

Research Paper

Meta-analysis of the effect of subsoiling on the yield of wheat, sugar beet, corn and cotton in Iran

Heidari Ahmad

Department of Agricultural Engineering Research, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension organization (AREEO), Hamadan, Iran.

Article history

Submitted: 2024/10/26

Revised: 2024/11/20

Accepted: 2025/01/27

Published
online: 2025/06/21

Keywords:

Deep ploughing
Deep tillage
Rainfed and irrigated
conditions
Soil compaction
Systematic review

*Corresponding author
email:

heidari299@gmail.com

ORCID: 

0000-0003-1621-4671



Abstract

Soil compaction is a negative factor for plant growth. Subsoiling is a practice that improves the physical, chemical, and biological properties of soil below the conventional tillage depth, leading to increased crop yield and improved water and nutrient use efficiency. The objective of this study was to evaluate the effect of subsoiling on the yield of wheat (irrigated and rainfed), sugar beet, grain maize, and cotton by reviewing domestic studies and applying a meta-analysis approach. To this end, articles, research reports, and student theses published over the past three decades were reviewed using keywords related to subsoiling in the aforementioned crops. After quality screening, 18 studies were included in the meta-analysis using a random-effects model, comprising comparisons of subsoiling versus no subsoiling for wheat (13 studies under irrigated conditions and 5 under rainfed conditions), 8 studies for sugar beet, 4 studies for grain maize, and 5 studies for cotton. The data required for the meta-analysis included the treatment mean ($\bar{X}$), standard deviation ($SD_{\bar{X}}$), and number of replications or sample size (n) in the experimental design. In data analysis, the standardized mean difference (SMD), one of the key effect size indices, was used to compare yield between the control treatment (no subsoiling) and the experimental treatment (with subsoiling). Based on the effect size values for irrigated wheat (SMD = +0.72), rainfed wheat (SMD = +1.14), sugar beet (SMD = +0.41), grain maize (SMD = +0.86), and cotton (SMD = +1.15), it can be concluded that subsoiling had a positive and significant effect on the yield of wheat (both irrigated and rainfed) and cotton, whereas its effect on sugar beet and grain maize was positive but not statistically significant. Compared with no subsoiling, subsoiling increased the yield of irrigated wheat, rainfed wheat, sugar beet, grain maize, and cotton by 13.27%, 16.02%, 3.74%, 5.84%, and 14.00%, respectively. Therefore, subsoiling is recommended to alleviate soil compaction and improve the yield of the aforementioned crops, particularly wheat and cotton.

How to cite this paper:

Heidari, A., (2025). Meta-analysis of the effect of subsoiling on the yield of wheat, sugar beet, corn and cotton in Iran. Modeling and optimization of the production process of pepper tablets. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*. 35: 33-50. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.14975.728> (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrekord University](https://www.shahrekord.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.14975.728>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Agriculture is facing new challenges due to climate change, and food shortages are imminent. As a result, new sources of food and water will be needed. In agricultural fields, the subsoil (the layer below the plowed soil) can store approximately 50% of the total nitrogen and 25-70% of the total phosphorus. It can also retain water even in dry conditions. However, the availability of these resources varies between crops. Soil compaction is a negative factor for plant growth. To remove the dense soil layer, subsoiling has been introduced, which reduces soil resistance and facilitates deeper root penetration. Thus, plants have access to subsoil resources. Subsoiling improves the physical properties of the soil (reducing soil resistance, reducing soil bulk density, and increasing water infiltration into the soil) without turning the soil over. Subsoiling is a field measure to improve the physical, chemical, and biological properties of the soil below the common plowing depth to increase crop yields, water, and nutrient use efficiency. Subsoiling requires a significant amount of fuel and energy, as well as the use of powerful tractors. Therefore, before doing so, it is necessary to ensure that a hard layer (cone index greater than 2 MPa) is present, which reduces performance. Otherwise, the only result of subsoiling will be increased fuel consumption, wear and tear on the tractor and equipment, and destruction of the soil structure.

Material and Methods

The purpose of this research is to investigate the effect of subsoiling on the yield of wheat, sugar beet, corn, and cotton, using internal studies and research, and applying the meta-analysis method. For this purpose, articles, research reports, and student theses from the last thirty years were reviewed using keywords related to subsoiling in the mentioned products. Finally, after quality control, 18 studies in wheat, 8 studies in sugar beet, 4 studies in grain corn, 5 studies in

cotton were entered into the meta-analysis process to compare subsoiling with using a random model. The data required for meta-analysis are the treatment mean ($\bar{X}$), standard deviation ($SD_{\bar{X}}$), and the number of replicates or sample size (n) in the experimental design. In data analysis, the standardized mean difference parameter, which is an important factor of effect size, was used to compare the performance between the control treatment (without subsoiling) and the experimental treatment (with subsoiling).

Results and Discussion

Considering the total SMD value (0.84+), it can be concluded that subsoiling had a positive and significant effect on wheat yield. Subsoiling significantly increased wheat yield in both irrigated conditions (SMD = 0.72+) and dryland conditions (SMD = 1.14+). The average total yield of wheat in the no-subsoiling and subsoiling methods was 4191.6 and 4707.4 kg/ha, respectively. After weighing each yield, the average weighted yield of the no-subsoiling and subsoiling methods was 207.1 and 234.6, respectively. Subsoiling in irrigated conditions increased wheat yield by 13.27% compared to no subsoiling. Subsoiling in dryland conditions also increased wheat yield by 16.02% compared to no subsoiling. Considering the effect sizes of sugar beet (SMD = +0.41), grain corn (SMD = +0.86), and cotton (SMD = +1.15), it can be concluded that subsoiling had a positive and insignificant effect on sugar beet yield, a positive and insignificant effect on grain corn yield, and a positive and significant effect on cotton yield. Subsoiling increased sugar beet yield by 3.74% compared to the no-subsoiling method. The average total sugar beet yield in the no-subsoiling and subsoiling methods was 55868 and 59067 kg/ha, respectively. After weighing each yield, the average weighted yield of the no-subsoiling and subsoiling methods was 7126 and 7393, respectively. Also, the subsoiling in the cotton crop increased its yield by 14%. The average cotton yields for the no-subsoiling and subsoiling methods are 2457.1 and 2806.8

kg/ha, respectively. After weighing the yields, the average weighted yields of the no-subsoiling and subsoiling methods were 497.9 and 567.6, respectively. Subsoiling increased the yield of grain corn by 5.84% compared to the no-subsoiling method. The average total yield of grain corn in the no subsoiling and subsoiling methods was 9850.5 and 10392.3 kg/ha, respectively. After weighing each yield, the average weighted yields for the no-subsoiling and subsoiling methods were 2474.9 and 2619.5, respectively. The probability level values in the Begg and Egger methods (for estimating publication bias) for wheat studies were 0.76 and 0.41, respectively. This suggests that publication bias does not exist in wheat crop research. Also, the probability level values in the Begg and Egger methods in sugar beet studies were 0.09 and 0.17, in corn studies 1 and 0.81, and in cotton studies 0.14 and 0.42, respectively, which can be concluded that publication bias (except in sugar beet) does not exist in the research on the mentioned crops.

Conclusions

The effect of subsoiling on wheat and cotton yield was positive and significant, whereas on sugar beet and grain corn yield, it was positive but insignificant. The positive effect of subsoiling on wheat, cotton, sugar beet and corn yields can be attributed to improving soil physical properties such as reducing soil resistance, reducing soil bulk density, increasing water penetration in the soil, increasing soil moisture (in dryland conditions), and expanding the depth of root penetration in the soil, which provides conditions for better plant growth. The greatest effect of subsoiling on wheat yield was in soils with silty clay loam texture. Subsoiling increased the yields of irrigated wheat, rainfed wheat, sugar beet, grain corn,

and cotton by 13.27%, 16.02%, 3.74%, 5.84%, and 14.00%, respectively, compared to no subsoiling. Therefore, it is recommended to subsoil in the presence of soil compaction, especially in crops such as wheat and cotton. It is also recommended that further studies be conducted on the impact of subsoiling on various crops.

Author Contributions

Heidari Ahmad extracted and analyzed the data and wrote the manuscript.

Data Availability Statement

This section details where supporting data can be found, typically including links to publicly archived datasets. If no data is reported, "Not applicable" should be stated.

Acknowledgements

We would like to thank the Hamedan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center for providing the necessary facilities to conduct this research.

Ethical Considerations

This section states ethical approval details (e.g., Ethics Committee, ethical code) and confirms adherence to ethical standards, including avoidance of data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Funding Statement

The author(s) received no specific funding for this research



فرا تحلیل اثر زیر شکنی بر عملکرد گندم، چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه در ایران

احمد حیدری

استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵	تراکم خاک عاملی منفی برای رشد گیاهان است. زیر شکنی روشی است که خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را در زیر عمق شخم معمول خاک بهبود بخشیده و باعث افزایش عملکرد محصول و بهبود بهره‌وری مصرف آب و مواد غذایی می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی اثر زیر شکنی بر عملکرد گندم (آبی و دیم)، چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه با استفاده از مطالعات و پژوهش‌های داخلی و به‌کارگیری روش فرا تحلیل است. بدین منظور مقاله‌ها، گزارش‌های پژوهشی و پایان‌نامه‌های دانشجویی در سی سال اخیر با استفاده از واژه‌های کلیدی مرتبط با زیر شکنی در محصولات ذکر شده مرور شد. پس از پایش کیفی، ۱۸ مطالعه برای مقایسه زیر شکنی با بدون زیر شکنی در گندم (۱۳ مطالعه در شرایط آبی و ۵ مطالعه در شرایط دیم)، ۸ مطالعه در چغندر قند، ۴ مطالعه در ذرت دانه‌ای، و ۵ مطالعه در پنبه با استفاده از مدل تصادفی وارد فرایند فرا تحلیل شدند. داده‌های مورد نیاز برای فرا تحلیل عبارتند از میانگین تیمار ($\bar{X}$)، انحراف معیار استاندارد ($SD_{\bar{X}}$) و تعداد تکرار یا حجم نمونه (n) در طرح آزمایشی. در تجزیه تحلیل داده‌ها از عامل تفاضل میانگین استاندارد شده (SMD)، که از شاخص‌های مهم اندازه اثر است، در عملکرد بین تیمار پایش (بدون زیر شکنی) و آزمایش (با زیر شکنی) استفاده شد. با توجه به مقدار اندازه اثر در گندم آبی ($SMD = +0.72$)، گندم دیم ($SMD = +1.14$)، چغندر قند ($SMD = +0.41$)، ذرت دانه‌ای ($SMD = +0.86$) و پنبه ($SMD = +1.15$) می‌توان نتیجه گرفت که زیر شکنی تأثیر مثبت و معنی‌دار بر عملکرد گندم (آبی و دیم) و پنبه داشته است. ولیکن اثر زیر شکنی بر چغندر قند و ذرت دانه‌ای مثبت و غیر معنی‌دار بوده است. زیر شکنی نسبت به بدون زیر شکنی عملکرد گندم آبی، گندم دیم، چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه را به ترتیب ۱۳/۲۷، ۱۶/۰۲، ۳/۷۴، ۵/۸۴ و ۱۴/۰۰ درصد افزایش داد. بنابراین برای حذف فشردگی خاک و بهبود عملکرد محصولات مذکور به خصوص گندم و پنبه توصیه به زیر شکنی می‌شود.
واژه‌های کلیدی: خاک‌ورزی عمیق شرایط دیم و آبی شخم عمیق فشردگی خاک	
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: heidari299@gmail.com	
ORCID:  ۰۰۰۰-۰۰۰۳-۱۶۲۱-۴۶۷۱	
	

نحوه استناد به این مقاله:

حیدری، ا. (۱۴۰۴). فرا تحلیل اثر زیر شکنی بر عملکرد گندم، چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه در ایران. نشریه پژوهش‌های مکانیک

ماشین‌های کشاورزی، ۳۵: ۳۳-۵۰. شناسه دیجیتال: <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.14975.728>

مقدمه

کشاورزی به دلیل تغییرات آب و هوایی با چالش‌های جدیدی روبه‌روست و به زودی کمبود عرضه مواد غذایی اتفاق می‌افتد (Cooper *et al.*, 2011). در نتیجه به منابع جدید غذایی و آب نیاز خواهد بود. در زمین‌های کشاورزی، لایه زیرین خاک (لایه زیر خاک شخم خورده) می‌تواند تقریباً ۵۰ درصد از نیتروژن کل و ۷۰-۲۵ درصد از فسفر کل را ذخیره کند (Kautz *et al.*, 2013) و همچنین می‌تواند آب را حتی در شرایط خشکی حفظ کند (Krikegaard *et al.*, 2007). به هر حال دسترسی به این منابع در محصولات مختلف متفاوت است.

مقاومت زیاد خاک، توسعه ریشه و در نتیجه دسترسی گیاه به منابع خاک زیرین را محدود می‌کند (Bengough *et al.*, 2011). فشردگی بیش از حد خاک می‌تواند رشد محصول را کاهش دهد، اما تراکم خاک می‌تواند اثرات مثبتی نیز داشته باشد به عنوان مثال افزایش هدایت آبی غیر اشباع خاک و در نتیجه جریان یافتن مویرگی آب و مواد غذایی به سمت بذر و گیاه. بنابراین ممکن است فشردگی بهینه برای رشد هر گیاه وجود داشته باشد (Arvidsson *et al.*, 2012). توانایی توسعه ریشه در خاک‌های با مقاومت زیاد در بین انواع گیاهان متفاوت است. گیاهان یک‌ساله دو لپه‌ای که ریشه‌های ضخیم‌تر دارند نسبت به گیاهان یک‌ساله تک لپه‌ای توانایی بیش‌تری در گسترش ریشه در خاک‌های با مقاومت زیاد دارند (Clark & Barraclough, 1999). به علاوه، گیاهان دو لپه‌ای می‌توانند شبکه خلل و فرج زیستی خاک را بهبود بخشند و مسیرهایی به سمت لایه زیرین خاک برای محصولات بعدی ایجاد کنند (Kautz *et al.*, 2013). اما، امروزه غلات و دیگر گیاهان با ریشه‌های نازک و فیبری بر سامانه کشت سالیانه به‌طور وسیعی غالب شده‌اند.

برای حذف لایه متراکم خاک، زیرشکنی معرفی شده است که باعث کاهش مقاومت خاک می‌شود و نفوذ عمیق‌تر ریشه را تسهیل می‌کند. بنابراین دسترسی گیاه به منابع زیرین خاک فراهم می‌شود. زیرشکنی بدون برگرداندن خاک، باعث بهبود خواص فیزیکی خاک (کاهش مقاومت خاک، کاهش چگالی ظاهری خاک و افزایش نفوذ آب به خاک) می‌شود.

در دهه ۱۹۷۰ میلادی، محبوبیت زیرشکنی در بین جامعه پژوهشی و نیز جامعه کشاورزان کاهش یافت. این امر احتمالاً به دلیل پاسخ ناسازگار عملکرد به زیرشکنی بود که

نتوانست هزینه‌های زیاد آن را جبران کند. نگرانی در مورد اثرهای منفی خاک‌ورزی بر موجودات زنده خاک (Kladivko, 2001)، مقاومت عمومی را در خصوص استفاده از خاک‌ورزی، به‌خصوص در بین کشاورزانی که به تولید محصولات ارگانیک می‌پردازند، افزایش داد. تغییر اقلیم باعث شده است تا خشک-سالی‌ها در مناطق مختلف دنیا افزایش پیدا کند (Olesen *et al.*, 2011; Challinor *et al.*, 2014). زیرشکنی ممکن است ابزاری باشد که انعطاف‌پذیری گیاهان را به تغییرات آب و هوا بالا ببرد و کاهش عملکرد در اثر خشک‌سالی را کم کند. جدا از تغییرات اقلیمی، محدودیت دسترسی به کودها نیز تهدیدی قریب الوقوع برای تولید محصولات کشاورزی است (Cooper *et al.*, 2011). استفاده از مواد مغذی خاک، عملکرد محصول را در آزمایش‌های بدون استفاده از کود حفظ می‌کند (Garz *et al.*, 2000). زیرشکنی باید دسترسی گیاه به منابع خاک زیرین را افزایش بدهد. به هر حال بررسی جامع و قابل درکی از تأثیر زیرشکنی بر عملکرد محصول تاکنون ارائه نشده است (Olsson & Cockroft, 2006).

زیرشکنی مستلزم صرف سوخت و انرژی زیاد و به-کارگیری تراکتورهای پر قدرت است. از این رو قبل از آن باید از وجود سخت لایه شدید (شاخص مخروط بیشتر از ۲ مگاپاسگال) که باعث کاهش عملکرد می‌شود مطمئن شد. در غیر این صورت تنها نتیجه حاصل از زیرشکنی، افزایش مصرف سوخت، فرسوده شدن تراکتور و ادوات و تخریب ساختمان خاک خواهد بود (Chaji *et al.*, 2006).

فرا تحلیل امکان تجزیه و تحلیل کمی نتایج آزمایش‌های گزارش شده توسط دیگر نویسندگان را فراهم می‌کند (Ried, 2009; Borenstein *et al.*, 2006). هم‌چنین فراتحلیل قدرت آماری موجود برای آزمایش فرضیه‌ها و تفاوت واکنش‌های تیمارها را در شرایط مختلف محیطی افزایش می‌دهد (Gates, 2009; Borenstein *et al.*, 2002). همه مطالعات برای برآورد کلی اثر تیمار مشارکت دارند؛ اگرچه نتیجه هر مطالعه‌ای به-طور آماری معنی‌دار یا غیر معنی‌دار باشد. داده‌های مطالعاتی که دارای اندازه‌های دقیق بیش‌تری هستند وزن بالاتری می-گیرند بنابراین آن‌ها تأثیر بیش‌تری بر برآورد کل دارند (Gates, 2002). به هر حال فراتحلیل دارای نقاط ضعف بالقوه‌ای مانند سوگرایی انتشار^۱ و سوگرایی‌های دیگری که در مراحل جستجو، انتخاب و ترکیب مطالعات اتفاق می‌افتد است (Egger *et al.*, 1997; Noble, 2006). سوگرایی انتشار تمایل

در تحقیقی با روش فراتحلیل اثر زیرشکنی بر عملکرد محصولات مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که زیرشکنی به طور متوسط عملکرد را ۶ درصد افزایش داده است. این محققان می‌گویند اثر خاک‌ورزی عمیق بر محصولات مختلف متفاوت است. خاک‌ورزی عمیق در خاک‌هایی که دارای لایه محدود کننده توسعه ریشه هستند، عملکرد را حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. خاک‌هایی که سیلت آن‌ها بیش‌تر از ۷۰ درصد است، خاک‌ورزی عمیق دارای خطر بالایی است. به‌طور کلی اثر خاک‌ورزی عمیق با شدت خاک‌ورزی افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که خاک‌ورزی عمیق می‌تواند دسترسی گیاه به مواد غذایی لایه‌هایی پایین خاک را تسهیل کند که نتیجه آن افزایش محصول است اگر مواد غذایی در لایه‌های بالایی خاک محدود باشد. خاک‌ورزی عمیق باید در خاک‌های با ساختمان پایدار و مقدار سیلت کم‌تر از ۷۰ درصد اجرا شود (Schneider et al., 2017).

در پژوهشی با روش فراتحلیل، اثر زیرشکنی فیزیکی، شیمیایی و زیستی در کشاورزی پایدار بررسی شد. نتایج نشان داد که زیرشکنی فیزیکی به طور متوسط عملکرد محصول را حدود ۱۹ درصد افزایش داد. در مقایسه با روش بی‌خاک‌وری، زیرشکنی فیزیکی مقدار کربن آلی خاک در لایه‌های سطحی خاک کاهش داد. نتیجه‌گیری شد که زیرشکنی فیزیکی برای حل مشکل فشردگی خاک نیاز است ولی کافی نیست. زیرشکنی شیمیایی و زیستی همراه با زیرشکنی فیزیکی در افزایش حاصل‌خیزی خاک و بهبود عملکرد محصول در درازمدت مؤثر هستند. بنابراین کشاورزان باید با رویکردهای زیستی، از جمله استفاده از محصولاتی با ریشه عمیق و مخلوط‌سازی بقایا با خاک و روش‌های زیرشکنی شیمیایی شامل استفاده از کودهای حیوانی و آهک خودشان را به روز کنند (Ning et al., 2022).

اثر حذف فشردگی خاک با زیرشکنی بر عملکرد ذرت و سویا در خاک‌های منطقه پامپاس آرژانتین که روش بی‌خاک‌ورزی در آن‌ها اجرا شده بود با روش فراتحلیل مطالعه شد. نتایج نشان داد که زیرشکنی به‌طور معنی‌داری چگالی ظاهری خاک را در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری خاک حدود ۴/۳ درصد کاهش و سرعت نفوذ آب به خاک را افزایش داد. هم‌چنین زیرشکنی شاخص مخروط خاک را در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری به‌طور متوسط ۴۴ درصد کاهش داد. زیرشکنی عملکرد ذرت را حدود ۶ درصد افزایش داد (Peralta et al., 2021).

گروهی از محققین، داورها و سردبیران برای ارسال و پذیرش دست‌نوشته‌ها بر اساس یافته‌های تحقیق است.

Heidari (2022) با روش فراتحلیل اثر زیرشکنی را بر عملکرد سیب‌زمینی بررسی کرد. نتایج نشان داد که با توجه به مقدار اندازه اثر کل ($SMD=+0/37$)، زیرشکنی اثر مثبت بر افزایش عملکرد سیب‌زمینی داشته و در کل باعث افزایش ۳/۹۲ درصد در عملکرد سیب‌زمینی شده است. زیرشکنی رایج، زیرشکنی ردیفی قبل از کاشت و زیرشکنی ردیفی بعد از کاشت عملکرد سیب‌زمینی را به ترتیب ۱/۲۳، ۵/۱۸ و ۴/۷۵ درصد نسبت به تیمار پایش (بدون زیرشکنی) افزایش داده است. در مطالعه دیگری با روش فراتحلیل اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر عملکرد سیب‌زمینی بررسی شد. نتایج نشان داد که با توجه به مقدار اندازه اثر ($SMD=+0/07$) روش کم‌خاک‌ورزی اثر مثبت جزئی بر افزایش عملکرد سیب‌زمینی داشته است و در مقایسه با خاک‌ورزی رایج در کل باعث افزایش ۰/۱۳ درصدی عملکرد شده است (Heidari et al., 2022). Heidari (2023) با روش فراتحلیل اثر خاک‌ورزی را بر عملکرد گندم آبی در ایران بررسی کرد. نتایج حاکی از تأثیر منفی روش کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی بر عملکرد گندم آبی بود. روش کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، عملکرد گندم را در مقایسه با خاک‌ورزی رایج به‌ترتیب ۲/۸۷ و ۸/۲ درصد کاهش داد.

در پژوهشی با روش فراتحلیل اثر زیرشکنی بر عملکرد گندم و ذرت در شمال چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش خاک‌ورزی دوار به همراه زیرشکن در مقایسه با خاک‌ورزی دوار عملکرد گندم و ذرت را به ترتیب ۱۰/۱۷ و ۷/۷۸ درصد افزایش داده است. هم‌چنین روش زیرشکن به همراه بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با روش بی‌خاک‌ورزی باعث افزایش عملکرد گندم و ذرت به‌ترتیب به میزان ۸/۷۳ و ۱۱/۵۶ درصد شد (Zheng et al., 2015). Wei et al. (2017) با روش فراتحلیل اثر بی‌خاک‌ورزی و زیرشکنی را بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه در جلگه لائوس بررسی کردند. آنها گزارش کردند در مناطقی با بارندگی ۶۰۰-۵۰۰ میلی‌متر، عملکرد و کارایی مصرف آب گندم با زیرشکنی به ترتیب ۱۴/۵ درصد و ۱۲/۲ درصد افزایش داشته است. هم‌چنین نتایج نشان داد در مناطق مختلف با بارندگی و دمای متفاوت، افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب گندم با زیرشکنی بیش‌تر از بی‌خاک‌ورزی بود.

و ارزیابی دقیقی درباره کیفیت مطالعه مورد استفاده صورت گیرد (Soltani & Soltani, 2014).

در مورد ارزیابی پژوهش‌ها، فرم استخراج داده‌ها تهیه شد و اطلاعاتی شامل نام نویسنده و سال انتشار، روش خاک‌ورزی، عمق زیر شکنی، محل اجرای آزمایش، نوع کشت (آبی یا دیم)، بافت خاک، تناوب گیاهی و مدت زمان آزمایش استخراج و ثبت شد (جدول ۱). این عوامل تأثیر بسزایی بر اندازه اثر^۱ دارند.

در مرحله ارزیابی پژوهش‌ها به بررسی نداشتن همگنی^۲ و دیگر اختلاط‌های^۳ مهم پرداخته شد. در این مرحله، تمام موارد درباره روش‌های اعمال تیمارها ثبت و تصمیم گرفته شد که کدام پژوهش‌ها نسبتاً مشابه^۴ هستند و می‌توان در تجزیه و تحلیل آن‌ها را وارد کرد (Soltani & Soltani, 2014; Gates, 2002). در نهایت ۳۵ مطالعه (۱۸ مطالعه در گندم آبی، ۵ مطالعه در گندم دیم، ۸ مطالعه در چغندر قند، ۴ مطالعه در ذرت دانه‌ای و ۵ مطالعه در پنبه) برای مقایسه زیر شکنی کردن با زیر شکنی نکردن انتخاب و وارد فرایند تجزیه و تحلیل آماری شدند.

استخراج داده‌ها

داده‌های مورد نیاز برای فراتحلیل عبارت‌اند از میانگین تیمار ($\bar{X}$)، انحراف معیار استاندارد ($SD_{\bar{X}}$) و تعداد تکرار یا حجم نمونه^۵ (n) در طرح آزمایشی. در تعدادی از پژوهش‌ها، نویسندگان داده آماری را در شکل‌های مختلف مانند خطای استاندارد ($SE_{\bar{X}}$) و ضریب تغییرات (CV%) گزارش کردند. این شکل‌ها به انحراف معیار استاندارد با استفاده از روابط ۱ و ۲ تغییر پیدا کردند:

$$\times \sqrt{n} = SE_{\bar{X}} \quad SD_{\bar{X}} \quad (1)$$

$$\left(\frac{CV\%}{100}\right) \times \bar{X} = SD_{\bar{X}} \quad (2)$$

گندم در ایران به دلیل اینکه خوراک عمده مردم است مهم تلقی می‌شود. هم‌چنین چغندر قند، ذرت و پنبه از محصولات مهم در ایران هستند. عملکرد محصول نیز مهم است، زیرا رایج‌ترین و مفیدترین عاملی است که برای توجیه و توصیه هر روش تولید توسط کشاورزان پذیرفته می‌شود (Abeyasekera, 2002). بنابراین در این تحقیق، با استفاده از داده‌های مطالعات و تحقیقات پیشین در داخل و با شرایط اقلیمی مختلف، زیر شکنی کردن با زیر شکنی نکردن در زراعت گندم (آبی و دیم)، چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه مقایسه شده است (لازم به توضیح است که بیش‌ترین مطالعات انجام شده در خصوص اثر زیر شکنی بر عملکرد محصول در ایران در گندم، چغندر قند، ذرت و پنبه انجام شده است).

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری اطلاعات (داده‌ها)

داده‌های عملکرد گندم (آبی و دیم)، چغندر قند، ذرت و پنبه از مطالعات و پژوهش‌های طولانی مدت تحت مدیریت‌های مختلف زیر شکنی در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۳۷۰ به دست آمد. پژوهش‌ها شامل مقالات علمی پژوهشی چاپ شده در مجلات معتبر، مقالات کنفرانسی، گزارش‌های پژوهشی، پایان‌نامه‌ها و غیره بود، که با جستجوی برخط در پایگاه‌های داخلی معتبر مانند پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد کشاورزی (SID)، بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)، Irandoct و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به دست آمد. هم‌چنین با توجه به این که ممکن است تحقیقی در داخل کشور انجام شده ولی به صورت مقاله انگلیسی ارائه شده باشد در پایگاه‌های (Scopus, Web of Science & Google Scholar) نیز جستجو انجام شد. جستجوی جامع و بر اساس واژه‌های کلیدی و ترکیب آن‌ها شامل خاک‌ورزی، زیر شکن، زیر شکنی، فشرده‌گی خاک، عملکرد در محصولات گندم، چغندر قند، ذرت و پنبه بود.

فرایند غربال‌گری و انتخاب

ارزیابی دقیق هر مطالعه برای تصمیم‌گیری در مورد این که آن پژوهش کیفیت لازم و اطلاعات مفید را برای فراتحلیل دارد مهم است. این قسمت اهمیت زیادی در فراتحلیل دارد. هر مطالعه باید حداقل نیازهای از پیش تعیین شده‌ای داشته باشد

4- Homogeneous
5- Sample size

1- Effect size
2- Heterogeneity
3- Confounder

جدول ۱- مطالعات استفاده شده در فراتحلیل

مدت زمان (سال)	تناوب زراعی	بافت خاک	نوع محصول	محل آزمایش	عمق زیرشکنی (سانتی‌متر)	روش خاک‌ورزی	نویسندگان، سال انتشار
۱	نامشخص	لومی رسی سیلتی	گندم آبی	کربال (فارس)	۴۵	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه بالهدار)	Solhjou, 2006
۱	چغندرقد بذری-گندم	لوم رسی سیلتی	گندم آبی	کبودآهنگ (همدان)	۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Heidari, 2011
۳	گندم- گندم	لومی رسی سیلتی	گندم آبی و دیم	گنبد (گرگان)	۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Sadeghnejad & Eslami, 2006
۱	نامشخص	رسی سیلتی	گندم آبی	اهواز (خوزستان)	۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده و فاصله ۷۵ سانتی‌متر بین دو تیغه)	Afzali & Javaheri, 2013
۴	ذرت- گندم	لوم رسی سیلتی	گندم آبی	ارومیه (آذربایجان غربی)	نامشخص	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Tabiezd, 2015
۳	پنبه - گندم	لوم	گندم آبی	داراب (فارس)	نامشخص	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Roosbeh & Niazi, 2015
۱	نامشخص	نامشخص	گندم آبی	اهواز (خوزستان)	۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Ansari & Asoudar, 2007
۱	نامشخص	نامشخص	گندم آبی	مشهد (خراسان رضوی)	۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Sharifnasab <i>et al.</i> , 2006
۱	نامشخص	نامشخص	گندم آبی	گنبد (گرگان)	۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Sharifnasab <i>et al.</i> , 2006
۱	نامشخص	نامشخص	گندم آبی	صفی آباد (خوزستان)	۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Sharifnasab <i>et al.</i> , 2006
۳	چغندرقد - گندم	لومی سیلتی	گندم آبی	میاندوآب (آذربایجان غربی)	۴۵	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Mohammadi Mazraeh & Nourjoo, 2009
۱	نامشخص	نامشخص	گندم آبی	ساری (مازندران)	نامشخص	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Abasian & Esmaeeli, 2006
۳	آیش- گندم	لوم رسی	گندم دیم	مراغه (آذربایجان شرقی)	۴۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده و فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین دو تیغه)	Eskandari, 1997
۳	آیش- گندم	نامشخص	گندم دیم	ممسنی (فارس)	۴۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه بالهدار و فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین دو تیغه)	Eskandari <i>et al.</i> , 2009
۳	آیش- گندم	لوم رسی سیلتی	گندم دیم	کبودآهنگ (همدان)	۴۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه بالهدار و فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین دو تیغه)	Eskandari <i>et al.</i> , 2009
۳	آیش- گندم	لوم رسی سیلتی	گندم دیم	سرارود (کرمانشاه)	۴۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه بالهدار و فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین دو تیغه)	Eskandari <i>et al.</i> , 2009
۲	گندم- چغندرقد	لوم	چغندرقد	داراب (فارس)	۳۵-۳۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Behaen <i>et al.</i> , 2013
۳	نامشخص	لومی سیلتی	چغندرقد	میاندوآب (آذربایجان غربی)	۴۰-۳۵	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Javanmard <i>et al.</i> , 2014
۱	ذرت- چغندرقد	لوم رسی سیلتی	چغندرقد	دزفول (خوزستان)	۵۵-۵۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Shahrbanoonejad, 2003
۱	نامشخص	رسی سیلتی	چغندرقد	زرقان (فارس)	۳۵-۳۰ ۴۵-۴۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Solhjou <i>et al.</i> , 2006
۱	گندم- چغندرقد	رسی سیلتی	چغندرقد	میاندوآب (آذربایجان غربی)	۴۵-۴۰	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Nourjou <i>et al.</i> , 2009
۱	گندم- چغندرقد	لوم	چغندرقد	همدان (همدان)	۴۰-۳۵	۱- بدون زیرشکن ۲- زیرشکن (با تیغه ساده)	Heidari & Ghadami Firouzabadi, 2022

۳	نامشخص	لومی سیلتی	چغندر قند	میان‌دو آب (آذربایجان غربی)	۴۰-۳۵	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Javanmard & Haghaninia, 2020
۱	نامشخص	رسی سیلتی	ذرت دانه‌ای	میان‌دو آب (آذربایجان غربی)	۴۵ ۵۵	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Mohammadi Mazraeh & Khalili, 2005
۱	ذرت- چغندر قند	لوم رسی سیلتی	ذرت دانه‌ای	دزفول (خوزستان)	۵۵-۵۰	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Shahrbanooonejad, 2003
۳	گندم- ذرت	لوم رسی سیلتی	ذرت دانه‌ای	ارومیه (آذربایجان غربی)	نامشخص	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Tabiezzad, 2015
۱	گندم- پنبه	لومی سیلتی	پنبه	کاشمر (خراسان رضوی)	۵۵-۵۰	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Chaji et al., 2006
۱	نامشخص	لوم رسی سیلتی	پنبه	هاشم آباد (گرگان)	۵۰-۴۵	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Rezaei et al., 2009
۲	نامشخص	لوم رسی سیلتی	پنبه	هاشم آباد (گرگان)	۵۰-۴۵	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Norouzieh et al., 2009
۱	نامشخص	رسی سیلتی	پنبه	مغان (اردبیل)	۳۵-۳۰ ۵۵-۵۰	۱- بدون زیر شکن ۲- زیر شکن (با تیغه ساده)	Taghinejad et al., 2001

تیمارهای فرا تحلیل

که در این رابطه SD_1 و SD_2 به ترتیب انحراف معیار گروه آزمایش و پایش است.

بهترین راه برای مقایسه پژوهش‌های مختلف، استفاده از میانگین اثر آن‌هاست. هر چند در تخمین اندازه اثر آزمایش-های مختلف، دقت‌های (اشتباه معیار) متفاوتی وجود دارد. بنابراین، پیش از فرا تحلیل، باید به داده‌ها وزن داده شود. به این ترتیب مطالعاتی که دقت آزمایشی بالاتری دارند وزن بیشتری خواهند داشت که موجب افزایش دقت اندازه اثر تخمین زده خواهد شد (Soltani & Soltani, 2014). میانگین وزن دهی از رابطه ۵ محاسبه شد.

$$WSMD_{overall} = \frac{\sum w_i \times SMD}{\sum w_i} \quad (5)$$

وزن داده شده به هر مطالعه (w_i) با معکوس کردن واریانس محاسبه شد (رابطه ۶).

$$W_i = \frac{1}{var_i} = \frac{1}{SD_i^2} \quad (6)$$

حدود اطمینان از رابطه ۷ محاسبه شد.

$$95\% CI = WSMD \pm 1.96 \times \sqrt{var_{overall}} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{\sum w_i} var_{overall}$$

آزمون Q (کوکران) و تجزیه آماری I^2 (I-squared) برای تشخیص ناهمگنی مطالعات استفاده شد (Higgins & Green, 2011). ناهمگنی در چهار گروه طبقه‌بندی شد، ناهمگنی زیاد (۷۵ درصد $I^2 \geq$ (I-squared) ناهمگنی متوسط (۴۹-۷۴) درصد (۲۵-۴۹) درصد $I^2 =$ (I-squared) ناهمگنی کم (۲۵-۴۹) درصد $I^2 =$ (I-squared) نداشتن ناهمگنی (۲۵ درصد $I^2 <$ (I-squared) (Higgins & Green, 2011).

خاک‌ورزی رایج (بدون زیر شکنی) در مقایسه با زیر شکنی مقایسه شد (جدول ۲). بنابراین تیمار شاهد (پایش)، خاک-ورزی رایج بدون زیر شکن انتخاب شد.

جدول ۲- شرح کوتاه از تیمارهای مورد استفاده در ارزیابی اثر زیر شکنی بر عملکرد گندم، چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه

روش خاک‌ورزی	توضیح مختصر
خاک‌ورزی رایج	شخم با گاوآهن برگرداندار + دیسک + ماله
زیر شکنی	زیر شکنی + خاک‌ورزی رایج (شخم با گاوآهن برگرداندار + دیسک + ماله)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در تجزیه تحلیل داده‌ها از عامل تفاضل میانگین استاندارد^۱ شده (SMD) (رابطه ۳)، که از شاخص‌های مهم اندازه اثر است، در عملکرد بین تیمار پایش و آزمایش استفاده شد (Cohen, 1988).

$$SMD = \frac{M_1 - M_2}{SD_{pooled}} \quad (3)$$

در این رابطه، M_1 و M_2 به ترتیب میانگین عملکرد تیمار آزمایش و تیمار پایش و SD_{pooled} ، انحراف معیار ترکیب شده (رابطه ۴) است (Cohen, 1988).

$$SD_{pooled} = \sqrt{\frac{SD_1^2 + SD_2^2}{2}} \quad (4)$$

(2017) *et al.* مبنی بر اثر مثبت زیرشکنی بر عملکرد محصول مطابقت دارد. علت تأثیر مثبت زیرشکنی بر عملکرد گندم را می‌توان به بهبود خواص فیزیکی خاک مانند کاهش مقاومت خاک (Solhjoui, 2015; Ansari & Asoudar, 2007; Eskandari *et al.*, 2009)، کاهش چگالی ظاهری خاک (Solhjoui, 2015; Ansari & Asoudar, 2007)، افزایش نفوذ آب در خاک (Eskandari *et al.*, 2009)، افزایش رطوبت خاک (در شرایط خاک (Solhjoui, 2015)، (Eskandari *et al.*, 2009) و توسعه عمق نفوذ ریشه در خاک (Sun *et al.*, 2023; Lv *et al.*, 2019) دانست که شرایط را جهت رشد بهتر گیاه فراهم می‌کند.

هم‌چنین زیرشکنی در بافت‌های مختلف خاک تأثیر مثبت بر عملکرد گندم داشته است (شکل ۲). بیش‌ترین اثر مثبت زیرشکنی بر عملکرد گندم در خاک‌هایی با بافت لوم رسی سیلت‌دار بوده است.

با توجه به مقدار شاخص آماری ناهمگنی بین مطالعات در گندم آبی ($I\text{-squared} = 18/2\%$)، بین مطالعات ناهمگنی کمی وجود دارد. ولیکن با توجه به مقدار این شاخص در گندم دیم ($I\text{-squared} = 83/0\%$)، بین مطالعات ناهمگنی بسیار شدید وجود دارد که ممکن است به دلیل اختلاف میزان بارش هر منطقه باشد.

اثر زیرشکنی بر عملکرد چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه
نتایج تجزیه آماری عامل تفاضل میانگین استاندارد شده (SMD) اثر زیرشکنی بر عملکرد چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به مقدار اندازه اثر چغندر قند ($SMD = +0/41$) و قطع کردن خط مرکزی توسط لوزی، ذرت دانه‌ای ($SMD = +0/86$) و قطع کردن خط مرکزی توسط لوزی و پنبه ($SMD = +1/15$) و قطع نکردن خط مرکزی توسط لوزی، می‌توان نتیجه گرفت که زیرشکنی تأثیر مثبت و غیرمعنی‌دار بر عملکرد چغندر قند، تأثیر مثبت و غیرمعنی‌دار بر عملکرد ذرت دانه‌ای و تأثیر مثبت و معنی‌دار بر عملکرد پنبه داشته است. تأثیر مثبت و غیرمعنی‌دار زیرشکنی بر عملکرد چغندر قند و ذرت دانه‌ای ممکن است به این دلیل باشد که این محصولات به طور کامل آبیاری شده باشند و کمتر دچار تنش خشکی قرار گرفته باشند. هم‌چنین ممکن است در بعضی مطالعات، بدون بررسی فشرده‌گی خاک مبادرت به زیرشکنی شده باشد.

زیرشکنی عملکرد چغندر قند را نسبت به بدون

به‌منظور اجرای سوگیری انتشار از آزمون Begg (Begg & Mazumdar, 1994) و Egger (Egger *et al.*, 1997) استفاده شد.

از نرم افزار Stata 14.2 برای فراتحلیل داده‌ها استفاده گردید. نرم افزارهای بسیاری مانند Stata، OpenMEE و CMA وجود دارند که در مراحل مختلف گردآوری، سازماندهی و تجزیه و تحلیل و ارائه گزارش نهایی در فراتحلیل استفاده می‌شوند. نرم افزار Stata یکی از جامع‌ترین نرم افزارهای تحلیل فراتحلیل در دنیا است.

نتایج و بحث

اثر زیرشکنی بر عملکرد گندم در شرایط آبی و دیم

نتایج تجزیه آماری عامل تفاضل میانگین استاندارد شده (SMD) اثر زیرشکنی بر عملکرد گندم در شکل ۱ آورده شده است. با توجه به مقدار SMD کل ($+0/84$) و حدود اطمینان ۹۵ درصد ($-0/142/25$) و نیز باتوجه به اینکه پایین‌ترین لوزی که میانگین مطالعات گندم آبی و دیم را نشان می‌دهد، در شکل مربوطه در قسمت مثبت شکل قرار گرفته و خط مرکزی را قطع نکرده است، می‌توان نتیجه گرفت که زیرشکنی اثر مثبت و معنی‌داری بر عملکرد گندم داشته است. زیرشکنی هم در شرایط آبی ($SMD = +0/72$) و قطع نکردن خط مرکزی توسط لوزی مربوط به مطالعات گندم آبی و هم در شرایط دیم ($SMD = +1/14$) و قطع نکردن خط مرکزی توسط لوزی مربوط به مطالعات گندم دیم به‌طور معنی‌داری عملکرد گندم را افزایش داده است (شکل ۱).
زیرشکنی در شرایط آبی عملکرد گندم را نسبت به بدون زیرشکنی ۱۳/۲۷ درصد افزایش داد. میانگین عملکرد کل گندم در روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به‌ترتیب برابر ۴۱۹۱/۶ و ۴۷۰۷/۴ کیلوگرم در هکتار است که بعد از وزن‌دهی (شکل ۱) به هر یک از عملکردها، میانگین عملکرد وزنی روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به‌ترتیب ۲۰۷/۱ و ۲۳۴/۶ به‌دست آمد. زیرشکنی در شرایط دیم نیز عملکرد گندم را نسبت به بدون زیرشکنی ۱۶/۰۲ درصد افزایش داد. میانگین عملکرد کل گندم در روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به‌ترتیب برابر ۱۸۰۴/۶ و ۲۱۰۰/۸ کیلوگرم در هکتار است که بعد از وزن‌دهی (شکل ۱) به هر یک از عملکردها، میانگین عملکرد وزنی روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به‌ترتیب ۱۲۳ و ۱۴۲/۷ به‌دست آمد. نتایج به دست آمده با گزارشات (Zheng *et al.*, 2015) و Schneider

نمود که تراکم خاک بر خواص خاک و گیاه تأثیر می‌گذارد. زیرشکنی تراکم خاک را از بین می‌برد و باعث بهبود خواص خاک، رشد و عملکرد ذرت می‌شود. محمدی مزرعه و خلیلی (MohammadiMazraeh & Khalili, 2005) پیشنهاد کردند که در مناطقی که مشکل تراکم خاک و کم آبی وجود دارد از زیرشکن استفاده شود. نتایج مطالعه دیگری نشان داد که زیرشکنی موجب بهبود عملکرد ذرت یا رطوبت قابل دسترس نمی‌شود به خصوص اگر مشکل تراکم خاک مشهود نباشد (Evans *et al.*, 1996).

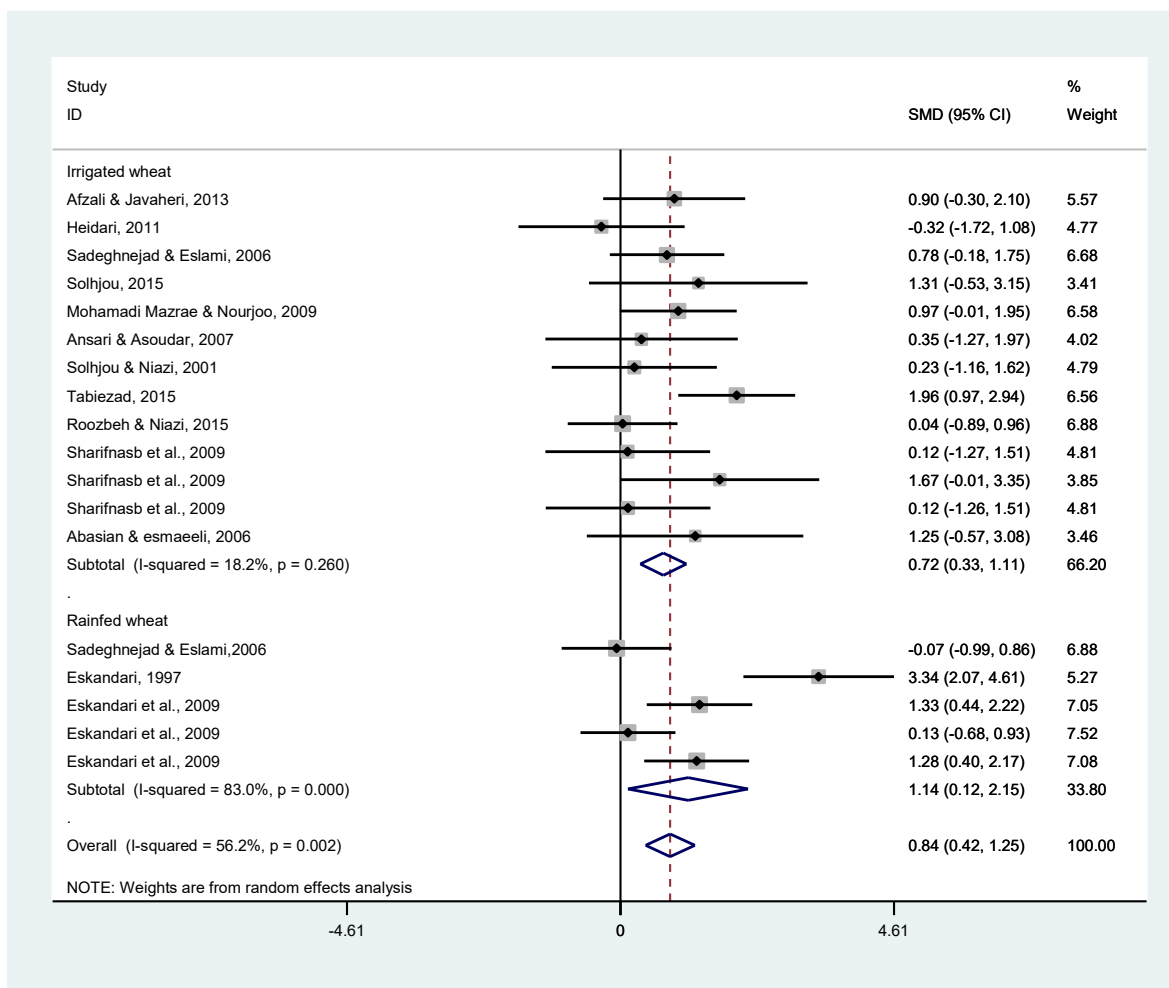
همچنین زیرشکنی در محصول پنبه باعث افزایش عملکرد آن به مقدار ۱۴ درصد شد. میانگین عملکرد پنبه در روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به ترتیب برابر ۲۴۵۷/۱ و ۲۸۰۶/۸ کیلوگرم در هکتار است که بعد از وزن دهی (شکل ۲) به هر یک از عملکردها، میانگین عملکرد وزنی روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به ترتیب ۴۹۷/۹ و ۵۶۷/۶ به دست آمد. محققان دیگری افزایش عملکرد پنبه و سایر محصولات زراعی را در اثر زیرشکنی گزارش کرده‌اند؛ (Akinci *et al.*, 2004). . (Reeder, *et al.*, 1992) نتایج تحقیقات ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2022) نشان داد که در خاک‌های شور، زیرشکنی در مقایسه با بدون زیرشکنی عملکرد پنبه را ۲۲/۸ درصد افزایش داد. زیرشکنی عملکرد پنبه را با کاهش مقدار نمک، چگالی ظاهری و pH خاک و افزایش حجم خلل و فرج خاک در لایه‌های زیرین خاک افزایش داد. Akinci *et al.* (2004) گزارش کردند که زیرشکنی اندکی عملکرد پنبه را افزایش داد. با این حال این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود. آنها نتیجه گرفتند زیرشکنی در مزارعی که به طور کامل آبیاری می‌شوند و دچار تنش خشکی نیستند تأثیری ندارد.

سوگرایی انتشار

مقدار سطح احتمال در روش Egger و Begg (برای تخمین سوگرایی انتشار) برای مطالعات گندم به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۴۱ به دست آمد (بیشتر از ۱۰ درصد) که می‌توان نتیجه گرفت که سوگرایی انتشار در پژوهش‌های محصول گندم وجود ندارد. همچنین مقدار سطح احتمال در روش Egger و Begg در مطالعات چغندر قند به ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۱۷، در مطالعات ذرت ۱ و ۰/۸۱ و در مطالعات پنبه ۰/۱۴ و ۰/۴۲ به دست آمد که می‌توان نتیجه گرفت که سوگرایی انتشار (به جز در مطالعات چغندر قند با روش Begg) در پژوهش‌های محصولات مذکور وجود ندارند.

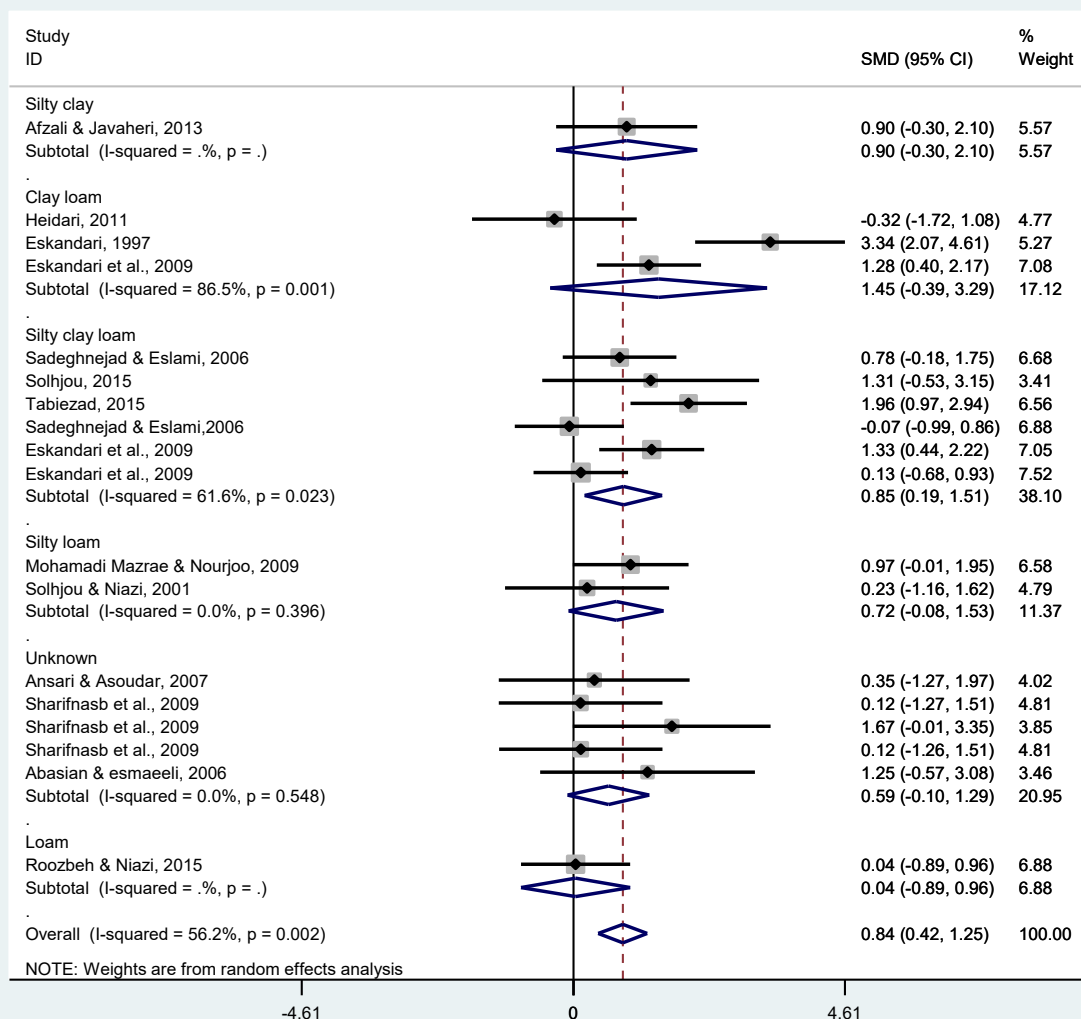
زیرشکنی ۳/۷۴ درصد افزایش داد. میانگین عملکرد کل چغندر قند در روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به ترتیب برابر ۵۵۸۶۸ و ۵۹۰۶۷ کیلوگرم در هکتار است که بعد از وزن دهی (شکل ۲) به هر یک از عملکردها، میانگین عملکرد وزنی روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به ترتیب ۷۱۲۶ و ۷۳۹۳ به دست آمد. در مطالعه‌ای اعلام شد که زیرشکنی خاک باعث شکسته شدن سخت لایه زیر عمق شخم مرسوم می‌شود، به طوری که جرم مخصوص ظاهری و شاخص مخروط خاک کاهش و عمق نفوذ ریشه، قطر چغندر قند و جذب آب و مواد غذایی از خاک افزایش و از این رو عملکرد چغندر قند (حدود ۲۰ درصد) افزایش می‌یابد (Solhjoui *et al.*, 2006). نتایج پژوهش دیگر نیز نشان داد که زیرشکنی عملکرد چغندر قند را در حدود ۶ درصد افزایش داد (Nourjou *et al.*, 2009). با افزایش عمق خاک‌ورزی، عمق نفوذ ریشه و همگنی غده‌های چغندر قند به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد به طوری که تیمار شخم عمیق با گاوا آهن برگردان دار و تیمار شخم سطحی به همراه زیرشکن به عنوان تیمارهای برتر از نظر همگنی غده‌های چغندر قند بود (Javanmard *et al.*, 2014). محققان دیگری نیز اعلام نمودند که زیرشکنی باعث بهبود عملکرد ریشه چغندر قند می‌شود (Johnson & Erickson, 1991; Ide *et al.*, 1987; EI-Sanat, 2018; Henriksen *et al.*, 2005).

زیرشکنی بیش‌ترین تأثیر را بر عملکرد چغندر قند در خاکی با بافت رسی سیلتی داشته است (شکل ۴). زیرشکنی عملکرد ذرت دانه‌ای را نسبت به بدون زیرشکنی ۵/۸۴ درصد افزایش داد. میانگین عملکرد کل ذرت دانه‌ای در روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به ترتیب برابر ۹۸۵۰/۵ و ۱۰۳۹۲/۳ کیلوگرم در هکتار است که بعد از وزن دهی (شکل ۲) به هر یک از عملکردها، میانگین عملکرد وزنی روش بدون زیرشکنی و زیرشکنی به ترتیب ۲۴۷۴/۹ و ۲۶۱۹/۵ به دست آمد. عملیات زیرشکن باعث جذب آب از اعماق خاک می‌شود که این امر در تولید محصول ذرت دانه‌ای مؤثر بوده است. با زیرشکنی نفوذ ریشه ذرت در عمق خاک بیش‌تر شده و جذب آب و مواد غذایی در حجم بیش‌تری از خاک انجام می‌شود. بنابراین گیاه کم‌تر تحت تأثیر تنش قرار گرفته و در نهایت تولید محصول افزایش می‌یابد (Al Adawi & Reeder, 1996). در پژوهشی گزارش شد که افزایش نسبی عملکرد ذرت به دلیل زیرشکنی از ۸۲/۸ تا ۱۲/۴ درصد متغیر است (Sene *et al.*, 1985). (Abu-Hamdeh, 2003) گزارش



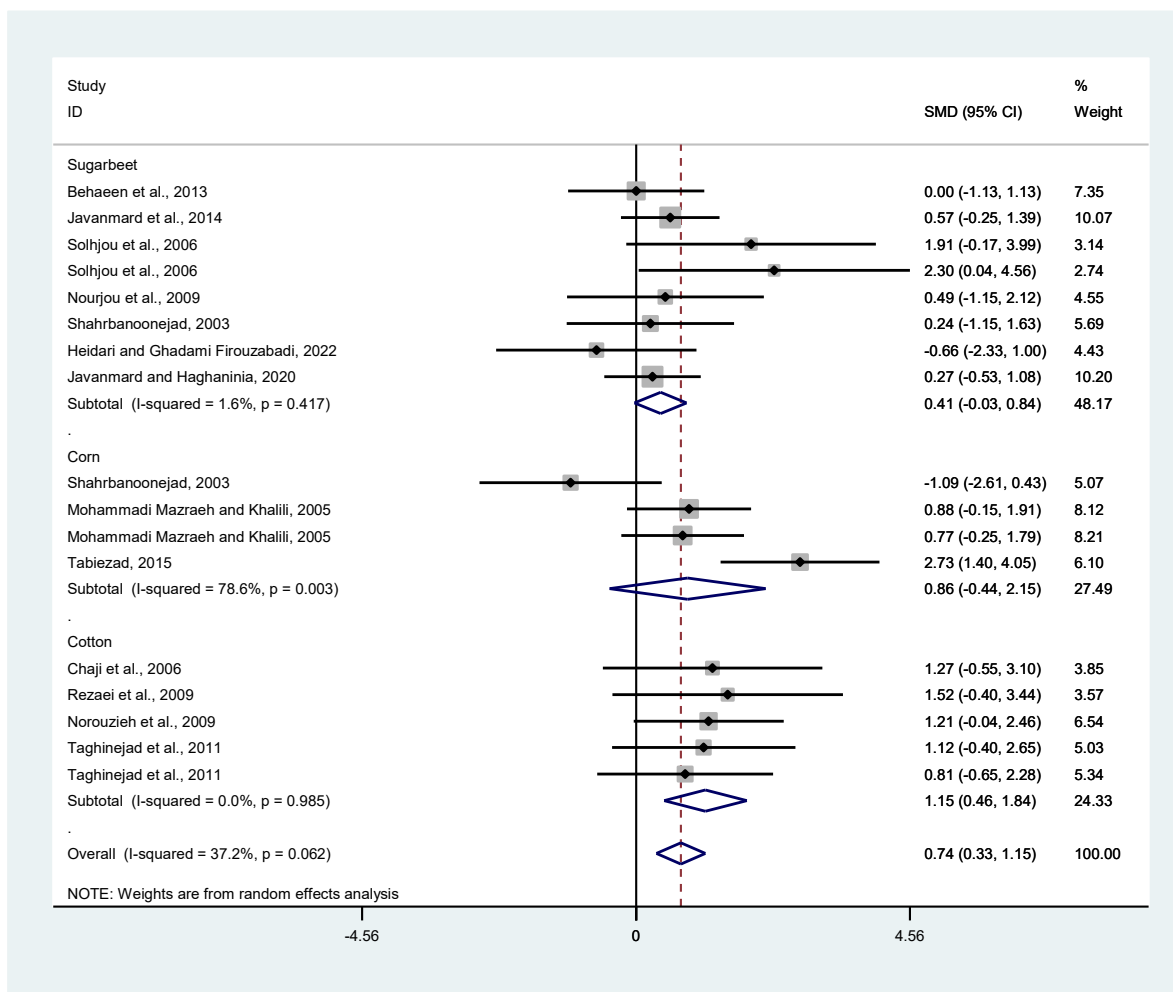
شکل ۱- نمودار انباشت اثر زیرشکنی بر عملکرد گندم

(SMD (اندازه اثر)، %Weight (درصد وزن)، Study ID (مشخصات مطالعه)، Irrigated wheat (گندم آبی)، Rainfed wheat (گندم دیم)،
Subtotal (زیر گروه)، Overall (کل))



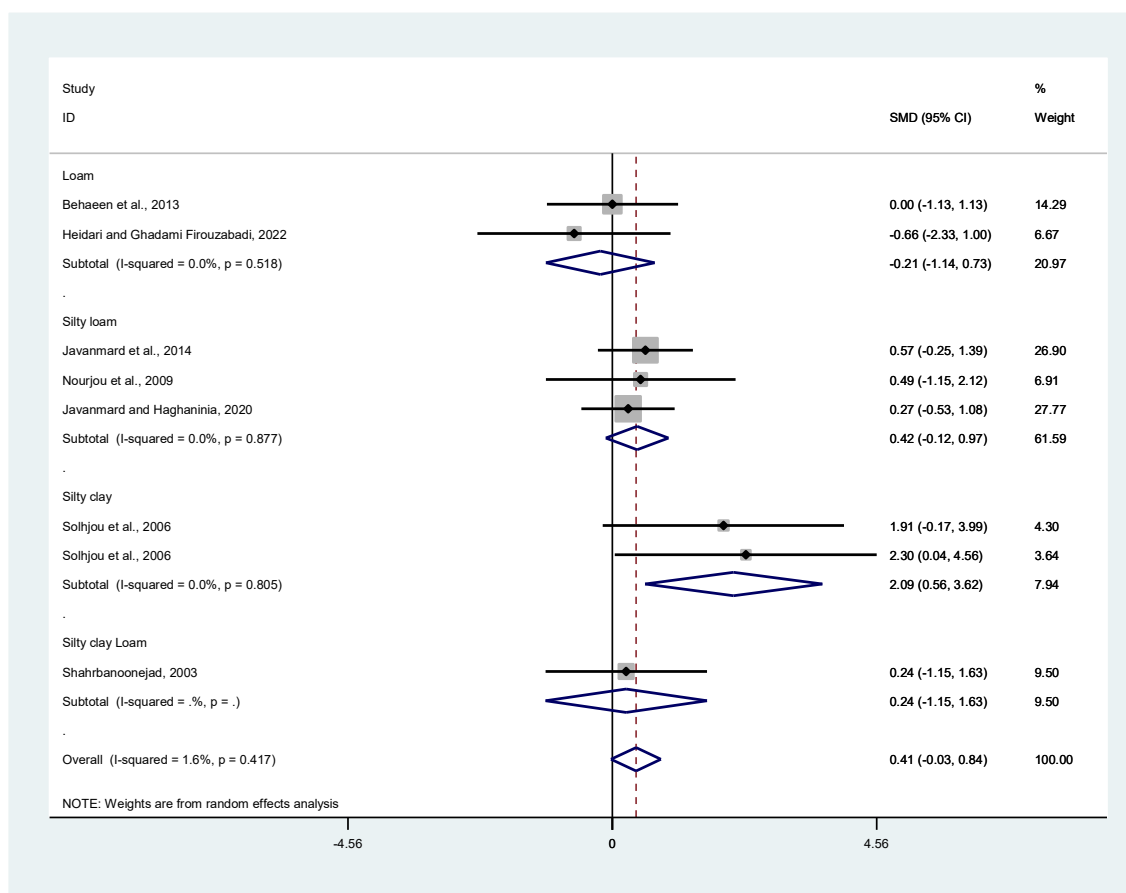
شکل ۲- نمودار انباشت اثر زیرشکنی بر عملکرد گندم در بافت‌های مختلف خاک

SMD (اندازه اثر)، %Weight (درصد وزن)، Study ID (مشخصات مطالعه)، Subtotal (زیر گروه)، Overall (کل)



شکل ۳- نمودار انباشت اثر زیرشکنی بر عملکرد چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه

SMD (اندازه اثر)، %Weight (درصد وزن)، Study ID (مشخصات مطالعه)، Sugarbeet (چغندر قند)، Corn (ذرت)، Cotton (پنبه)، Subtotal (زیر گروه)، Overall (کل)



شکل ۴- نمودار انباشت اثر زیر شکنی بر عملکرد چغندر قند در بافت‌های مختلف خاک
 SMD (اندازه اثر)، %Weight (درصد وزن)، Study ID (مشخصات مطالعه)، Subtotal (زیر گروه)، Overall (کل)

نتیجه‌گیری

تأثیر زیرشکنی بر عملکرد گندم و پنبه مثبت و معنی‌دار ولی بر عملکرد چغندر قند و ذرت دانه‌ای مثبت و غیر معنی‌دار بود. بیش‌ترین تأثیر زیرشکنی بر عملکرد گندم در خاک‌های با بافت لوم رسی سیلت‌دار بود. زیرشکنی عملکرد گندم آبی، دیم، چغندر قند، ذرت دانه‌ای و پنبه را نسبت به بدون زیرشکنی به ترتیب ۱۳/۲۷، ۱۶/۰۲، ۳/۷۴، ۵/۸۴ و ۱۴/۰۰ درصد افزایش داد. بنابراین توصیه می‌شود در صورت وجود فشردگی خاک مبادرت به زیرشکنی به خصوص در محصولاتی مانند گندم و پنبه شود. همچنین پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری در خصوص اثر زیرشکنی بر محصولات مختلف انجام شود.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

نویسنده(ها) هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

منابع

- Al-Adawi, S. S., & Reeder, R. C. (1996). Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yield and soil physical properties. *Transactions of the ASAE*, 39(5):1641-1649.
- Ansari, M. R., & Asoudar, M. A. (2007). The effects of tillage on soil physical properties and wheat yield. *Proceedings of the 10th Congress of Soil Sciences of Iran, Karaj- 4 to 6 Shahrivar*. (In Persian).
- Arvidsson, J., Bölenius, E., & Cavalieri, K. M. V. (2012). Effects of compaction during drilling on yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *European journal of agronomy*, 39, 44-51.
- Begg, C. B., & Mazumdar, M. (1994). Operating characteristics of a rank correlation test for publication bias. *Biometrics*, 50, 1088-1101.
- Behaen, M. A., Ashrafmansouri, G. R., & Hamdi, F. (2013). Effect of different tillage methods in monogerm seedbed preparation on yield and quality of sugar beet. *Sugarbeet Journal*, 28(2): 123-135. (In Persian).
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., & Valentine, T.A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental botany*, 62, 59-68. DOI: [10.1093/jxb/erq350](https://doi.org/10.1093/jxb/erq350)
- Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P. T., & Rothstein, H. R. (2009). *Introduction to Meta-analysis*. Wiley, London.
- Chaji, H., Afshar Chamanabad, H., & Jamili, H. (2006). Investigation on physical properties of soil, fuel consumption productivity and cotton yield in several tillage systems (Research Note). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(26): 159-174. (In Persian).
- Challinor, A., Cochrane, K., Howden, M., Iqbal, M.M., Lobell, D., Travasso, M.I., Chhetri, N., Garrett, K., Ingram, J., Lipper, L., & McCarthy, N. (2014). Food security and food production systems. *Climate Change 2013: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Clark, L.J., & Barraclough, P.B. (1999). Do dicotyledons generate greater maximum axial root growth pressures than monocotyledons? *Journal of experimental botany*, 50, 1263-1266. doi.org/10.1093/jxb/50.336.1263
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd Edition. Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., & Carliell-Marquet, C. (2011). The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources, conservation and recycling*, 57, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.009>
- Egger, M., Smith, G. D., & Phillips, A. N. (1997). *Meta-analysis: principles and procedures*. *Bmj*, 315(7121), 1533-1537. <https://doi.org/10.1136/bmj.315.7121.1533>
- El-Sanat, G.M.A. (2018). Impact of subsoiling, organic manure and nitrogen sources on some soil properties and sugar beet productivity. *Menoufia Journal of Soil Science*, 3(1):1-16.
- Abasian, A., & Esmaeeli, M. A. (2006). Studying the effect of subsoiler and micronutrient fertilizers of zinc and manganese sulfates on the growth and yield of wheat. *The 9th Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding of Iran*. (In Persian).
- Abeyasekera, S., Ritchie, J. M., & Lawson-McDowall, J. (2002). Combining ranks and scores to determine farmers' preferences for bean varieties in southern Malawi. *Experimental Agriculture*, 38, 97-109. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479702000182>
- Abu-Hamdeh, N.H. (2003). Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 67(4):1213-1219. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1213>
- Afzali, M. J., & Javaheri, A. (2013). The effect of tillage methods on soil cone index, technical factors and wheat yield. *Journal of Agricultural Machinery*, 3(1), 24-31. (In Persian).
- Akinci, A., Cakir, E., Topakci, M., Canakci, M. & Inan, O. (2004). The effect of subsoiling on soil resistance and cotton yield. *Soil and Tillage Research*, 77: 203-210. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.006>

- characteristics of sugarbeet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Research in Crop Ecosystems*. 1(3): 83-94. (In Persian).
- Johnson, B.S. & Erickson, A.E. (1991). Sugarbeet response to subsoiling and wheel traffic. *Agronomy Journal*, 83(2): 386-390. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300020025x>
- Kautz, T., Amelung, W., Ewert, F., Gaiser, T., Horn, R., Jahn, R., Javaux, M., Kemna, A., Kuzyakov, Y., Munch, J.C., & Pätzold, S. (2013). Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 1003-1022. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.014>
- Kirkegaard, J. A., Lilley, J. M., Howe, G. N., & Graham, J. M. (2007). Impact of subsoil water use on wheat yield. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(4), 303-315. DOI:10.1071/AR06285
- Kladivko, E. J. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61(1-2), 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00179-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00179-9)
- Lv, G., Han, W., Wang, H., Bai, W., & Song, J. (2019). Effect of subsoiling on tillers, root density and nitrogen use efficiency of winter wheat in loessal soil. *Plant, Soil and Environment*, 65(9), 456-462. <https://doi.org/10.17221/311/2019-PSE>
- Mohammadi Mazraeh, H., & Khalili, M. (2005). Effect of subsoiling and irrigation periods upon corn yield. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 5(21): 37-48. (In Persian).
- Mohammadi Mazraeh, H., & Nourjoo, A. (2009). The effects of sub-soiling and different levels of irrigation on sugar beet and wheat yield in rotation. *Sugarbeet Journal*, 25(1), 39-51. (In Persian).
- Ning, T., Liu, Z., Hu, H., Li, G. and Kuzyakov, Y., (2022). Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 223, p.105490.
- Noble Jr, J. H. (2006). Meta-analysis: methods, strengths, weaknesses, and political uses. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 147(1), 7-20. DOI: [10.1016/j.lab.2005.08.006](https://doi.org/10.1016/j.lab.2005.08.006)
- Norouzieh, S., Tabatabaeifar, A & Ghorbaninasrabad, G. (2009). Investigating the effect of spring subsoiling on cotton yield and soil density. 02th National Conference on Agr. Machinery Engineering and Mechanization. Karaj. Iran. (In Persian).
- Nourjou, A., Mohammadi, H., & Gahramanian, G. (2009). Effects of deficit irrigation under sub-soiling condition on decreasing of water used on sugar beet yield under surface irrigation system. 05th National Conference on Agr. Machinery Engineering and Mechanization. Mashhad. Iran. (In Persian).
- Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., & Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European journal of agronomy*, 34(2), 96-112. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.003>
- Eskandari, E. (1997). Investigating the effects of using subsoiler on wheat yield in rainfed conditions. Final Report. 525. Dryland Agricultural Research Institute. Maragheh. (In Persian).
- Eskandari, E., Afzalnia, S., Bakhtiyari, M. R., & Yavari, E. (2009). Investigating the effects of using subsoiler on some of soil physical properties and wheat yield in rainfed conditions. Final Report. 953. Dryland Agricultural Research Institute. Maragheh. (In Persian).
- Evans, S.D., Lindstrom, M.J., Voorhees, W.B., Moncrief, J.F. & Nelson, G.A. (1996). Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil and Tillage Research*, 38(1-2): 35-46. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01020-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01020-3)
- Garz, J., Schliephake, W., & Merbach, W. (2000). Changes in the subsoil of long-term trials in Halle (Saale), Germany, caused by mineral fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(6), 663-668. <https://doi.org/10.1002/1522-2624>
- Gates, S. (2002). Review of methodology of quantitative reviews using meta-analysis in ecology. *Journal of Animal Ecology*, 71(4), 547-557. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2002.00634.x>
- Heidari, A. (2011). The effect of tillage methods on soil physical properties and yield of irrigated wheat. *Journal of Soil and Water Sciences*, 57, 115-124. (In Persian)
- Heidari, A. (2022). Meta-Analysis of the Effect of Subsoiling on Potato Yield. *Agricultural Mechanization and Systems Research*. 23(80), 71-86. (In Persian)
- Heidari, A. (2023). Meta-Analysis of the Effect of Conservation tillage on irrigated wheat yield in Iran. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural*. 11(4), 105-115. (In Persian)
- Heidari, A., Bahramloo, R., and Bakhtiyari, M. R. (2022). Meta-analysis of the effect of conservation tillage on potato yield. *Journal of Agricultural Mechanization*. 7 (2), 19-30. (In Persian)
- Heidari, A., & Ghadami Firouzabadi, A. (2022). Effect of different tillage system and deficit irrigation on yield and water use efficiency of sugar beet. *Journal of Agricultural Machinery*. 12(2): 219-229.
- Henriksen, C.B., Rasmussen, J. & Søgaard, C. (2005). Kemink subsoiling before and after planting. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2):59-68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.022>
- Higgins, J. P., & Green, S. (2011). *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. John Wiley & Sons, 4,570.
- Ide, G., Hofman, G., Van Ruymbeke, M. & Ossemerct, C. (1987). Influence of subsoiling on the yield of sugar beets. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 150(3):151-155. <https://doi.org/10.1002/jpln.19871500306>
- Javanmard, A., & Haghaninia, M. 2020. Effects of tillage management on quantity and quality yield of sugarbeet. 16th National Iranian Crop Science Congress. January 25-27.2020. Ahvaz. Khuzestan.
- Javanmard, A., Ghahramanian, G. R., Fotouhi, K., & Asadi Danalo, A. (2014). Evaluation of different tillage methods on soil physical properties and growth

- Solhjou, A. A., Dehghanian, A., Sepaskhah, A., & Niromand Jahromi, M. (2006). Effect of subsoiling and irrigation frequencies on soil physical properties and sugarbeet yield. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6(25): 131-144. (In Persian)
- Soltani, E., & Soltani, A. (2014). Necessity of using meta-analysis in field crops researches. *Journal of Crop Production*. 7(3), 203-216. (In Persian)
- Sun, Q., Sun, W., Zhao, Z., Jiang, W., Zhang, P., Sun, X., & Xue, Q. (2023). Soil Compaction and Maize Root Distribution under Subsoiling Tillage in a Wheat-Maize Double Cropping System. *Agronomy*, 13(2), 394. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020394>
- Tabiezzad, H. (2015). Studying of effect of tillage on some of soil physical properties and crop yield in maize-wheat rotation. Final Report. Water and Soil Research Institute. (In Persian)
- Taghinejad, J., Borgheai, A. M., Minaei, S., and Adelzadeh, R. (2011). The effect of subsoiling on soil compaction and cotton yield in Moghan region. 06th National Conference on Agr. Machinery Engineering and Mechanization. Karaj. Iran. (In Persian)
- Wei, H., Wang, S., Yang, W., Sun, H., Yin, L. & Deng, X. (2017). Meta analysis on impact of no-tillage and subsoiling tillage on spring maize and winter wheat yield and water use efficiency on the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(3), 461-473. [DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2017.03.005](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2017.03.005)
- Zhang, L., Mao, L., Yan, X., Liu, C., Song, X. & Sun, X. (2022). Long-term cotton stubble return and subsoiling increases cotton yield through improving root growth and properties of coastal saline soil. *Industrial Crops and Products*, 177, p.114472. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114472>
- Zheng, K., He, J., Li, H., Wang, Q. & Li, W. (2015). Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(22), 7-15.
- Olsson, K.A., & Cockroft, B. (2006). Structure: managing belowground. In: Lal, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Taylor & Francis, New York, pp. 1704-1706.
- Peralta, G., Alvarez, C. R., & Taboada, M. A. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 211, 105022.
- Reeder, R., Wood, R., & Finck, C. (1992). Five subsoil designs and their effects on soil and crop yields. Paper-American-Society-of-Agricultural-Engineers. No 92-1594. 16 pp.
- Rezaei, J., Norouzieh, S., & Ghorbani, G. (2009). The effect of the use of subsoiler on the quantitative and qualitative increase of the cotton crop. 05th National Conference on Agr. Machinery Engineering and Mechanization. Mashhad. Iran. (In Persian)
- Ried, K. (2006). Interpreting and understanding meta-analysis graphs: A practical guide. *Aust Fam Physician* 35(8):635-638.
- Roosbeh, M., & Niazi, J. (2015). Evaluation and comparison of different tillage methods in improving soils affected by salinity in wheat production. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 13(1), 140-145. *Iranian Journal of Field Crops Research*. (In Persian)
- Sadeghnejad, H. R., & Eslami, K. (2006). The comparison of wheat yield under different tillage methods. *Journal of Agricultural Sciences*, 12(1), 103-112. (In Persian)
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., & Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield-What do we really know? *Soil and Tillage Research*, 174: 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.005>
- Sene, M., Vepraskas, M.J., Naderman, G.C. & Denton, H.P., (1985). Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Science Society of America Journal*, 49(2) :422. 427. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020030x>
- Shahrbanooonejad, M. (2003). Effects of subsoiling on sugarbeet yield. Final Report. Agricultural Engineering Research Institute. (In Persian)
- Sharifnasab, H., Mehdinia, A., Sadeghnejad, H. R., Shahrbanooonejad, M., & Heidari, A. (2009). Study and determination of application effect of deep tillage implements on chemical and physical properties of soil and wheat yield. Final Report. 763. Agricultural Engineering Research Institute. Karaj. Iran. (In Persian)
- Solhjou, A. A. (2015). The effect of susoiling on yield of irrigated wheat in different intervals from open drainage. *Journal of Iran Biosystem engineering*, 46(2), 193-199. (In Persian)
- Solhjou, A. A. 2006. Soil compaction. Education and Extension Journal. Agricultural Organization of Fars. (In Persian)
- Solhjou, A. A., & Niazi, J. (2001). The effect of subsoiling on soil physical properties and irrigated wheat yield. *Iranian Journal of Agricultural Engineering Research*, 7, 65-78. (In Persian)