Governance of Population and Family
Journal homepage: www.pdj.ihu.ac.ir

Analysis of Global Research Trends on Airborne Nanoparticles and Infertility in the Last Two Decades: A Scientometric and Topic Mapping Approach

Mohammad Arefkhani[1*]; Zahra Ghorbani[2] ; AmirRezaei[3]

1. PhD student, Population Health Department, Population Center, Imam Hossein University, Tehran, Iran. Email: mohammadarefkhani3634@gmail.com
2. Assistant Professor, Faculty member, Department of Sociology, Faculty of Humanities, University of Arak, Iran. Email: z-ghorbani@araku.ac.ir
3. PhD student in Nanobiotechnology, Imam Hossein University, Tehran, Iran.
Email: amiralireza6@gmail.com

Received: 05 July 2025; **Revised:** 02 August 2025; **Accepted:** 23 September 2025; **Published:** 02 October 2025

Abstract

Purpose: In the present study, global research on the impact of airborne nanoparticles on infertility in the last two decades (2000-2024) was analyzed using a scientometric and thematic mapping approach. Studies show that since the 2000s, the primary focus has been on acute toxicity mechanisms of nanoparticles, such as oxidative stress and DNA damage. With technological advances and increasing environmental concerns, in the second decade (2010-2020), attention has increased on chronic and intergenerational effects, especially on sperm quality and fetal health**.**

Methodology: Thematic mapping identified three main clusters: the toxic mechanisms cluster (oxidative stress and apoptosis), the animal studies cluster (effects on sperm and testis), and the human studies cluster (hormonal disruption and infertility).

Findings: Scientometric analysis indicated a growth in publications, particularly in Europe and Asia. However, gaps were noted in examining effects on women, long-term outcomes, and protective strategies (such as antioxidants).

Research limitations /Implications: This analysis emphasizes the need to develop comprehensive theoretical frameworks, standardize toxicity assessment protocols, and develop policies to reduce exposure to nanoparticles.

Keywords: Airborne nanoparticles, Air pollution, Infertility, Scientometrics, Thematic mapping.

Cite this Paper: Arefkhani'M & Ghorbani 'Z, RezaeiL' R.(2025 Analysis of Global Research Trends on Airborne Nanoparticles and Infertility in the Last Two Decades: A Scientometric and Topic Mapping Approach. Governance of Population and Family, 2(5), 117–139.

© (2025) The Authors. Governance of Population and Family Published by Imam Hussein University.
This is an Open access article under the CC- BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

حکمرانی جمعیت و خانواده
Journal homepage: www.pdj.ihu.ac.ir

تحلیل روند تحقیقات جهانی درباره نانوذرات هوا و ناباروری در دو دهه اخیر: رویکرد علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی

محمد عارفخانی[1*]؛ زهرا قربانی[2] ؛ امیر رضائی[3]

۱. دانشجوی دکتری، گروه سلامت جمعیت، پژوهشکده حکمرانی جمعیت و خانواده، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران
Email: mohammadarefkhani3634@gmail.com
۲. استادیار، گروه جامعه‌شناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. Email: z-ghorbani@araku.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری نانوبیوتکنولوژی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران Email: amiralireza6@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۱ مرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۰ مهر ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

چکیده

هدف: در پژوهش حاضر، تحقیقات جهانی درباره تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری در دو دهه اخیر (۲۰۰۰–۲۰۲۴) با استفاده از رویکرد علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی تحلیل شد. مطالعات نشان می‌دهند که از دهه ۲۰۰۰، تمرکز اولیه بر مکانیسم‌های سمیت حاد نانوذرات، مانند استرس اکسیداتیو و آسیب به DNA، بوده است. با پیشرفت فناوری و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، در دهه دوم (۲۰۱۰–۲۰۲۰)، توجه به اثرات مزمن و بین‌نسلی، به‌ویژه بر کیفیت اسپرم و سلامت جنین، افزایش یافت.

روش پژوهش: نقشه‌برداری موضوعی سه خوشه اصلی را شناسایی کرد: خوشه مکانیسم‌های سمی (استرس اکسیداتیو و آپوپتوز)، خوشه مطالعات حیوانی (تأثیر بر اسپرم و بیضه)، و خوشه پژوهش‌های انسانی (اختلالات هورمونی و ناباروری).

یافته‌ها: تحلیل علم‌سنجی حاکی از رشد انتشارات، به‌ویژه در اروپا و آسیا است. با این حال، شکاف‌هایی در بررسی اثرات بر زنان، پیامدهای بلندمدت، و راهکارهای محافظتی (مانند آنتی‌اکسیدان‌ها) مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: این تحلیل بر ضرورت توسعه چارچوب‌های نظری جامع، استانداردسازی پروتکل‌های ارزیابی سمیت، و سیاست‌گذاری برای کاهش مواجهه با نانوذرات تأکید دارد..

کلیدواژه‌ها: نانوذرات هوا، آلودگی هوا؛ ناباروری؛ علم سنجی، نقشه برداری موضوعی.

مقدمه و بیان مسئله

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه فناوری نانو، افق‌های جدیدی را در علوم مختلف از جمله پزشکی، محیط‌زیست و مهندسی گشوده است. نانوذرات، به‌عنوان یکی از محصولات کلیدی این فناوری، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد فیزیکی و شیمیایی خود، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف یافته‌اند. بااین‌حال، افزایش حضور نانوذرات در محیط‌زیست، به‌ویژه در هوا، نگرانی‌هایی را در مورد اثرات زیست‌محیطی و سلامت انسان ایجاد کرده است. یکی از حوزه‌های حساس و کمتر بررسی‌شده، تأثیر این نانوذرات بر سلامت باروری انسان است. از اوایل دهه ۲۰۰۰، با گسترش استفاده از نانوذرات در محصولات صنعتی و تجاری، تحقیقات اولیه در مورد اثرات سمی آن‌ها بر سیستم‌های بیولوژیکی آغاز شد. مطالعات اولیه عمدتاً بر سمیت حاد متمرکز بودند، اما با پیشرفت علم، توجه به اثرات مزمن و بلندمدت، از جمله ناباروری، افزایش یافته است. این موضوع به‌ویژه در سال‌های اخیر به دلیل افزایش نرخ ناباروری در جوامع مدرن و ارتباط احتمالی آن با عوامل محیطی، به یکی از مباحث روز علم پزشکی و محیط‌زیست تبدیل شده است. نیاز به بررسی تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری از چندین منظر قابل توجیه است. نخست، شواهد موجود نشان‌دهنده افزایش مواجهه انسان با نانوذرات از طریق استنشاق در محیط‌های شهری و صنعتی است. مطالعات پیشین، مانند پژوهش‌های انجام‌شده در دهه۲۰۲۰- ۲۰۱۰، نشان داده‌اند که نانوذرات می‌توانند از سدهای بیولوژیکی عبور کرده و در اندام‌های حیاتی، از جمله سیستم تولیدمثل، تجمع یابند. با این حال، فقدان اجماع علمی در مورد مکانیسم‌های دقیق این اثرات و تناقض در نتایج مطالعات، ضرورت انجام تحقیقات جامع‌تر را برجسته می‌کند. علاوه بر این، نقدهای موجود بر محدودیت‌های روش‌شناختی مطالعات پیشین، مانند کمبود تحلیل‌های بلندمدت و نبود استانداردهای یکپارچه برای ارزیابی سمیت نانوذرات، لزوم رویکردهای نوین مانند علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی را برای شناسایی شکاف‌های دانش و جهت‌گیری‌های پژوهشی تقویت می‌کند. بررسی تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری از منظر نظری و عملی دارای اهمیت بسزایی است. از منظر نظری، این مطالعه به درک بهتر مکانیسم‌های تعامل نانوذرات با سیستم‌های بیولوژیکی کمک می‌کند و می‌تواند به توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی منجر شود. از منظر عملی، نتایج این پژوهش می‌تواند به تدوین سیاست‌های سلامت عمومی، تنظیم مقررات زیست‌محیطی و طراحی فناوری‌های ایمن‌تر کمک کند. با توجه به افزایش نرخ ناباروری در جهان و تأثیرات اجتماعی و اقتصادی آن، شناسایی عوامل محیطی مؤثر بر این پدیده می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی و کاهش بار اقتصادی مرتبط با درمان‌های ناباروری کمک کند. مساله اصلی این پژوهش، فقدان درک جامع از روند تحقیقات جهانی در زمینه تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری و شناسایی شکاف‌های پژوهشی در این حوزه است. با وجود افزایش تعداد مطالعات در دو دهه اخیر، همچنان سؤالاتی در مورد ماهیت، وسعت و جهت‌گیری این تحقیقات باقی مانده است. به عنوان مثال، آیا تحقیقات موجود به‌طور یکسان به انواع مختلف نانوذرات (مانند نانوذرات فلزی، کربنی یا پلیمری) پرداخته‌اند؟ آیا تمرکز مطالعات بر جنبه‌های خاصی از ناباروری (مانند اثرات بر اسپرم یا تخمک) بوده یا رویکردی جامع اتخاذ شده است؟ این پژوهش با استفاده از رویکرد علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی به دنبال پاسخ به این سؤالات و ارائه تصویری روشن از وضعیت کنونی دانش در این حوزه است. هدف اصلی این مقاله، تحلیل روند تحقیقات جهانی در زمینه تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری در دو دهه اخیر با

استفاده از ابزارهای علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی است. اهداف فرعی شامل شناسایی موضوعات کلیدی، نویسندگان برجسته، و شکاف‌های پژوهشی در این حوزه است. سؤالات اصلی پژوهش عبارت‌اند از:

- روند انتشار مقالات در زمینه نانوذرات هوا و ناباروری در دو دهه اخیر چگونه بوده است؟
- چه موضوعات و زیر موضوعاتی در این حوزه بیشترین توجه را دریافت کرده‌اند؟
- کدام شکاف‌های پژوهشی در این حوزه نیازمند توجه بیشتر هستند؟

این مقاله با رویکرد قیاسی (کل به جزء) سازماندهی شده است. ابتدا، با مروری کلی بر وضعیت تحقیقات جهانی در زمینه نانوذرات و سلامت، چارچوب مفهومی پژوهش ترسیم می‌شود. سپس، با تمرکز بر داده‌های علم‌سنجی، روندهای کلی انتشار مقالات، نویسندگان کلیدی و مجلات فعال تحلیل می‌شود. در ادامه، از طریق نقشه‌برداری موضوعی، خوشه‌های موضوعی و ارتباطات میان آن‌ها شناسایی خواهد شد. در نهایت، با تلفیق یافته‌ها، شکاف‌های پژوهشی و جهت‌گیری‌های آینده پیشنهاد می‌شود. این ساختار زنجیروار، از بررسی کلیات به جزئیات، به پاسخ‌گویی به سؤالات پژوهش منجر خواهد شد. در این راستا، سؤال کلیدی این است: چگونه می‌توان با استفاده از علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی، درک جامعی از روند تحقیقات جهانی در زمینه نانوذرات هوا و ناباروری به دست آورد؟

مبانی نظری پژوهش

مطالعات مربوط به تأثیر آلودگی هوا بر سلامت انسان از دهه‌های گذشته آغاز شده است، اما توجه به اثرات نانوذرات موجود در هوا بر سلامت باروری از اوایل قرن بیست ویکم شدت گرفت. با پیشرفت فناوری نانو و افزایش استفاده از نانوذرات در صنایع مختلف، نگرانی‌ها درباره اثرات زیست‌محیطی و سلامت این مواد افزایش یافت. نانوذرات، به دلیل اندازه کوچک (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی منحصربه‌فرد، قادر به نفوذ به بافت‌های بیولوژیکی هستند و می‌توانند اثرات سمی بر سیستم‌های تولیدمثل ایجاد کنند (کاری و همکاران ، ۲۰۱۷). از دهه ۲۰۰۰، تحقیقات اولیه بر سمیت حاد نانوذرات متمرکز بود، اما با پیشرفت علم، توجه به اثرات مزمن، از جمله تأثیر بر ناباروری، افزایش یافت (چکا ویزکاینو و همکاران ، ۲۰۱۶). این موضوع به‌ویژه به دلیل افزایش نرخ ناباروری در جوامع مدرن و ارتباط احتمالی آن با عوامل محیطی مورد توجه قرار گرفته است (هانت و همکاران ، ۲۰۲۴).

نانوذرات به ذراتی با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر اطلاق می‌شود که می‌توانند از منابع طبیعی (مانند گردوغبار آتشفشانی) یا مصنوعی (مانند احتراق سوخت یا محصولات صنعتی) تولید شوند (ابرهارد و همکاران ، ۲۰۲۴). این ذرات به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی قوی‌تری دارند و می‌توانند از طریق استنشاق، پوست یا تزریق وارد بدن شوند (صدیقی و همکاران ، ۲۰۲۲). ناباروری به ناتوانی در باروری پس از یک سال تلاش مداوم تعریف می‌شود و می‌تواند ناشی از اختلالات در تولید گامت‌ها، کیفیت اسپرم یا تخمک، یا عملکرد هورمونی باشد (کاری و همکاران، ۲۰۱۷). در این پژوهش، تمرکز بر نانوذرات موجود در هوا (مانند PM2.5، نانوذرات فلزی، و میکروپلاستیک‌ها) و تأثیر آن‌ها بر شاخص‌های باروری، از جمله تعداد، تحرک و مورفولوژی اسپرم، و همچنین سلامت جنینی است. عوامل متعددی بر تأثیر نانوذرات بر سیستم تولیدمثل اثر می‌گذارند:

- ترکیب شیمیایی: نانوذرات مختلف مانند دی‌اکسید تیتانیوم (nano-TiO2)، نقره (Ag-NPs)، طلا (Au-NPs)، و میکروپلاستیک‌ها اثرات متفاوتی دارند. برای مثال، nano-TiO2 می‌تواند باعث استرس اکسیداتیو و آسیب به DNA در سلول‌های زایا شود (فان و همکاران، ۲۰۲۳).
- اندازه و غلظت: نانوذرات کوچک‌تر به دلیل توانایی نفوذ بیشتر به بافت‌ها، سمیت بیشتری دارند (ابرهارد و همکاران، ۲۰۲۴). غلظت‌های بالاتر نانوذرات نقره و طلا در آزمایش‌های انجام شده در شرایط آزمایشگاهی باعث کاهش تحرک و زنده‌مانی اسپرم شده است (مورتی و همکاران ، ۲۰۱۲).
- مسیر مواجهه: استنشاق نانوذرات موجود در هوا، شایع‌ترین مسیر مواجهه است که می‌تواند به تجمع آن‌ها در بیضه‌ها و تخمدان‌ها منجر شود (کلین و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، نانوذرات می‌توانند از سد جفت عبور کرده و بر دستگاه تناسلی جنین اثر بگذارند (سامروت و همکاران، ۲۰۲۳).
- مدت زمان مواجهه: مواجهه مزمن با نانوذرات می‌تواند اثرات تجمعی داشته باشد، در حالی که مواجهه حاد ممکن است اثرات موقتی ایجاد کند (چکا ویزکاینو و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول ۱. ابعاد اصلی تأثیر نانوذرات بر ناباروری و سلامت جنین

ابعاد	تأثیر
استرس اکسیداتیو	نانوذرات با تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) باعث آسیب به غشای سلولی، میتوکندری و DNA در سلول‌های زایا می‌شوند (سارموت و همکاران[1]، ۲۰۲۳). این مکانیسم در کاهش کیفیت اسپرم و تخمک نقش دارد (هاباس و همکاران[2]، ۲۰۲۱).
اختلالات هورمونی	نانوذرات می‌توانند به‌عنوان اخلال‌گرهای غدد درون‌ریز عمل کرده و تعادل هورمون‌هایی مانند تستوسترون و پروژسترون را مختل کنند (سارگازی و همکاران[3]، ۲۰۲۲).
آسیب به بافت‌های تولیدمثل	تجمع نانوذرات در بیضه‌ها و تخمدان‌ها می‌تواند باعث التهاب، آپوپتوز غیرطبیعی و آسیب به ساختار بافت‌ها شود (فان و همکاران، ۲۰۲۳؛ ایفتیخار و همکاران[4]، ۲۰۲۱).
تأثیرات جنینی	نانوذرات می‌توانند از سد جفت عبور کرده و باعث نقص دستگاه تولیدمثلی جنین شوند (هانت و همکاران، ۲۰۲٤).

پیشینهٔ پژوهش

مطالعات متعددی تأثیر نانوذرات بر سیستم تولیدمثل را بررسی کرده‌اند. کاری و همکاران (۲۰۱۷) در یک مرور سیستماتیک نشان دادند که آلاینده‌های هوا، از جمله PM2.5 و نانوذرات، با کاهش ظرفیت تولیدمثلی در جمعیت‌های مواجهه‌یافته مرتبط هستند. این مطالعه مکانیسم‌هایی مانند استرس اکسیداتیو، تشکیل آداکت‌های DNA و تغییرات اپی‌ژنتیکی را به‌عنوان عوامل اصلی معرفی کرد. به طور مشابه، چکا ویزکاینو و همکاران (۲۰۱۶) دریافتند که مواجهه با آلاینده‌های هوا در زنان تحت لقاح مصنوعی (IVF) با کاهش نرخ تولد زنده و افزایش خطر سقط جنین همراه است. این مطالعه نشان داد که اثرات آلاینده‌ها بر زنان نابارور مشابه جمعیت عمومی است. هانت و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی میکروپلاستیک‌ها، حضور این ذرات را در جفت و مدفوع جنینی تأیید کردند و ارتباط آن‌ها با کاهش وزن هنگام

1- Samrot et al.
2- Habas et al.
3- Sargazi et al.
4- Iftikhar et al.

تولد و تنوع میکروبیوتای روده را گزارش دادند. ابرهارد و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی نانوذرات در هوای داخل و خارج، نشان دادند که مواجهه استنشاقی در نوزادان و کودکان پیش‌دبستانی بالاترین دوز را دارد و می‌تواند اثرات تجمعی بر سلامت تولیدمثل داشته باشد. کلین و همکاران (۲۰۲۳) و ایفتیخار و همکاران (۲۰۲۱) بر اثرات نانوذرات بر بیضه‌ها متمرکز شدند و گزارش دادند که نانوذرات می‌توانند پس از عبور از سد خونی-بیضه‌ای، باعث کاهش تعداد و تحرک اسپرم شوند. با این حال، کلین و همکاران (۲۰۲۳) تأکید کردند که اثرات سمی در بزرگسالان معمولاً ضعیف و قابل‌برگشت است، اما استثناهایی وجود دارد که نیازمند بررسی بیشتر است. فان و همکاران (۲۰۲۳) به‌طور خاص به نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم پرداختند و مکانیسم‌هایی مانند استرس اکسیداتیو، التهاب و اختلال در سنتز هورمون را به‌عنوان عوامل اصلی سمیت معرفی کردند. سارقازی و همکاران (۲۰۲۲) کاربردهای مثبت نانوذرات در تشخیص و درمان ناباروری را بررسی کردند، اما هشدار دادند که برخی نانوذرات ممکن است به دلیل سمیت، اثرات منفی بر سلول‌های زایا داشته باشند. سارموت و همکاران (۲۰۲۳) نقش آنتی‌اکسیدان‌ها را در کاهش سمیت نانوذرات بررسی کردند و پیشنهاد دادند که استفاده از آنتی‌اکسیدان‌ها می‌تواند اثرات مخرب را کاهش دهد. مورتی و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای در شرایط آزمایشگاهی نشان دادند که نانوذرات طلا و نقره در غلظت‌های بالا باعث کاهش تحرک و زنده‌مانی اسپرم می‌شوند، اما در شرایط ازمایشکاهی این اثرات کمتر محتمل است. میرگالویه بیات و همکاران (۲۰۲۴) دریافتند که نانوذرات اکسید منیزیم (MgO NPs) در حالی که pH، مورفولوژی و یکپارچگی DNA اسپرم را حفظ می‌کنند، تحرک و زنده‌مانی اسپرم را کاهش می‌دهند. در نهایت، پورتاقل و همکاران (۲۰۲۴) به خطرات نانوذرات موجود در هوا اشاره کردند و نیاز به پروتکل‌های استاندارد برای ارزیابی سمیت را تأکید نمودند. مطالعات نشان می‌دهند که نانوذرات موجود در هوا از طریق مکانیسم‌هایی مانند استرس اکسیداتیو، اختلالات هورمونی و آسیب به بافت‌های تولیدمثل می‌توانند بر باروری اثر بگذارند. با این حال، شکاف‌هایی در مورد مکانیسم‌های دقیق، اثرات بلندمدت و تفاوت‌های بین انواع نانوذرات وجود دارد. این پژوهش با استفاده از رویکرد علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی به دنبال تحلیل روند تحقیقات جهانی در این حوزه و شناسایی این شکاف‌ها است.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد مرور نظام‌مند و تحلیل علم‌سنجی انجام شده است تا روند تحقیقات جهانی در خصوص ارتباط بین نانوذرات موجود در هوا و ناباروری در دو دهه اخیر (۲۰۰۴–۲۰۲۴) مورد بررسی قرار گیرد.

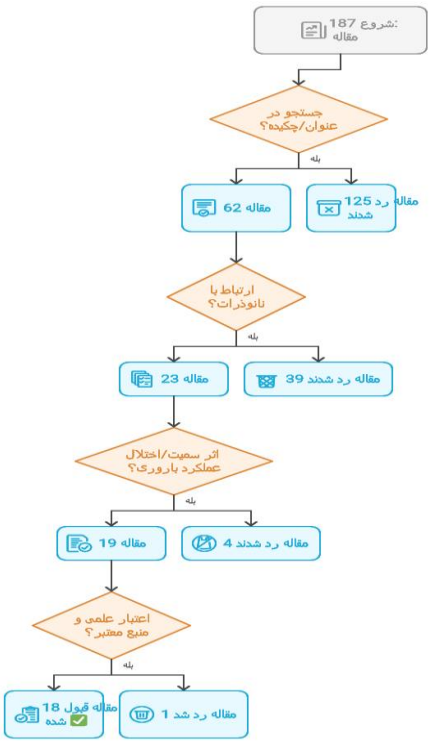
فرایند انتخاب مقالات در چهار مرحله متوالی و مبتنی بر الگوی PRISMA انجام شد:

مرحله اول: جستجوی اولیه در پایگاه‌های داده علمی شامل Web of Science، Scopus و PubMed صورت گرفت. کلیدواژه‌های مورداستفاده شامل ترکیباتی از واژه‌های " nanoparticles", "air pollution", "infertility", "PM2.5", "reproductive toxicity"" و معادل‌های آن‌ها بود. در این مرحله، در مجموع ۱۸۷ مقاله بازیابی شد.

مرحله دوم: پالایش اولیه مقالات بر اساس عنوان و چکیده انجام شد. در این مرحله، مقالات نامرتبط، تکراری، و مقالاتی که تمرکز آن‌ها خارج از دامنه موضوعی پژوهش بود، حذف شدند. ۶۲ مقاله برای بررسی بیشتر انتخاب شده و ۱۲۵ مقاله حذف گردیدند.

مرحله سوم: بررسی دقیق‌تر متن کامل مقالات انتخاب‌شده مرحله قبل انجام شد. معیارهای ورود شامل تمرکز بر تأثیر نانوذرات معلق هوا بر باروری انسان یا حیوانات، برخورداری از روش علمی معتبر و انتشار در بازه زمانی موردنظر بود. در این مرحله، ۲۳ مقاله باقی ماندند و ۳۹ مقاله رد شدند.

مرحله چهارم: ارزیابی نهایی بر اساس کیفیت روش‌شناسی، نوع مطالعه (مروری، تجربی، مشاهده‌ای)، نمایه بودن در منابع معتبر، و تناسب با اهداف پژوهش انجام شد. در نهایت، ۱۸ مقاله واجد شرایط نهایی انتخاب شدند و تنها ۱ مقاله در این مرحله حذف گردید.



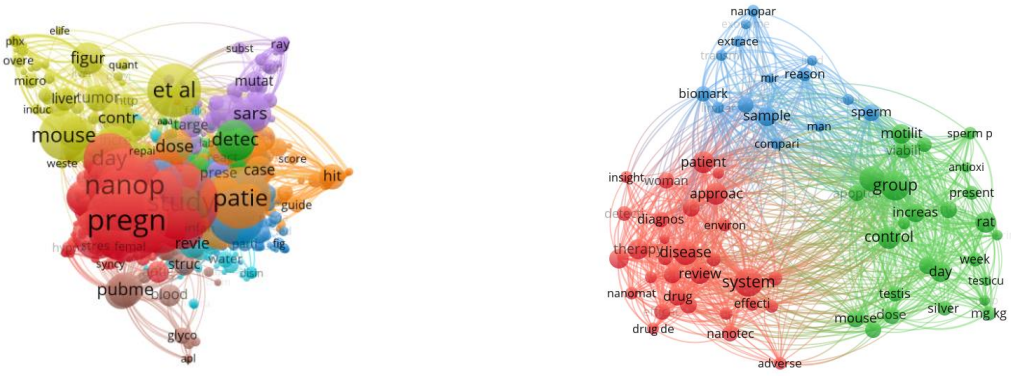
شکل ۱- فلوچارت روند پژوهش

جدول ۲- معیارهای ورود و خروج

معیارهای ورود	معیارهای خروج
تمرکز بر ارتباط نانوذرات هوا با ناباروری	مطالعات فاقد ارتباط مستقیم با موضوع
انتشار در مجلات معتبر علمی بین‌المللی	مقالات مروری ضعیف یا فاقد داده‌های معتبر
انتشار بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲٤	تکراری یا غیرقابل‌دسترس بودن متن کامل مقاله
دارا بودن داده‌های تجربی یا تحلیل‌های معتبر علم‌سنجی	

شبکه مفهومی ارائه‌شده در شکل۲، یک نقشه‌برداری موضوعی از تحقیقات جهانی در حوزه نانوذرات هوا و ناباروری در دو دهه اخیر را نشان می‌دهد که با استفاده از رویکرد علم‌سنجی ترسیم شده است. این شبکه از گره‌ها و یال‌هایی تشکیل شده که گره‌ها مفاهیم کلیدی (مانند ""nanopart"، "sperm"، "infertility"، "effect"" و "mouse") و یال‌ها ارتباط بین این مفاهیم را نشان می‌دهند. رنگ‌های مختلف گره‌ها (قرمز، سبز و آبی) بیانگر خوشه‌های موضوعی متمایز هستند که هر یک بر جنبه‌ای خاص از موضوع تمرکز دارند. خوشه قرمز در سمت چپ شبکه، بر مفاهیم مرتبط با ""disease"، "system"، "diagnosis"، "drug"" و "effect" متمرکز است. این خوشه نشان‌دهنده تحقیقاتی است که به اثرات نانوذرات

هوا بر سیستم‌های بیولوژیکی، بیماری‌ها و جنبه‌های تشخیصی و درمانی پرداخته‌اند. حضور گره "nanopart" در این خوشه و ارتباط قوی آن با "effect" و "disease" حاکی از آن است که بخش قابل‌توجهی از تحقیقات بر پیامدهای منفی نانوذرات، از جمله سمیت و تأثیرات بیماری‌زا، متمرکز بوده است. این خوشه احتمالاً به بررسی مکانیسم‌هایی مانند استرس اکسیداتیو و التهاب می‌پردازد که در مطالعات متعددی به‌عنوان عوامل اصلی سمیت نانوذرات شناسایی شده‌اند. خوشه سبز در مرکز شبکه، مفاهیمی مانند ""sperm"، "control"، "group"، "increase"" و "testis" را در بر می‌گیرد. این خوشه به‌طور خاص بر مطالعات تجربی متمرکز است که اثرات نانوذرات هوا بر پارامترهای اسپرم و بافت بیضه را بررسی کرده‌اند. گره‌های "sperm" و "testis" با گره‌های "increase" و "effect" ارتباط قوی دارند، که نشان‌دهنده تمرکز بر کاهش کیفیت اسپرم (مانند تعداد، تحرک و مورفولوژی) و آسیب به بافت بیضه در مواجهه با نانوذرات است. حضور گره "control" و "group" بیانگر استفاده گسترده از طراحی‌های تجربی با گروه‌های کنترل و آزمایش در این مطالعات است، که معمولاً در مدل‌های حیوانی مانند موش انجام می‌شوند (گره "mouse"). خوشه آبی در سمت راست شبکه، مفاهیمی مانند ""man"، "patient"، "sample"، "biomark"" و "review" را شامل می‌شود. این خوشه بر مطالعات انسانی و مرورهای سیستماتیک متمرکز است که تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری مردان را بررسی کرده‌اند. گره "man" و "patient" نشان‌دهنده تمرکز بر جمعیت‌های انسانی، از جمله بیماران نابارور، است. ارتباط گره "biomark" با "sample" حاکی از تحقیقاتی است که به شناسایی نشانگرهای زیستی مرتبط با ناباروری در مواجهه با نانوذرات پرداخته‌اند، مانند سطح هورمون‌ها یا نشانگرهای استرس اکسیداتیو. حضور گره "review" بیانگر تعداد قابل‌توجه مرورهای سیستماتیک در این حوزه است که سعی در جمع‌بندی شواهد موجود دارند. ارتباط بین خوشه‌ها نیز قابل‌توجه است. گره "nanopart" در خوشه قرمز با گره‌های "sperm" و "testis" در خوشه سبز و "man" در خوشه آبی مرتبط است، که نشان‌دهنده پیوستگی موضوعی بین تحقیقات بنیادی (خوشه قرمز)، مطالعات تجربی حیوانی (خوشه سبز) و پژوهش‌های انسانی (خوشه آبی) است. این ارتباط حاکی از آن است که تحقیقات در این حوزه از سطح مکانیسمی (مانند استرس اکسیداتیو) به سطح تجربی (اثرات بر اسپرم و بیضه) و نهایتاً به سطح بالینی (تأثیر بر ناباروری مردان) پیش رفته است. از منظر روند زمانی، گره‌های مرتبط با مدل‌های حیوانی (مانند "mouse" و "testis") و مفاهیم مکانیسمی (مانند "effect" و "disease") نشان‌دهنده تمرکز اولیه تحقیقات در دهه اول (۲۰۰۰-۲۰۱۰) بر درک مکانیسم‌های سمیت نانوذرات است. در دهه دوم (۲۰۱۰-۲۰۲۰)، با افزایش گره‌های ""patient ،man"" و "biomark"، توجه به مطالعات انسانی و بالینی افزایش یافته است. این روند نشان‌دهنده حرکت از تحقیقات پایه به سمت کاربردهای بالینی و شناسایی پیامدهای واقعی نانوذرات بر سلامت تولیدمثل انسان است.



شکل ۱- نقشه‌برداری موضوعی از تحقیقات جهانی در حوزه نانوذرات هوا و ناباروری

یافته‌های پژوهش

مطالعه سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثر محافظتی آلفا-توکوفرول و آنتوسیانین در برابر سمیت ژنتیکی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO2-NPs) بر اسپرم انسان پرداخت. این مطالعه in vitro با استفاده از نمونه‌های اسپرم ۱۳۲ مرد، پس از مواجهه با دوز ۱ میکروگرم بر لیتر TiO2-NPs و افزودن آنتی‌اکسیدان‌ها در زمان‌های مختلف (۱۵ تا ۹۰ دقیقه)، انجام شد. نتایج نشان داد که TiO2-NPs باعث کاهش یکپارچگی DNA، افزایش آپوپتوز، و کاهش پایداری ژنومی به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود. آلفا-توکوفرول و آنتوسیانین به‌طور زمان‌مند این آسیب‌ها را کاهش دادند، به‌ویژه پس از ۳۰ و ۹۰ دقیقه. استفاده از تست‌های Comet، TUNEL و RAPD-PCR برای ارزیابی آسیب DNA و پایداری ژنومی، نقطه قوت این مطالعه است. با این حال، ماهیت in vitro آن، امکان تعمیم نتایج به شرایط آزمایشگاهی را محدود می‌کند. این مطالعه نشان‌دهنده پتانسیل آنتی‌اکسیدان‌ها در کاهش سمیت نانوذرات است و کاربرد بالینی آن‌ها در درمان ناباروری ناشی از عوامل محیطی را پیشنهاد می‌دهد (سانتوناستاسو و همکاران، ۲۰۲۱). شاندیلیا و همکاران (۲۰۲۰) در یک مرور جامع، کاربردهای نانوفناوری در پزشکی تولیدمثل را بررسی کردند. این مطالعه بر پتانسیل نانوذرات در تشخیص زودهنگام بیماری‌های تولیدمثلی، مانند عفونت‌ها و سرطان‌ها، و درمان هدفمند تأکید دارد. با این حال، این پژوهش به خطرات سمیت نانوذرات، به‌ویژه بر سلول‌های زایا، اشاره می‌کند. نقطه قوت این مطالعه، ارائه دیدگاهی جامع از کاربردهای مثبت و منفی نانوذرات است، اما فقدان داده‌های تجربی مستقیم و تمرکز بر مرور ادبیات، محدودیت آن محسوب می‌شود. این مطالعه بر نیاز به تحقیقات بیشتر برای ترجمه بالینی ایمن نانوفناوری تأکید دارد (شاندیلیا و همکاران ، ۲۰۲۰). مهر و همکاران (۲۰۲۴) کاربردهای نانوذرات نقره (AgNPs) در زیست‌پزشکی را بررسی کردند و به ویژگی‌هایی مانند رزونانس پلاسمون سطحی و خاصیت ضدمیکروبی اشاره نمودند. این مطالعه نشان داد که AgNPs در تشخیص و درمان بیماری‌ها، از جمله پوشش‌های پزشکی و تحویل دارو، کاربرد دارند، اما اثرات سمی احتمالی آن‌ها بر سلول‌های زایا نیازمند بررسی بیشتر است. تحلیل جامع روش‌های سنتز و کاربردهای AgNPs نقطه قوت این مطالعه است، اما فقدان داده‌های تجربی خاص در مورد تأثیر بر باروری و تمرکز بر جنبه‌های عمومی زیست‌پزشکی، محدودیت آن محسوب می‌شود. این مطالعه بر لزوم بهینه‌سازی نانوذرات برای کاهش سمیت تأکید دارد (مهر و همکاران ، ۲۰۲۴). آلویسی و همکاران (۲۰۲۲) اثرات نانوذرات فلزی بر سیستم تولیدمثل زنان را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که نانوذرات می‌توانند به تخمدان، رحم و جفت نفوذ کرده و باعث کاهش پتانسیل باروری و آسیب به سلامت جنین شوند. با این حال، کاربردهای درمانی نانوذرات در درمان سرطان تخمدان و حفظ باروری نیز برجسته شد. استفاده از داده‌های حیوانی و انسانی برای تحلیل اثرات سمی و درمانی، نقطه قوت این مطالعه است. محدودیت آن، فقدان تمرکز بر مکانیسم‌های مولکولی دقیق و داده‌های محدود در مورد انواع خاص نانوذرات است. این مطالعه بر نیاز به تعادل بین خطرات و فواید نانوذرات تأکید دارد (آلویسی و همکاران ، ۲۰۲۲). الیان و همکاران (۲۰۲۴) اثرات نانوذرات مگنتیت و نقش محافظتی کورکومین را بر تخمدان موش‌های ماده بررسی کردند. این مطالعه با استفاده از ۴۰ موش ماده و دوز ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نانوذرات مگنتیت نشان داد که این نانوذرات باعث کاهش سطح هورمون‌های FSH، LH، استروژن و پروژسترون، افزایش آپوپتوز، و کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شوند. درمان همزمان با کورکومین (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) این اثرات را بهبود بخشید. استفاده از مدل حیوانی و تحلیل‌های مولکولی، از جمله داکینگ برای بررسی تعامل کورکومین با گیرنده‌های هورمونی، نقطه قوت این مطالعه است. محدودیت آن، عدم بررسی اثرات بلندمدت و تمرکز بر

یک نوع نانوذره است. این مطالعه نقش آنتی‌اکسیدان‌ها در کاهش سمیت نانوذرات را تأیید می‌کند (الیان و همکاران، ۲۰۲۴). فادل و همکاران (۲۰۲۳) اثرات نانوذرات نقره (AgNPs) را بر باروری موش‌های نر بررسی کردند. این مطالعه با استفاده از ۳۵ موش نر و دوزهای ۶۲,۵ و ۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم AgNPs به مدت ۳۵ روز نشان داد که این نانوذرات باعث کاهش تعداد، تحرک و مورفولوژی اسپرم و افزایش آسیب DNA می‌شوند. دوره ۱۵ روزه بهبودی نشان داد که برخی اثرات قابل‌برگشت هستند. استفاده از تست Comet برای ارزیابی آسیب DNA و بررسی دوره بهبودی، نقاط قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، عدم بررسی مکانیسم‌های مولکولی دقیق و تمرکز بر دوزهای بالا است. این مطالعه بر سمیت وابسته به دوز AgNPs تأکید دارد (فادل و همکاران ، ۲۰۲۳). نظری و همکاران (۲۰۲۳) اثرات نانوساختارهای هسته-پوسته Au@Ag با پوشش آلژینات را بر سیستم تولیدمثل موش‌های نر بررسی کردند. این مطالعه با استفاده از دوز ۱,۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به مدت ۱۴ و ۳۵ روز نشان داد که این نانوساختارها باعث کاهش عملکرد اسپرم، افزایش آپوپتوز، و کاهش نشانگرهای اتوفاژی می‌شوند. در فاز مزمن، نفوذ به بافت بیضه و تخریب اپیتلیوم مشاهده شد. تحلیل‌های مولکولی مانند TUNEL و بررسی بیان ژن‌های Bax و caspase-3 نقطه قوت این مطالعه است. محدودیت آن، عدم بررسی اثرات بین‌نسلی و تمرکز بر یک نوع نانوساختار است. این مطالعه بر تأثیر منفی نانوساختارها بر باروری تأکید دارد (نظری و همکاران ، ۲۰۲۳).

وی و همکاران (۲۰۲۳) اثرات نانوذرات آنتی‌اکسیدانی honokiol را در کاهش سمیت سیس‌پلاتین بر بیضه‌های موش بررسی کردند. این مطالعه با تزریق داخل صفاقی دوز ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به مدت ۶ هفته نشان داد که این نانوذرات با تقویت مسیر ترمیم DNA (MDC1-53bp1) و کاهش آسیب اکسیداتیو میتوکندری، اسپرماتوژنز و تولید ATP را بهبود می‌بخشند. تحلیل‌های دقیق مولکولی و استفاده از مدل حیوانی نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، عدم بررسی اثرات مستقیم نانوذرات honokiol بدون سیس‌پلاتین است. این مطالعه پتانسیل درمانی نانوذرات آنتی‌اکسیدانی را تأیید می‌کند (وی و همکاران ، ۲۰۲۳). احمد و همکاران (۲۰۱۹) اثرات محافظتی کورکومین-نانوذرات اکسید روی را در برابر ناباروری ناشی از سیکلوفسفامید در موش‌های نر بررسی کردند. این مطالعه با استفاده از دوزهای ۱۵ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به مدت ۳۰ روز نشان داد که این نانوذرات باعث افزایش تحرک و تعداد اسپرم، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، و سطح تستوسترون و FSH می‌شوند. استفاده از مدل حیوانی و دوزهای چندگانه نقطه قوت این مطالعه است. محدودیت آن، عدم بررسی اثرات بلندمدت و مکانیسم‌های مولکولی دقیق است. این مطالعه نقش نانوذرات ترکیبی در کاهش سمیت را تأیید می‌کند (احمد و همکاران ، ۲۰۱۹). مریدی و همکاران (۲۰۱۸) اثرات محافظتی نانوذرات اکسید سریم (CeNPs) را در برابر سمیت مالاتیون در موش‌های نر بررسی کردند. این مطالعه با استفاده از دوزهای ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به مدت ۴ هفته نشان داد که CeNPs در دوز ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باعث بهبود تعداد، تحرک و زنده‌مانی اسپرم و کاهش استرس اکسیداتیو می‌شود. تحلیل‌های بیوشیمیایی و استفاده از مدل حیوانی نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، عدم بررسی اثرات در زنان و تمرکز بر یک عامل سمی است. این مطالعه نقش آنتی‌اکسیدانی CeNPs را تأیید می‌کند (مریدی و همکاران ، ۲۰۱۸). ژنگ و همکاران (۲۰۲۴) اثرات نانوذرات نیکل (Ni NPs) را بر سلول‌های اسپرماتوگونی موش (GC-1) بررسی کردند. این مطالعه در شرایط آزمایشگاهی نشان داد که این نانوذره باعث تقسیم میتوکندری از طریق مسیر DRP1 و افزایش آپوپتوز می‌شوند. استفاده از مهارکننده Mdivi-1 این اثرات را کاهش داد. تحلیل‌های مولکولی دقیق و تمرکز بر دینامیک‌های میتوکندری نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، ماهیت in vitro و عدم بررسی اثرات in vivo است. این مطالعه نقش دینامیک‌های میتوکندری در سمیت نانوذرات را برجسته

می‌کند (ژنگ و همکاران ، ۲۰۲۴). الموسوی و همکاران (۲۰۲۲) اثرات نانوذرات اکسید مس (CuO NPs) و سولفات مس را بر سیستم تولیدمثل موش‌های نر مقایسه کردند. این مطالعه با دوزهای ۲۵ و ۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به مدت ۱۴ روز نشان داد که هر دو ماده باعث کاهش وزن بیضه، افزایش MDA و آپوپتوز، و کاهش بیان Ki67 می‌شوند، اما CuO NPs سمیت کمتری دارند. استفاده از تحلیل‌های ایمونوهیستوشیمیایی و مقایسه دو ماده نقطه قوت این مطالعه است. محدودیت آن، عدم بررسی اثرات بلندمدت و مکانیسم‌های مولکولی است. این مطالعه بر سمیت کمتر CuO NPs نسبت به سولفات مس تأکید دارد (الموسوی و همکاران ، ۲۰۲۲). باریتو و همکاران (۲۰۲۵) اثرات نانوذرات مغناطیسی منگنز-فریت را در ایجاد ناباروری دائمی در موش‌های نر بررسی کردند. این مطالعه با تزریق داخل بیضه‌ای و استفاده از هیپرترمی مغناطیسی نشان داد که این روش باعث آتروفی بیضه و فقدان لوله‌های سمینال بدون اثرات جانبی بلندمدت می‌شود. بررسی ۱۲ ماهه و تحلیل‌های جامع سلامت عمومی نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، تمرکز بر یک روش خاص و عدم بررسی اثرات در زنان است. این مطالعه کاربرد نانوذرات در عقیم‌سازی غیرجراحی را تأیید می‌کند (باریتو و همکاران ، ۲۰۲۵). اسمیت و همکاران (۲۰۱۴) اثرات نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم آناتاز (ATNPs) را بر موش‌های نر بررسی کردند. این مطالعه با تزریق داخل صفاقی دوزهای ۲,۵ و ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به مدت ۳ روز نشان داد که ATNPs در کوتاه‌مدت (تا ۱۲۰ ساعت) باعث افزایش آپوپتوز، کاهش تحرک اسپرم و افزایش ROS می‌شوند، اما این اثرات در بلندمدت (تا ۵ هفته) قابل‌برگشت هستند. استفاده از میکروسکوپ الکترونی و تحلیل‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت نقطه قوت این مطالعه است. محدودیت آن، عدم بررسی مکانیسم‌های مولکولی دقیق است. این مطالعه بر سمیت موقت ATNPs تأکید دارد (اسمیت و همکاران ، ۲۰۱۴). شیونگ و همکاران (۲۰۲۲) اثرات نانوذرات اکسید مس (CuONPs) را بر اسپرم انسان در شرایط آزمایشگاهی بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که CuONPs باعث کاهش تحرک، زنده‌مانی و ظرفیت‌سازی اسپرم از طریق استرس اکسیداتیو و کاهش فسفوریلاسیون AMPK می‌شوند. استفاده از NAC و فعال‌کننده AMPK این اثرات را کاهش داد. تحلیل‌های مولکولی دقیق و تمرکز بر مسیر AMPK نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، ماهیت آزمایشگاهی و عدم بررسی اثرات in vivo است. این مطالعه نقش مسیر AMPK در سمیت نانوذرات را تأیید می‌کند (شیونگ و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین شیونگ و همکاران (۲۰۲۴) اثرات انتقال بین‌نسلی نانوذرات اکسید مس را در موش‌ها بررسی کردند. این مطالعه با دوزهای مختلف CuONPs به مدت ۳۵ روز نشان داد که این نانوذرات باعث کاهش سطح H3K9me3 در اسپرم پدری، اختلال در مسیر GDNF/PI3K/AKT، و آستنواسپرمی در نسل بعدی می‌شوند. تحلیل‌های اپی‌ژنتیکی و بررسی اثرات بین‌نسلی نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، تمرکز بر یک نوع نانوذره و عدم بررسی اثرات در زنان است. این مطالعه بر تأثیرات اپی‌ژنتیکی نانوذرات تأکید دارد (شیونگ و همکاران ، ۲۰۲۴). ساید و همکاران (۲۰۲۲) اثرات محافظتی روغن اسانسی Pelargonium graveolens را در برابر سمیت TiO2-NPs در موش‌های نر بررسی کردند. این مطالعه با دوز TiO2-NPs100 ppm و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم روغن اسانسی به مدت ۶۰ روز نشان داد که TiO2-NPs باعث کاهش کیفیت اسپرم و سطح هورمون‌ها می‌شود، اما روغن اسانسی این اثرات را بهبود می‌بخشد. تحلیل‌های مورفومتریک و بررسی بیان ژن‌های استروئیدوژنز نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، عدم بررسی مکانیسم‌های دقیق روغن اسانسی است. این مطالعه نقش ترکیبات طبیعی در کاهش سمیت نانوذرات را تأیید می‌کند (ساید و همکاران ، ۲۰۲۲). آراتو و همکاران (۲۰۲۳) اثرات نانوذرات اکسید نیکل (NiO NPs) را بر سلول‌های سرتولی پیش‌بالغ خوک بررسی کردند. این مطالعه in vitro با دوزهای ۱ و ۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر نشان داد که NiO NPs باعث افزایش ROS، آسیب DNA، کاهش بیان AMH و اینهیبین B، و فعال‌سازی مسیرهای MAPK می‌شوند. تحلیل‌های مولکولی و بررسی سیتوکین‌های پیش‌التهابی

نقطه قوت این مطالعه هستند. محدودیت آن، ماهیت آزمایشگاهی و عدم بررسی اثرات in vivo است. این مطالعه تأثیر منفی NiO NPs بر عملکرد سلول‌های سرتولی را تأیید می‌کند (آراتو و همکاران ، ۲۰۲۳). این مطالعات به‌طور جامع اثرات نانوذرات (TiO2-NPs، AgNPs، CuONPs، NiO NPs، و نانوذرات مغناطیسی) را بر سیستم تولیدمثل بررسی کرده‌اند. مکانیسم‌های اصلی سمیت شامل استرس اکسیداتیو، آپوپتوز، اختلالات هورمونی، و تغییرات اپی‌ژنتیکی است. مطالعات در شرایط آزمایشگاهی مکانیسم‌های مولکولی را به‌خوبی روشن کرده‌اند، اما محدودیت تعمیم به شرایط آزمایشگاهی دارند. مطالعات در شرایط آزمایشگاهی اثرات واقعی‌تر را نشان داده‌اند، اما اغلب فاقد بررسی‌های بلندمدت یا مکانیسم‌های دقیق هستند. نقش آنتی‌اکسیدان‌ها (آلفا-توکوفرول، کورکومین، honokiol، و روغن‌های اسانسی) در کاهش سمیت نانوذرات در چندین مطالعه تأیید شده است، که پتانسیل درمانی آن‌ها را برجسته می‌کند. با این حال، کاربردهای درمانی نانوذرات نیازمند بهینه‌سازی برای کاهش خطرات سمیتی است. مطالعه شیونگ و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی اثرات بین‌نسلی، بعد جدیدی به این حوزه اضافه کرده است.

جدول ۳- تأثیر آلاینده‌ها بر ناباروری در انسان

نام نویسندگان و سال	روش‌شناسی و نتایج	مورد مطالعه	آلاینده هوا/ نانوذره
سانتوناستازو و همکاران، ۲۰۲۱	مطالعه in vitro با اسپرم ۱۳۲ مرد؛ کاهش یکپارچگی DNA و افزایش ROS. آنتی‌اکسیدان‌ها نقش حفاظتی نشان دادند. تست‌های TUNEL، Comet و RAPD-PCR.	اسپرم انسان، اثر حفاظتی آلفا-توکوفرول و آنتوسیانین	TiO2-NPs + آنتی‌اکسیدان‌ها
شاندیلیا و همکاران، ۲۰۲۰	مطالعه مروری. کاربردهای درمانی و تشخیصی نانوذرات و هشدار درباره سمیت آنها.	مرور نقش نانوفناوری در پزشکی تولیدمثل	نانوذرات مختلف
مهِر و همکاران، ۲۰۲٤	مرور روش‌های سنتز، کاربردها، و سمیت احتمالی نانوذرات نقره. فاقد داده تجربی باروری.	مرور ویژگی‌های زیست‌پزشکی نانوذرات نقره	AgNPs
آلویسی و همکاران، ۲۰۲۲	ترکیب داده‌های انسانی و حیوانی؛ اثرات مخرب بر تخمدان، رحم، جفت؛ کاربردهای درمانی در سرطان.	تأثیر بر اندام‌های تولیدمثلی زنان	نانوذرات فلزی
ایلیان و همکاران، ۲۰۲٤	دوز ۵۰mg/kg نانوذره، ۱۰۰mg/kg کورکومین؛ کاهش هورمون‌ها، افزایش آپوپتوز؛ مدل‌سازی داکینگ مولکولی.	تخمدان موش ماده	نانوذرات مگنتیت + کورکومین
فاضل و همکاران، ۲۰۲۳	دوزهای ٦۲,۵ و ۱۲۵mg/kg به‌مدت ۳۵ روز؛ کاهش کیفیت اسپرم و آسیب DNA؛ دوره بازیابی ۱۵روزه.	اسپرم و باروری موش نر	AgNPs
نظاری و همکاران، ۲۰۲۳	دوز ۱,۵mg/kg؛ افزایش آپوپتوز و اختلال در اپی‌تلیوم بیضه؛ تحلیل TUNEL، Bax و Caspase-3.	سیستم تولیدمثل موش نر	Au@Agبا پوشش آلژینات
وی و همکاران، ۲۰۲۳	دوز ۵mg/kg به‌مدت ٦ هفته؛ ترمیم DNA، افزایش ATP و بهبود اسپرماتوژنز.	محافظت در برابر سمیت سیس‌پلاتین در بیضه	نانوذرات honokiol

نام نویسندگان و سال	روش‌شناسی و نتایج	مورد مطالعه	آلاینده هوا/ نانوذره
		موش	
احمد و همکاران، ۲۰۱۹	دوزهای ۱۵ و ۲۰mg/kg؛ بهبود کیفیت اسپرم، افزایش آنتی‌اکسیدان‌ها؛ کاهش آسیب بافتی.	اسپرم و باروری موش نر در برابر سیکلوفسفامید	کورکومین + ZnO NPs
مریدی و همکاران، ۲۰۱۸	دوز ۱۵ و ۳۰mg/kg؛ کاهش استرس اکسیداتیو، بهبود پارامترهای اسپرم.	محافظت در برابر سمیت مالاتیون در موش نر	CeO2-NPs
ژنگ و همکاران، ۲۰۲٤	افزایش آپوپتوز از طریق DRP1؛ مهار با Mdivi-1؛ تحلیل دقیق دینامیک میتوکندری.	سلول‌های اسپرماتوگونی GC-1 موش (مطالعه in vitro)	Ni NPs
الموسوی و همکاران، ۲۰۲۲	دوز ۲۵ و ۳۵mg/kg؛ افزایش MDA و آپوپتوز؛ سمیت کمتر CuO نسبت به CuSO4.	اثر بر سیستم تولیدمثل موش نر	CuO NPsدر مقایسه با CuSO4
بریتو و همکاران، ۲۰۲۵	تزریق داخل بیضه و پیگیری ۱۲ ماهه؛ آتروفی بیضه بدون آسیب سیستمیک؛ نوآوری در ناباروری ایمن.	ناباروری برگشت‌ناپذیر در موش نر با هیپرترمی مغناطیسی	نانوذرات منگنز–فریت
هاشم و همکاران، ۲۰۲۲	دوزهای ۱۰۰mg/kg؛ کاهش آپوپتوز و ROS، بهبود باروری؛ تحلیل بیان ژن و هیستوپاتولوژی.	اثر محافظتی در برابر سمیت بیضه‌ای در موش نر	TiO2 NPs + Eویتامین
العریفی و همکاران، ۲۰۱۳	دوزهای ۵۰ و ۱۰۰mg/kg؛ کاهش استروژن، اختلال در فولیکولوژنز؛ افزایش ROS.	تأثیر در موش ماده	ZnO NPs
چوی و همکاران، ۲۰۱۰	افزایش تخریب DNA، اختلال در اسپرماتوژنز؛ تحلیل ساختاری بیضه و تست‌های آنزیمی.	اثر نانوذرات کوانتومی تلوریدکادمیم بر بیضه	CdTe QDs
صادقی و همکاران، ۲۰۲۱	دوزهای ۲۰ و ٤۰mg/kg AgNP، ۱۰۰ mg/kg NAC؛ بهبود اسپرم و کاهش آپوپتوز.	محافظت NAC در برابر سمیت AgNPs در موش نر	AgNPs + NAC
هوانگ و همکاران، ۲۰۱۰	دوز ۵۰mg/kg، ۲۱ روز؛ کاهش کیفیت اسپرم و تستوسترون؛ افزایش آنزیم‌های آسیب بافتی.	سمیت نانوذرات روی بر موش نر	ZnO NPs

مطالعاتی که بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ منتشر شده‌اند؛ تأثیر آلاینده‌های محیطی، به‌ویژه آلاینده‌های موجود در هوا مانند PM10، PM2.5، SO2، NOx، CO، و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAH)، را بر پارامترهای اسپرم و باروری مردان بررسی کرده‌اند. این مطالعات با استفاده از روش‌شناسی‌های مختلف (مقطعی، کوهورت آینده‌نگر، و کوهورت گذشته‌نگر) و جامعه آماری متنوع (از ۴۸ تا ۳۲۷ نفر) انجام شده‌اند و نتایج آن‌ها نشان‌دهنده اثرات منفی این آلاینده‌ها بر کیفیت اسپرم و باروری مردان است. مطالعه سلوان و همکاران (۲۰۰۰) با تمرکز بر ۲۷۲ مرد ۱۸ ساله سالم در جمهوری چک، پارامترهای اسپرم را در دو منطقه صنعتی (Teplice) و روستایی (Prachatice) مقایسه کرده و اثرات آلاینده‌های PM10، SO2، CO، و NOx را بررسی کرده است. این مطالعه مقطعی نشان داد که مردان در منطقه صنعتی Teplice، که در معرض سطوح بالاتری از آلودگی هوا بودند، کاهش معناداری در تحرک اسپرم (۳۱٫۶ ± ۱۶٫۳ در مقابل ۳۶٫۱ ± ۱۷٫۹) و مورفولوژی نرمال اسپرم (۱۶٫۶ ± ۷٫۳ در مقابل ۱۹٫۳ ± ۸٫۶) نسبت به مردان منطقه روستایی داشتند.

همچنین، مواجهه متوسط و بالا با این آلاینده‌ها به‌طور خاص با کاهش تحرک و مورفولوژی اسپرم مرتبط بود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر منفی آلودگی هوای صنعتی بر کیفیت اسپرم است، اما طراحی مقطعی این مطالعه نمی‌تواند رابطه علّی را تأیید کند و ممکن است عوامل مخدوش‌کننده مانند سبک زندگی بر نتایج اثر گذاشته باشند. مطالعه دی روزا و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی ۱۷۰ نفر، اثرات آلاینده‌های ناشی از ترافیک خودروها را بر کارگران عوارضی بزرگراه (۸۵ نفر) در مقایسه با گروه کنترل همسان‌شده (۸۵ نفر) ارزیابی کرده است. این مطالعه مقطعی نشان داد که گروه مواجهه‌یافته کاهش قابل‌توجهی در تحرک اسپرم (۳۴٫۷ ± ۲٫۲٪ در مقابل ۵۶٫۸ ± ۰٫۸٪)، زنده‌مانی اسپرم (۵۱٫۷ ± ۲٫۵٪ در مقابل ۸۰٫۷ ± ۰٫۶٪)، و یکپارچگی DNA اسپرم (۴۸٫۵ ± ۲٫۲٪ در مقابل ۷۵٫۷ ± ۰٫۶٪) نسبت به گروه کنترل داشتند. این نتایج بیانگر تأثیر مخرب آلاینده‌های ترافیکی بر سلامت اسپرم است و تحلیل یکپارچگی DNA نشان‌دهنده آسیب‌های ژنتیکی احتمالی است که می‌تواند باروری را تحت تأثیر قرار دهد. همسان‌سازی گروه‌ها نقطه قوت این مطالعه است، اما عدم اندازه‌گیری دقیق سطح مواجهه با آلاینده‌ها ممکن است دقت نتایج را کاهش داده باشد. مطالعه گاسپاری و همکاران (۲۰۰۳) با طراحی کوهورت آینده‌نگر و بررسی ۱۸۲ مرد نابارور با مورفولوژی غیرطبیعی اسپرم، ارتباط بین سطح ادکت‌های PAH-DNA در اسپرم و مشکلات اسپرم را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که بین سطح ادکت‌های PAH-DNA و مورفولوژی غیرطبیعی سر اسپرم همبستگی مثبت و معناداری وجود دارد ($r = 0.3$; $p = 0.0001$). این یافته‌ها حاکی از آن است که PAH، که از احتراق سوخت‌ها تولید می‌شود، می‌تواند به DNA اسپرم آسیب برساند و منجر به ناهنجاری‌های مورفولوژیک شود که بر باروری اثر منفی می‌گذارد. طراحی آینده‌نگر این مطالعه امکان بررسی دقیق‌تر رابطه علّی را فراهم کرده است، اما تمرکز بر مردان نابارور ممکن است نتایج را به جمعیت عمومی قابل‌تعمیم نکند. مطالعه هسو و همکاران (۲۰۰۶) با تمرکز بر ۴۸ کارگر کوره‌های کک‌سازی در تایوان، اثرات مواجهه شغلی با PAH را بر اسپرم بررسی کرد. این مطالعه مقطعی نشان داد که در گروه با مواجهه بالا، میزان الیگوسپرمی (۱۸٫۸٪ در مقابل ۰٪) و مورفولوژی غیرطبیعی اسپرم (۳۲٫۳٪ در مقابل ۱۴٫۶٪) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این نتایج تأیید می‌کند که مواجهه با PAH، به‌ویژه در محیط‌های صنعتی، می‌تواند به کاهش تعداد اسپرم و افزایش ناهنجاری‌های مورفولوژیک منجر شود. تعداد کم سوژه‌ها محدودیت این مطالعه است، اما تمرکز بر یک گروه شغلی خاص امکان تحلیل دقیق‌تر اثرات مواجهه را فراهم کرده است. مطالعه رادوان و همکاران (۲۰۱۶) با طراحی کوهورت گذشته‌نگر و بررسی ۳۲۷ مرد لهستانی با شمارش نرمال اسپرم که تحت درمان ناباروری بودند، ارتباط بین مواجهه با PM10، PM2.5، SO2، NOx، و CO و مورفولوژی اسپرم را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که مواجهه با هر یک از این آلاینده‌ها با کاهش معنادار مورفولوژی اسپرم مرتبط است (PM10: $\beta = 32.60$; $p = 0.0002$، PM2.5: $\beta = 40.53$; $p = 0.0001$). این یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیر گسترده آلاینده‌های هوا، به‌ویژه ذرات معلق (PM)، بر کیفیت اسپرم است و طراحی گذشته‌نگر امکان بررسی اثرات بلندمدت را فراهم کرده است. با این حال، عدم بررسی سایر پارامترهای اسپرم مانند تحرک و زنده‌مانی، تحلیل را محدود می‌کند.

جدول ۴-تأثیر آلاینده‌ها بر اسپرماتوژنز در انسان

انتشار	آلاینده(های) مورد مطالعه	نتایج
سلوان و همکاران، ۲۰۰۰	PM10, SO2, CO, NOx	کاهش معنادار تحرک اسپرم (۳۱٫٦ ± ۳.۱٦ در مقابل ۱.۳٦ ± ۹.۱۷) و مورفولوژی نرمال اسپرم (۱٦٫٦ ± ۳.۷ در مقابل ۳.۱۹ ± ٦.۸) در مردان .Teplice مواجهه متوسط و بالا با کاهش تحرک و مورفولوژی اسپرم مرتبط بود.
دی روزا و همکاران، ۲۰۰۳	چندین آلاینده از ترافیک خودروها	کاهش تحرک اسپرم (۳٤٫۷ ± ۲.۲٪ در مقابل ۸.۵٦ ± ۰٫۸٪)، زنده‌مانی اسپرم (۵۱٫۷ ± ۲٫۵٪ در مقابل ۸۰٫۷ ± ٦.۰٪) و یکپارچگی DNA اسپرم (٤۸٫۵ ± ۲.۲٪ در مقابل ۷۵٫۷ ± ۰٫٦٪ (در گروه مواجهه‌یافته.

انتشار	آلاینده(های) مورد مطالعه	نتایج
گاسپاری و همکاران، ۲۰۰۳	PAH	همبستگی مثبت بین سطح PAH-DNA ادکت‌ها در اسپرم و مورفولوژی غیرطبیعی سر اسپرم (r = 0.3; p = 0.0001).
هسو و همکاران، ۲۰۰۶	PAH	افزایش میزان الیگوسپرمی (۱۸٫۸٪ در مقابل ۰٪) و مورفولوژی غیرطبیعی اسپرم (۳۲٫۳٪ در مقابل ۱۴٫۶٪) در گروه با مواجهه بالا.
رادوان و همکاران، ۲۰۱۶	PM10, PM2.5, SO2, NOx, CO	ارتباط معنادار بین مورفولوژی اسپرم و مواجهه با هر آلاینده (PM10: β = 32.60; p = 0.0002، PM2.5: β = 40.53; p = 0.0001).

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که آلاینده‌های هوا، از جمله PM، NOx، CO، SO2، و PAH، اثرات منفی قابل‌توجهی بر پارامترهای اسپرم، به‌ویژه تحرک، زنده‌مانی، یکپارچگی DNA، و مورفولوژی دارند. مطالعات مقطعی (سلوان و همکاران، ۲۰۰۰؛ دی روزا و همکاران، ۲۰۰۳؛ هسو و همکاران، ۲۰۰۶) بر اثرات فوری و محلی آلاینده‌ها تأکید دارند، در حالی که مطالعات کوهورت (گاسپاری و همکاران، ۲۰۰۳؛ رادوان و همکاران، ۲۰۱۶) به اثرات بلندمدت و مکانیسم‌های ژنتیکی پرداخته‌اند.

مطالعات مرتبط با تأثیر آلاینده‌های محیطی، به‌ویژه نانوذرات هوا و سایر آلاینده‌ها، بر سیستم تولیدمثل زنان، نشان‌دهنده رویکردهای متنوعی در بررسی این موضوع طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ است. این مطالعات با استفاده از گونه‌های مختلف (موش‌ها و انسان‌ها)، تعداد سوژه‌های متفاوت، و روش‌شناسی‌های خاص، به بررسی اثرات آلاینده‌هایی مانند دود اگزوز دیزل، بنزن، حلال‌های آلی، و آلاینده‌های ناشی از ترافیک خودروها بر باروری زنان پرداخته‌اند. مطالعه اولگاری و همکاران (۲۰۱۳) با تمرکز بر موش‌ها و استفاده از ۳۷ سوژه، اثرات چند آلاینده موجود در دود اگزوز دیزل را در دو دوره جنینی و پس از تولد بررسی کرده است. این مطالعه با طراحی چهار گروه آزمایشی (گروه ۱: هوای فیلترشده در هر دو دوره، گروه ۲: هوای آلوده در دوران جنینی و فیلترشده پس از تولد، گروه ۳: هوای فیلترشده در دوران جنینی و آلوده پس از تولد، و گروه ۴: هوای آلوده در هر دو دوره) و تحلیل مورفومتریک تخمدان‌ها، نشان داد که مواجهه با آلودگی در هر یک از این دوره‌ها به‌طور معناداری مساحت فولیکول‌های اولیه را کاهش داده است (p=0.035 برای دوران جنینی، p=0.015 برای پس از تولد، و p=0.004 برای هر دو دوره). همچنین، نسبت فولیکول‌های اولیه (p=0.04) و ثانویه (p=0.05) در موش‌های در معرض آلودگی جنینی کاهش یافت. این نتایج حاکی از آن است که مواجهه زودهنگام با آلاینده‌ها می‌تواند اثرات بلندمدتی بر رشد فولیکول‌ها و در نتیجه باروری داشته باشد، که اهمیت دوره جنینی را برجسته می‌کند. در مقابل، مطالعه تارستون و همکاران (۲۰۰۰) با تمرکز بر انسان‌ها و ۳۳۴۳ سوژه، به بررسی اثر بنزن بر طول چرخه قاعدگی زنان شاغل در صنایع پتروشیمی پرداخته است. این مطالعه مقطعی با استفاده از پرسشنامه‌های استاندارد نشان داد که پس از ۷ سال مواجهه، خطر طول غیرعادی چرخه قاعدگی (کمتر از ۲۱ یا بیشتر از ۳۵ روز) با نسبت شانس ۱٫۷۱ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱٫۲۷–۲٫۳۱) برای هر ۵ سال مواجهه اضافی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها نشان‌دهنده ارتباط قوی بین مواجهه مزمن با بنزن و اختلالات چرخه قاعدگی است، که می‌تواند به‌عنوان یک شاخص اولیه ناباروری در نظر گرفته شود. روش‌شناسی مبتنی بر گزارش‌های خوداظهاری، اگرچه ساده است، اما ممکن است به دلیل عدم دقت در اندازه‌گیری مواجهه، نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. مطالعه چو و همکاران (۲۰۰۱) نیز بر انسان‌ها با ۱۴۰۸ سوژه تمرکز دارد و اثرات شغلی مواجهه با حلال‌های آلی (بنزن، تولوئن، استایرن، و زایلن) را بر طول چرخه قاعدگی بررسی کرده است. این مطالعه مقطعی با استفاده از مصاحبه و مقایسه با گروه کنترل نشان داد که نسبت شانس الیگومنوره (چرخه

بیش از ۳۵ روز) در گروه مواجهه‌یافته به‌ترتیب برای استایرن (۱,۶۵، ۱,۰۵–۲,۵۵)، زایلن (۱,۶۳، ۱,۰۴–۲,۵۳)، بنزن (۱,۳۵، ۰,۹۰–۲,۰۰)، تولوئن (۱,۴۳، ۰,۹۳–۲,۱۷)، و همه حلال‌ها (۱,۷۶، ۱,۰۸–۲,۸۲) افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که حلال‌های آلی به‌ویژه استایرن و زایلن اثرات معناداری بر چرخه قاعدگی دارند، که می‌تواند به کاهش باروری منجر شود. استفاده از ارزیابی کیفی بهداشت صنعتی برای گروه کنترل، نقطه قوتی در این مطالعه است، اما محدودیت آن به دلیل ماهیت مقطعی، عدم توانایی در تعیین علیت است. مطالعه تومری و همکاران (۲۰۰۶) با ۲۰۱ سوژه انسانی، اثرات آلاینده‌های ناشی از ترافیک خودروها بر سطح استرادیول β۱۷ در زنان افسران پلیس را بررسی کرده است. این مطالعه کوهورت آینده‌نگر با همسان‌سازی گروه‌ها بر اساس روز چرخه، نشان داد که سطح استرادیول در گروه مواجهه‌یافته با ترافیک در فاز فولیکولی (۵۰,۴ در مقابل ۱۱۸,۵ پیکوگرم/میلی‌لیتر، $p<0.001$) و فاز لوتئال (۸۲,۳ در مقابل ۱۵۳,۹ پیکوگرم/میلی‌لیتر، $p<0.001$) به‌طور معناداری کاهش یافته، اما در فاز تخمک‌گذاری تفاوتی مشاهده نشد (۱۵۰,۹ در مقابل ۱۹۳,۵ پیکوگرم/میلی‌لیتر، غیرمعنادار). این کاهش می‌تواند بر تخمک‌گذاری و عملکرد هورمونی تأثیر منفی بگذارد. طراحی آینده‌نگر و همسان‌سازی گروه‌ها نقطه قوت این مطالعه است، اما تعداد محدود سوژه‌ها و تمرکز بر یک گروه خاص (افسران پلیس) ممکن است تعمیم‌پذیری نتایج را محدود کند. این مطالعات نشان می‌دهند که آلاینده‌های هوا، از جمله دود اگزوز دیزل، بنزن، حلال‌های آلی، و آلاینده‌های ترافیکی، اثرات منفی معناداری بر سیستم تولیدمثل زنان دارند. مواجهه جنینی و شغلی با کاهش فولیکول‌های تخمدانی، اختلال در چرخه قاعدگی، و کاهش سطح هورمون‌ها مرتبط است. اگرچه روش‌شناسی‌ها از تحلیل مورفومتریک تا پرسشنامه‌های خوداظهاری متفاوت است، همگی بر اهمیت مواجهه زودهنگام و مزمن با آلاینده‌ها تأکید دارند.

جدول ۵- تأثیر آلاینده‌های محیطی، به‌ویژه نانوذرات هوا و سایر آلاینده‌ها، بر سیستم تولیدمثل زنان

انتشار	گونه	آلاینده(های) مورد مطالعه	نتایج
اولگاری و همکاران، ۲۰۱۳	موش	چندین آلاینده از دود اگزوز دیزل	تحلیل مورفومتریک تخمدان‌ها برای تعیین مساحت نسبی اشغال‌شده توسط فولیکول‌های اولیه، اولیه، ثانویه و گراف. کاهش معنادار مساحت فولیکول‌های اولیه در موش‌های در معرض آلودگی، چه در دوران جنینی (۰٫۰۳۵=p ، پس از تولد (۰٫۰۱۵ =p یا هر دو (۰٫۰۰٤ =p). نسبت فولیکول‌های اولیه (۰٫۰٤ =p) و ثانویه (۰٫۰۵ =p) فقط در موش‌های در معرض آلودگی جنینی کاهش یافت.
تارستون و همکاران، ۲۰۰۰	انسان	بنزن	پس از ۷ سال کار، افزایش خطر طول غیرعادی چرخه قاعدگی (کمتر از ۲۱ یا بیشتر از ۳۵ روز) به ازای هر ۵ سال مواجهه اضافی با بنزن: نسبت شانس: ۱٫۷۱ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱٫۲۷–۲٫۳۱).
چو و همکاران، ۲۰۰۱	انسان	چندین آلاینده از مواجهه شغلی با حلال‌های آلی (بنزن، تولوئن، استایرن و/یا زایلن)	در مقایسه با گروه کنترل، نسبت شانس (فاصله اطمینان ۹۵٪) الیگومنوره (چرخه قاعدگی بیش از ۳۵ روز) در گروه مواجهه‌یافته با: استایرن: ۱٫۶۵ (۱٫۰۵–۲٫۵۵) (زایلن: ۱٫۶۳ (۱٫۰٤–۲٫۵۳) بنزن: ۱٫۳۵ (۰٫۹۰–۲٫۰۰) تولوئن: ۱٫٤۳ (۰٫۹۳–۲٫۱۷) (همه حلال‌ها: ۱٫۷۶ (۱٫۰۸–۲٫۸۲)

انتشار	گونه	آلاینده(های) مورد مطالعه	نتایج
تومری و همکاران، ۲۰۰۶	انسان	چندین آلاینده از ترافیک خودروها	کاهش معنادار سطح میانگین (انحراف معیار) استرادیول در گروه مواجهه‌یافته در فاز فولیکولی (۵۰٫۴ (۲۱٫۱) در مقابل ۱۱۸٫۵ (۷۱٫۱) پیکوگرم/میلی‌لیتر؛ ۰٫۰۰۱ p<) و فاز لوتئال (۸۲٫۳ (۳۳٫۰) در مقابل ۱۵۳٫۹ (۵۷٫۳) پیکوگرم/میلی‌لیتر؛ ۰٫۰۰۱ p<)، اما نه در فاز تخمک‌گذاری (۱۵۰٫۹ (۹۱٫۶) در مقابل ۱۹۳٫۵ (۱۱۲٫۵) پیکوگرم/میلی‌لیتر؛ غیر معنادار)

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که نانوذرات و آلاینده‌های هوا از طریق مکانیسم‌هایی مانند استرس اکسیداتیو، آپوپتوز، و اختلالات هورمونی بر سیستم تولیدمثل اثر می‌گذارند. سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱) و اسمیت و همکاران (۲۰۱۴) هر دو اثرات نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO2-NPs) را بررسی کردند و به نتایج مشابهی در مورد تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و آسیب به DNA اسپرم رسیدند. بااین‌حال، سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱) بامطالعه in vitro بر اسپرم انسان، نقش محافظتی آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند آلفا-توکوفرول را برجسته کردند، در حالی که اسمیت و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه in vivo بر موش‌ها، بر قابل‌برگشت بودن اثرات در بلندمدت تأکید داشتند. این تفاوت‌ها به دلیل ماهیت in vitro در مقابل in vivo است؛ مطالعات آزمایشگاهی مانند سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱) مکانیسم‌های مولکولی را دقیق‌تر بررسی می‌کنند، اما تعمیم‌پذیری کمتری دارند، در حالی که مطالعات حیوانی مانند اسمیت و همکاران (۲۰۱۴) اثرات سیستمیک را بهتر نشان می‌دهند. در مورد نانوذرات نقره (AgNPs)، فادل و همکاران (۲۰۲۳) و مهر و همکاران (۲۰۲۴) هر دو به سمیت این نانوذرات اشاره کردند، اما تمرکز آن‌ها متفاوت بود. فادل و همکاران (۲۰۲۳) با دوزهای بالا (۶۲٫۵ و ۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر موش‌های نر، کاهش تحرک، تعداد، و مورفولوژی اسپرم را گزارش کردند، در حالی که مهر و همکاران (۲۰۲۴) در یک مرور جامع، بر کاربردهای زیست‌پزشکی AgNPs و نیاز به بررسی بیشتر سمیت آن‌ها تأکید کردند. شباهت در شناسایی سمیت AgNPs ناشی از واکنش‌پذیری شیمیایی بالای این ذرات است (ابرهارد و همکاران، ۲۰۲۴)، اما تفاوت در روش‌شناسی (تجربی در مقابل مروری) و دوزهای مورد استفاده، بر نتایج تأثیر گذاشته است. صادقی و همکاران (۲۰۲۱) نیز با بررسی AgNPs و نقش محافظتی NAC، نتایج مشابهی با فادل و همکاران (۲۰۲۳) در کاهش کیفیت اسپرم گزارش کردند، اما افزودن NAC اثرات را بهبود بخشید، که با یافته‌های سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱) در مورد نقش آنتی‌اکسیدان‌ها هم‌خوانی دارد.

شیونگ و همکاران (۲۰۲۲ و ۲۰۲۴) و الموسوی و همکاران (۲۰۲۲) اثرات نانوذرات اکسید مس (CuONPs) را بررسی کردند. شیونگ و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه in vitro بر اسپرم انسان، کاهش تحرک و زنده‌مانی اسپرم را از طریق استرس اکسیداتیو و اختلال در مسیر AMPK گزارش کردند، در حالی که الموسوی و همکاران (۲۰۲۲) با مقایسه CuONPs و سولفات مس در موش‌ها، سمیت کمتری برای CuONPs مشاهده کردند. شباهت در شناسایی استرس اکسیداتیو به‌عنوان مکانیسم اصلی سمیت (سارموت و همکاران، ۲۰۲۳) دیده می‌شود، اما تفاوت‌ها ناشی از مسیر مواجهه (in vitro در مقابل in vivo) و ترکیب شیمیایی است؛ CuONPs به دلیل اندازه نانویی، نفوذ بیشتری دارند، اما سولفات مس به دلیل حلالیت بالاتر، سمیت بیشتری نشان داد. شیونگ و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی اثرات بین‌نسلی CuONPs، کاهش H3K9me3 در اسپرم و آستنواسپرمی در نسل بعدی را گزارش کردند، که بعد جدیدی به اثرات اپی‌ژنتیکی آلاینده‌ها اضافه کرد و با هانت و همکاران (۲۰۲۴) در مورد تأثیرات جنینی هم‌خوانی دارد. آراتو و همکاران (۲۰۲۳) و ژنگ و همکاران (۲۰۲۴) به ترتیب اثرات نانوذرات اکسید نیکل (NiO NPs) و نیکل (Ni NPs) را بررسی کردند و هر دو افزایش ROS و آپوپتوز را گزارش کردند. آراتو و همکاران (۲۰۲۳) بر سلول‌های سرتولی خوک و ژنگ و همکاران (۲۰۲۴)

بر سلول‌های اسپرماتوگونی موش متمرکز بودند. شباهت در مکانیسم‌های سمیت (استرس اکسیداتیو و آپوپتوز) ناشی از واکنش‌پذیری شیمیایی نیکل است (فان و همکاران، ۲۰۲۳)، اما تفاوت در نوع سلول هدف و مسیرهای مولکولی (MAPK در مقابل DRP1) به دلیل تفاوت در گونه و نوع نانوذره است. مطالعات حیوانی مانند الیان و همکاران (۲۰۲۴)، نظری و همکاران (۲۰۲۳)، و باریتو و همکاران (۲۰۲۵) بر نانوذرات مگنتیت، Au@Ag، و منگنز-فریت متمرکز بودند. الیان و همکاران (۲۰۲۴) کاهش هورمون‌های تولیدمثلی و آپوپتوز در تخمدان موش‌ها را گزارش کردند، که با نظری و همکاران (۲۰۲۳) در مورد افزایش آپوپتوز در بیضه موش‌ها هم‌خوانی دارد. با این حال، باریتو و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از هیپرترمی مغناطیسی، ناباروری دائمی را ایجاد کردند، که کاربرد متفاوتی از نانوذرات را نشان می‌دهد. شباهت در آسیب بافتی ناشی از تجمع نانوذرات در بافت‌های تولیدمثل است (ایفتیخار و همکاران، ۲۰۲۱)، اما تفاوت‌ها به دلیل هدف مطالعه (سمیت در مقابل کاربرد درمانی) و روش مواجهه (تزریق داخل بیضه‌ای در مقابل سیستمیک) است. مطالعات انسانی مانند سلوان و همکاران (۲۰۰۰)، دی روزا و همکاران (۲۰۰۳)، گاسپاری و همکاران (۲۰۰۳)، هسو و همکاران (۲۰۰۶)، و رادوان و همکاران (۲۰۱۶) اثرات آلاینده‌های هوا (PM، PAH، و NOx) را بر اسپرم بررسی کردند. سلوان و همکاران (۲۰۰۰) و رادوان و همکاران (۲۰۱۶) هر دو کاهش مورفولوژی اسپرم را گزارش کردند، اما رادوان و همکاران (۲۰۱۶) با طراحی گذشته‌نگر، اثرات بلندمدت را بهتر نشان داد. دی روزا و همکاران (۲۰۰۳) و هسو و همکاران (۲۰۰۶) کاهش تحرک و زنده‌مانی اسپرم را تأیید کردند، که با نتایج گاسپاری و همکاران (۲۰۰۳) در مورد آسیب DNA هم‌خوانی دارد. شباهت‌ها ناشی از مکانیسم مشترک استرس اکسیداتیو است (کاری و همکاران، ۲۰۱۷)، اما تفاوت‌ها به دلیل نوع آلاینده (PAH در مقابل PM) و روش‌شناسی (مقطعی در مقابل کوهورت) است. در زنان، اولگاری و همکاران (۲۰۱۳)، تارستون و همکاران (۲۰۰۰)، چو و همکاران (۲۰۰۱)، و تومری و همکاران (۲۰۰۶) اثرات آلاینده‌ها را بررسی کردند. اولگاری و همکاران (۲۰۱۳) کاهش فولیکول‌های تخمدانی را در موش‌ها گزارش کردند، که با یافته‌های آلویسی و همکاران (۲۰۲۲) در مورد آسیب تخمدانی در زنان هم‌خوانی دارد. تارستون و همکاران (۲۰۰۰) و چو و همکاران (۲۰۰۱) افزایش خطر الیگومنوره را در زنان مواجهه‌یافته با بنزن و حلال‌ها گزارش کردند، در حالی که تومری و همکاران (۲۰۰۶) کاهش استرادیول را در زنان مواجهه‌یافته با آلاینده‌های ترافیکی نشان داد. شباهت‌ها در اختلالات هورمونی است (سارگازی و همکاران، ۲۰۲۲)، اما تفاوت‌ها به دلیل گونه (موش در مقابل انسان) و نوع آلاینده (دود دیزل در مقابل بنزن) است. مطالعات محافظتی مانند وی و همکاران (۲۰۲۳)، احمد و همکاران (۲۰۱۹)، مریدی و همکاران (۲۰۱۸)، ساید و همکاران (۲۰۲۲)، و هاشم و همکاران (۲۰۲۲) نقش آنتی‌اکسیدان‌ها را تأیید کردند. وی و همکاران (۲۰۲۳) و احمد و همکاران (۲۰۱۹) بهبود اسپرماتوژنز را با نانوذرات آنتی‌اکسیدانی گزارش کردند، که با یافته‌های مریدی و همکاران (۲۰۱۸) در مورد CeNPs هم‌خوانی دارد. ساید و همکاران (۲۰۲۲) و هاشم و همکاران (۲۰۲۲) نقش ترکیبات طبیعی مانند روغن اسانسی و ویتامین E را در کاهش سمیت TiO2-NPs نشان دادند. شباهت‌ها به دلیل کاهش ROS توسط آنتی‌اکسیدان‌ها است (سارموت و همکاران، ۲۰۲۳)، اما تفاوت‌ها به نوع آنتی‌اکسیدان و نانوذره هدف بستگی دارد. مطالعات چوی و همکاران (۲۰۱۰)، هوانگ و همکاران (۲۰۱۰)، و العریفی و همکاران (۲۰۱۳) اثرات سمی نانوذرات کوانتومی و ZnO را گزارش کردند. این مطالعات با فان و همکاران (۲۰۲۳) در شناسایی استرس اکسیداتیو و آسیب بافتی هم‌خوانی دارند، اما تفاوت‌ها به دلیل نوع نانوذره و گونه (موش نر در مقابل موش ماده) است. این مقایسه نشان می‌دهد که اگرچه مکانیسم‌های سمیت مشترک هستند، روش‌شناسی، نوع آلاینده، و هدف مطالعه بر نتایج تأثیر می‌گذارند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند در تحلیل روند تحقیقات علمی، امکان شناسایی الگوها، شکاف‌ها و جهت‌گیری‌های پژوهشی را فراهم می‌کنند. در زمینه نانوذرات هوا و ناباروری، این رویکردها می‌توانند با تحلیل داده‌های کتاب‌سنجی و محتوای پژوهش‌ها، درک جامعی از وضعیت تحقیقات جهانی ارائه دهند. ابتدا، با استفاده از علم‌سنجی می‌توان روند انتشار مقالات را بررسی کرد. برای مثال، بر اساس مطالعات ارائه‌شده، از اوایل دهه ۲۰۰۰، توجه به اثرات نانوذرات بر سلامت تولیدمثل افزایش یافته است (کاری و همکاران ، ۲۰۱۷). تحلیل تعداد مقالات منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، همان‌طور که در مطالعات چکا ویزکاینو و همکاران (۲۰۱۶) و Hunt و همکاران (۲۰۲۴) نیز اشاره شده، نشان می‌دهد که تعداد پژوهش‌ها در دهه دوم (۲۰۱۰-۲۰۲۰) به دلیل افزایش نرخ ناباروری و نگرانی‌های زیست‌محیطی رشد چشمگیری داشته است. در مرحله بعد، نقشه‌برداری موضوعی انجام شد که خوشه‌های موضوعی و ارتباطات میان آن‌ها را شناسایی می کند. این نقشه‌برداری نشان می‌دهد که مطالعات اولیه، بر اثرات سمی نانوذرات (مانند نقره و طلا) متمرکز بودند، در حالی که پژوهش‌های جدیدتر، به اثرات بین‌نسلی و اپی‌ژنتیکی پرداخته‌اند. علم‌سنجی همچنین به شناسایی نویسندگان و مؤسسات پیشرو کمک می‌کند. برای نمونه، نویسندگانی مانند کلین و همکاران (۲۰۲۳) و ایفتیخار و همکاران (۲۰۲۱) با تمرکز بر سمیت نانوذرات بر بیضه‌ها و اسپرم، نقش برجسته‌ای در این حوزه داشته‌اند. تحلیل جغرافیایی نیز نشان می‌دهد که مؤسسات اروپایی و آسیایی، مانند دانشگاه‌های فرانسه (کاری و همکاران ، ۲۰۱۷) و چین (فان و همکاران، ۲۰۲۳)، در این زمینه فعال‌تر بوده‌اند. این اطلاعات می‌تواند از طریق تحلیل استنادها و همکاری‌های بین‌المللی استخراج شود. نقشه‌برداری موضوعی همچنین شکاف‌های پژوهشی را آشکار می‌کند. در شبکه مفهومی، گره‌های مرتبط با اثرات نانوذرات بر زنان (مانند تخمدان یا جنین) کم‌رنگ هستند، که با یافته‌های الویسی و همکاران (۲۰۲۲) هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده تمرکز بیشتر بر ناباروری مردان است. علاوه بر این، گره‌های مرتبط با راهکارهای محافظتی، مانند استفاده از آنتی‌اکسیدان‌ها، برجسته نیستند، در حالی که مطالعاتی مانند سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱) و الین و همکاران (۲۰۲۴) پتانسیل آلفا-توکوفرول و کورکومین را در کاهش سمیت نانوذرات نشان داده‌اند. این شکاف‌ها می‌توانند جهت‌گیری تحقیقات آینده را مشخص کنند. از منظر روش‌شناختی، علم‌سنجی می‌تواند با تحلیل استنادها و شاخص‌های تأثیر (مانند h-index) میزان تأثیرگذاری پژوهش‌ها را ارزیابی کند. برای مثال، مطالعه کاری و همکاران (۲۰۱۷) با ۳۵۱ استناد، تأثیر بالایی در این حوزه داشته است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که تحقیقات از دهه اول (۲۰۰۰-۲۰۱۰) با تمرکز بر مکانیسم‌های سمیت (شیونگ و همکاران، ۲۰۲۴) به سمت مطالعات بالینی و اپی‌ژنتیکی در دهه دوم (۲۰۱۰-۲۰۲۰) حرکت کرده‌اند (شیونگ و همکاران، ۲۰۲۴). ترکیب علم‌سنجی و نقشه‌برداری موضوعی امکان ارائه دیدگاهی جامع از روند تحقیقات را فراهم می‌کند. این رویکرد نه‌تنها روند انتشار، نویسندگان کلیدی، و خوشه‌های موضوعی را مشخص می‌کند، بلکه شکاف‌هایی مانند کمبود مطالعات در زمینه زنان و راهکارهای محافظتی را نیز آشکار می‌سازد. با استفاده از این ابزارها، می‌توان سیاست‌گذاری‌های علمی را برای تمرکز بر موضوعات کمتر بررسی‌شده، مانند اثرات بین‌نسلی (شیونگ و همکاران، ۲۰۲۴) و کاربردهای درمانی نانوذرات (شاندیلیا و همکارانف ۲۰۲۰)، هدایت کرد و در نهایت به درک عمیق‌تری از تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری دست یافت.

در بررسی پیشینه پژوهش‌های مرتبط با تأثیر نانوذرات بر ناباروری طی دو دهه اخیر، روندی پیوسته و روبه‌رشد در تعداد و کیفیت مقالات علمی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت روزافزون این حوزه در مطالعات زیست‌محیطی،

سم‌شناسی و سلامت باروری است. در دهه اول (۲۰۰۰ تا حدود ۲۰۱۰)، تمرکز عمده مطالعات بر شناسایی عمومی سمیت نانوذرات فلزی مانند نقره (AgNPs)، اکسید روی (ZnO NPs) و اکسید مس (CuO NPs) بود. در این مقالات، اغلب از مدل‌های حیوانی (به‌ویژه موش صحرایی) برای بررسی تأثیرات مستقیم نانوذرات بر عملکرد بیضه‌ها، تعداد اسپرم و شاخص‌های هورمونی استفاده می‌شد و رویکرد مطالعات عمدتاً توصیفی و مشاهده‌ای بود. از دهه دوم (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴)، با پیشرفت ابزارهای مولکولی و شناخت دقیق‌تر از مسیرهای سلولی، تمرکز پژوهش‌ها به سمت بررسی مکانیزم‌های زیان‌بار نانوذرات تغییر یافت. در این دوره، زیرموضوع‌هایی مانند استرس اکسیداتیو، آسیب DNA، القای آپوپتوز، اختلال در بیان ژن‌های باروری و مسیرهای پیام‌رسانی سلولی بیشترین توجه را به خود جلب کردند. همچنین، پژوهش‌هایی به‌طور خاص اثرات نانوذرات بر هورمون‌های جنسی، مورفولوژی و تحرک اسپرم، ساختار بافت بیضه و تخمدان و نیز تأثیر بر تخمک‌گذاری و لقاح را بررسی کردند. در سال‌های اخیر (به‌ویژه پس از ۲۰۱۸)، مطالعات به سمت ارزیابی اثرات حفاظتی آنتی‌اکسیدان‌ها مانند کوئرستین، کورکومین، honokiol و ویتامین E در برابر سمیت نانوذرات گسترش یافته‌اند. این مطالعات تلاش می‌کنند تا نه‌تنها اثرات تخریبی نانوذرات را نشان دهند، بلکه راهکارهایی برای پیشگیری و ترمیم آسیب‌های ناشی از آن‌ها نیز ارائه دهند. همچنین، پژوهش‌هایی به بررسی نانوذرات زیست‌سازگار و دارای پوشش محافظ (مانند آلژینات یا کیتوزان) با هدف کاهش سمیت و افزایش ایمنی زیستی متمرکز شده‌اند. موضوعات خاصی مانند تأثیر نانوذرات بر باروری زنانه، تفاوت‌های جنسیتی در پاسخ به نانوذرات، اثرات بلندمدت (مزمن) و اثر نانوذرات ترکیبی یا تجمع‌یافته نیز به‌تدریج در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. همچنین، مطالعات مقایسه‌ای بین نانوذرات و مواد شیمیایی سنتی (مانند CuO NPs در مقابل CuSO4) نشان‌دهنده دغدغه‌مندی نسبت به استفاده ایمن از نانوذرات در صنایع دارویی، غذایی و آرایشی است. موضوعاتی مانند استرس اکسیداتیو، سمیت ژنتیکی، مکانیسم‌های آپوپتوز، پیشگیری با آنتی‌اکسیدان‌ها و توسعه نانوذرات ایمن‌تر از جمله مهم‌ترین محورهای پژوهشی در این حوزه محسوب می‌شوند. این روند رو به رشد، بیانگر ضرورت تلفیق علم نانو، پزشکی باروری و زیست‌فناوری در مواجهه با چالش‌های نوظهور سلامت باروری در عصر فناوری نانو است.

پیشنهادهای این پژوهش با توجه به یافته‌های گسترده از مطالعات بررسی‌شده، با هدف ارائه راهکارهایی برای توسعه نظری و کاربردی در حوزه تأثیر نانوذرات هوا بر ناباروری و سلامت تولیدمثل تنظیم شده است. این پیشنهادات بر اساس شکاف‌های شناسایی‌شده و نتایج کلیدی مطالعات، از جمله سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱)، شیونگ و همکاران (۲۰۲۴)، و هانت و همکاران (۲۰۲۴)، ارائه می‌شوند و بر کاربردی بودن آن‌ها برای سیاست‌گذاری، تحقیقات آینده، و توسعه فناوری تأکید دارند.

در بخش توسعه نظری؛ یافته‌ها نشان می‌دهند که نانوذرات از طریق مکانیسم‌هایی مانند استرس اکسیداتیو، آپوپتوز، اختلالات هورمونی، و تغییرات اپی‌ژنتیکی بر سیستم تولیدمثل اثر می‌گذارند (فان و همکاران، ۲۰۲۳). برای توسعه نظری، پیشنهاد می‌شود که چارچوب‌های جامع‌تری برای مدل‌سازی مکانیسم‌های سمیت نانوذرات ایجاد شود. به عنوان مثال، با توجه به نتایج شیونگ و همکاران (۲۰۲۴) که اثرات بین‌نسلی و اپی‌ژنتیکی نانوذرات اکسید مس را نشان داد، مدل‌هایی طراحی شوند که اثرات اپی‌ژنتیکی را در چندین نسل بررسی کنند. همچنین، با استناد به آراتو و همکاران (۲۰۲۳) و ژنگ و همکاران (۲۰۲۴)، که بر مسیرهای مولکولی مانند MAPK و DRP1 تمرکز داشتند، پیشنهاد می‌شود که شبکه‌های سیگنالینگ سلولی به‌عنوان بخشی از این چارچوب‌ها مورد تحلیل قرار گیرند تا درک دقیق‌تری از مکانیسم‌های سمی به دست آید.

در زمینه تحقیقات آینده، شکاف‌های پژوهشی متعددی در این حوزه شناسایی شده‌اند که می‌توانند جهت‌گیری تحقیقات آینده را مشخص کنند. اولاً، با توجه به تمرکز بیشتر مطالعات بر ناباروری مردان (مانند فادل و همکاران، ۲۰۲۳؛ سلوان و همکاران، ۲۰۰۰)، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری بر اثرات نانوذرات بر سیستم تولیدمثل زنان انجام شود. آلویسی و همکاران (۲۰۲۲) و اولگاری و همکاران (۲۰۱۳) به اثرات مخرب بر تخمدان اشاره کردند، اما داده‌ها کافی نیستند. ثانیاً، با توجه به یافته‌های سانتوناستاسو و همکاران (۲۰۲۱) و ساید و همکاران (۲۰۲۲) در مورد نقش آنتی‌اکسیدان‌ها، پیشنهاد می‌شود که اثرات محافظتی ترکیبات طبیعی دیگر، مانند پلی‌فنول‌ها، در مدل‌های in vivo بررسی شود تا راهکارهایی برای کاهش سمیت نانوذرات ارائه شود. ثالثاً، با استناد به شیونگ و همکاران (۲۰۲۴) که اثرات بین‌نسلی را گزارش کردند، پیشنهاد می‌شود که مطالعات طولی بیشتری برای بررسی اثرات بلندمدت نانوذرات بر نسل‌های بعدی انجام شود. در نهایت، پورتانقل و همکاران (۲۰۱۴) به نیاز به پروتکل‌های استاندارد ارزیابی سمیت اشاره کردند؛ لذا پیشنهاد می‌شود که استانداردهای بین‌المللی برای اندازه‌گیری دوز و اثرات نانوذرات در محیط‌های واقعی تدوین شود.

از منظر توسعه کاربردی؛ از منظر کاربردی، یافته‌ها می‌توانند به سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و سلامت عمومی کمک کنند. باتوجه‌به نتایج سلوان و همکاران (۲۰۰۰) و رادوان و همکاران (۲۰۱۶) که کاهش کیفیت اسپرم را در مناطق آلوده گزارش کردند، پیشنهاد می‌شود که محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تری برای سطح نانوذرات و آلاینده‌ها (مانند PM ۲,۵) در مناطق صنعتی و شهری اعمال شود. همچنین، با استناد به تارستون و همکاران (۲۰۰۰) و چو و همکاران (۲۰۰۱) که اثرات شغلی بنزن و حلال‌ها را بر چرخه قاعدگی زنان نشان دادند، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های نظارتی برای کارگران در صنایع پرخطر اجرا شود، از جمله استفاده از تجهیزات محافظتی و کاهش مواجهه شغلی.

از منظر کاربردهای درمانی؛ یافته‌های وی و همکاران (۲۰۲۳)، احمد و همکاران (۲۰۱۹)، و مریدی و همکاران (۲۰۱۸) نشان‌دهنده پتانسیل درمانی نانوذرات آنتی‌اکسیدانی در کاهش سمیت است. پیشنهاد می‌شود که این نانوذرات (مانند honokiol و CeNPs) در مطالعات بالینی برای درمان ناباروری ناشی از عوامل محیطی آزمایش شوند. همچنین، با توجه به باریتو و همکاران (۲۰۲۵) که از نانوذرات مغناطیسی برای عقیم‌سازی غیرجراحی استفاده کردند، پیشنهاد می‌شود که کاربردهای درمانی مشابه برای کنترل باروری توسعه یابد، به‌ویژه در شرایطی که روش‌های جراحی نامناسب هستند.

با تمرکز بر آموزش و آگاهی عمومی؛ باتوجه‌به نتایج هانت و همکاران (۲۰۲۴) و ابرهارد و همکاران (۲۰۲۴) که حضور نانوذرات در جفت و اثرات آن بر کودکان را نشان دادند، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های آموزشی برای افزایش آگاهی عمومی درباره خطرات نانوذرات هوا اجرا شود. این برنامه‌ها می‌توانند بر کاهش مواجهه خانگی (مانند استفاده از فیلترهای هوا) و محافظت از گروه‌های حساس مانند زنان باردار و کودکان تمرکز کنند.

در زمینه توسعه فناوری؛ شاندیلیا و همکاران (۲۰۲۰) و سارقازی و همکاران (۲۰۲۲) به کاربردهای تشخیصی و درمانی نانوذرات اشاره کردند. پیشنهاد می‌شود که فناوری‌های مبتنی بر نانوذرات برای تشخیص زودهنگام مشکلات باروری توسعه یابد، مانند حسگرهایی که نشانگرهای زیستی مرتبط با استرس اکسیداتیو را شناسایی کنند. همچنین، با توجه به سمیت نانوذرات، پیشنهاد می‌شود که روش‌های سنتز ایمن‌تر (مانند روش‌های سبز) برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و سلامت توسعه یابد. این پیشنهادات با هدف پر کردن شکاف‌های پژوهشی، بهبود سیاست‌گذاری، و ارائه راهکارهای عملی برای کاهش اثرات نانوذرات هوا بر ناباروری ارائه شده‌اند. اجرای آن‌ها می‌تواند به حفاظت از سلامت تولیدمثل و کاهش بار ناباروری در جوامع مدرن کمک کند.

References

Ahmad, K. E., Abd El-Aziz, R. M., & Abd El-Emam, M. M. (2017). Ameliorative Effects of Curcumin-Zinc Oxide Nanoparticles Conjugate on Cyclophosphamide-Induced Infertility in Male Rats. Zagazig Veterinary Journal, 45(Supplementary 1), 126-132. doi: 10.21608/zvjz.2019.28657

Al-Musawi, M. M. S., Al-Shmgani, H., & Al-Bairuty, G. A. (2022). Histopathological and Biochemical Comparative Study of Copper Oxide Nanoparticles and Copper Sulphate Toxicity in Male Albino Mice Reproductive System. International journal of biomaterials, 2022, 4877637. https://doi.org/10.1155/2022/4877637

Aloisi, M., Rossi, G., Colafarina, S., Guido, M., Cecconi, S., & Poma, A. M. G. (2022). The Impact of Metal Nanoparticles on Female Reproductive System: Risks and Opportunities. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(21), 13748. https://doi.org/10.3390/ijerph192113748

Ankita Meher, Ashish Tandi, Srikanta Moharana, Subhendu Chakroborty, Susnata Sovalin Mohapatra, Arijit Mondal, Suddhasattya Dey, Prakash Chandra, (2024). Silver nanoparticle for biomedical applications: A review, Hybrid Advances, Volume 6, 100184, ISSN 2773-207X, https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100184.

Arato I, Giovagnoli S, Di Michele A, Bellucci C, Lilli C, Aglietti MC, Bartolini D, Gambelunghe A, Muzi G, Calvitti M, Eugeni E, Gaggia F, Baroni T, Mancuso F and Luca G (2023) Nickel oxide nanoparticles exposure as a risk factor for male infertility: "In vitro" effects on porcine pre-pubertal Sertoli cells. Front. Endocrinol. 14:1063916. doi: 10.3389/fendo.2023.1063916

Samrot, A. V., & Noel Richard Prakash, L. X. (2023). Nanoparticles Induced Oxidative Damage in Reproductive System and Role of Antioxidants on the Induced Toxicity. Life, 13(3), 767. https://doi.org/10.3390/life13030767

Brito, J. L. M., Lima, V. N., Jivago, J. L. P. R., Marangon, A. R. M., Vinícius-Araújo, M., Bakuzis, A. F., Santos, J. d. A. R. d., Souza, P. E. N., Azevedo, R. B., & Lucci, C. M. (2025). Achieving Permanent Male Infertility by Magnetic Nanoparticle Hyperthermia: A Breakthrough in Animal Fertility Management. Pharmaceutics, 17(5), 602. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17050602

Carré, Julie & Gatimel, Nicolas & Moreau, Jessika & Parinaud, Jean & Roger, Leandri. (2017). Does air pollution play a role in infertility?: A systematic review. Environmental Health. 16. 82. 10.1186/s12940-017-0291-8.

Checa Vizcaíno, M. A., González-Comadran, M., & Jacquemin, B. (2016). Outdoor air pollution and human infertility: a systematic review. Fertility and sterility, 106(4), 897–904.e1. https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2016.07.1110

Eberhard, T., Casillas, G., Zarus, G.M. et al. (2024). Systematic review of microplastics and nanoplastics in indoor and outdoor air: identifying a framework and data needs for quantifying human inhalation exposures. J Expo Sci Environ Epidemiol 34, 185–196. https://doi.org/10.1038/s41370-023-00634-x

Eleyan, M., Ibrahim, K. A., Mohamed, R. A., Hussien, M., Zughbur, M. R., Aldalou, A. R., Masad, A., El-Rahman, H. A. A., & Abdelgaid, H. A. (2024). Quercetin diminishes the apoptotic pathway of magnetite nanoparticles in rats' ovary: Antioxidant status and hormonal profiles. Environmental analysis, health and toxicology, 39(3), e2024025. https://doi.org/10.5620/eaht.2024025

Fadl, Marwa & Abdellateif, Abd-El-karim & Khandel, Ahmed & Aboella, Adel. (2023). Assessment of Reproductive Toxicity of Silver Nanoparticles on Male Albino Mice "Mus musculus". Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, B. Zoology. 15. 53-67. 10.21608/eajbsz.2023.288521.

Habas, K., Demir, E., Guo, C., Brinkworth, M. H., & Anderson, D. (2021). Toxicity mechanisms of nanoparticles in the male reproductive system. Drug Metabolism Reviews, 53(4), 604–617. https://doi.org/10.1080/03602532.2021.1917597

Hunt K, Davies A, Fraser A, Burden C, Howell A, Buckley K, et al. (2024). Exposure to microplastics and human reproductive outcomes: A systematic review. BJOG. 131(5): 675–683. https://doi.org/10.1111/1471-0528.17756

Iftikhar, M., Noureen, A., Uzair, M., Jabeen, F., Abdel Daim, M., & Cappello, T. (2021). Perspectives of Nanoparticles in Male Infertility: Evidence for Induced Abnormalities in Sperm Production. International journal of environmental research and public health, 18(4), 1758. https://doi.org/10.3390/ijerph18041758

J. Siddiqi, N., Fatima, S., Sharma, B., & Samir Elrobh, M. (2022). In-Utero Neurotoxicity of Nanoparticles. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.101452

José Portugal, Carmen Bedia, Fulvio Amato, Ana T. Juárez-Facio, Rodopi Stamatiou, Antigone Lazou, Chiara E. Campiglio, Karine Elihn, Benjamin Piña, (2024). Toxicity of airborne nanoparticles: Facts and challenges, Environment International, Volume 190, 108889, ISSN 0160-4120, https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108889.

Klein, J.-P., Mery, L., Boudard, D., Ravel, C., Cottier, M., & Bitounis, D. (2023). Impact of Nanoparticles on Male Fertility: What Do We Really Know? A Systematic Review. International Journal of Molecular Sciences, 24(1), 576. https://doi.org/10.3390/ijms24010576

Mahsa Nazari, Ronak Shabani, Marziyeh Ajdary, Mohsen Ashjari, Reza Shirazi, Azam Govahi, Fatemeh Kermanian, Mehdi Mehdizadeh, (2023). Effects of Au@Ag core-shell nanostructure with alginate coating on male reproductive system in mice, Toxicology Reports, Volume 10,Pages 104-116, ISSN 2214-7500, https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.01.003.

Minghui F, Ran S, Yuxue J and Minjia S (2023) Toxic effects of titanium dioxide nanoparticles on reproduction in mammals. Front. Bioeng. Biotechnol. 11:1183592. doi: 10.3389/fbioe.2023.1183592

Mirgalooye Bayat Sh, Farzaneh F, Mirgalobayat Sh. (2024). Comparative Analysis of the Effects of Magnesium Oxide Nanoparticles on Sperm Parameters in Fresh and Frozen Samples. J Reprod Infertil.25(2):148-156.

Moretti, E., Terzuoli, G., Renieri, T., Iacoponi, F., Castellini, C., Giordano, C. and Collodel, G. (2013), In vitro effect of gold and silver nanoparticles on human spermatozoa. Andrologia, 45: 392-396. https://doi.org/10.1111/and.12028

Moridi H, Hosseini S A, Shateri H, Kheiripour N, Kaki A, Hatami M et al . (2018). Protective effect of cerium oxide nanoparticle on sperm quality and oxidative damage in malathion-induced testicular toxicity in rats: An experimental study. IJRM 16 (4) :261-266

Said, A. A., Nasr, Y., Galal, A. A. A., Abdelhamid, A. E., Mohamed, H. A., Metwally, M. M. M., Said, M. A., Nassan, M. A., Dahran, N., & Mohamed, A. A.-R. (2022). Concerns with Male Infertility Induced by Exposure to Titanium Nanoparticles and the Supporting Impact of Pelargonium graveolens Essential Oil: Morphometric Records in Male-Wistar Rats. Life, 12(5), 639. https://doi.org/10.3390/life12050639

Saman Sargazi, Zahra Ahmadi, Mahmood Barani, Abbas Rahdar, Soheil Amani, Martin F. Desimone, Sadanand Pandey, George Z. Kyzas, (2022). Can nanomaterials support the diagnosis and treatment of human infertility? A preliminary review, Life Sciences, Volume 299,120539,ISSN 0024-3205, https://doi.org/10.1016/j.lfs.2022.120539.

Samrot, A. V., & Noel Richard Prakash, L. X. (2023). Nanoparticles Induced Oxidative Damage in Reproductive System and Role of Antioxidants on the Induced Toxicity. Life, 13(3), 767. https://doi.org/10.3390/life13030767

Santonastaso, Marianna & Mottola, Filomena & Iovine, Concetta & Colacurci, N & Rocco, Lucia. (2021). P–033 In vitro protective effect of α -tocopherol and anthocyanin against TiO2-NPs induced genotoxicity on human spermatozoa. Human Reproduction. 36. 10.1093/humrep/deab130.032.

Shandilya, R., Pathak, N., Lohiya, N. K., Sharma, R. S., & Mishra, P. K. (2020). Nanotechnology in reproductive medicine: Opportunities for clinical translation. Clinical and experimental reproductive medicine, 47(4), 245–262. https://doi.org/10.5653/cerm.2020.03650

Shaoyong, W., Wang, W., Pan, B., Liu, R., Yin, L., Wangjie, R., Tian, H., Wang, Y., & Jin, M. (2024). Transgenerational Inheritance Effects of Copper Oxide Nanoparticles (CuONPs) Induced Asthenospermia and Infertility via Gamete H3K9me3 Insufficiency Pathway in Mice. ACS nano, 10.1021/acsnano.4c05660. Advance online publication. https://doi.org/10.1021/acsnano.4c05660

Shaoyong, Weike and Xu, Bocheng and Liu, Yalin and Pan, Bo and Wang, Yizhen and Jin, Mingliang, Exposure to Copper Oxide Nanoparticles Causes Human Infertility Risk and Damages the Quality of the Human Sperm Via the 5'Amp-Activated Protein Kinase-Mediated Signaling Pathway in Vitro. Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4052477 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4052477

Smith, M. A., Michael, R., Aravindan, R. G., Dash, S., Shah, S. I., Galileo, D. S., & Martin-DeLeon, P. A. (2015). Anatase titanium dioxide nanoparticles in mice: evidence for induced structural and functional sperm defects after short-, but not long-, term exposure. Asian journal of andrology, 17(2), 261–268. https://doi.org/10.4103/1008-682X.143247

Wei, Y. S., Chen, Y. L., Li, W. Y., Yang, Y. Y., Lin, S. J., Wu, C. H., Yang, J. I., Wang, T. E., Yu, J., & Tsai, P. S. (2023). Antioxidant Nanoparticles Restore Cisplatin-Induced Male Fertility Defects by Promoting MDC1-53bp1-Associated Non-Homologous DNA Repair Mechanism and Sperm Intracellular Calcium Influx. International journal of nanomedicine, 18, 4313–4327. https://doi.org/10.2147/IJN.S408623

Zheng, H., Liang, G., Guan, C., Liu, L., Dong, J., Zhao, J., Tang, M., & Kong, L. (2024). Mitochondrial Fission in Nickel Nanoparticle-Induced Reproductive Toxicity: An In Vitro GC-1 Cell Study. Nanomaterials, 14(8), 689. https://doi.org/10.3390/nano14080689