EXPERIMENTAL RESULTS AND MODELING

نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی – النتائج التجريبية والنمذجة

ENGLISH SECTION 🔹

Experimental Framework and High-Fidelity Simulation

To rigorously evaluate the performance and operational dynamics of the tri-phasic nano-catalytic remediation system, a comprehensive methodology combining field-scale validation and high-resolution computational modeling was implemented. This integrative approach aimed to elucidate the synergistic interactions among reactive gas-phase nanobubbles, solid-phase catalysts, and the aqueous transport .medium within heterogeneous subsurface matrices

Reaction–Diffusion Transport Modeling

The spatial-temporal dynamics of pollutant transformation were mathematically modeled using the :classical advection–diffusion–reaction equation

$$\partial C/\partial t = D\ \partial^2 C/\partial x^2 - v\ \partial C/\partial x - kC$$

:Where

- concentration of contaminant = **C(x,t)**
- diffusion coefficient (cm^2/s) = **D**
- nanobubble front velocity (cm/s) = **v**
- pseudo–first-order reaction rate constant (1/s) = **k**

:Boundary conditions

- $C(x=0, t) = C_0$ (initial surface concentration)
- $C(x \to \infty, t) \to 0$
- $t > 0$

Numerical solutions via the finite difference method confirmed that the concurrent injection of nanobubbles and catalytic particles significantly improved mass transport and reactivity, especially in moist .sandy loam soils, enabling deep in-situ oxidation and contaminant breakdown

---

Designed Experimental Matrix (DOE)

A structured Design of Experiments (DOE) was used to examine the sensitivity of key parameters across :various contamination scenarios

Biodegradation (%)	Reaction Time (hr)	/Flow Rate (L (min	Injection Depth (cm)	Contaminant Type	Run
58.2	12	1.0	30	Heavy Hydrocarbon	1
73.5	8	2.0	50	Light Oil	2
65.1	10	1.5	40	Phenol / PAH	3
80.3	14	2.2	60	Mixed (Oil + VOC)	4

Global Pilot Deployment Benchmarking

Comparison with global pilot-scale technologies highlighted the superior performance, flexibility, and modularity of the tri-phasic platform:

Limiting Factors	Biodegradation (%)	Treatment Method	Location	Project
Long remediation time, poor control	50%~\	Passive subsurface aeration	Alberta	Canada – BioVent
Toxic residues, multistage complexity	70%–60	Fenton + surfactant oxidation	Hamburg	Germany – Fentox
Cost-intensive at depth	78%~\	Nanobubble-ozone hybrid	Abu Dhabi	UAE – Nano-O_2
Fully modular and site-adaptive	**90%–85**	Tri-phasic catalytic system	Multi-regional	**This Platform**

Download Full Pilot Comparison Table (CSV)

🔹 فارسی (Farsi Section)

چارچوب فرآیند آزمایشی و مدل‌سازی دقیق

به‌منظور ارزیابی جامع عملکرد پلتفرم سه‌فازی نانوکاتالیزوری، تلفیقی از آزمایش‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی دقیق انجام شد تا واکنش‌های بین نانوحباب‌های گازی، کاتالیزورهای جامد و فاز مایع در بسترهای خاکی آلوده بررسی شود.

مدل‌سازی نفوذ و واکنش در محیط خاک

فرمول کلاسیک انتقال واکنشی-نفوذی مورد استفاده قرار گرفت:

$$\partial C/\partial t = D\ \partial^2 C/\partial x^2 - v\ \partial C/\partial x - kC$$

که در آن:

- **C(x,t)** = غلظت آلاینده
- **D** = ضریب نفوذ (cm^2/s)
- **v** = سرعت جبهه نانوحباب (cm/s)
- **k** = نرخ واکنش مرتبه اول (1/s)

شرایط مرزی:

- $C(x=0, t) = C_0$ (غلظت اولیه در سطح)
- $C(x \to \infty, t) \to 0$
- $t > 0$

شبیه‌سازی عددی به روش تفاضل محدود نشان داد که ترکیب نانوحباب‌ها با کاتالیزورهای جامد، در محیط‌های لومی مرطوب منجر به افزایش نفوذ مؤثر و تجزیه آلاینده‌ها در عمق می‌شود.

طراحی آزمایش (DOE)

اجرا	نوع آلاینده	عمق تزریق (cm)	دبی (L/min)	زمان واکنش (ساعت)	درصد تجزیه زیستی
۱	نفت سنگین	۳۰	۱٫۰	۱۲	۵۸٫۲
۲	نفت سبک	۵۰	۲٫۰	۸	۷۳٫۵
۳	فنول / PAH	۴۰	۱٫۵	۱۰	۶۵٫۱
۴	ترکیبی (نفت + VOC)	۶۰	۲٫۲	۱۴	۸۰٫۳

مرور پروژه‌های پایلوت بین‌المللی

پروژه	کشور	روش اجرا	درصد تجزیه زیستی	محدودیت‌های اصلی
BioVent – کانادا	آلبرتا	هوادهی غیرفعال	~۱–۵۰٪	زمان طولانی، کنترل پایین
Fentox – آلمان	هامبورگ	فنتون + سورفکتانت‌ها	۶۰–۷۰٪	باقی‌مانده سمی، پیچیدگی چندمرحله‌ای
Nano-O_2 – امارات	ابوظبی	نانوحباب + ازن	~۱–۷۸٪	هزینه بالا در عمق زیاد
پلتفرم ما	مناطق مختلف	سامانه سه‌فازی کاتالیزوری	**۸۵–۹۰٪**	مدولار، قابل تنظیم بر اساس محل

🔹 العربية (Arabic Section)

الإطار التجريبي والنمذجة العددية المتقدمة

في إطار تحليل جدوى النظام النانوتكنولوجي المعتمد على المنصة ثلاثية الأطوار، تم تنفيذ دراسة تجريبية شاملة ترافقت مع نمذجة عددية عالية الدقة. تهدف هذه الدراسة إلى توصيف آليات التفاعل المتزامنة بين الفقاعات النانوية الغازية، الجسيمات الصلبة المحفّزة، ووسيط النقل السائل ضمن مصفوفة التربة الملوثة. يشمل هذا النهج التحليلي تفاعلات الأكسدة المحفزة، انتقال الكتلة متعدد الأطوار، والاستجابة البيئية الميكروية ضمن بيئات تحت سطحية غير متجانسة.

نموذج الانتقال والتفاعل الكيميائي

لتمثيل التحولات الزمنية والمكانية للملوثات، تم اعتماد معادلة النقل التفاعلي من نوع الحمل–الانتشار–التحلل:

$$\partial C/\partial t = D\ \partial^2 C/\partial x^2 - v\ \partial C/\partial x - kC\partial$$

حيث:

- **C(x,t)**: تركيز المادة الملوثة بدلالة الزمن والموقع
- **D**: معامل الانتشار الفعال (سم²/ث)
- **v**: سرعة الجبهة النانوية الفعالة (سم/ث)
- **k**: ثابت سرعة التحلل من الدرجة الأولى (1/ث)

الشروط الحدية:

- $C(x=0,\ t) = C_0$ (التركيز الابتدائي عند السطح)
- $C(x \to \infty,\ t) \to 0$
- $t > 0$

أظهرت نتائج المحاكاة العددية المستندة إلى طريقة الفروق المحدودة كفاءة عالية في اختراق الملوثات وتفكيكها ضمن تربة لومية رملية رطبة، حيث ساهم التفاعل التآزري بين مكونات النظام الثلاثي في تسريع آليات الأكسدة والتحلل الحيوي.

تصميم التجارب المعملي (DOE)

تم اعتماد مصفوفة تجريبية مدروسة لاختبار تأثير عمق الحقن، معدل التدفق، وزمن التفاعل على فعالية إزالة الملوثات المختلفة:

التجربة	نوع الملوث	عمق الحقن (سم)	معدل التدفق (لتر/دقيقة)	زمن التفاعل (ساعة)	نسبة التحلل الحيوي (%)
1	الهيدروكربونات الثقيلة	30	1.0	12	58.2
2	النفط الخفيف	50	2.0	8	73.5

التجربة	نوع الملوث	عمق الحقن (سم)	معدل التدفق (لتر/دقيقة)	زمن التفاعل (ساعة)	نسبة التحلل الحيوي (%)
3	الفينول / PAH	40	1.5	10	65.1
4	خليط (نفط + مركبات عضوية طيّارة VOC)	60	2.2	14	80.3

تحليل مقارن للمشاريع التجريبية العالمية

تم إجراء تحليل مقارن بين عدد من المبادرات الدولية لتقنيات التنقية البيئية، مع التركيز على كفاءة التحلل، المردود الاقتصادي، ومرونة التطبيق الميداني:

المشروع	الموقع	التقنية المستخدمة	نسبة التحلل الحيوي (%)	أبرز التحديات التقنية
BioVent – كندا	ألبرتا	تهوية سلبية تحت التربة	~50%	بُطء التنفيذ، غياب التحكم الديناميكي
Fentox – ألمانيا	هامبورغ	أكسدة فنتون + مواد خافضة للتوتر	60–70%	نواتج ثانوية سامة، تعقيد في التشغيل
Nano-O_2 – الإمارات	أبو ظبي	فقاعات نانوية + أوزون	~78%	كلفة مرتفعة للمعالجة في العمق
منصتنا الحالية	متعددة المناطق	منصة نانوية ثلاثية الأطوار	**85–90%**	بنية معيارية، قابلة للضبط والتكييف

تحميل جدول المقارنة الكامل (CSV)