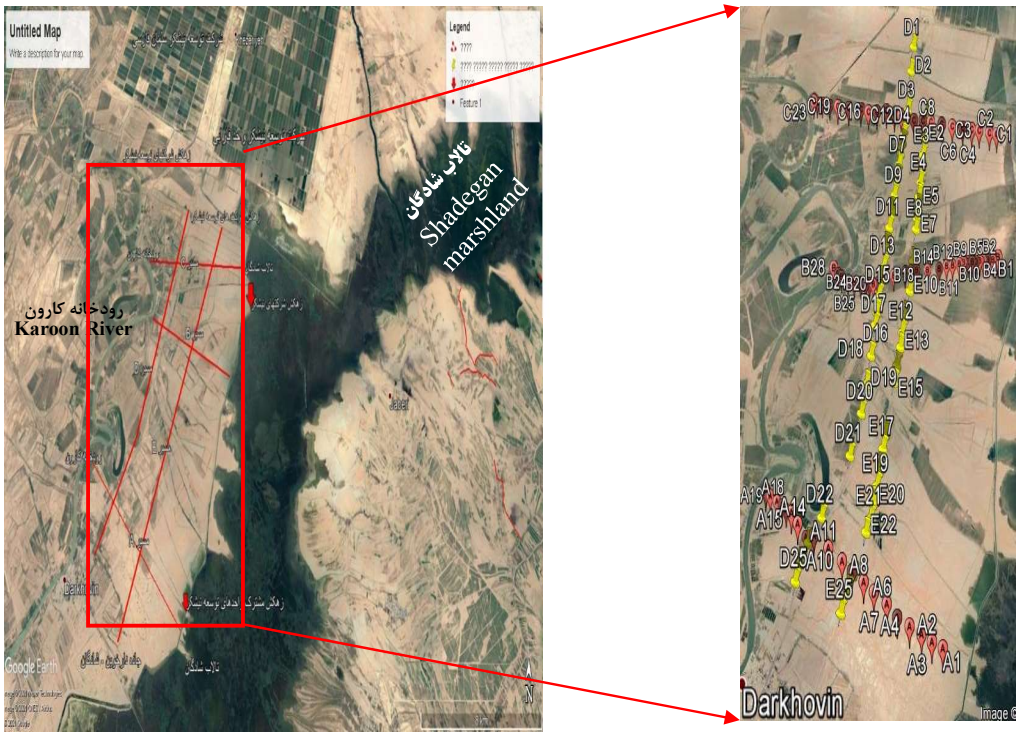
نقاط و نحوه نمونه‌برداری

در این تحقیق، از پنج مسیر که سه مسیر آن در امتداد شرقی-غربی (عمود بر رودخانه کارون) و دو مسیر شمالی-جنوبی (موازی با رودخانه کارون) بوده است، نمونه‌برداری شد (شکل ۱). این مقاطع طوری انتخاب شده است که همه شرایط از جمله تنوع بافت خاک، سطح آب زیرزمینی، پستی و بلندی، اثرات رودخانه، کشت و کار و آبیاری را در برداشته باشد. فواصل بین نقاط نمونه‌برداری تقریباً ۳۰۰ متر و عمق نمونه‌برداری نیز ۲ متر (از اعماق ۵۰-۰، ۱۰۰-۵۰ ، ۱۵۰-۱۰۰ و ۲۰۰ - ۱۵۰ سانتیمتر) است. در مجموع، از ۱۵۰ نقطه و کلاً ۶۰۰ نمونه خاک با مته دستی نمونه برداری شد (شکل ۱). در حین نمونه‌برداری، عمق و ضخامت لایه ماتل‌دار خاک، سطح آب زیرزمینی، شوری آب زیرزمینی، نوع و تراکم پوشش گیاهی و شرایط سطحی خاک ثبت و از آب زیرزمینی برای اندازه‌گیری شوری آن، نمونه‌برداری شد. نمونه برداری آب توسط بیلر و سطح آب زیرزمینی با استفاده از دستگاه عمق‌یاب آب اندازه گیری شد.

تجزیه‌های آزمایشگاهی و روش تحقیق

نمونه‌های خاک در آزمایشگاه هوا خشک و از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. قابلیت هدایت الکتریکی در

عصاره اشباع خاک به وسیله دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی انجام شد. همچنین هدایت الکتریکی نمونه‌های آب زیرزمینی توسط الکترود شیشه‌ای اندازه‌گیری (Rhoades, 1996) و بافت خاک به روش هیدرومتر انجام شد (Gee and Bauder, 1986). سپس رابطه بین میزان شوری لایه‌های مختلف خاک با شوری آب زیرزمینی تعیین و نتایج بر اساس اثر عوامل مختلف تحلیل شد. در نهایت، پس از اندازه‌گیری بافت به روش هیدرومتر در تمامی نمونه‌های خاک، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS صورت گرفت. به‌منظور مقایسه نمونه‌های مورد مطالعه، از برآورد رگرسیون و همبستگی استفاده شد.



شکل ۱- مسیرهای مختلف نمونه‌برداری بر نقشه گوگل ارث (۲۰۱۹)، شکل چپ موقعیت کلی مسیرهای نمونه برداری و شکل سمت راست، شماره نقاط در مسیرهای نمونه برداری.

نتایج و بحث

بافت خاک در منطقه مورد مطالعه در همه پنج مسیر مورد مطالعه بترتیب لوم رسی سیلتی، لوم رسی و رسی است. در برخی از مناطق لایه‌های ماسه بادی به صورت لنز ماسه‌ای بین لایه‌های آبرفتی رسوب نموده است.

تغییرات میزان شوری خاک

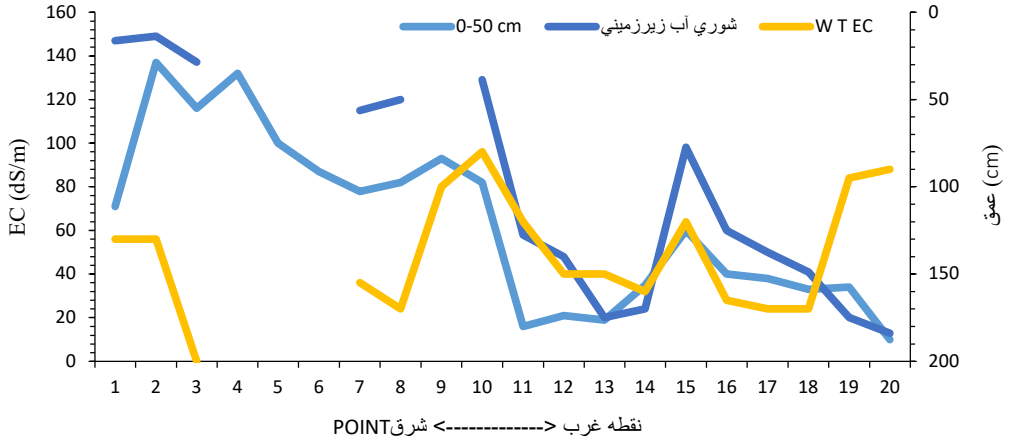
مسیر اول A

پوشش گیاهی در این مسیر شامل گز شوره، سالسولا، نی وحشی و درمنه به‌صورت پراکنده بود. سطح خاک نسبتاً مرطوب و تجمع نمک کم و بیش در آن دیده می‌شد. در اواسط و انتهای مسیر، به‌دلیل مجاورت با رودخانه، کم و بیش کشت و زرع گندم و جو صورت می‌گیرد. سطح آب زیرزمینی در عمق ۱۰۰ تا ۲۰۰، ماتل در اعماق ۵۰ تا ۱۰۰ و گلی در عمق ۱۲۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متری از سطح زمین قرار داشت.

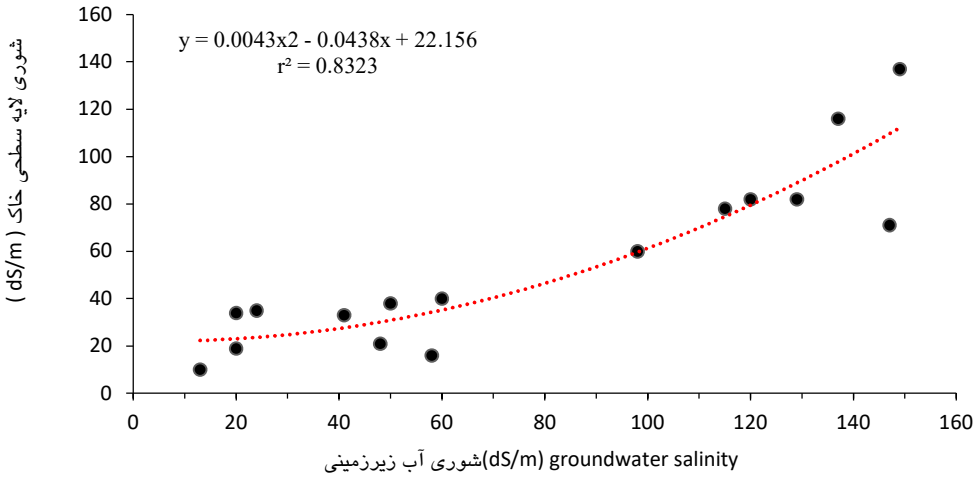
با حرکت از سمت غرب (رودخانه کارون) به سمت شرق (تالاب شادگان)، شوری خاک بیشتر شده است (شکل ۲). همچنین در این امتداد رودخانه به سمت تالاب، سطح آب زیرزمینی در اراضی بالا بود. این نتیجه از یک سو به اثرات تالاب و از سوی دیگر به اثرات رودخانه بر زهکشی اراضی حاشیه آن مربوط می‌شد. در شکل ۲ رابطه بین شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتر) و شوری و عمق آب زیرزمینی نشان داده شده است.

بر اساس شکل ۲، روند مشابهی در تغییرات شوری آب زیرزمینی و خاک لایه سطحی ملاحظه شد. شوری خاک و آب زیرزمینی از نقطه ۱ (شرق) تا نقطه ۲۰ (غرب) روند کاهشی دارد که می‌تواند به تخلیه زه آب‌ها به سمت غرب و عدم زهکشی اراضی در قسمت شرق منطقه مربوط باشد. در برخی نقاط مسیر A، نوساناتی در میزان شوری ایجاد شده است. مثلا در نقطه ۳ و ۷ به‌دلیل بافت شنی، خیز موئینگی کمتر و در نقاط ۱۱ تا ۱۳ به‌دلیل کشت و کار و آبیاری و همچنین احداث نهرها و زهکشی توسط زارعین، شوری کاهش یافته است. افزایش شوری در نقطه ۱۵، به آب‌ماندگی این بخش از اراضی در اثر خاک برداری مربوط است که باعث تجمع آب زیرزمینی در این قسمت شده و در نهایت با تبخیر از سطح، شوری را تشدید نموده است. از نقطه ۱٦ الی ۲۰ سیر کاهشی عمق آب زیرزمینی و در نتیجه شوری خاک، در اثر مجاورت با رودخانه کارون و بهبود شرایط زهکشی حاصل شده است. همچنین بر اساس این نمودار، هرچه عمق آب زیرزمینی به سطح خاک نزدیک تر شده است، شوری آب زیرزمینی و در نتیجه شوری خاک نیز افزایش یافته است. تبخیر سطح به‌دلیل دمای زیاد خاک، مهم‌ترین عامل در ایجاد شوری آب و خاک است.

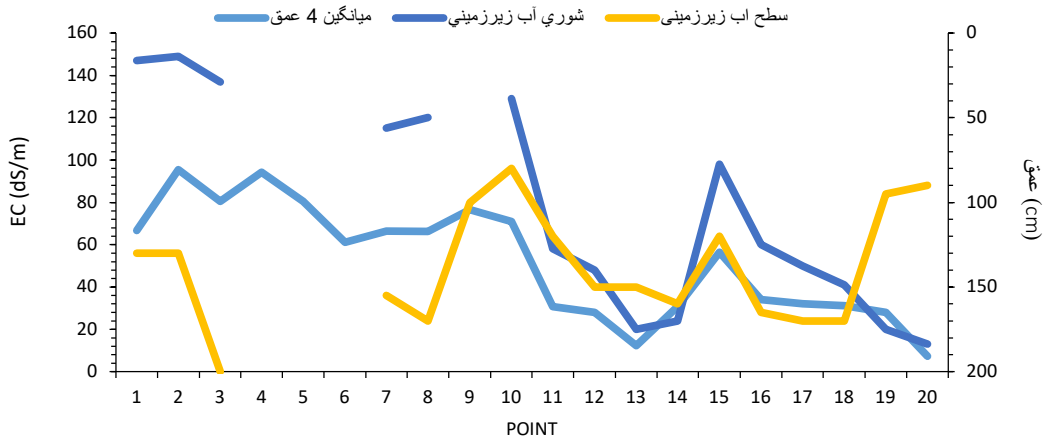
همبستگی بین شوری آب زیرزمینی و شوری لایه سطحی در مسیر A نشان داده شده است. همبستگی بالایی بین میزان شوری لایه سطحی و شوری آب زیرزمینی وجود دارد (r^2=۰/۸۳) و بیانگر آن است که منشأ شوری خاک سطحی از آب زیرزمینی است (شکل ۳). به عبارتی با افزایش شوری آب زیرزمینی، شوری خاک نیز افزایش یافته است. این رابطه نمایی است که می‌تواند به اثرات عوامل متعدد در تغییرات شوری خاک مربوط باشد که این اثرات شامل لایه‌های مطبق خاک، وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی، سله سطحی و غیره می‌باشد. مثلاً در نقطه ۱ با ماندابی شدن سطحی خاک، شوری آب زیرزمینی افزایش یافته است که با جریان انتشار نمک از سطح به عمق، شوری لایه سطحی کاهش یافته است. رابطه بین میانگین شوری در چهار لایه خاک و شوری و عمق آب زیرزمینی در شکل (٤) آمده است. ملاحظه می‌شود که شوری آب زیرزمینی با شوری میانگین چهار عمق خاک از نقاط شرقی (نقاط ۱ تا ۹) دارای اختلاف زیادی نسبت به روند آن در بخش غربی است (نقاط ۱۵ تا ۲۰) ولی در همه موارد، شوری آب زیرزمینی در چهار عمق از شوری خاک بیشتر است. بخشی از این نتیجه به زمان نمونه‌برداری مربوط می‌گردد. نمونه‌برداری در اسفند تا اواخر فروردین صورت گرفته که طی این دوره، در اثر بارندگی‌های زمستان گذشته، املاح سطحی به عمق خاک یا آب زیرزمینی منتقل شده و در نتیجه، لایه سطحی از شوری کمتری برخوردار است. در صورتی که اگر نمونه‌برداری در اواخر فصل خشک یعنی مهر یا آبان صورت می‌گرفت، به نتایج متفاوتی منجر می‌شد که در آن، شوری خاک بیشتر از شوری آب زیرزمینی بود (Jafari, 2018). در این مسیر، از نقطه ۱ تا ۲۰ روند کاهشی شوری ملاحظه شد. محصور ماندن آب زیرزمینی و عدم زهکشی آن و در نتیجه کاهش پوشش گیاهی در قسمت شرق منطقه، باعث شده تا شوری در این قسمت افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. تغییرات شوری آب زیرزمینی و میانگین شوری لایه‌های خاک با تغییرات سطح آب زیرزمینی از روند نسبتاً همواری برخوردار است. مورد استثنا در این میان، نقطه ۲۰ است که با افزایش عمق آب زیرزمینی، از میزان شوری آن کاسته شده که می‌تواند ناشی از تخلیه زه‌آب‌های اراضی توسط رودخانه کارون باشد. شوری آب زیرزمینی بخش زیادی از شوری خاک در چهار عمق مورد بررسی را توضیح می‌دهد (r^2=۰/۹۲) که بیانگر منشأ شوری خاک از شوری آب زیرزمینی است (شکل ۵). این رابطه حتی از میزان مشابه آن با لایه سطحی شکل ۳ نیز بیشتر است.



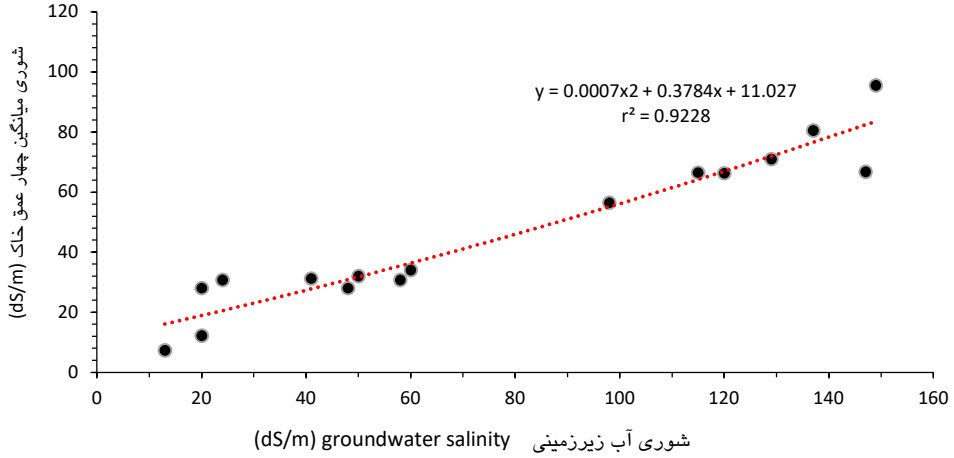
شکل ۲- رابطه بین شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتر) و شوری و عمق آب زیرزمینی در مسیر A



شکل ۳- رابطه رگرسیونی بین شوری لایه سطحی و شوری آب زیرزمینی در مسیر A



شکل ۴- رابطه بین میانگین شوری چهار لایه خاک مسیر A و شوری و عمق آب زیرزمینی



شکل ۵- رابطه رگرسیونی بین شوری میانگین چهار عمق مورد بررسی و شوری آب زیرزمینی در مسیر A

مسیر دوم B

این مسیر که موازی مسیر A در امتداد شرقی-غربی و در فاصله نسبتاً زیادی از آن در شمال مسیر A است، پوشش گیاهی مشابه مسیر A ولی با تراکم خیلی کمتری دارد. سطح خاک مرطوب و در شرایط خشک به‌صورت پودر با تجمع نمک در سطح است. عمق آب زیرزمینی از ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر متغیر است. همچنین ماتل در اعماق ٤٠ تا ۱۵۰ و گلی در عمق ۱۲۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متری مشاهده شد. از ابتدا (شرق) تا میانه مسیر، بافت در لایه اول و دوم، لوم شنی و شنی و در لایه‌های عمیق‌تر به رسی و لوم رسی تغییر نموده ولی در ادامه مسیر و تا انتهای آن، بافت غالب چهار لایه خاک از لوم شنی تا شنی تغییر نمود. مشابه مسیر قبلی، شوری خاک و آب زیرزمینی از شرق به غرب کاهش یافته که به اثرات زهکشی رودخانه و مسطح بودن اراضی مربوط می‌باشد. در این مسیر نیز تا نقاط ١٤، با قطع زهکش‌های اراضی توسط زهکش مشترک شرکت‌های نیشکر، سطح آب در اراضی بالا آمده و شوری خاک افزایش یافته ولی از نقطه ۱۵ تا انتهای مسیر، شوری به صورت ناگهانی کاهش یافته که به‌دلیل بافت سبک خاک از یکسو و زهکشی مناسب توسط رودخانه و آبیاری است.

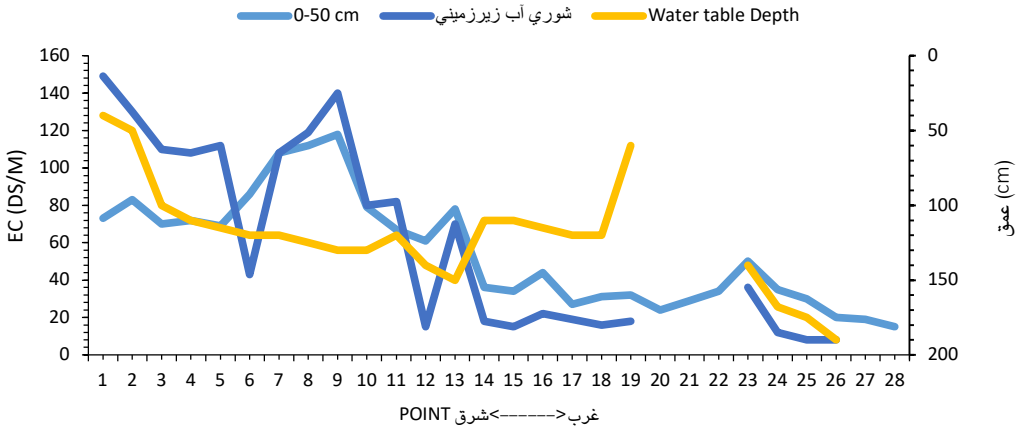
در این مسیر، سیر نزولی شوری خاک هماهنگ با کاهش شوری آب زیرزمینی از شرق به غرب رخ داده است که مؤید منشأ شوری خاک از آب زیرزمینی است. در نقاط ۱ تا ٥، سطح بالای آب زیرزمینی و تبخیر پی در پی آن سبب شوری آب زیرزمینی شده ولی اختلاف شوری خاک و آب زیرزمینی خیلی زیاد است. به‌دلیل وجود کانال عمیق در مجاور نقاط ٦ و ۱۲، شوری آب زیرزمینی به شدت کاهش یافته است. تزریق آب از کانال زهکشی نیشکر به اراضی مجاور، سبب افزایش سطح آب زیرزمینی در این اراضی و در نتیجه کاهش شوری آب زیرزمینی شده است ولی تبخیر آن در سطح خاک، سبب شوری آن می‌گردد. نقاط ۸ و ۹ در مجاورت این کانال بوده و سطح آب زیرزمینی و شوری را در این بخش افزایش داده است. به‌طوری که، ماتل‌ها در عمق ٤٠ سانتی‌متری پدید آمده‌اند.

همبستگی بالای شوری خاک سطحی با آب زیرزمینی در این مسیر نیز (r^2=۰/۷۳) نشان‌دهنده آن است که شوری خاک از آب زیرزمینی منشأ گرفته است (شکل ۷). اختلاف بین این دو عامل، به میزان بیشتر در ابتدای مسیر و در نقاط ۱ ، ٦ ، ۸ و ۱۲ اتفاق افتاده که در بالا به‌دلایل آنها اشاره شد (شکل ۷). روند مشابهی با لایه سطحی، نیز برای میانگین شوری چهار عمق با شوری آب زیرزمینی ملاحظه شد (شکل ۸).

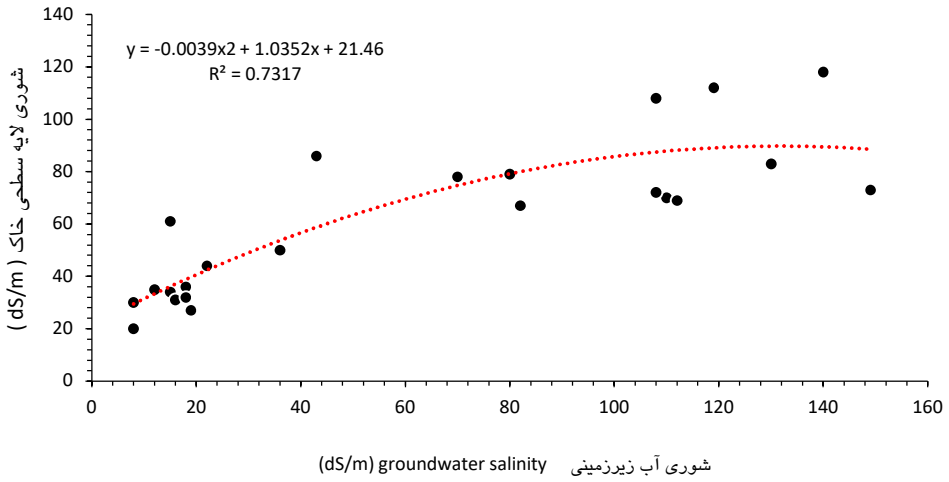
شوری کل خاک و شوری آب زیرزمینی از شرق به غرب (نقطه ۱ تا ۲۸) کاهش می‌یابد که مشابه مسیر A به

اثرات کانال زهکشی نیشکر در شرق و بهبود زهکشی در مجاور رودخانه کارون در غرب مربوط می‌گردد. از ابتدای مسیر تا میانه آن، فاصله دو منحنی از هم زیاد شده که از جمله دلایل آن می‌توان به ماندابی شدن سطحی بخش شرقی و مجاورت با کانال آبرسانی دارای آب غیرشور اشاره نمود.

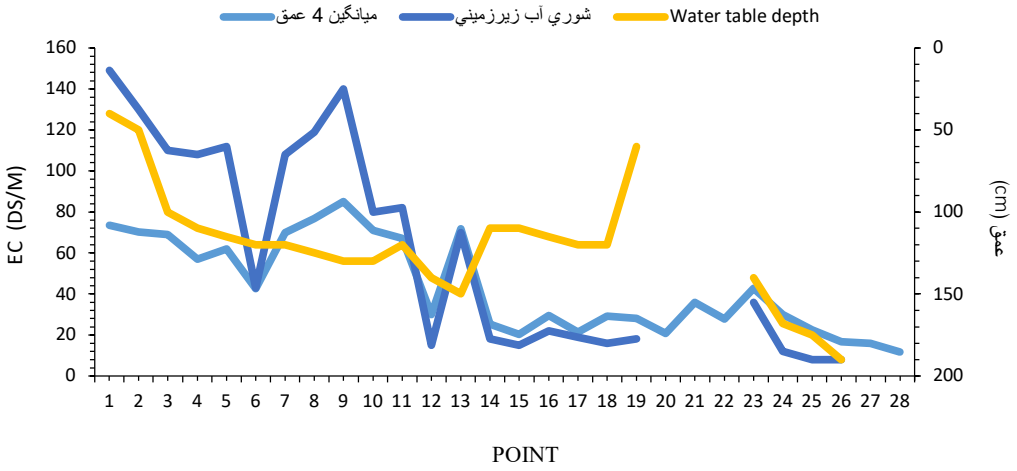
رابطه رگرسیونی شوری آب زیرزمینی و میانگین شوری کل خاک در مسیر B از ضریب تعیین بالایی بین شوری آب زیرزمینی و شوری کل خاک برخوردار است (شکل ۹). در ابتدای مسیر، اختلاف بین دو عامل همبستگی ضعیفی را نشان می‌دهد ولی از میانه مسیر تا انتهای آن، این همبستگی کاهش می‌یابد.



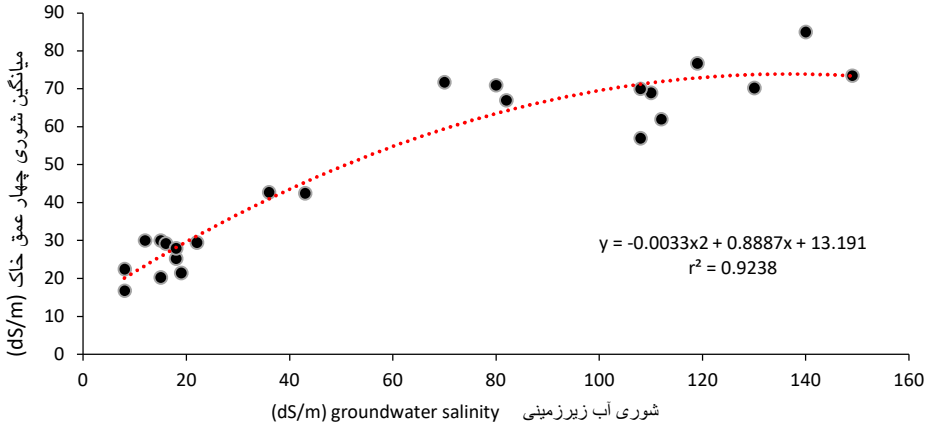
شکل ۶- رابطه بین شوری خاک لایه سطحی خاک (۵۰-۰ سانتیمتری) مسیر B و شوری و عمق آب زیرزمینی



شکل ۷- رابطه رگرسیونی بین شوری لایه سطحی و شوری آب زیرزمینی در مسیر B



شکل ۸- تغییرات میانگین شوری چهار عمق خاک و شوری و عمق آب زیرزمینی در مسیر B



شکل ۹- رابطه رگرسیونی بین شوری میانگین چهار عمق مورد بررسی و شوری آب زیرزمینی مسیر B

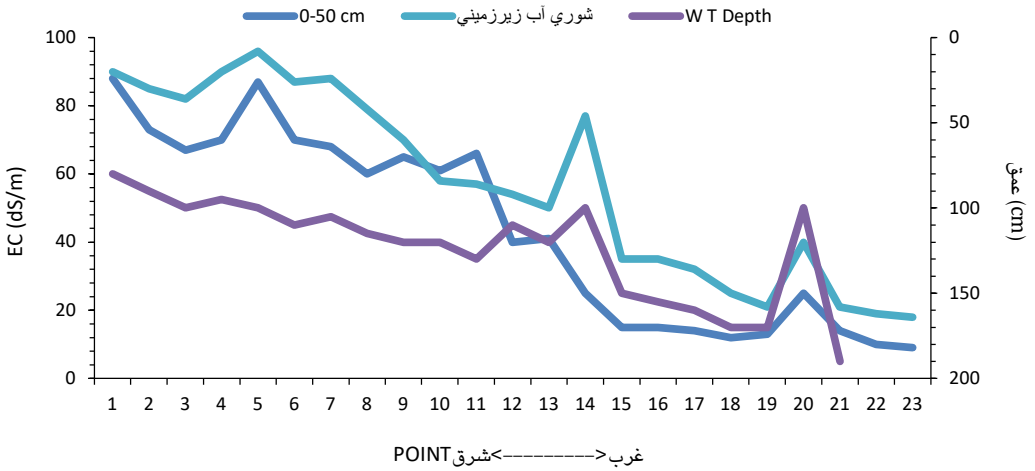
مسیر سوم C

مسیر C نیز یک مسیر شرقی-غربی است که پوشش گیاهی آن شامل نی وحشی، گز شور، سالسولا، درمنه و در بخش غربی نخل خرما، گندم، جو و یونجه کشت شده است. پوشش گیاهی بومی از تراکم خیلی کمی برخوردار است. در این مسیر نیز سطح خاک در اثر تجمع نمک به‌صورت پودری با شوره در سطح دیده می‌شود. آب زیرزمینی در این مسیر از ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متری، ماتل در اعماق ٤٠ تا ١٥٠ و گلی در عمق ١٢٠ تا ٢٠٠ سانتی‌متری قابل مشاهده بود. بافت خاک در این مسیر، غالباً سنگین رسی تا لوم رسی است ولی در عمق ١٢٠ سانتی‌متری، لایه‌ای به ضخامت ١٠ سانتیمتر از جنس ماسه وجود دارد. مشابه با روندی که در مسیرهای A و B ملاحظه شد، روندی از تغییرات شوری خاک و آب زیرزمینی در امتداد شرق به غرب نیز در این مسیر ملاحظه شد (شکل ١٠).

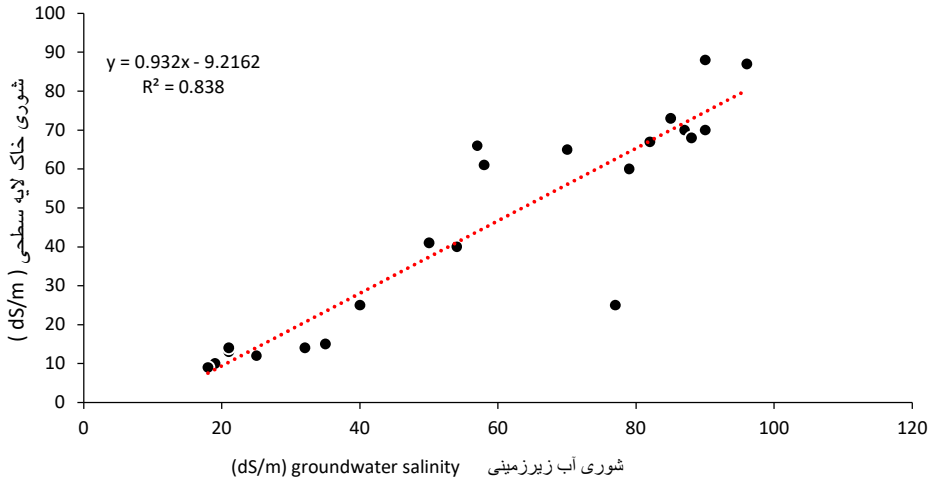
در این مسیر نیز شوری خاک از ابتدای تا نقطه ١١ خیلی زیاد است. به‌دلیل مسدود شدن زهکش‌های روباز سنتی (نقاط ١٤ و ٢٠)، عمق آب زیرزمینی در این بخش بالا آمده و منجر به شوری بالای خاک شده است. در ادامه مسیر (از نقاط شماره ١٥ تا ٢٣)، شوری خاک به شدت کاهش یافته است. در این بخش از اراضی، به‌دلیل

شرایط مناسب زهکشی از یک سو و انجام عملیات آبیاری و در نتیجه آبشویی خاک از سوی دیگر، شوری آب زیرزمینی و در نتیجه شوری خاک کاهش یافته است. همبستگی بالایی (۰/۸٤) بین شوری آب زیرزمینی و خاک در طول این مسیر نیز وجود دارد (شکل ۱۱). در این مسیر نیز به‌دلیل برخورد با زهکش کشاورزی، شوری آب زیرزمینی نسبت به روند این مسیر به‌صورت ناگهانی افزایش یافته و نقطه‌ای خارج از روند عمومی تغییرات شوری در این بخش ایجاد نموده است (نقطه ١٤). در مسیر C نیز روندی مشابه با شوری خاک سطحی و آب زیرزمینی، بین میانگین شوری خاک در چهار لایه با شوری آب زیرزمینی ملاحظه شد که از شرق به غرب کاهش می‌یافت (شکل ۱۲). به‌دلیل انسداد زهکش‌های سنتی، شوری آب زیرزمینی به‌صورت قابل‌توجهی افزایش یافته است (نقاط ١٤ و ٢٠).

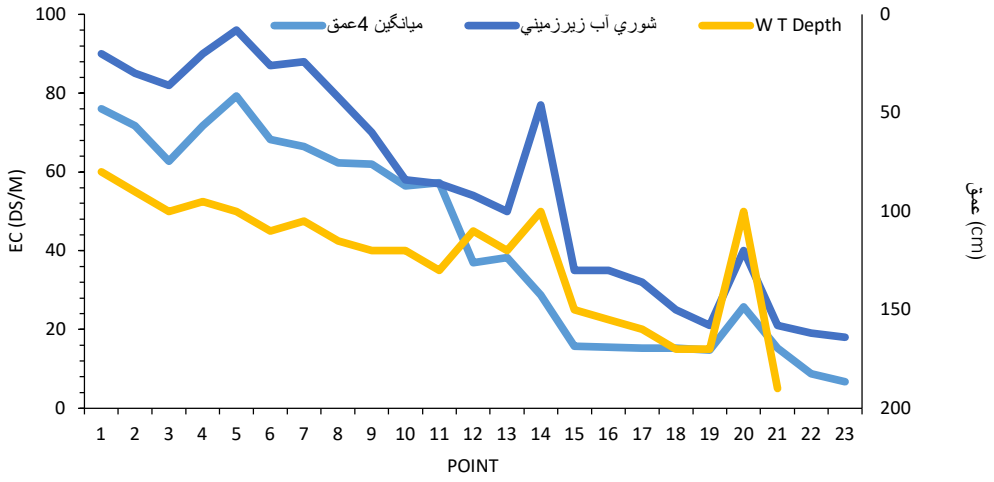
در رابطه رگرسیونی نیز همبستگی بالاتری بین شوری آب زیرسطحی و شوری چهار لایه خاک در این مسیر نسبت به لایه سطحی ملاحظه شد (شکل ۱۳). تنها استثنا در این مورد نقطه ١٤ است که به علت آن اشاره شد.



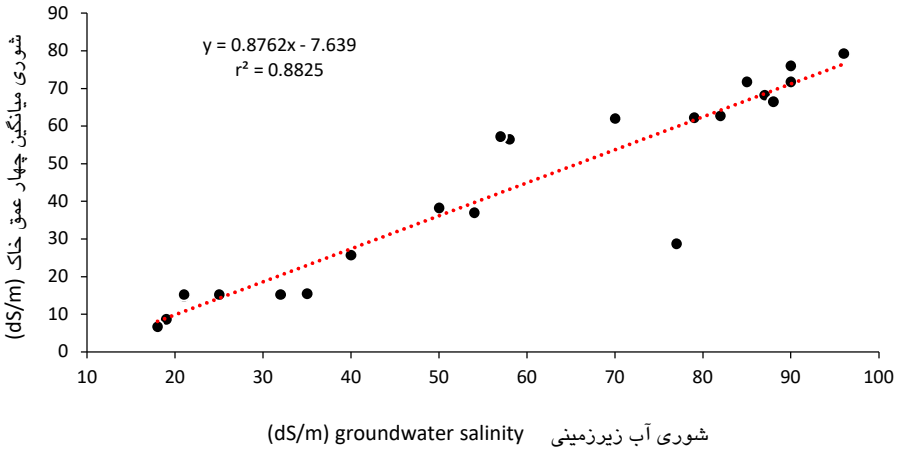
شکل ۱۰- رابطه بین شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتری) و شوری و سطح آب زیرزمینی



شکل ۱۱- رابطه رگرسیونی شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتری) و شوری آب زیرزمینی مسیر C



شکل ۱۲- رابطه بین شوری میانگین کل خاک و شوری و سطح آب زیرزمینی در مسیر C



شکل ۱۳- رابطه رگرسیونی بین شوری میانگین کل خاک و شوری آب زیرزمینی مسیر C

مسیر چهارم D

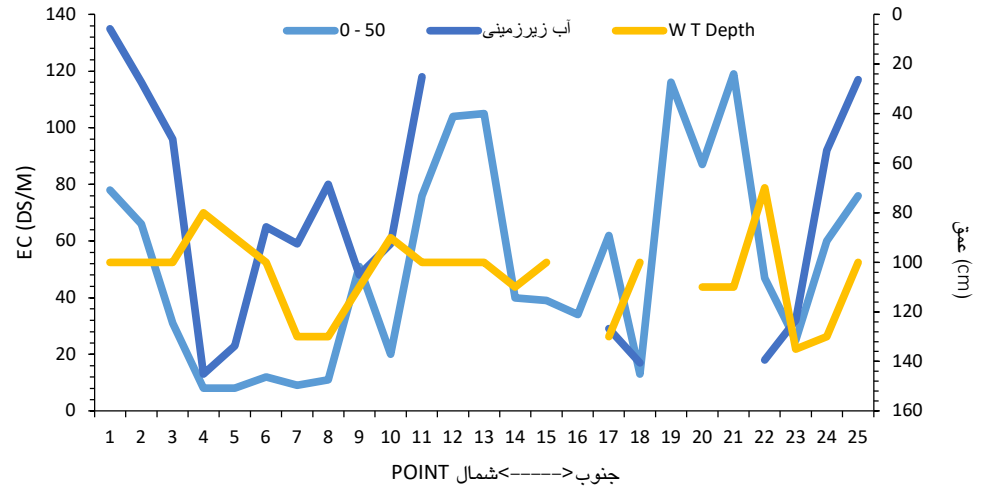
بر خلاف سه مسیر قبلی، مسیر **D** در امتداد شمال به جنوب بوده و از روستای دریسیه شروع و تا جنوب دارخوین ادامه دارد (به موازات اتوبان اهواز-آبادان). پوشش گیاهی آن مشابه مسیر **C** بوده و گندم و جو در بخش جنوبی آن کشت می‌شود. سطح خاک متأثر از شوری، به‌صورت پودری و پف‌کرده درآمده است. عمق آب زیرزمینی در این مسیر از ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر متغیر است. همچنین ماتل در اعماق ٤٠ تا ۱۵۰ و گلی در عمق ۱۲۰ تا بیش از ۲۰۰ سانتی‌متری قابل مشاهده بود. ماتل‌ها نسبت به مسیرهای دیگر به سطح نزدیک‌تر شده است. بافت خاک در این مسیر از ماسه‌ای تا رسی متغیر است. در این مسیر نیز شوری و سطح آب زیرزمینی نقاط ابتدایی متأثر از زهکش عظیم نیشکر است که سبب افزایش سطح ایستابی در این نقاط شده و شوری خاک سطحی را نیز افزایش داده است.

بر خلاف آنچه در سه مسیر شرقی-غربی ملاحظه شد، در مسیر شمالی جنوبی (شکل ١٤) تغییرات شوری سطحی با شوری آب زیرزمینی در امتداد شمال - جنوب روندی به میزان آنچه در مسیرهای شرقی-غربی ملاحظه شد، ندارد ولی همبستگی بین تغییرات شوری آب زیرزمینی با شوری خاک وجود دارد. بر خلاف مسیرهای شرقی-غربی قبلی، در این مسیر نوسانات شوری بسیار شدیدی رخ داده است. احداث زهکش در اراضی کشاورزی سبب کاهش شوری در بخشی از نقاط

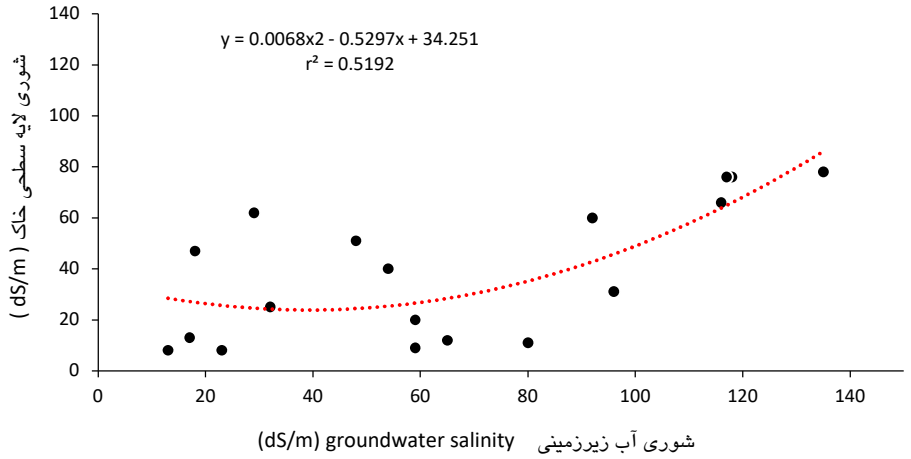
مسیر شده است (نقاط ۳ تا ۸). در نقاط ٦ تا ۸، به‌دلیل شستشوی مداوم لایه‌های خاک و به‌خصوص لایه سطحی، شوری خاک به حداقل رسیده است. افزایش ناگهانی شوری آب زیرزمینی (برعکس شوری خاک) در این نقاط ممکن است به‌دلیل وجود لایه شنی در لایه سوم و چهارم خاک باشد که باعث کاهش و یا حذف خیز موئینگی در لایه‌های بالاتر شده است. از دیگر دلایل آن می‌توان به احتمال شستشو لایه‌های بالایی خاک اشاره نمود که به‌دلیل بافت سبک لایه‌های رو و زیرین و امکان آبشویی بیشتر در این نقاط، شوری خاک سطحی به لایه‌های زیرین خاک منتقل شده است. در ادامه مسیر و در نقطه ۱۰، به‌دلیل مجاورت با زهکش اصلی روباز، شوری در لایه سطحی کم ولی شوری آب زیرزمینی به حداکثر خود رسیده است. نزدیک بودن این نقطه به زهکش اصلی علت این پدیده است. همچنین در نقاط ۱۱ تا ۱۳ به‌دلیل عدم آبشویی ناشی از بایر بودن زمین و بافت سنگین این نقاط، شوری خاک و آب زیرزمینی افزایش یافته است. در نقاط ١٤ تا ۱۸، وجود بافت شنی شدید در اکثر لایه‌های خاک و کاهش یا حذف خیز موئینگی، باعث تقلیل شوری در این نقاط شده است. نقاط ۱۹ تا ۲۱ در اراضی بایر قرار دارند، ولی به‌دلیل مجاورت با اراضی کشاورزی فاقد سیستم زهکشی مناسب، امکان تخلیه زه‌آب را نداشته و سبب شوری آب زیرزمینی و خاک شده است. در نقطه ۲۲، به‌دلیل مجاورت با کانال آبرسان و شستشوی مدام سطح خاک در اثر شکستگی و یا طغیان آب کانال، شوری در این موقعیت کاهش یافته است. نقطه ۲۳ نیز در زمین‌های کشاورزی واقع شده و در اثر آبیاری و زهکشی، شوری خاک و آب زیرزمینی به حداقل خود رسیده است. همچنین این نقطه مسیر حرکت زهکش جانبی آب از کانال به اراضی اطراف است که سبب شستشوی املاح و کاهش شوری خاک شده است. در آخرین نقطه مسیر **D** (نقطه ۲۵)، به‌دلیل پست بودن زمین و تجمع آب در اثر بالا بودن سطح ایستابی در آن موقعیت، شوری آب زیرزمینی و به تبع آن شوری خاک به‌شدت افزایش داشته است. رابطه بین شوری خاک لایه سطحی و آب زیرزمینی رابطه نمایی با ضریب تعیین نسبتاً کمتری (۰/۵۲) از بقیه مسیرها می‌باشد (شکل ۱۵).

عبور مسیر **D** از اراضی کشاورزی و بایر و تغییرات نسبت آبشویی و همچنین وجود لایه‌های شنی در لایه‌های زیرین، سبب شده است تا نوسانات شدیدی در شوری این مسیر اتفاق افتاده و باعث شده تا رابطه رگرسیونی ضعیفی نسبت به بقیه مسیرها بین شوری خاک و شوری آب زیرزمینی پدید آید (r^2=۰/۵۲). این نتایج نشان می‌دهد که شوری غیر از آب زیرزمینی و سطح آن، متأثر از عوامل دیگری است که می‌تواند به بافت لایه‌های مختلف، وجود زهکش‌های روباز، آبیاری و یا عدم آن مربوط گردد. روندی مشابه با آنچه که در لایه سطحی و شوری آب زیرزمینی شکل ۱۵) دیده شد، در رابطه میانگین شوری طبق نتایج (شکل ١٦) تغییرات شوری کل خاک ناشی از اثرات انسان در تغییر شرایط توپوگرافی، هیدرولوژی یا بهره برداری از اراضی است. در این بخش نیز انسان با ایجاد کانال‌های آبیاری یا زهکشی سبب کاهش یا تشدید شوری شده است. کانال زه‌آب نیشکر به‌دلیل قرار داشتن در سطح زمین و تغذیه سفره آب زیرزمینی سبب شوری لایه‌های سطحی و زیرسطحی اراضی مجاور شده که بخش شمالی این مسیر را نیز از این جریان متأثر نموده است. با این وجود، ایجاد انهار زهکشی و آبیاری در اراضی کشاورزی سبب کاهش شوری خاک شده است.

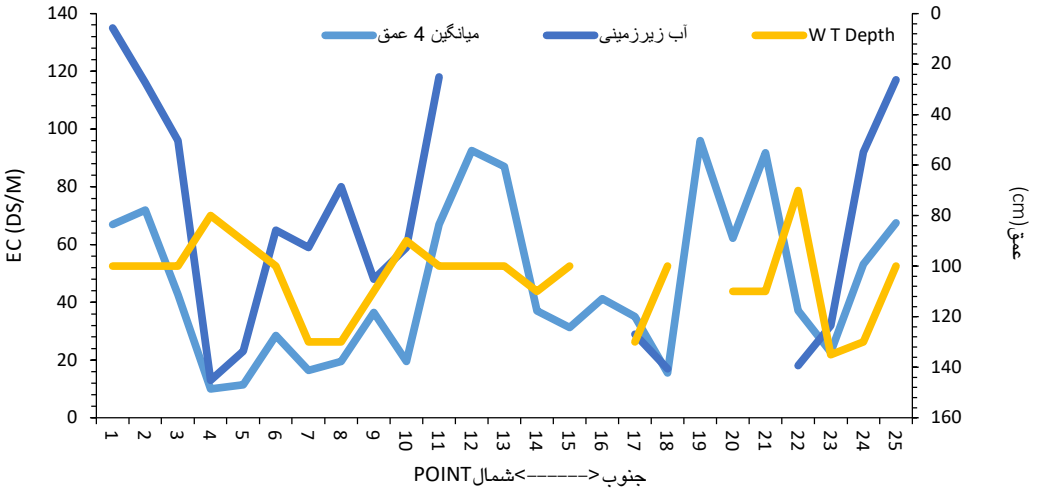
رابطه رگرسیونی بین میانگین شوری کل لایه‌های خاک و شوری آب زیرزمینی (شکل ۱۷) ضریب تعیین بالاتری را با لایه سطحی نشان می‌دهد (۰/۷۵ در برابر ۰/۵۲). این امر می‌تواند به یکنواختی توزیع شوری در لایه‌های مختلف خاک نسبت داده شود.



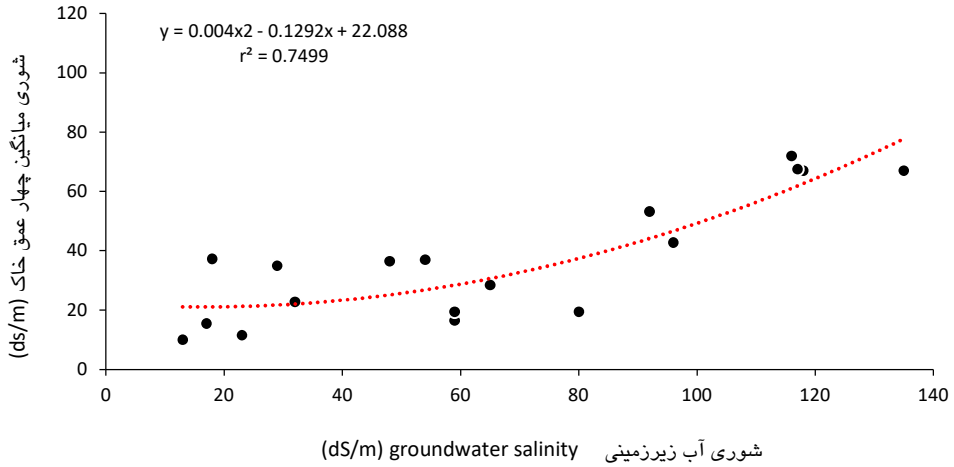
شکل ۱۴- رابطه بین شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتری) و شوری و سطح آب زیرزمینی در مسیر D



شکل ۱۵- رابطه رگرسیونی شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتری) و شوری آب زیرزمینی در مسیر D



شکل ۱۶- رابطه بین شوری میانگین کل خاک و شوری و سطح آب زیرزمینی



شکل ۱۷- رابطه رگرسیونی میانگین شوری کل خاک و شوری آب زیرزمینی در مسیر D

مسیر پنجم E

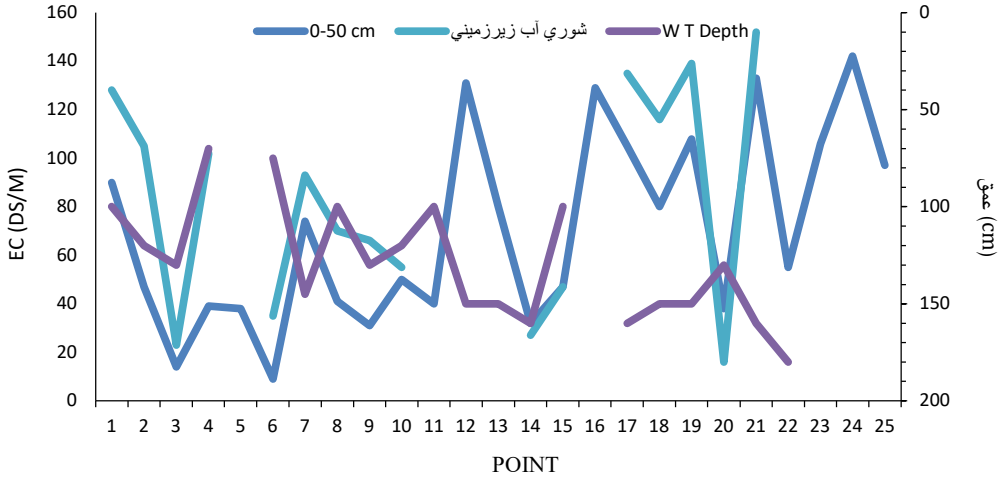
مسیر **E** نیز مسیری شمالی-جنوبی است که از شمال منطقه یعنی روستای دابوهیه شروع و تا جنوب منطقه یعنی روستای شاخت الخان ۱ (شهر دارخوین) در امتداد جاده اهواز آبادان امتداد دارد. این مسیر نیز پوشش گیاهی مشابه مسیر **D** دارد. سطح خاک اکثراً به‌صورت مرطوب و پودری همراه با نمک بر سطح زمین دیده می‌شود. این علائم در مناطق کشت‌شده حذف شده است. در طول مسیر به‌دلیل شوری نسبتاً بالا، گندم و جو کشت می‌شود. عمق آب زیرزمینی در این مسیر، از ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متری، ماتل در اعماق ٤٠ تا ١٥٠ و گلی در عمق ۱۲۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متری بود. بافت خاک در این مسیر غالباً بافت سنگین رسی و لوم رسی است. در طول این مسیر، تغییرات ناگهانی و متناوبی در شوری خاک و آب زیرزمینی اتفاق افتاده است که به تغییرات مربوط به کاربری اراضی، کشت و زرع در برخی از نقاط مسیر و بایر بودن اراضی ارتباط دارد (شکل ۱۸).

زهکش عظیم اراضی واحدهای جنوب شرقی نیشکر در ابتدای مسیر، سبب بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در این بخش از اراضی شده و به تبع آن شوری خاک را در پی داشته است (نقاط ۱ و ۲). در ادامه‌ی مسیر، در برخی از نقاط کشت و کار و احداث زهکش سبب کاهش شوری خاک شده است (نقاط ۳ تا ٦). در برخی نقاط به‌دلیل عدم امکان خروج زه‌آب اراضی زراعی در اثر قطع مسیر زهکش‌های روستایی توسط زهکش نیشکر و عدم امکان تخلیه زه‌آب این اراضی به تالاب، این اراضی در اثر شوری زیاد به حال خود رها شده و قابلیت کشت و کار ندارد. در نقاط ۷، ۱۲و ١٦ شوری بیشتر افزایش یافته است که از جمله دلایل آن می‌توان به فقدان زهکش مناسب و آبیاری مکرر و عدم خروج زه‌آب‌های کشاورزی از منطقه اشاره نمود که سبب بالا آمدن سطح ایستابی منطقه شده و با تبخیر از سطح موجب شور شدن بیش از اندازه لایه سطحی شده است. نقاط ۸ تا ۱۰ در زمین‌های کشاورزی واقع هستند و به همین دلیل، از درجه شوری کمتری برخوردارند. همچنین عامل افزایش شوری در نقاط ۱۹ و ۲۲ تغییر کاربری اراضی می‌باشد. با توجه به عدم امکان خروج زه‌آب‌های کشاورزی روستایی (شرق منطقه ۱) به تالاب شادگان در اثر مسدود شدن مسیر توسط زهکش شرکت‌های نیشکر و شور شدن اراضی در این قسمت، اکثر کشاورزان با تغییر کاربری اراضی و روی آوردن به شیلات سبب شور شدن بیش از پیش اراضی شده‌اند.

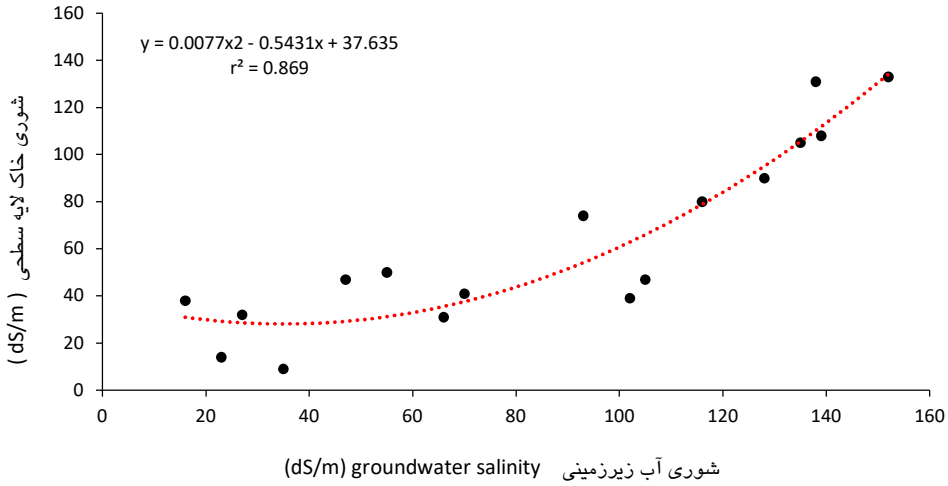
در انتهای مسیر، برعکس اکثر نقاط برداشت شده از منطقه مورد مطالعه، شوری در لایه سطحی خاک به مراتب بیشتر از اعماق پایین‌تر می‌باشد ولی سطح ایستابی پایین‌تر از ۲ متر بود. چنین به‌نظر می‌رسد که

عدم وجود زهکش در این اراضی، سبب شده تا آب موجود تبخیر شده و با به‌جا گذاشتن املاح خود، سبب شوری خاک شود. این بخش از اراضی در زمان‌های قدیم، جزء زمین های کشاورزی بوده و در آن‌ها کشت و زرع صورت می‌گرفته ولی با شروع جنگ ایران – عراق به منطقه جنگی تبدیل شده و با احداث سنگرها و خاکریزها و همچنین ایجاد جاده‌های دسترسی متعدد، باعث افزایش ارتفاع سطح زمین نسبت به بقیه منطقه شده است. به همین دلیل، سطح ایستابی این نقاط پایین بوده ولی از آن‌جایی که هنوز آثار ابنیه و خاکریزهای جنگی در این منطقه باقی مانده، کشت و زرع در این قسمت از اراضی میسر نبوده و رها شدن این زمین‌ها سبب شور شدن سطح خاک شده است (نقطه ٢٤).

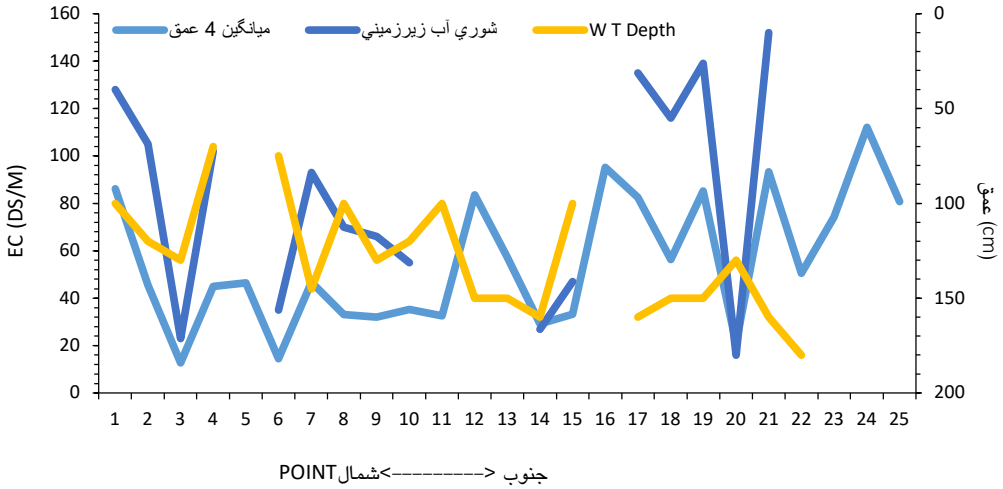
شوری خاک لایه سطحی و شوری آب زیرزمینی بر اساس رابطه رگرسیونی، ضریب تعیین بالاتری را نسبت به مسیرهای دیگر نشان می‌دهد (r^2=۰/۸۷). دلیل آن را می‌توان بیشتر ناشی از اثرات کمتر لنزهای ماسه‌ای بر کاهش شوری خاک لایه سطحی است. در برخی از قسمت‌ها خوزستان لایه‌هایی از ماسه بصورت لنز بین لایه‌های آبرفتی ریزدانه قرار گرفته‌اند که به آنها لنز ماسه‌ای گفته می‌شود. بر اساس منابع، بیشترین خیز موییینگی به بافت سیلتی مربوط است (Ejrami et al., 2023; Jafari, 2014; Jafari, 2018). روند مشابهی نسبت به آن چه برای تغییرات شوری لایه سطحی و شوری آب زیرزمینی دیده شد، برای شوری میانگین شوری کل خاک و شوری آب زیرزمینی نیز مشاهده شد (شکل ۲۰). با حرکت از شمال منطقه به جنوب آن و کاهش تدریجی ارتفاع اراضی نسبت به سطح دریای آزاد در بخش‌های جنوبی، شوری خاک و آب زیرزمینی افزایش می‌یابد (شکل ۲۰).



شکل ۱۸- رابطه بین شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتری) و شوری آب زیرزمینی در مسیر E



شکل ۱۹- رابطه رگرسیونی شوری خاک لایه سطحی (۵۰-۰ سانتیمتری) و شوری آب زیرزمینی در مسیر E



شکل ۲۰- رابطه بین میانگین شوری کل خاک و شوری آب زیرزمینی در مسیر E

تحلیل آماری

مقایسه‌ی شوری اعماق مختلف

مقایسه شوری پنج مسیر مورد مطالعه در (جدول ۱) آمده است. میانگین شوری در پنج مسیر ۵۱/۲ دسی زیمنس بر متر (کلاس **C4**) است که بیانگر شوری بسیار زیاد خاک‌های منطقه مورد مطالعه است. حداقل و حداکثر شوری به‌ترتیب ٤ و ۱۵۲ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. بیشترین شوری متعلق به مسیر **E** بوده که مسیر شمالی-جنوبی است. همچنین دلیل دیگر افزایش شوری این مسیر آن است که در شرق منطقه و به موازات کانال انتقال زه‌آب شرکت‌های نیشکر است که سبب بالا آمدن سطح ایستابی و در نتیجه شوری خاک منطقه شده است. در مسیر **C** که یک مسیر شرقی-غربی است، به‌دلیل کشت مداوم و آبشویی، شوری خاک به حداقل خود نسبت به سایر مسیرها رسیده است. نتایج آنالیز واریانس داده‌ها برای پنج مسیر در (جدول ۲) آمده است.

جدول ۱- شاخص‌های آماری شوری خاک در پنج مسیر مورد بررسی

مسیر	تعداد	میانگین (dS/m)	انحراف معیار	کمینه (dS/m)	بیشینه (dS/m)
A	۱۲۱	۵۶/۹	۳۵/۳	۸	۱۴۲
B	۱۲۱	۴۷/۴	۲۹/۴	۸	۱۲۱
C	۱۲۱	۴۳/۴	۲۴/۶	۵	۱۲۲
D	۱۲۱	۴۳/۷	۲۲/۷	۴	۱۱۱
E	۹۷	۴۷/۸	۴۲/۹	۸	۱۵۲
کل	۵۸۱	۵۱/۲	۲/۵	۴	۱۵۲

جدول ۲- آنالیز واریانس داده‌ها برای پنج مسیر

تغییرات	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F	Sig.
بین گروه‌ها	٤٦٥٣٧/٥	٤	١١٦٣٤/٤	١١/٨	٠/٠٠٠
درون گروه‌ها	٥٦٥٣٢٥/٢	٥٧٦	٩٨١/٥		
کل	٦١١٨٦٢/٧	٥٨٠			

با توجه به آماره **F** محاسباتی و سطح معنی‌داری آن، بین پنج مسیر مورد مطالعه از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح کمتر از یک درصد بین میزان شوری دیده می‌شود. از آنجا که این مسیرها دارای منشأ خاک نسبتاً مشابهی هستند (رسوبات آبرفتی سیلابی)، این اختلاف شدید نشان‌دهنده اثرات مهم عوامل ثانویه تغییردهنده شوری در دشت است. عوامل انسانی، پستی و بلندی، تغییرات توپوگرافی، اثرات کشت و کار و حاشیه رودخانه بر جریان زهکشی، توزیع غیریکنواخت جریان آب سطحی و تغییر شرایط زهکشی زیرسطحی و همچنین احداث کانال‌های بزرگ از جمله این عوامل مهم هستند.

توصیف آماری شوری پنج مسیر بر اساس آزمون جم هوول در (جدول ۳) آمده است. اختلاف میانگین میزان شوری در مسیر ۱ با میانگین آن در مسیرهای ۳ و ٤ معنی دار می‌باشد. همچنین اختلاف میانگین میزان شوری در مسیر ۳ در مقایسه با مسیر ۱ و میانگین میزان شوری در مسیر ٤ در مقایسه با میانگین آن در مسیر ۱ اختلاف معنی‌داری داشت، ولی میانگین شوری سایر مسیرها اختلاف معنی‌داری نداشتند. عوامل مختلفی بر تغییرات شوری در هر مسیر اثرگذار هستند که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شد. این اختلافات منجر به معنی‌داری شوری در مسیرهای مختلف شده است. با این وجود، اختلاف واریانس بین شوری خاک هر مسیر می‌تواند سبب معنی‌داری اختلاف شوری بین مسیرها گردد.

همبستگی شوری بین اعماق مختلف خاک و شوری آب زیرزمینی

همبستگی شوری بین چهار عمق نمونه‌برداری خاک و شوری آب زیرزمینی بر اساس ضریب همبستگی پیرسون در (جدول ٤) ارائه شده است. نتایج نشان داد که در اعماق خاک مجاور همدیگر، ضریب همبستگی بالا بوده، ولی برای اعماق دورتر از یکدیگر، این همبستگی کاهش می‌یابد. اما بین شوری خاک در هر چهار عمق مورد بررسی، همبستگی مثبت بسیار بالا و معنی‌داری مشاهده می‌شود. ضریب همبستگی بین شوری آب زیرزمینی و چهار عمق خاک مورد بررسی بسیار پایین بوده و از نظر آماری نیز معنی‌دار نیست. این نتایج برخلاف روابط شوری آب زیرزمینی با شوری خاک است، وقتی که به‌طور جداگانه در هر مسیر بررسی شد. به‌عبارتی، شوری هر خاکی متأثر از شوری آب زیرزمینی و سطح آن تغییر می‌کند که عوامل مختلفی چون بافت، پوشش گیاهی و شرایط تخلیه زه‌آب‌ها در آن تأثیرگذار است. از طرف دیگر، ضریب همبستگی رابطه خطی بین دو متغیر را نشان می‌دهد. از آنجا که در مدل

رگرسیون نشان داده شد که متغیر شوری اعماق مختلف خاک و آب زیرزمینی رابطه غیرخطی دارند، بنابراین تناقضی بین عدم وجود همبستگی و روابط رگرسیون وجود ندارد.

جدول ۳- نتایج آزمون تعقیبی جم هوول پنج عامل مورد بررسی (شوری چهار عمق خاک و شوری آب زیرزمینی)

(I) dpt	(J) dpt`	Mean Difference (I-J)	انحراف معیار	Sig.
A	B	۹/۵	٤/۲	۰/۱۵۷
	C	۱۳/٤*	۳/۹	۰/۰۰٦
	D	۱۳/۲*	۳/۸	۰/۰۰٦
	E	-۱۰/۹	۵/٤	۰/۲۵۹
B	A	-۹/۵	٤/۱	۰/۱۵۷
	C	۳/۹	۳/۵	۰/۹۵۳
	D	۳/۷	۳/٤	۰/۹٦۳
	E	-۲۰/۵*	۵/۱	۰/۰۰۱
C	A	-۱۳/٤*	۳/۹	۰/۰۰۷
	B	-۳/۹	۳/۵	۰/۹۵۳
	D	-۲۵	۳/۱	۱
	E	-۲٤/٤*	٤/۹	۰/۰۰۰
D	A	-۱۳/۲*	۳/۸	۰/۰۰۷
	B	-۳/۷	۳/٤	۰/۹٦۳
	C	۲۵	۳	۱
	E	-۲٤/۱*	٤/۹	۰/۰۰۰
E	A	۱۱	۵/٤	۰/۳٦٦
	B	۲۰/۵*	۵/۱	۰/۰۰۱
	C	۲٤/٤*	٤/۹	۰/۰۰۰
	D	۲٤/۱*	٤/۸	۰/۰۰۰

جدول ۴- ضریب همبستگی بین پنج عامل مورد مطالعه (شوری چهار عمق خاک و آب زیرزمینی)

	عمق ۱	عمق ۲	عمق ۳	عمق ٤	آب زیرزمینی
عمق ۱	۱	۹۱۹/۰**	۸۴۷/۰**	۷۳۲/۰**	۰۹۴/۰
		(۰۰۰/۰)	(۰۰۰/۰)	(۰۰۰/۰)	(۳۶۹/۰)
عمق ۲	۹۱۹/۰**	۱	۸۶۷/۰**	۷۷۴/۰**	۱۰۸/۰
	(۰۰۰/۰)		(۰۰۰/۰)	(۰۰۰/۰)	(۲۹۸/۰)
عمق ۳	۸۴۷/۰**	۸۶۷/۰**	۱	۸۱۷/۰**	۰۴۰/۰
	(۰۰۰/۰)	(۰۰۰/۰)		(۰۰۰/۰)	(۷۰۰/۰)
عمق ٤	۷۳۲/۰**	۷۷۴/۰**	۸۱۷/۰**	۱	-۰۰۴/۰
	(۰۰۰/۰)	(۰۰۰/۰)	(۰۰۰/۰)		(۹۷۱/۰)
آب زیرزمینی	۰۹۴/۰	۱۰۸/۰	۰۴۰/۰	-۰۰۴/۰	۱
	(۳۶۹/۰)	(۲۹۸/۰)	(۷۰۰/۰)	(۹۷۱/۰)	

*منظور از عمق، اعماق نمونه‌برداری خاک است.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که شوری خاک در اراضی جنوب‌شرق اهواز از تغییرپذیری مکانی بسیار زیادی برخوردار است و به‌شدت تحت تأثیر شرایط هیدرولوژیکی، زهکشی، سطح آب زیرزمینی، بافت خاک، کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. میانگین شوری خاک در پنج مسیر مورد بررسی۵۱/۲ دسی زیمنس بر متر و دامنه تغییرات آن ٤ تا ۱۵۲ دسی‌زیمنس بر متر بود که نشان‌دهنده شدت بسیار زیاد شوری در بخش قابل توجهی از منطقه است. با وجود قرارگیری

مسیرهای نمونه‌برداری عمدتاً بر روی رسوبات آبرفتی سیلابی مشابه، تفاوت معنی‌دار شوری بین مسیرها نشان می‌دهد که عوامل ثانویه و به‌ویژه شرایط متفاوت سطح آب زیرزمینی و زهکشی، نقش مهمی در ایجاد ناهمگنی شوری دارند. بر اساس این مطالعه، شوری در اراضی خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در دشت‌های آبیاری‌شده، حاصل برهم‌کنش تراز آب و نمک در خاک است و نمی‌توان آن را تنها به ویژگی ذاتی خاک یا مواد مادری نسبت داد که با مطالعات سایر پژوهشگران نیز همخوانی دارد (Hopmans et al., 2021; Singh, 2021).

یکی از مهم‌ترین نتایج این مطالعه، وابستگی شدید الگوی شوری به وضعیت زهکشی بود. در بخش‌هایی از منطقه که خروج آب زهکش‌ها محدود یا مسدود شده است، سطح آب زیرزمینی افزایش یافته و به دنبال آن شوری خاک نیز تشدید شده است. برعکس، در مجاورت رودخانه کارون و در نقاطی که شبکه زهکشی کشاورزی عملکرد مناسبی داشته است، کاهش سطح آب زیرزمینی با کاهش شوری همراه بوده است. این موضوع از نظر فرآیندهای هیدرولوژیکی کاملاً قابل توجیه است؛ زیرا در شرایط زهکشی ضعیف، آب اضافی حاصل از آبیاری و بارندگی در خاکرخ باقی مانده و با افزایش سطح ایستابی، امکان انتقال املاح محلول به ناحیه ریشه و سطح خاک افزایش می‌یابد. در اقلیم گرم منطقه مورد مطالعه، تبخیر شدید موجب حذف آب و باقی‌ماندن نمک در پروفیل خاک می‌شود. مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که در اراضی آبیاری‌شده خشک و نیمه‌خشک، زهکشی ناکافی، بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و تبخیر زیاد از مهم‌ترین عوامل ایجاد و تداوم شوری ثانویه هستند (Mohanavelu et al., 2021).

در این میان، زهکش عظیم نیشکر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل انسان‌زاد مؤثر بر الگوی شوری منطقه مطرح است. بر اساس مشاهدات این پژوهش، این زهکش که برای انتقال زه‌آب واحدهای نیشکر سلمان فارسی و دعبل خزایی به سمت تالاب شادگان احداث شده است، در بخش‌هایی از مسیر به‌دلیل قرارگیری در تراز بالاتر از سطح زمین، کاهش سرعت جریان، رشد نی وحشی و تجمع رسوبات، سبب افزایش تراوش جانبی آب به اراضی مجاور شده است. در نتیجه، به‌جای آنکه زهکش صرفاً نقش تخلیه‌کننده داشته باشد، در برخی بخش‌ها به یک منبع تغذیه موضعی برای آب زیرزمینی تبدیل شده است. ورود این آب، با شوری حدود ۱۵ دسی زیمنس بر متر، موجب افزایش سطح ایستابی و فراهم‌شدن شرایط انتقال نمک به سطح خاک شده است. بنابراین، اثر این زهکش را نمی‌توان صرفاً با عنوان «زهکش» ارزیابی کرد؛ بلکه عملکرد واقعی آن از نظر تراز آب، کیفیت زه‌آب، تراوش جانبی و ارتباط هیدرولیکی با سفره زیرزمینی باید مورد توجه قرار گیرد.

این تفسیر با مطالعات جدید درباره شوری ناشی از آبیاری و زهکشی سازگار است. هنگامی که آب حاوی املاح وارد سیستم خاک می‌شود، بخشی از آن به آب زیرزمینی نفوذ کرده و شوری آب زیرزمینی را افزایش می دهد؛ در صورتی که تخلیه کافی وجود نداشته باشد، این آب شور مجدداً از طریق جریان موئینگی به سمت بالا حرکت می‌کند. بنابراین، سیستم آب–خاک–آب زیرزمینی می‌تواند یک چرخه بازخوردی ایجاد کند که در آن شوری آب زیرزمینی و خاک یکدیگر را تشدید می‌کنند (Mohanavelu et al., 2021).

ازاین‌منظر، افزایش شوری در بخش شرقی منطقه را می‌توان حاصل هم‌افزایی چند عامل دانست: محدودیت خروج زه‌آب کشاورزی، تأثیر زهکش‌های نیشکر، بالا بودن سطح آب زیرزمینی، تبخیر شدید، کاهش آبشویی طبیعی و مصنوعی و در برخی نقاط، تغییر کاربری اراضی. بنابراین، نسبت دادن شوری شرق منطقه به یک عامل منفرد، از نظر علمی کافی نیست بلکه مجموعه‌ای از تغییرات هیدرولوژیکی و مدیریتی در شکل‌گیری وضعیت کنونی نقش داشته‌اند. بررسی‌های جدید نیز تأکید می‌کنند که شوری ثانویه در اراضی آبیاری‌شده معمولاً نتیجه برهم‌کنش کیفیت آب، حجم آب ورودی، زهکشی، سطح

آب زیرزمینی و شرایط اقلیمی است (Mohanavelu et al., 2021).

در مقابل، رودخانه کارون مهم‌ترین عامل طبیعی بهبود زهکشی در بخش غربی منطقه به‌شمار می‌رود. در مسیرهای **A**، **B** و **C**، با نزدیک شدن به رودخانه، عموماً سطح آب زیرزمینی پایین‌تر و شوری خاک و آب زیرزمینی کمتر شده است. این الگو را می‌توان ناشی از نقش رودخانه در ایجاد گرادیان هیدرولیکی و تسهیل تخلیه آب زیرزمینی و زه‌آب اراضی مجاور دانست. به‌عبارت دیگر، نزدیکی به رودخانه در این منطقه تنها یک عامل جغرافیایی نیست، بلکه یک عامل مؤثر در تنظیم وضعیت هیدرولوژیکی دشت محسوب می‌شود. در نتیجه، با فاصله گرفتن از رودخانه و کاهش کارایی زهکشی، احتمال تجمع آب و نمک افزایش می‌یابد. اهمیت چنین شرایطی در دشت‌های کم‌شیب و مسطح بیشتر است، زیرا در این محیط‌ها تخلیه طبیعی آب به کندی صورت می‌گیرد و هرگونه اختلال در مسیرهای زهکشی می‌تواند موجب افزایش شوری شود (Stavi et al., 2021).

باوجوداین، رابطه بین شوری خاک و آب زیرزمینی در تمام نقاط منطقه یکسان نبود. اختلاف قابل توجه بین شوری آب زیرزمینی و شوری خاک در برخی نقاط نشان می‌دهد که عمق آب زیرزمینی به‌تنهایی تعیین‌کننده شوری سطحی نیست. بافت خاک، مطبق بودن خاک آبرفتی، وجود لایه‌های شنی، شدت آبشویی، پوشش گیاهی، آبیاری و زهکشی می‌توانند انتقال آب و نمک بین آب زیرزمینی و سطح خاک را کنترل کنند. در مسیر **D** این مسئله به‌وضوح مشاهده شد؛ وجود لایه‌های شنی در اعماق مختلف، همراه با تفاوت کاربری اراضی و شرایط زهکشی، باعث ایجاد نوسانات شدید در شوری و کاهش قدرت توضیح‌دهندگی شوری آب زیرزمینی نسبت به شوری سطحی شد. بنابراین، در چنین شرایطی انتظار یک رابطه یکنواخت و خطی بین این دو متغیر منطقی نیست.

بافت خاک و خیز موئینگی نیز سازوکار مهم دیگری برای تبیین این الگو است. در خاک‌های سبک و شنی، اندازه بزرگ‌تر منافذ و هدایت هیدرولیکی بیشتر موجب شده است که آب سریع‌تر به سمت پایین حرکت کند و پیوستگی جریان موئینگی به سطح کاهش یابد؛ در نتیجه، احتمال تجمع نمک در سطح کمتر گردد. در مقابل، در خاک‌های با بافت متوسط و سیلت‌دار، ظرفیت انتقال آب از طریق موئینگی بیشتر بوده و در صورت وجود آب زیرزمینی کم‌عمق و شور، شرایط برای انتقال نمک به لایه‌های سطحی فراهم شده است. وجود بافت‌های سبک در برخی از مناطق مورد مطالعه سبب کاهش خیزموییینگی و در نتیجه کاهش شوری سطحی شده است. ماسه مانع از خیزموییینگی و حرکت رو به بالای آب و در نتیجه شوری خاک می گردد (Jorenush and Sepaskhah, 2003; Ejrami et al., 2023). بیشترین خیزموییینگی مربوط به بافت‌های متوسط و خاک‌های با میزان زیاد سیلت است (Kovda, 1968). مطالعات جدید نیز در دشت‌های خشک و مسطح، ارتباط بین سطح ایستابی کم‌عمق، جریان موئینگی و تجمع نمک در سطح خاک را به‌عنوان یکی از سازوکارهای اصلی شوری ثانویه معرفی کرده‌اند (Stavi et al., 2021). بنابراین، مشاهده رابطه نسبتاً قوی بین شوری آب زیرزمینی و شوری خاک در مسیرهای**A** ، **B**، **C** و **E** را می‌توان حاصل فراهم‌بودن همزمان دو شرط دانست: وجود آب زیرزمینی شور در عمق نسبتاً کم و وجود خاکی که امکان انتقال موئینگی آب را فراهم کند. هرگاه یکی از این دو عامل تغییر نموده، شدت رابطه نیز کاهش یافته است. به همین دلیل، مسیر **D** که از نظر بافت، کاربری و وضعیت زهکشی ناهمگن‌تر بود، ضریب تعیین پایین‌تری نسبت به سایر مسیرها نشان داد.

از سوی دیگر، کاهش پوشش گیاهی و تشدید شوری در منطقه را باید در قالب یک بازخورد مثبت شوری–پوشش گیاهی–تبخیر تفسیر کرد. افزایش شوری موجب کاهش رشد بسیاری از گیاهان، کاهش تراکم پوشش و

در نهایت برهنه‌شدن سطح خاک می‌شود. کاهش پوشش گیاهی نیز با کاهش مصرف آب توسط گیاه و افزایش سطح در معرض تبخیر، به تمرکز بیشتر نمک در سطح خاک کمک نموده است. در نتیجه، شوری موجب کاهش پوشش گیاهی و کاهش پوشش گیاهی، نیز در شرایط مناسب، به تشدید شوری کمک نموده است. این بازخورد به‌ویژه در مناطق گرم و خشک که تبخیر بالقوه زیاد است، اهمیت بیشتری دارد. مطالعات مروری جدید نیز کاهش تولید گیاهی، تخریب کیفیت خاک و کاهش کارایی اراضی را از پیامدهای اصلی شوری شدید می‌دانند (Mohanavelu et al., 2021).

در این منطقه، کاهش آبشویی طبیعی دشت نیز احتمالاً در تشدید وضعیت کنونی مؤثر بوده است. دشت مورد مطالعه از نظر ژئومورفولوژیک یک دشت آبرفتی سیلابی است و جریان‌های سیلابی گذشته نه‌تنها در شکل‌گیری رسوبات آن نقش داشته‌اند، بلکه می‌توانستند در دوره‌های مناسب موجب شست‌وشوی بخشی از املاح خاک شوند. تغییر رژیم جریان رودخانه، کاهش رخداد سیلاب و محدودشدن ورود آب به دشت با احداث دیواره‌های سیل‌بند در حاشیه رودخانه، همراه با دوره‌های خشکسالی، تراز آب و نمک را به سمت افزایش شوری تغییر داده است.

مقایسه وضعیت کنونی با داده‌های تاریخی مورد اشاره در مطالعه نیز از تغییر بلندمدت رژیم آب زیرزمینی در منطقه حکایت دارد (۱۵). بر اساس داده‌های قبلی (۱۵)، سطح آب زیرزمینی در گذشته در برخی بخش‌های دشت به سطح زمین نزدیک‌تر بوده، در حالی که در زمان مطالعه عمق آن بیشتر شده است؛ همزمان شوری آب زیرزمینی افزایش یافته است. این همزمانی نشان می‌دهد که عمق آب زیرزمینی و شوری آن، دو متغیر مستقل از یکدیگر نیستند و تغییر در تغذیه، زهکشی، تبخیر و برداشت آب می‌تواند به تغییر همزمان هر دو منجر شود. با این حال، باید توجه داشت که کاهش سطح آب زیرزمینی الزاماً به معنی کاهش شوری نیست؛ در برخی شرایط، کاهش تغذیه و افزایش تبخیر می‌تواند حجم آب زیرزمینی را کاهش ولی غلظت نمک آن را افزایش دهد. بنابراین، ارزیابی وضعیت دشت باید بر اساس تراز همزمان آب و نمک انجام شود.

یکی از یافته‌های مهم این مطالعه، نقش آبیاری بدون زهکشی مؤثر در تشدید شوری است. ورود حجم زیادی از آب به زمین‌های کشاورزی، به‌خصوص در سیستم‌هایی با نیاز آبی بالا، در صورت نبود مسیر مناسب برای خروج زه‌آب، می‌تواند سطح آب زیرزمینی را بالا آورده و شرایط را برای شوری ثانویه فراهم کند. این مسئله در نقاطی از مسیرهای **B**، **C**، **D** و **E** که همزمان تحت تأثیر آبیاری و زهکشی نامناسب قرار داشتند، مشاهده شد. بنابراین، آبیاری به‌تنهایی یک عامل کاهش یا افزایش شوری نیست؛ اثر نهایی آن به نسبت آب ورودی، آب مصرف‌شده توسط گیاه، آب خروجی از زهکش و میزان نمک واردشده به سیستم بستگی دارد. مرورهای علمی جدید نیز تأکید دارند که آبیاری بدون زهکشی کافی یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد شوری و آب‌ماندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Ritzema, 2016; Mohanavelu et al., 2021; Stavi et al., 2021; Singh, 2021).

در همین ارتباط، وضعیت مسیر **E** اهمیت ویژه‌ای دارد. بیشترین میانگین شوری در این مسیر ثبت شد و این مسیر تحت تأثیر همزمان محدودیت زهکشی، فعالیت‌های کشاورزی، اراضی بایر و نزدیکی به شبکه زهکشی نیشکر قرار دارد. در برخی نقاط، آبیاری و زهکشی مناسب باعث کاهش شوری شده، در حالی که در نقاط دیگر، نبود امکان تخلیه زه‌آب موجب افزایش سطح ایستابی و تجمع نمک شده است. این تضاد نشان می‌دهد که کاربری کشاورزی به‌خودی‌خود عامل کاهش شوری نیست بلکه نتیجه آن به نحوه مدیریت آب و زهکشی بستگی دارد. در بخش انتهایی مسیر **E**، علی‌رغم پایین‌تر بودن سطح ایستابی، نشان می‌دهد که شوری سطحی همیشه نتیجه مستقیم آب زیرزمینی کم‌عمق

نیست. در این قسمت، عدم زهکشی، سابقه کاربری اراضی، رهاشدگی زمین و شرایط سطحی موجب تبخیر آب موجود و تمرکز نمک در سطح شده است. این یافته بار دیگر بر اهمیت تفکیک مکانی فرآیندهای شوری تأکید می‌کند به‌عبارت دیگر، یک مدل واحد نمی‌تواند الزاماً رفتار شوری تمام نقاط منطقه را توضیح دهد.

از نظر آماری نیز نتایج نشان داد که میان شوری چهار عمق خاک همبستگی مثبت و بسیار بالایی وجود دارد، در حالی که همبستگی خطی بین شوری آب زیرزمینی و شوری هر یک از اعماق خاک در کل داده‌ها ضعیف و غیرمعنی‌دار بود. این مسئله در نگاه اول با ضرایب تعیین بالای حاصل از رگرسیون در برخی مسیرها متناقض به نظر می‌رسد، اما در واقع این دو تحلیل سؤال آماری یکسانی را بررسی نمی‌کنند. ضریب پیرسون در جدول ٤ رابطه خطی تجمعی در کل منطقه را ارزیابی می‌کند، در حالی که رگرسیون‌های مسیرها روابط درون هر مسیر را بررسی کرده‌اند. تفاوت شرایط بین مسیرها می‌تواند باعث شود رابطه‌ای که در سطح محلی قوی است، پس از ترکیب کل داده‌ها تضعیف شود. بنابراین، ادعای وجود رابطه قوی بین آب زیرزمینی و شوری خاک باید به‌صورت محدود و در سطح مسیرهای مربوطه بیان شود و نباید از آن نتیجه گرفت که در کل منطقه یک رابطه خطی قوی وجود دارد. همچنین، غیرخطی بودن رابطه به‌تنهایی دلیل کافی برای توضیح ضریب همبستگی پایین نیست. برای اثبات وجود رابطه غیرخطی لازم است معادله مدل، ضریب تعیین، معنی‌داری مدل و در صورت امکان فاصله اطمینان ضرایب گزارش شود. از آنجا که داده‌های این پژوهش ساختار سلسله‌مراتبی دارند، یعنی چهار عمق در یک نقطه و نقاط متعدد در یک مسیر قرار گرفته‌اند، استفاده از مدل‌های آمیخته یا مدل‌های رگرسیون چندسطحی در تحلیل‌های تکمیلی می‌تواند تصویر دقیق‌تری از اثر واقعی شوری آب زیرزمینی، عمق آب، بافت و مسیر ارائه کند. این مسئله برای جلوگیری از شبه‌تکرار و تفکیک اثرات محلی از اثرات منطقه‌ای اهمیت دارد.

در مجموع، شواهد این مطالعه نشان می‌دهد که شوری کنونی منطقه حاصل برهم‌کنش فرآیندهای طبیعی و انسان‌زاد است، اما شدت و الگوی مکانی آن به‌شدت تحت تأثیر تغییرات انسانی در رژیم آب و زهکشی قرار گرفته است. به‌ویژه، محدودشدن خروج زه‌آب اراضی کشاورزی، عملکرد نامناسب برخی زهکش‌ها، ورود یا تراوش آب شور از شبکه زهکشی نیشکر، آبیاری بدون زهکشی کافی، تغییر کاربری اراضی و کاهش آبشویی طبیعی، مجموعه‌ای از عوامل هستند که چرخه تجمع نمک را تقویت نموده است. در مقابل، اراضی مجاور رودخانه کارون به‌عنوان یک زهکش‌های مؤثر و همچنین نقاط دارای خاک سبک‌تر و قابلیت آبشویی بیشتر، شرایط مناسب‌تری برای تخلیه آب و نمک فراهم کرده‌اند.

اهمیت این مسئله صرفاً به کاهش باروری خاک محدود نمی‌شود. ادامه تجمع نمک می‌تواند موجب کاهش تراکم و تنوع پوشش گیاهی، افزایش پوکی سطح خاک، کاهش قابلیت کشاورزی و افزایش حساسیت سطح زمین به فرسایش بادی شود. در یک دشت مسطح و خشک مانند منطقه مورد مطالعه، تخریب پوشش گیاهی و باقی‌ماندن سطوح شور و بدون پوشش می‌تواند خطر فرسایش بادی و تولید گردوغبار را افزایش دهد. بنابراین، شوری خاک را باید علاوه بر یک مسئله کشاورزی، یک مسئله هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی منطقه‌ای نیز تلقی کرد.

در نهایت، می‌توان گفت که الگوی شوری منطقه جنوب‌شرق اهواز یک الگوی هیدرولوژیکی– مدیریتی است که توسط ویژگی‌های خاک و اقلیم تعدیل می‌شود. آب زیرزمینی شور در صورت قرارگیری در عمق کم، منبع بالقوه مهم نمک برای پروفیل خاک است؛ اما تبدیل این پتانسیل به شوری سطحی شدید به وجود شرایطی مانند خیز موئینگی، تبخیر بالا و زهکشی ناکافی وابسته است. در نتیجه، شوری آب زیرزمینی، سطح آب

زیرزمینی، بافت خاک و زهکشی باید به‌صورت یک سیستم به‌هم‌پیوسته مورد ارزیابی قرار گیرند. این برداشت با چارچوب‌های جدید مطالعات شوری جهانی همخوان است که شوری ثانویه را حاصل برهم‌کنش فرآیندهای هیدرولوژیکی، اقلیمی و مدیریتی می‌دانند (Ritzema, 2016).

نتیجه‌گیری کلی

بیشترین شوری متعلق به شرق، قسمتی از شمال و جنوب منطقه بوده و کمترین آن مربوط به قسمت غرب منطقه می‌باشد که نشان از اثر مهم زهکشی و نقش رودخانه کارون بعنوان زهکش دشت در کاهش شوری خاک دارد. زهکشی یا تخلیه زه‌آب در اثر دو عامل طبیعی و انسانی کاهش یا توسعه یافته بود. ارتباط شدیدی بین میزان شوری خاک و سطح آب زیرزمینی ملاحظه شد که در مسیرهای مختلف متفاوت بود. بالا رفتن سطح آب زیرزمینی، سبب تشدید شوری خاک های منطقه شده است. یکی از عوامل اصلی تشدید شوری، فعالیت‌های انسانی است که با احداث زهکش عظیم واحدهای نیشکری پدید آمده است. در مقابل، رودخانه کارون با بهبود جریان زهکشی، سبب کاهش شوری در اراضی مجاور خود شده است. شور شدن اراضی منطقه در اثر فعالیت‌های انسان تشدید شده است. احداث دیواره‌هایی در اطراف رودخانه کارون که مانع از جریان های سیلابی به اراضی شده است از یک سو و زه جانبی آب کانال زهکشی به اراضی اطراف و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی از سوی دیگر، سبب تشدید شوری خاک‌های منطقه شده و به‌این‌ترتیب، به کشاورزی در این بخش از دشت صدمه جدی وارد نموده است. همچنین تشدید شوری خاک و آب زیرزمینی سبب حذف پوشش گیاهی و یا کاهش تراکم آنها در این اراضی شده است. این رخداد سبب تشدید فرسایش بادی و ایجاد پدید گرد و غبار در منطقه به خصوص طی دو دهه اخیر شده است. به‌طوری‌که، این منطقه را که در جنوب شرق اهواز قرار دارد به یکی از کانونهای فعال گرد و غبار تبدیل کرده است. پیشنهاد می‌شود که شور شدن اراضی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطراتی که اراضی منطقه را تهدید مینماید، مورد توجه جدی و پایش دایمی قرار گیرد تا از یک سو مانع از تخریب اراضی شده و از سوی دیگر با کاهش آن، تهدیدهای دیگری چون گرد و غبار را نیز بتوان کاهش داده و کنترل نمود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچگونه تضاد منافعی با شـخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

REFERENCES

Anonymous. (2023). *Meteorological report of the sugarcane research center*. Sugarcane development company and by products. Khuzestan, Iran.

Ayers, R. S. & Westcot, D. W. (1976). *Water quality for agriculture*. FAO. No. 29.

Darvishzadeh, A. (2003). *Geology of Iran*. Amir Kabir Publications. (In Persian)

Ejrami, S., Khalilimoghadam, B., Sheini Dashtegol, A., & Jafari, S. (2023). Capillary rise simulation using UPFLOW model in sugarcane Agro-industries of Khuzestan. *Desert*, *28*(2), 217-229. https://doi.org/10.22059/jdesert.2023.95507.

Flagella, Z., Cantore, V., Giuliani, M. M., Tarantino, E., & De Caro, A. (2002). Crop salt tolerance: Physiological, yield and quality aspects. *Recent Research Development Plant Biology*, *2*, 155-186.

Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*.Part1, 2nded: Agronomy Monograph. Vol.9, SSSA, Madison, WI, pp. 377–381.

Hopmans, J. W., Qureshi, A. S., Kisekka, I., Munns, R., Grattan, S. R., Rengasamy, P., ... & Taleisnik, E. (2021). Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. *Advances in agronomy*, *169*, 1-191. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.03.001.

Jafari, S. (2014). Identify and classification of soils diversity in Khuzestan province. Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. Research project No. 911-81 (In Persian).

Jafari, S. (2018). Effects of dam construction and the Karoon River's change of hydrology regime on soil salinity and dust storms of Khuzestan plain. *Irrigation Sciences and Engineering*. *43*(1):157-172. (In Persian)

Jorenush, M. H & Sepaskhah. A. R. (2003). Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions, *Agricultural Water Management*, *61*(2): 125-141, ISSN 0378-3774, https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00176-2

Kovda, A. (1968). *Irrigation, drainage and salinity: an international source book*. FAO/UNESCO. No. 113.

Mohanavelu, A., Naganna, S. R., & Al-Ansari, N. (2021). Irrigation Induced Salinity and Sodicity Hazards on Soil and Groundwater: An Overview of Its Causes, Impacts and Mitigation Strategies. *Agriculture*, *11*(10), 983. https://doi.org/10.3390/agriculture11100983.

Qureshi A. S., Qadir, M. Heydari, N. Turral H. & Javadi. A. (2007). A review of management strategies for salt-prone land and water resources in Iran. Colombus, Sri Lanka: international water management institute. 30p. (IWMI working paper 125).

Rangzan, N., & Jafari, S. (2017). The effect of soil forming factors on the amount and diversity of clay minerals in the soils and deposits originated from Karoon River in Khuzestan province. Ramin Agriculture & Natural Resources University of Khuzestan. Research project No. 33/95/106. (In Persian)

Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, *5*, 417-435.

Ritzema, H. P. (2016). Drain for Gain: Managing salinity in irrigated lands-A review. *Agricultural Water Management*, *176*:18-28, ISSN 0378-3774, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.014.

Singh, A. (2021). Soil salinization management for sustainable development: A review. *Journal of environmental management*, *277*, 111383. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111383

Southwest Geological authority. (2018). *Pedology of dust source areas in South Khuzestan*. National dust control project.

Stavi, I., Thevs, N., & Priori, S. (2021). Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, 712831. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831

UNEP/UN. (2001). The Mesopotamian marshlands. Demise of an ecosystem. Division of early warning and assessment. United Nations environment program. Nairobi, Kenya. TR01-3.