

فرایند بیولوژیکی اصلاح خاک در مهندسی عمران: یک مقاله مروری

چکیده

مفهوم استفاده از فرایندهای بیولوژیک (زیستی) در اصلاح خاک که موسوم به روش اصلاح خاک به واسطه عوامل بیولوژیک و زیستی می‌باشد، پتانسیل عظیمی را در زمینه‌های مهندسی ژئوتکنیک از حیث عملکرد و پایداری زیست محیطی نشان داده است. این مقاله مروری بر میکروارگانیسم‌های خاک که مسئول این فرایند هستند و عوامل تأثیر گذار بر فعالیت‌های متابولیک و سازگاری ژئومتریکی با اندازه ذرات خاک خواهد داشت. دو مکانیسم معدنی سازی زیستی یعنی معدنی سازی کنترل شده زیستی و معدنی سازی به واسطه عوامل بیولوژیک، نیز بحث شده‌اند. عوامل محیطی و سایر عوامل محلی در طی رسوب کلسیت میکروبی (MICP) و تأثیرات آن‌ها بر روی فرایند شناسایی و ارائه شده است. اصلاح خواص مهندسی خاک نظیر مقاومت/سفتی و نفوذ پذیری که در برخی از مطالعات ارزیابی شده است نیز در این مطالعه بررسی می‌شود. کاربردهای بالقوه اینفرایند در مهندسی ژئوتکنیک و چالش‌های کاربرد میدانی فرایند، شناسایی شده است.

کلمات کلیدی: اصلاح خاک به واسطه عوامل زیستی، میکروارگانیسم‌ها، فعالیت‌های متابولیک، معدنی سازی زیستی، فعالیت اوره آز

1-مقدمه

مطالعات اخیر در زمینه روش‌های های اصلاح بیولوژیک خاک، عملی بودن این رویکرد را به دلیل عملکرد مؤثر و پایداری زیست محیطی آن اثبات کرده است. برایندها و نتایج مطلوب این مطالعات پتانسیل این روش را در مهندسی ژئوتکنیک نشان داده‌اند. روش‌های زیستی اصلاح خاک به عنوان یک رویکرد جدید و نو در مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته است که می‌تواند برای پیشگیری از روانگرایی و زمین لغزه در ماسه شل که منجر به دفورماسیون پی و یا گسیختگی آن می‌شود، استفاده گردد (الواردو 2009). اهمیت بالای استفاده از تیمارهای بیولوژیکی (زیستی) در زمینه‌های بسیاری از جمله بهبود مقاومت برشی و کاهش نفوذ پذیری خاک‌ها (ویفین و همکاران 2007، ایوانوف و پو 2008، هارکس و همکاران 2010، وان پاسن 2011)، بهبود مقاومت و دوام سیمان و بتون، اصلاح ترک‌ها در ساختمان (گیان و همکاران 2010، اکال و همکاران 2013)، اصلاح

خواص مهندسی خاک و سیمانی شدن ستون شن (اکال و همکاران 2009 الف، دامال و همکاران 2013) اثبات شده است.

روش اصلاح بیولوژیکی خاک عموماً اشاره به واکنش بیوشیمیایی ای دارد که در توده خاک برای تولید رسوب کلسیت جهت اصلاح برخی خواص مهندسی خاک رخ می‌دهد (دیجانگ و همکاران 2010). در عین حال، استفاده از دانش بین رشته‌ای مهندسی عمران، شیمی و میکروبیولوژی برای تغییر خواص مهندسی خاک زیر سطحی، اخیراً ظهور یافته است (ویفین و همکاران 2007، ایوانوفو چو 2008، میشل و سانتارینا 2005، دی جانگ و همکاران 2010). این روش از فرایندهای میکروبی خاک که از دیدگاه فنی موسوم به رسوب کلسیت میکروبی (MICP) است برای رسوب کربنات کلسیم در ماتریس خاک استفاده می‌کند. کلسیم کربنات به عنوان سیمانی جهت اتصال ذرات خاک عمل می‌کند (که موجب سیمانی شدن و کلوخه شدن خاک می‌شود) و موجب بهبود مقاومت و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود. MICP می‌تواند یک جایگزین عملی برای اصلاح خاک باشد که از هر دو ساختارهای جدید و فعلی پشتیبانی کرده و در بسیاری از زمینه‌های مهندسی عمران نظیر رسوبات شنی روان، تثبیت دامنه و زیر سازی جاده استفاده شده است (دی جانگ و همکاران 2006، چنگ و همکاران 2013).

گفته می‌شود که میکروارگانیسم‌ها بر تشکیل خاک‌های ریزدانه تأثیر گذاشته و موجب تغییر رفتار خاک‌های دانه درشت نظیر مقاومت و هدایت هیدرولیکی می‌شوند. آن‌ها موجب تسهیل واکنش‌های شیمیایی در توده خاک شده و موجب افزایش هوازدهی و تغییر خواص شیمیایی و میکروبی نمونه‌ها پس از نمونه برداری می‌شود. از این روی، اثرات این میکروارگانیسم‌ها بر روی خواص مکانیکی خاک‌ها هنوز به طور کامل در زمینه مهندسی ژئوتکنیک کشف نشده است (میشل و سانت مارینا 2005). اگرچه این مسئله به خوبی مشخص شده است که میکروارگانیسم‌های بیشتری در خاک زیر سطحی نسبت به سطح زمین وجود دارند و مطالعات به مدت چندین سال، اهمیت فعالیت‌های زیستی در تأثیر گذاری بر رفتار خاک را اثبات کرده‌اند، مطالعات کمی در زمینه کشف اهمیت، سودمندی و کاربرد زیست شناسی در مهندسی ژئوتکنیک صورت گرفته‌اند. در عین حال، انتظار می‌رود که درک شفاف تأثیر میکروارگانیسم‌ها و فعالیت زیستی بر روی رفتار خاک می‌تواند منجر به شناسایی و طبقه

بندی بهتر خاک و حتی راه حل‌های مهندسی ژئوتکنیک جایگزین شود. این مقاله مروری بر مفهوم معدنی سازی زیستی و کاربردهای آن در اصلاح خواص مهندسی خاک دارد.

2- میکروارگانیسم‌های خاک

خاک نسبت به سایر زیستگاه‌های میکروبی، محل زندگی جنس‌ها و گونه‌های میکروارگانیسم‌های بیشتری است. دلیل این است که خاک دارای عناصر مغذی فراوانی بوده و معمولاً مایع را در خلل و فرج خاک حفظ می‌کند. برخی از گونه‌های این میکروارگانیسم‌ها به تعداد زیاد وجود دارند، و تعداد برخی از آن‌ها نیز بسیار کم است زیرا عوامل ضروری برای بقا و رشد این میکروارگانیسم‌ها توزیع برابری در عمق لیتوسفر ندارند. میکروارگانیسم‌ها سازگاری بالایی با شرایط متغیر ژنتیکی و فیزیولوژیکی دارند زیرا آن‌ها قدمت بیش از 3.5 میلیارد سال دارند (استوتزکی 1997).

تقریباً 10^{12} – 10^9 ارگانیسم در هر کیلوگرم خاک نزدیک به سطح زمین وجود دارد. میکروارگانیسم‌های موجود در خاک شامل باکتری‌ها، آرکایا و یوکاریا می‌باشند. برخی از ویژگی‌های مهم باکتری‌ها و آرکایا دارای ساختار سلولی ساده بدون هسته محصول شده در غشا، بیش از یک کروموزوم و ترکیب شیمیایی متمایز هستند. شناسایی و طبقه بندی میکروارگانیسم‌ها معمولاً با استفاده از نوع دیواره سلولی، شکل، عناصر مغذی، نوع تبدیل بیوشیمیایی و توالی دیان ای و آران ای انجام می‌شود (ووز و همکاران 1990، ارلیخ 1998، کاپل 2001). بر طبق گفته میشل و سانتامارینا (2005)، فراوان‌ترین میکروارگانیسم‌ها در خاک‌ها، باکتری‌ها هستند. به منظور مقابله با شرایط محیطی نامساعد، برخی از باکتری‌ها تولید اسپور می‌کنند. قطر سلول اسپور ها 0.5 میکرومتر تا 3 میکرومتر است و شکل آن‌ها گرد، میله‌ای یا مارپیچی است. مادپگان و همکاران (2008) نشان داده‌اند که باکتری‌ها می‌توانند در محیط‌های با اسیدیته پایین تا بالا یا شوری پایین تا بالا زنده بمانند. آن‌ها می‌توانند در دماهای بسیار پایین تا بالا یعنی از زیر صفر تا بالای نقطه جوش زنده مانده و به فشارهای بسیار بالا مقاوم هستند. اکثریت سلول‌های باکتریایی دارای بار سطحی منفی برای مقادیر PH آب زیرزمینی بین 5 و 7 می‌باشند که در خاک نزدیک سطح زمین زندگی می‌کنند و بار سطح منفی با افزایش غلظت و ظرفیت یون‌ها در سیال منفذی کاهش می‌یابد (چاپل 2001).

چون باکتریها، بومی زمین هستند، بعید است که آنها در آینده موجب بروز مسائل زیست محیطی شوند (فریتزاگ 2005). برخی از سویه‌های باکتری‌ها قادر به تولید آنزیم اوره از بوده و در روش اصلاح بیولوژیکی خاکم استفاده می‌شوند از جمله جنس‌های *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Spoloactobacilus*, *Desulfotomaculum* و *Clostridium* (کاپراسکی و همکاران 2006).

فعالیت میکروارگانیسم‌های تولید کننده اوره از را می‌توان به دو دسته متفاوت بر اساس پاسخ آنها به غلظت بالای آمونیوم تقسیم کرد. اولین گروه شامل باکتری‌هایی هستند که فعالیت اوره از آنها به دلیل غلظت آمونیوم بالا (که در جدول 1 نشان داده شده است) متوقف نمی‌شود. اگرچه دومین گروه شامل باسیلوس مگاتریوم، الکالیژن یوتروفوس، کلبزیلا ارگانز و زئودوموناس ارگیونزوا (کلاتواسر و همکاران 1972، فریدریخ و مگازانیک 1977) می‌باشد، که فعالیت اوره از آنها با غلظت بالای آمونیوم متوقف می‌شود. از این روی میکروارگانیسم‌هایی که فعالیت اوره از آنها با مقدار بالای آمونیوم متوقف نمی‌شود، در اصلاح بیولوژیک خاک ارجح تر هستند زیرا غلظت بالای اوره در فرایند هیدرولیز می‌شود (ویفین 2004).

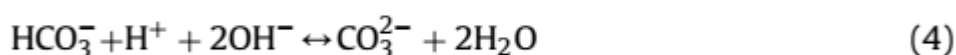
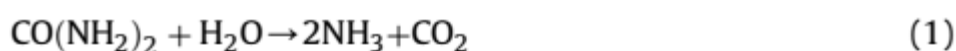
جدول 1: میکروارگانیسم‌هایی که فعالیت اوره از آنها با آمونیوم متوقف نمی‌شود (ویفنی 2004)

میکروارگانیسم‌ها	فعالیت بالا	عدم مهار شدن با آمونیوم	بیماری زانودن و اصلاح شده ژنتیکی
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	بله	بله	بله
<i>Proteus vulgaris</i>	نامشخص	بله	به طور متوسط
<i>Proteus mirabilis</i>	نامشخص	بله	خیر
<i>Helicobacter pylori</i>	بله	بله	خیر
<i>Ureplasma (Moclicutes)</i>	بله	بله	خیر

به این ترتیب، همه میکروارگانیسم‌ها برای کاربردهای معدنی سازی زیستی به دلیل فعالیت اوره از خود خوب هستند: آنها بایستی برای محیط زیست در طی و پس از فرایند تیمار، ایمن باشند. از این روی باکتری‌های

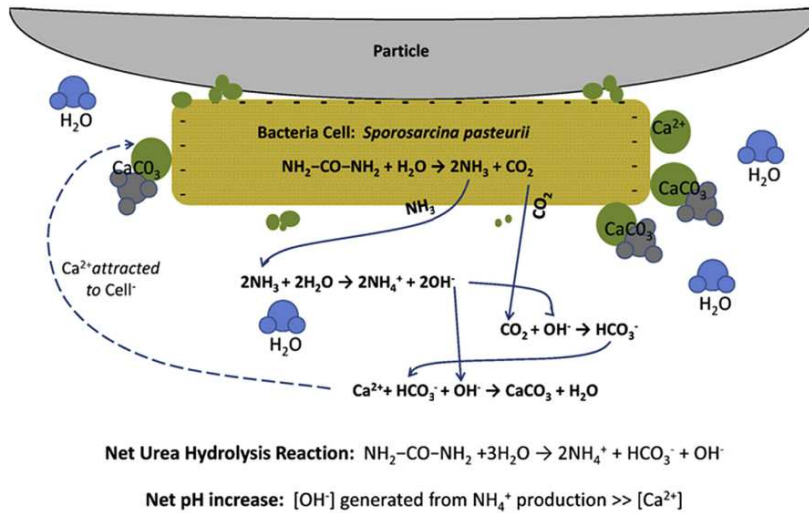
تولید کننده اوره از برای کاربردهای اصلاح بیولوژیکی نایبستی پاتوژنیک باشد و یا دارای عناصر اصلاح شده‌ای باشد که موجب بهبود بیماری زایی میکروب‌های محیطی باشند.

بر طبق گفته بون و چن (2000)، هیدرولیز اوره عموماً از یک سری واکنش‌های شیمیایی پیروی می‌کند که منجر به تشکیل آمونیوم و دی اکسید کربن می‌شود. واکنش شیمیایی در معادله 1 تشریح شده است. یون‌های هیدروکسیل تولید شده از تبدیل امونیاک به آمونیوم منجر به افزایش مقدار PH محلی می‌شود که موجب تجزیه بی کربنات به یون‌های کربنات خواهد شد. دی اکسید کربن سریعاً در حضور آب به بی کربنات تجزیه شده و با یون‌های هیدروکسیل برای تشکیل یون‌های کربنات واکنش می‌دهد (معادله 3-4). از این روی، در حضور یون‌های کلسیم، کلسیت رسوب می‌شود (کاستینر و همکاران 1999، بون و چن 2000). کل فرایند هیدرولیز اوره و تشکیل کلسیم کربنات در معادله 6 ارائه شده است. شکل 1 جزئیات واکنش‌های هیدرولیز اوره را برای رسوب کلسیم کربنات با *Sporosarcina pasteurii* نشان می‌دهد.



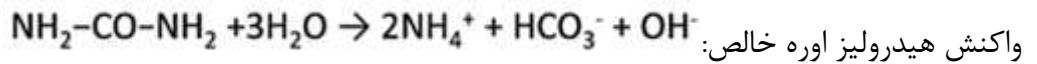
عوامل محیطی نظیر دما و رطوبت بر واکنش‌های متابولیکی درون سلول‌ها و برخی خواص فیزیکی نظیر سرعت و انتشار اثر می‌گذارند. سایر عوامل نظیر وجود سایر میکروارگانیسم‌ها موجب محدود شدن فضای موجود برای رشد و فعالیت باکتری‌ها شده و جمعیت باکتری‌ها را محدود می‌کنند. مقدار PH خاک موجب افزایش شوری محیط شده و بر جذب، بار سطحی و انحلال برخی کانی‌ها در خاک اثر دارد (دیگانز و هریس 1997). اگرچه میکروب‌ها به آسانی در منافذ خاک دانه‌های خاک حرکت می‌کنند، جا به جایی آن‌ها با خلل و فرج کوچک‌تر تشکیل شده توسط خاک‌های دانه ریز محدود می‌شود. اندازه باکتری‌ها بین 0.5 میکرومتر و 3 میکرومتر متغیر

است زیرا بعید است که آن‌ها از فضاهای کوچک‌تر از 0.4 میکرومتر عبور کنند. همچنین، قارچ‌ها و پرتوزاها نیازمند اندازه خلل و فرج بزرگ‌تری از 6 میکرومتر هستند (کاستینر و همکاران 2000). شکل 2، مقایسه ذرات خاک و میکروارگانیسم‌ها را نشان می‌دهد. در عین حال، در خاک‌های دانه درشت، باکتری‌ها به اسانی بین ذرات معدنی خاک جا به جا شده و به سطوح کانی چسبیده و تشکیل میکروکلنی یا بیوفیلم می‌دهند.



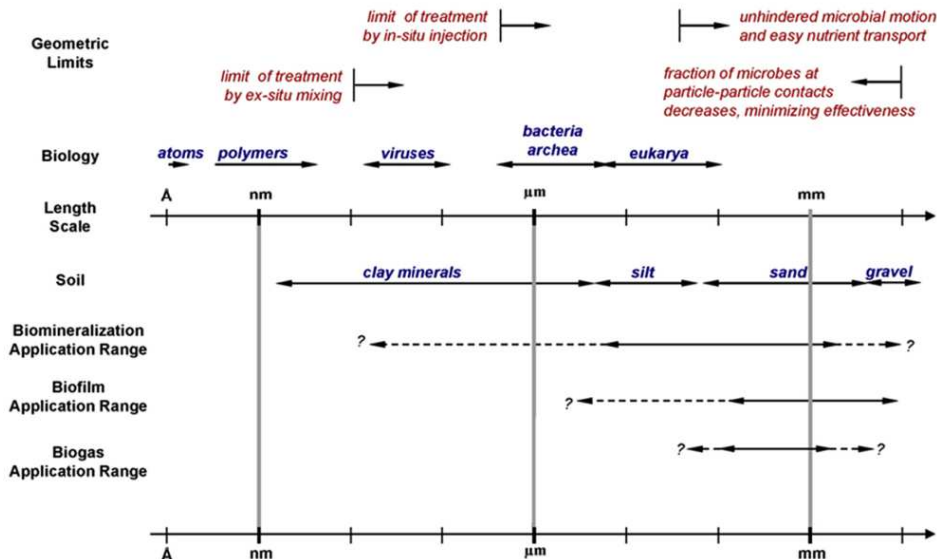
ذره

سلول باکتری: اسپوروزاگارسینا پاستوریل



افزایش PH خالص: OH تولید شده از تولید NH4

شکل 1: فرایند رسوب کلسیت میکروبی با هیدرولیز اوره (دیجانگ و همکاران 2010).



<p>حدود ژئومتریک، بیولوژی، مقیاس طولی، خاک، دامنه کاربرد معدنی سازی، دامنه کاربرد بیو فیلم، دامنه کاربرد بیوگاز</p>
<p>حدود تیمار با ترکیب نابرجا، حدود تیمار با تزریق برجا، حرکت میکروبی پیوسته و انتقال اسان عناصر مغذی، کسری از میکرووبها در حدفاصل ذرات کاهش یافته و به این ترتیب اثر بخشی به حداقل می‌رسد.</p>
<p>اتمها، پلیمرها، ویروسها، اراکایا، یوکاریا،</p>
<p>کانی‌های رس، سیلت، شن، سنگریزه</p>

شکل 2: مقایسه اندازه ذرات خاک، محدودیت‌های هندسی و میکروارگانیسم‌ها برگرفته از میشل و سانت مارینا 2005 توسط دیجانگ و همکاران 2010

3- معدنی سازی زیستی

فرایندی که از طریق آن موجودات زنده تولید مواد معدنی می‌کنند موسوم به معدنی سازی زیستی است. این مواد سیلیکات‌ها در جلبک‌ها و دیاتوم‌ها، کربنات‌ها در موجودات بی مهره و فسفات‌ها، کلسیم و کربنات در ارگانیسم‌های مهره دار هستند (لاورنستراک و وینر 1989). مواد معدنی تحت دو مکانیسم تولید می‌شوند: مکانیسم‌های کنترل شده زیستی و مکانیسم‌های القا شده زیستی. در معدنی سازی کنترل شده زیستی، ارگانیسم‌ها، فرایند را مستقل از شرایط محیطی کنترل می‌کنند. فرایندهای هسته زایی و رشد کانی‌ها درون سلول ارگانیسم‌ها کنترل می‌شوند. اگرچه در فرایند معدنی سازی زیستی، فعالیت‌های متابولیکی برون سلولی میکروارگانیسم‌ها که وابسته به شرایط محیطی هستند منجر به تشکیل کانی‌ها می‌شود (داهمی و همکاران 2013). از این روی رسوب باکتریایی کلسیم کربنات به طور کلی به عنوان یک فرایند زیستی تلقی می‌شود که به شدت وابسته به نوع باکتری، عوامل غیر زیستی نظیر شوری و ترکیب محیط و سایر شرایط محیطی است (کونر و کرامبین 2000، ریدادجنیر و همکاران 2004).

فرایندهای معدنی سازی زیستی که در بسیاری از مطالعات اثبات شده است، به لیان و همکاران (2006) در هر محیطی بر روی زمین فعال هستند که بیشتر فعالیت‌های میکروبی منجر به تشکیل کانی‌های کربناته نزدیک

سطح زمین می‌شوند. فعالیت میکروبی نقش مهمی در تشکیل کربنات نظیر رسوبات و رسوبات کربناته خاک ایفای می‌کند. میکروب‌های خاک و برخی از محیط‌های محلول مسئول تشکیل رسوبات کربنات کربناته در هر دو شرایط طبیعی و آزمایشگاهی می‌باشند (پکن و همکاران 1999). مواد معدنی ناشی از فرایندهای معدنی سازی زیستی شامل کربنات‌ها هستند. کربنات‌های کلسیم میکروبی کاربرد زیادی در زیست فناوری، ژئوتکنولوژی و مهندسی عمران دارند (داهمی و همکاران 2013).

از این روی چهار عامل بر فرایند شیمیایی تأثیر می‌گذارد که منجر به رسوب کربنات کلسیم می‌شود: غلظت کلسیم، غلظت کربن معدنی محلول، مقدار PH و دسترسی به سایت‌های هسته زایی (هامس و واسترات 2002). بسیاری از گونه‌های باکتریایی با رسوبات کربنات طبیعی از محیط‌های مختلف ارتباط دارند. نقش اصلی باکتریها در فرایند رسوب به توانایی ایجاد یک محیط قلیایی از طریق افزایش مقدار PH و کربن معدنی حل شده در طی فعالیت‌های فیزولوژیکی بر می‌گردد (هامس و ورستارت 2002).

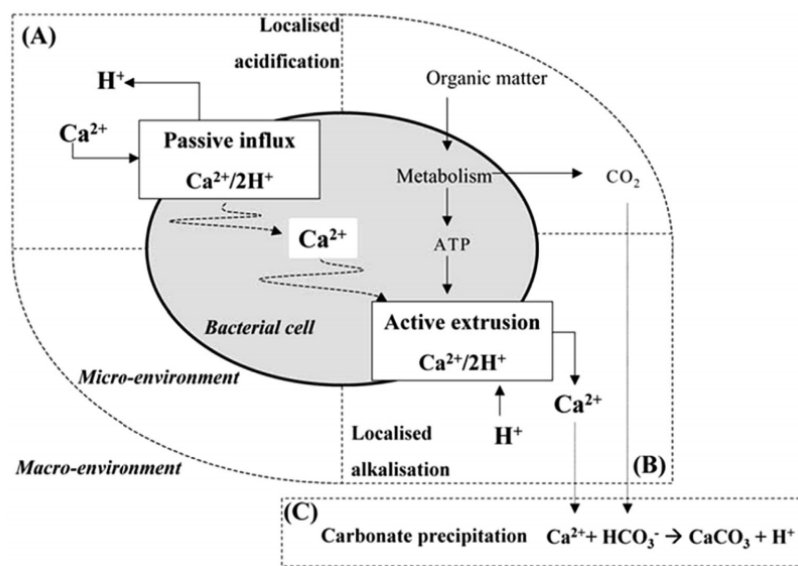
رسوب کربنات میکروبی (MCP) به طور گسترده تحت محیط‌های طبیعی و شرایط آزمایشگاهی کنترل شده مطالعه شده است، ولی مکانیسم‌های دقیق رسوب کربنات و نقش موجودات رسوب کننده در این فرایند در اکولوژی میکروبی، مبهم بوده‌اند. از این روی این فرایند در سه مکانیسم شناسایی شده‌است: اول، معدنی زیستی به صورت محصول فرعی ناخواسته متابولیسم میکروبی رخ می‌دهد (کانر و کرادمین 2000). این رایج‌ترین مکانیسم است. این فرایند در شکل 3 نشان داده شده است. سپس هسته زایی کربنات بر روی دروه سلولی میکروارگانیسم‌ها به دلیل تبادل یونی از طریق غشای میکروبی رخ می‌دهد در حالی که میکروارگانیسم‌ها کم‌تر شناخته شده‌اند (کاستینر و همکاران 2000). سومین مکانیسم شامل ماکرومولکول‌های برون سلولی هستند که یون‌های کلسیم را به دام انداخته و به عنوان اصلاح کنندگان رشد برای کنترل تبلور عمل می‌کنند (برایزانت و همکاران 2003).

به این ترتیب، دانش اخیر در خصوص مفهوم رسوب کربنات اصلاح شده با باکتری منوط به این واقعیت است که رسوب کربنات تولید شده، فاقد کارکردها و نقش‌های زیستی است که ارتباط ژنتیکی با میکروارگانیسم‌های موجود در فرایند دارند. این نشان می‌دهد که معدنی سازی میکروبی به کربنات یک فرایند غالب است (مان

2000). با این حال، وجود مکانیسم‌های مختلف با توجه به نقش میکرو ارگانیسم‌ها در رسوب کربنات، به توصیف پیچیدگی فرایند معدنی سازی زیستی کمک می‌کند.

4- عوامل مؤثر بر فرایندهای MICP

رسوب کربنات کلسیم میکروبی به عنوان یک فرایندی که در بر گیرنده فعالیت‌های متابولیکی میکروارگانیسم‌ها و برخی واکنش‌های شیمیایی است، تحت کنترل شرایط محیطی است. مارتنزن و همکاران 2011 به ارزیابی اثرات برخی عوامل میدانی در طی تیمار MICP و اثرات احتمالی بر رشد باکتری، متابولیسم و رسوب ناشی از باکتری‌ها با باکتریوم *Sporosarcina pasteurii* پرداخته‌اند. از این روی تست‌های ستون خاک و بیج برای ارزیابی عوامل محیطی زیر سطحی در فرایند تیمار استفاده شده است. رسوب کربنات و رشد میکروبی در آب شور و شیرین ارزیابی شده است.



اسیدیفیکاسیون محلی، ماده الی، انتقال غیر فعال، متابولیسم، سلول باکتریایی، اکستروژن فعال، خرد محیط، کلان محیط، قلیایی شدن موضعی، رسوب کربنات

شکل 3: نمودار شماتیک متابولیسم باکتریایی و رسوب کلسیم کربنات تحت PF بالا و شرایط برون سلولی کلسیم بالا (هامس و ورسترات 2002).