

کاربرد فناوری نانو در معماری

تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۲۳

تاریخ پذیرش نهایی: ۹۲/۱۱/۱۴

لادن وجدان زاده*

چکیده

در ابتدای هزاره سوم میلادی، فناوری از جنس نانو، نوید انقلاب صنعتی دیگری را می‌دهد که از آن به عنوان موج چهارم انقلاب صنعتی یاد می‌شود. بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که در آینده‌ای نه چندان دور همه اشیا بر مبنای مقیاس نانو ساخته شده و خواصشان در آن مقیاس شکل می‌گیرد و تولید همه اشیای دست‌ساز بشر دچار تحول خواهد شد. بنابراین تغییر و تحول مصالح ساختمانی و فناوری ساخت امری امکان پذیر به نظر می‌رسد و باید از هم اکنون تأثیرات آن بر معماری مورد بررسی قرار گیرد. این مقاله بر آن است تا تأثیرات فناوری نانو در حوزه معماری را با مطالعه کاربرد فناوری نانو در عرصه معماری و بهره‌گیری از مصالح نانو بنیان و تغییر ساختار یاخته‌ای و فرمی معماری مورد بررسی قرار دهد. چهارچوب نظری پژوهش بر اساس اهمیت به کارگیری مصالح نانو بنیان و ساخت و ارائه طرح‌هایی بر مبنای بهره‌گیری از ساختار علم طبیعی یا همان بیونیک استوار شده است. روش تحقیق به کار گرفته شده در این مقاله، روش تحقیقات کاربردی و بر اساس خصوصیت موضوع روش توصیفی است. تأثیر فراگیر نانو فناوری در زندگی بشر و نحوه ارتباط او با محیط اطراف و ساختمان‌ها اجتناب ناپذیر و غیر قابل تصور است. بنابراین مصالح نانو بنیان باید به مرور جایگزین مصالح سنتی شوند تا بتوان در صنعت ساخت و ساز تحویلی عظیم را به وجود آورد از سوی دیگر ارائه طرح‌های معمارانه بر اساس ساختار موفولوژی و یاخته‌ای نانو به عنوان پادزهری برای بناهای فرم محور امروزی خواهد بود.

واژگان کلیدی: معماری، معماری پایدار، فناوری نانو، معماری، نانو مواد، بیونیک.

مقدمه

«نانو فناوری نامی است که به یک نوع فناوری تولیدی اطلاق می‌شود. همان‌طور که از نامش پیداست زمانی محقق می‌شود که توانایی ساختن اشیا از اتم‌ها وجود داشته باشد و در این صورت توانایی آرایش دوباره مواد با دقت اتمی را به وجود می‌آورد» (Fazeli et al., 2005, p. 1). فناوری جدید تکامل تدریجی طراحی و تولید را در دهه گذشته برعهده داشته است. این فناوری محدودیت‌هایی مثل استانداردها، ترکیبات غیر قابل بازگشت همانند بتن و آجر، استیل، میخ، اتصالات و ... را از سر راه طراحان برخواهد داشت و مفاهیم معماری را دچار دگرگونی خواهد کرد (Olson, 2000, pp. 993-998). در دنیای کنونی دیر زمانی است که زنگ خطر اتمام ذخایر نفتی و فسیلی به صدا درآمده است، یافتن منابع جدید انرژی ارزان قیمت و حفظ ذخایر و منابع برای نسل‌های آینده رمز موفقیت ملت‌ها در عدم وابستگی به دیگران است. از سوی دیگر کاهش آلودگی زیست محیطی، جلوگیری از اتلاف نیروی انسانی و کاهش هزینه‌های هنگفت از جمله خصوصیات است که برای هر پروژه و یا فعالیت موفق و پایدار تعریف می‌شود؛ تا با تأمین منابع مورد نیاز هر فعالیت به حفظ منابع طبیعی و تجدیدنپذیر برای نسل آینده و کاهش آلودگی و حفظ زیست بوم پرداخت. با توجه به نیازهای کنونی جامعه آیا فناوری نانو قادر خواهد بود تا به صورت کاربردی معماری و حوزه ساخت و ساز را دستخوش تغییرات اساسی نماید و روند ساخت و ساز را در راستای پایداری منابع و زیست بوم هدایت نماید؟ آیا استفاده از مصالح نانو بنیان‌بنایی با مقاومت بالا در برابر زلزله و بلایای طبیعی را به ارمغان خواهد آورد؟ آیا استفاده از فناوری نانو ساختمان طول عمر مفید بناها را افزایش خواهد داد؟ و مهم‌تر از همه آیا این فناوری قادر خواهد بود به خلق محیطی پاسخده و ایده‌آل بپردازد و از طراحی و ساخت بناهای فرم محور جلوگیری نماید؟

استحکام^۱، سودمندی^۲ و زیبایی^۳ ارکان سه‌گانه ویتروویوس است که در هر برهه زمانی با ظهور مکاتب متعدد مورد تردید قرار گرفته است اما همچنان خصوصیات یک بنا را به زیبایی و تمام و کامل بیان می‌دارد؛ از همین روی با ظهور این نانو فناوری هندسه فضایی در قالب مولکول‌ها و اتم‌ها، ایستایی، سودمندی و زیبایی ساختمان را تأمین خواهند کرد. «این یک رؤیای علمی تخیلی نیست، زیرا که علم نانو خیلی سریع‌تر از یک واقعیت رخ خواهد داد» (Elvin, 2003, pp. 98-99). «به عبارت دیگر در آینده بزرگ‌ترین طرح‌ها برای ساختن محیط اطراف، خیلی خیلی کوچک خواهد بود» (Lymt et al., 2001, p. 16). مدرک بی‌واسطه و مستدل برخورد مستقیم نانو فناوری و معماری، مصالح (تولیدات فیزیکی) هستند که عموماً کاربری‌های گوناگونی به ساختمان‌ها می‌بخشند. چنین مصالحی، امکانات تازه‌ای را برای تکمیل و بهبود شی معماری و اندیشیدن درباره شکل جدیدی از زندگی، به وجود می‌آورند (Rennie, 2008, p. 8). نظیر (پوست‌های محافظ در برابر خورشید، دیوارهای نامریی و کپی‌سازی ساختارهای زاینده، همگی در قلمرو امکان قرار می‌گیرند. تحولات اجتماعی، اخلاقی و محیطی نیز جدای این سیر تحول‌کننده، نخواهد بود (Elvin, 2003, pp. 100-105). بنابراین بهره‌گیری از نانو با توجه به آرایش مولکولی، ساختار سازه‌ای (نظیر بیونیک) و مصالح نوین راهکاری منطقی جهت حل چالش‌های معماری فرم‌محور امروزی (نظیر آنچه که جوهنسن^۴ در سال‌های متمادی به آن پرداخته است) می‌باشد. از سوی دیگر تطابق سازه و معماری در راستای شکل‌گیری معماری و سازه به مثابه یک ساختار واحد و کاهش بحران انرژی، پایداری بنا در برابر حوادث غیر مترقبه (با صرفه اقتصادی) و حفظ منابع انرژی برای نسل‌های آتی و یافتن منابع جدید انرژی افق‌های جدیدی را در معماری و شهرسازی فراهم خواهد نمود.

بر اساس هدف (بررسی تأثیرات فناوری نانو در حوزه معماری)، روش تحقیق به کار گرفته شده در این مقاله، روش تحقیقات کاربردی و بر اساس خصوصیت موضوع روش توصیفی برگزیده شده است. از همین روی با تعریف جامعی از نانو و مروری بر پیشینه آن، به کاربرد این فناوری در حوزه‌های مختلف اشاره نموده و با تأکید بر حوزه معماری و شهرسازی و ذکر نمونه‌هایی از کاربرد فناوری نانو در حوزه معماری و صنعت ساختمان به صورت موردی و بیان مزایا و معایب بهره‌گیری از این فناوری به تحلیل موضوع پرداخته و نتایج حاصله ارائه می‌شود.

۱. نانو و نانو فناوری

«اصطلاح نانو از واژه یونانی Nanos مشتق شده و معنای کوتوله^۵ دارد. عبارت نانو پیشوندی است مانند سایر پیشوندها که در ابتدای واحدهای سنجش اندازه مانند ثانیه، متره و غیره می‌آیند. یک نانومتر به معنای یک میلیاردم متر یا ۱۰ آنگستروم است (برابر ابعاد پنج اتم)» (Golabchi, 2011, p. 23). در حالی که تعاریف زیادی برای فناوری نانو وجود دارد، طرح ملی فناوری نانو^۶ NNI تعریفی سه بخشی را برای فناوری نانو ارائه می‌دهد: توسعه فناوری و تحقیقات در سطوح اتمی، مولکولی و یا ماکرومولکولی در مقیاس اندازه‌ای یک تا ۱۰۰ نانومتر در کنار خلق و استفاده از ساختارها، ابزار و سیستم‌هایی که به خاطر اندازه کوچک یا حد میانه آن‌ها، خواص و عملکرد نوینی دارند و بالاخره توانایی کنترل یا دستکاری در سطوح اتمی. همچنین وزارت آموزش و تحقیقات فدرال آلمان^۷ فناوری نانو را این گونه توصیف می‌کند: فناوری نانو به تمام فعالیت‌های تحقیق و بررسی، خلق و کاربرد ساختارهای مولکولی، در گستره درون ماده‌ای و سطح بیرونی مواد باز می‌گردد که دست کم یکی از ابعاد آن، رواداری کمتر از ۱۰۰ نانومتر داشته باشد. آنچه مسلم است، اینکه

دست‌کاری اجزای یک سیستم در مقیاس نانو، منجر به ایجاد کاربردها و مشخصه‌هایی در مواد می‌شود که به این ترتیب می‌توان مصالح جدید یا کاربردهای جدید برای مصالح قبلی خلق کرد.

۲. مروری بر پیشینه فناوری نانو

در طول تاریخ بشر از زمان یونان باستان، مردم و به خصوص دانشمندان آن دوره بر این باور بودند که مواد را می‌توان آنقدر به اجزاء کوچک تقسیم کرد تا به ذراتی رسید که خرد ناشدنی هستند و این ذرات بنیان مواد را تشکیل می‌دهند. در حدود ۴۰۰ سال پیش از میلاد مسیح شخصی به نام دموکریتوس^۸ فیلسوف یونانی واژه اتم را که به معنی تقسیم نشدنی در زبان یونانی است برای توصیف ذرات سازنده مواد به کار برد. بسیاری وی را پدر فناوری و علوم نانو می‌دانند. نقطه آغاز فناوری نانو^۹ به طور دقیق مشخص نیست. شاید بتوان شیشه‌گران قرون وسطا را اولین نانو تکنولوژیست‌ها دانست. آنان از قالب‌های قدیمی^{۱۰} برای شکل دادن شیشه‌ها استفاده می‌کردند، ولی شیشه‌گران دلیل تغییر رنگ شیشه در اثر اضافه نمودن طلا را نمی‌دانستند. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون وسطایی از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌کردند و با این کار شیشه‌های رنگی بسیار جذابی به دست می‌آمد (Leydecker, 2008, p. 19). به طور کلی روند توسعه فناوری را چنین می‌توان در نظر گرفت:

جدول ۱: روند توسعه فناوری نانو

۱۹۵۹	سخنرانی ریچارد فاینمن ^{۱۱} پایه‌گذار علم نانو با عنوان «فضای بسیار زیادی در مقیاس خرد وجود دارد».
۱۹۷۴	واژه نانو فناوری توسط نوریو تانیگوچی ^{۱۲} استاد دانشگاه علوم توکیو بر زبان‌ها جاری شد.
۱۹۸۱	اختراع میکروسکوپ STM
۱۹۸۵	کشف باکی‌بال ^{۱۳} (کربن خالص کره‌ای شکل و تو خالی)
۱۹۸۶	اختراع میکروسکوپ AFM
۱۹۸۹	عبارت IBM به وسیله اتم‌های جداگانه نوشته شد.
۱۹۹۰	تولید مصنوعی باکی‌بال در مقیاس قابل مشاهده با چشم غیرمسلح
۱۹۹۰	آغاز سرمایه‌گذاری در زمینه تحقیق و توسعه فناوری نانو در کشورهای مختلف
۱۹۹۰	ورود اولین محصول نانو به بازار
۱۹۹۱	کشف نانو لوله‌ها
۲۰۰۰	مقاله بیل جوی ^{۱۴} با عنوان «چرا آینده به ما نیاز دارد؟» - آغاز مناقشات پیرامون فناوری نانو
۲۰۰۷	مطرح شدن نخستین گواهی‌نامه جهانی در زمینه مدیریت ریسک و پایش سیستم‌های فناوری نانو در آلمان و سوییس

(Leydecker, 2008, p. 21)

فناوری نانو طی دو دهه توانست جایگاه خود را در میان علوم و رشته‌های متعدد تثبیت نماید و در برخی رشته‌ها یا محصولات، انقلابی به پا نموده است؛ که در ذیل به ذکر برخی از آنان می‌پردازیم.

۳. کاربردهای نانو فناوری

چنانچه پیشتر نیز اشاره شد نانو فناوری علی‌رغم نوظهور بودن پیش‌بینی می‌شود که زندگی جامعه بشری را دستخوش تغییرات نموده و به رویاهای آدمی جامه عمل بپوشاند. از همین روی این فناوری نوظهور در بسیاری از دانش‌ها و رشته‌های پرکاربرد وارد شده و پژوهشگران به نتایج قابل توجهی دست یافته‌اند (Asadi fard, 2004). این دستاوردها عبارتند از:

جدول ۲: کاربردهای فناوری نانو

حوزه یا رشته	توضیحات
حفاظت از محیط زیست	- کاهش در مصرف مواد خام و انرژی، در نتیجه کاهش انتشار گاز CO ₂ و حفاظت از منابع - تولید انرژی خورشیدی (سلول‌های فتوولتایی) و پیل‌های سوختی
صنایع دریایی	ساخت شناورها با هدف: - ایجاد پوشش‌های مناسب در برابر خوردگی و افزایش استحکام - ممانعت از حمل چندین تن سوخت و توقف‌های متعدد با تولید سوخت‌های جدید و باتری با ذخیره انرژی بسیار
نانوفناوری پزشکی ^{۱۵}	- تولید سیستم‌های هوشمند برای شناسایی بیماری‌ها و ترمیم و بافت‌های زیستی آسیب دیده در سطوح ملکولی - هدف‌گیری و ارسال دارو به نقاط غیر قابل دسترس بدن با تجهیزات نانومتری - تولید بافت‌های مصنوعی سازگار با بدن - درمان برخی از بیماری‌های صعب‌العلاج مانند سرطان، ایدز و هیپاتیت - مراقبت بهداشتی بهتر با استفاده از تجهیزات نانومتری در داخل بدن
علوم کامپیوتر و الکترونیک	- افزایش میزان ذخیره‌سازی اطلاعات - ساخت ماشین‌های شبیه سازنده به کمک نانو کامپیوتر و نانو اسمبلر ^{۱۶} - کاربرد بالقوه نانو لوله‌ها به عنوان قطعه‌های گسیلنده میدانی در نمایش دهنده‌های صفحات تخت و ...
بیوتکنولوژی ^{۱۷} یا نانوبیوتکنولوژی ^{۱۸}	- ساخت سیستم‌هایی به منظور ره‌ایش دارو در بدن - ساخت قطعات سازگار برای جایگزینی اعضای بدن - تشخیص همزمان چندین بیماری از روی یک قطره خون (بر اساس DNA) - ساخت ابزارهای نانومتری بر پایه DNA از جمله کاربردهای نانو در بیوتکنولوژی

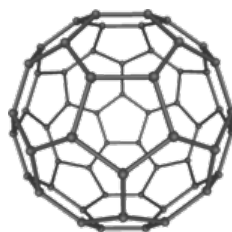
۴. نانو فناوری در معماری و شهرسازی

کاربرد فناوری نانو در معماری را به دو گروه می‌توان تقسیم کرد؛ گروه اول معماری بیونیک (کاربرد هندسه و ساختار کربنی در معماری بناهای گوناگون) و گروه دوم بهره‌گیری از مواد و مصالح ساخته شده با استفاده از مواد نانو است. در مورد معماری بیونیک می‌توان به ریشه‌های آن توجه خاص برای بهره‌برداری مناسب داشت. حدود ۳ میلیارد سال از آفرینش زمین می‌گذرد و در این مدت طبیعت خود، به عنوان معماری توانا و خلاق مطرح شده است. به عنوان مثال گیاهان و جانوران توانسته‌اند با تزئینات و طراحی‌های لازم بر مشکلات محیط زیست خود فائق آیند و انسان نیز در طول زندگی خود، همیشه سعی داشته برای ساخت و طراحی مکان‌ها و وسایل مورد نیاز خود از طبیعت و محیط زیست اطراف خود الهام بگیرد. معماری نیز از این روند مستثنا نبوده و بارها از ساختارها و اشکال طبیعی و طبیعت الهام گرفته‌اند که اخیراً این روند به جای الگوبرداری و تأثیرپذیری مستقیم از طبیعت بیشتر در منطق درونی و مورفولوژی پروسه‌های طبیعی یا همان یاخته‌های سازنده ساختاری دیده می‌شود و به بهترین شکل ممکن از قوانین سازه‌ای آن نظیر انعطاف‌پذیری و مقاومت پیروی می‌کند. از دریچه چنین نگرشی جنبش معماری بیونیک شکل چهار ضلعی و منتظم ساختمان‌های سنتی را برای پدید آوردن ساختمان‌های بیولوژیکی و جهان طبیعی نفی می‌کند. نتیجه این دیدگاه مجموعه‌ای از ساختمان‌های منحصر به فرد با قالب‌های بیولوژیکی و ریاضی خواهد بود. بهره‌گیری از ساختار هندسی عناصر پایه (نانو ساختارها) و خصوصیات رفتاری آنان (معماری بیونیک^{۱۹}) که دیر زمانی است در الگوی بسیاری از معماران نظیر کالاتراوا راه یافته است. «نانو فناوری» بخشی از آینده نیست بلکه همه آینده است. یکی از این ساختارها، ساختار کربنی است که عناصری سخت نظیر الماس حاصل این رفتار و پیوند شیمیایی است و باکی بال نمونه بارز این ساختار سخت می‌باشد. باکی بال شناخته شده ترین فولرین^{۲۰} است که شبیه توپ فوتبال می‌باشد (شکل ۱) و از ۲۰ شش ضلعی و ۱۲ پنج ضلعی ساخته شده است. اولین فولرین^{۲۱} کشف شده باکی‌بال بود، که به علت شباهت با گنبد ژنودزیک باکمینستر فولر، باکمینستر فولرین^{۲۲} نیز خوانده می‌شد (شکل ۲). باکی‌بال مولکولی از ۶۰ اتم کربن (C₆₀) به شکل یک توپ فوتبال است، که به صورت شش‌ضلعی‌ها و پنج‌ضلعی‌های به هم پیوسته‌ای آرایش یافته‌اند.

شکل ۲: غرفه امریکا در نمایشگاه مونترال ۱۹۷۶



(http://en.wikipedia.org, 2011)

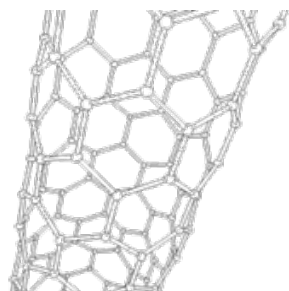


شکل ۱: شباهت باکی‌بال و توپ فوتبال



(http://en.wikipedia.org, 2012)

شکل ۳: نانو لوله کربنی



(http://en.wikipedia.org, 2012)

نانو لوله کربنی^{۲۳} که از لوله شدن صفحات گرافیتی با آرایش شش ضلعی ساخته می‌شوند - در صورت بسته بودن انتهایشان، خوشایند نزدیک فولرین به حساب می‌آیند (شکل ۳). در واقع آن‌ها به مثابه فولرین‌هایی می‌باشند که با قرار دادن کربن در نصف‌النهارشان به صورت لوله درآمده‌اند. با این حال در اینجا لفظ فولرین‌ها دربرگیرنده نانولوله‌ها نیست.

چنانچه پیش‌تر نیز اشاره شد علاوه بر استفاده از هندسه و ساختار کربنی نانو در معماری بناهای گوناگون بهره‌گیری از مواد و مصالح ساخته شده با استفاده از مواد نانو از دیگر کاربردهای نانو در معماری است. نانو فناوری علم ساخت اتم به اتم مواد است و با کنترل مواد در مقیاس مولکولی امکان تولید مصالح مناسب با ویژگی‌های منحصر به فرد نظیر پایداری و ماندگاری مصالح و بنا، ضربه پذیری بالا، شکنندگی کم را فراهم می‌کند. به طور کلی از نتایج کاربرد فناوری نانو در صنعت ساختمان را در ارائه سازه‌های سبک‌تر و مقاوم‌تر، ساخت مصالح بسیار مقاوم در برابر نشست که می‌توانند

در ساخت تأسیسات ساختمانی به کار گرفته شوند، بهبود عملکرد اتصالات لوله‌های آب، بالابردن راندمان الکتریکی و مکانیکی تأسیسات ساختمان، مقاوم سازی مصالح، کاهش میزان اتلاف حرارتی، عدم نیاز به عایق کاری از جمله خواص فیزیکی مصالحی است که در بخش صنعت ساختمان با بهره‌گیری از فناوری نانو تولید خواهد شد. در بخش ساخت و ساز علاوه بر جلوگیری از اتلاف انرژی در بخش‌های مختلف و استفاده بهینه انرژی در ساختمان، می‌توان به حفظ و نگهداری ساختمان برای مدت طولانی و مقاوم سازی آن حتی برای حوادث غیر مترقبه (با صرفه اقتصادی) دست یافت. کاهش پساب و آلودگی ناشی از مصرف انرژی، همچنین امکان بازیافت و استفاده مجدد از مواد، انرژی و آب از دیگر نتایج حاصل از بهره‌گیری نانو تکنولوژی محسوب می‌شود. گرچه مطالبی که بدان اشاره شد در حوزه صنعت ساخت و ساز و تولید محصولاتی است که کمترین اثرات زیست محیطی را به دنبال داشته باشد و سایر جنبه‌های آن نظیر زیبایی، کیفیت بصری، قابلیت ترمیم، دسترسی راحت و آسان و یا همان اصول سه گانه ویتروویوس^{۲۴} که در ده کتاب معماری بدان اشاره نموده است^{۲۵}؛ شامل استحکام^{۲۶}، سودمندی^{۲۷} و زیبایی^{۲۸} مد نظر قرار گرفته است. آنچه که به طور کلی در حیطه معماری و صنعت ساختمان می‌توان به آن اشاره نمود عبارتند از:

جدول ۳: اشکال و فرم‌های استفاده از مواد محصول نانو

زیر مجموعه	نانو مواد در صنعت ساختمان
<ul style="list-style-type: none"> - هوابرد - چسبیده به سطح - معلق در جامد - معلق در مایع 	ذرات
سطوح ساخت یافته، فیلم‌ها و روکش‌ها	سطحی
تک یا چند فازی	حجمی

نانو موادهای بسیاری در حوزه ساختمان و معماری وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به صورت ذیل طبقه نمود:

جدول ۴: محصولات نانو در حوزه ساختمان و معماری

۱	سطوح خود تمیز شونده ^{۳۹} و آسان تمیز شونده ^{۴۰}	- آب گریز با خاصیت نیلوفر آبی ^{۳۱} - آب دوست، آسان تمیز شونده - خود تمیز کننده فوتوکاتالیستی ^{۳۲}
۲	نانو پوشش‌ها	- ضد انعکاس ^{۳۳} - ضد اثر انگشت ^{۳۴} - حفاظت در برابر اشعه ماورا بنفش ^{۳۵} - حفاظت در برابر تابش خورشیدی ^{۳۶} - ضد بخار ^{۳۷} - تصفیه کننده هوا ^{۳۸}
۳	نانو عایق‌ها	- عایق حرارتی ^{۳۹} - ضد حریق ^{۴۰} - تنظیم کننده دما ^{۴۱}
۴	عناصر خود ترمیم شونده	- ضد خش و خراش ^{۴۲}
۵	سطوح ضد باکتری و میکروب کش	- آنتی باکتریال ^{۴۳}
۶	نانوفناوری در تولید فولاد و بتن	

۵. چشم‌انداز نانو فناوری در معماری

با توجه به مطالبی که پیشتر بدان‌ها اشاره شد حال این سوال مطرح می‌شود که معماری چگونه می‌تواند با علم و فناوری نوظهوری همچون نانو در آمیزد و پیشرفت کند؟ جان. ام. جوهانسن^{۴۴} فردی است که در کتاب خود تحت عنوان «معماری نانو، گونه‌ای جدید از معماری»^{۴۵} به طور کامل به این مبحث می‌پردازد. او بر این باور است که بهره‌گیری از نانو آینده معماری را دگرگون خواهد ساخت و آن را در مسیر ویژه‌ای هدایت خواهد نمود. به عبارت دیگر معماری نانو این امکان را به طراحان می‌دهد که تعاملات بهتر و نزدیکتری با کاربران برقرار کنند در حقیقت این نوع معماری بر مبنای طبیعت و قرابت با آن شکل یافته است. همچنین در صورت بهره‌گیری از این نوع معماری علاوه بر آنکه از فناوری پیشرفته می‌توان بهره برد این نوع معماری، طراحی مأنوس‌تر و همگون‌تری با انسان و نیازهای انسانی ارائه خواهد نمود. از سوی دیگر طراحی مصالح با ویژگی‌های مورد نظر و مطابق با نیازهای پروژه و مخاطب از دیگر مزیت‌هایی است که برای آینده نانو و معماری پیش‌بینی می‌شود. باید به خاطر داشت که بهره‌گیری از فناوری نانو سبب بروز خواص ویژه‌ای در مواد و مصالح خواهد بود و آن‌ها به گونه‌ای شگفت انگیز تغییر می‌دهد؛ به عنوان مثال خاصیت خودترمیمی و یا بازگشت به محیط از جمله ویژگی‌هایی هستند که باید بدان اشاره نمود (Johanson, 2002).

۵-۱- نانو معماری، معماری سازگار با طبیعت

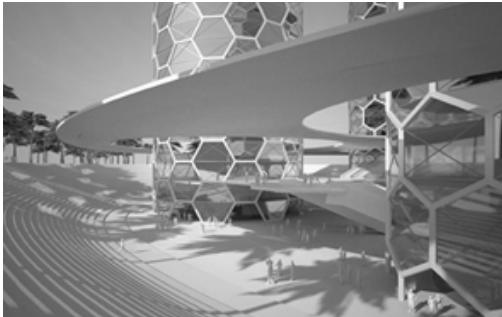
معماری ارگانیک^{۴۶} که توسط فرانک لوید رایت^{۴۷} به عنوان سازگاری ساختار ساختمان‌ها براساس قرارگیری در طبیعت تعریف شده، امروز در قالب معماری پایدار و افق جدید آن، نانوفناوری مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. رایت بر این عقیده بود که شکل معماری باید از بطن طبیعت اشیاء به وجود آید و هر شی نیز به نوبه خود دارای یک زبان خاص برای تکلم و بیان احساس می‌باشد. در معماری بیونیک و در آثار معمارانی همچون سانتیاگو کالاتراوا بهره‌گیری از ساختار و مکانیزم طبیعت را به خوبی می‌توان مشاهده کرد و طراحان با الگوبرداری از آنچه که طبیعت در فاصله زمانی طولانی در جهت تکامل آن حرکت نموده و هر چه را که سازگاری نداشته از بین برده است، به خلق مجموعه‌هایی ایده‌آل و پاسخ‌ده دست یافته‌اند.

ذرات نانو از ساختار مولکولی الماس تبعیت می‌کنند که ساختاری پایدار است و به هم جهت الماس جز سخت‌ترین مواد در دنیا محسوب می‌شود. حال استفاده از این ساختار در سیستم سازه‌ای و معماری یک بنا، آن را بسیار مقاوم و منعطف می‌سازد. البته الگوبرداری از ساختار مورفولوژی ذرات نانو گستره چندانی ندارد و هنوز در آغاز راه قرار دارد.

۱-۱-۵- برج های نانو^{۴۸}

برج های نانو در دبی، به عنوان مقر جدید پارک تحقیقاتی دیویوتک^{۴۹} در دبی، توسط معماران آلارد^{۵۰} پیشنهاد شده است. این ترکیب شامل ۱۶۰۰۰۰ مترمربع فضای اداری، آزمایشگاه ها، هتل، مسکونی و به همراه امکانات پشتیبانی در یک برج با ارتفاع ۲۶۲ متر می باشد. پوششی در نزدیکی سطح زمین، سایه بانی را فراهم کرده، در حالی که یک ورودی چشمگیر برای برج ها ایجاد می کند: یک صفحه زمینی مفهومی که برج ها از درون آن رشد می کنند (شکل ۴).

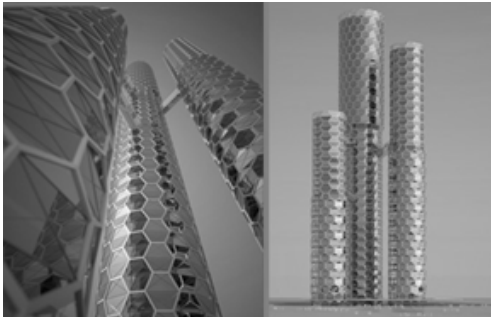
شکل ۴: برج های نانو



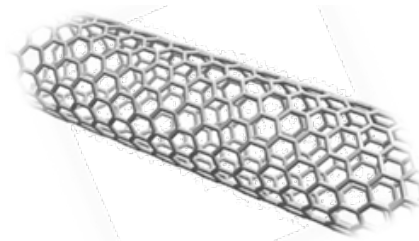
(<http://www.allardarchitecture.com>, 2012)

معماری جالب توجه آن، شبکه ای تکرار شده از ساختار پوشش محافظ خارجی بنا است که دارای تیرهای غیر منحنی ولی با طول های برابر می باشد. نمای کل برج چندوجهی است - با الهام از لوله کربن در مقیاس نانو - و ساختار، اتصالاتی برای تغییر جهت هندسی از عمودی به افقی، به وجود می آورد که فرصت های متعددی برای تقسیم فضاهای داخلی در امتداد خطوط جرزه ها فراهم می کند (شکل ۵).

شکل ۵: تشابه برج های نانو و لوله کربنی



(<http://www.allardarchitecture.com>, 2012)



(<http://mitangles.wordpress.com>, 2012)

چنانچه در تصویر نیز مشاهده می شود در بخش خارجی بنا از ساختار مولکول های الماس استفاده شده است؛ که ساختاری بسیار پایدار است. در این پروژه سازه و معماری در هم آمیخته شده اند و از یکدیگر مجزا نمی باشند. بنابراین حاصل کار یک معماری ایده آل و پاسخده است و خصوصیات یک بنا از نظر ویتروویوس را تأمین نموده است.

۱-۱-۲- نانو و معماری فوتوریستی^{۵۱}

جوهانسن معمار برجسته امریکایی یکی از پیشتازان معماری فوتوریستی بود. وی سال هایی را صرف ساخت و ارائه طرح هایی در زمینه معماری فوتوریستی براساس خصوصیات ساختار نانو و شناوری مغناطیسی^{۵۲} نموده است. وی در کتاب خود تحت عنوان معماری نانو^{۵۳} برای ارائه یازده اثر خود در این زمینه پرداخته است و آن را پادزهری برای بناهای فرم محور^{۵۴} امروزی و تحقق رویاهای فوتوریستی می داند (Johansen, 2002). در زیر نمونه هایی از طرح های جوهانسن آورده شده است.

شکل ۸: شبکه



شکل ۷: چهار حباب



شکل ۶: مرکز کنفرانس شناور

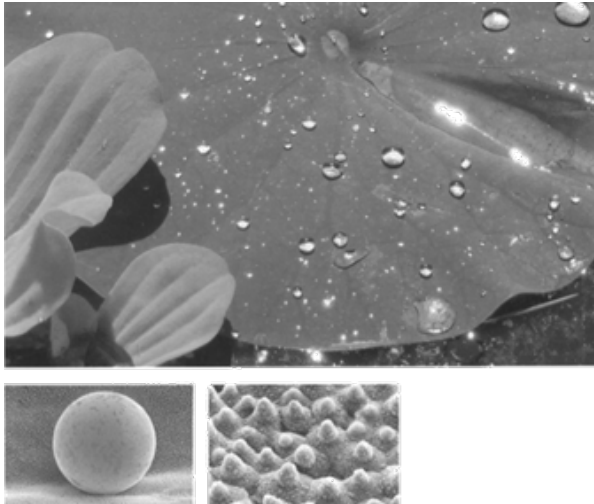


(<http://observatory.designobserver.com>, 2013)

البته بهره‌گیری از ساختار نانو در طرح‌های ارایه شده صرفاً حالت فرمی ندارد بلکه ساختار نانو نیز مد نظر بوده است و علاوه بر تأمین پایداری بنا، محیطی متفاوت و جذاب را توأم با تجربه فضایی جدید برای کاربر فراهم خواهد نمود (شکل ۶، ۷ و ۸).

۲-۵- نانو مواد در معماری

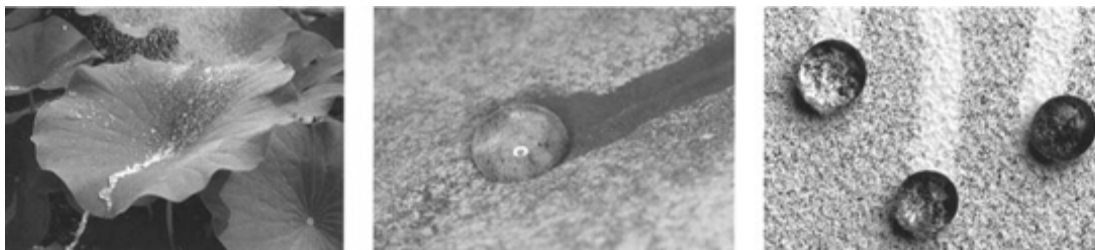
شکل ۹: گل نیلوفر آبی



(<http://hellomaterialsblog.ddc.dk>, 2013)

«از آنجا که با استفاده از دستاوردهای نانو فناوری یک شیء - ساختمان - در زمان‌ها و مکان‌های مختلف می‌تواند رفتارهای متفاوتی از خود نشان دهد - سخت و غیر قابل انعطاف و یا نرم و سیال - تئوری‌های شناخت مواد به طور کلی دگرگون می‌شوند. در واقع مصالح، هویت ثابت خود را از دست می‌دهند و دیگر معماری تعریف محدودی در زمان و مکان نخواهد داشت. رفتار سازه‌ها و ساختمان‌ها کاملاً عملکردگرا و زمینه‌گرا می‌شوند» (Abasalipour, 2007, p. 86). نانو پوشش‌های خود پاک شونده (اثر نیلوفر آبی^{۹۵}) نمونه دیگری از کاربرد نانو در معماری است. این پوشش‌ها یکی از بهترین ابزارها برای طراحی سطوح با نانو مواد هستند. ایده طراحی این نوع پوشش‌ها از برگ نیلوفر آبی گرفته شده است. نیلوفر آبی یا لوتوس نوعی گیاه آبی است که در آب گل‌آلود می‌روید. دانشمندان با مطالعه این گیاه به راز پاکیزگی آن پی برده‌اند و بر این پایه به آزمایش ساخت نوعی پوشش با فناوری نانو پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌داد که سطح برگ نیلوفر آبی، یک سطح ناهموار و بسیار آبگریز است. سطح این پوشش‌ها مشابه برگ نیلوفر آبی دارای برجستگی‌های میکرومتری و نانومتری است که باعث می‌شود نیروی چسبندگی سطحی بین آب و آلودگی بیشتر از نیروی چسبندگی میان آلودگی و سطح شود (شکل ۹). به این ترتیب تماس آب با سطح پوشش، آلودگی را همراه خود می‌برد و از سطح دور می‌کند (شکل ۱۰). این نوع پوشش‌ها بیشتر برای سطوحی مناسب هستند که در معرض بارش و آب کافی باشند، زیرا در غیر این صورت روکش نانویی سطح عملکرد مناسبی نخواهد داشت و رد قطرات بر آن می‌ماند و کثیف‌تر به نظر می‌رسد. استفاده از این پوشش‌ها در سطوحی که در معرض استهلاک مکانیکی نیستند، با کاهش چشمگیر نیاز به پاک کردن همراه است و سطوحی که در معرض آب کافی باشند دیگر نیازی به تمیز کردن ندارند اما نیاز به مراقبت و نگهداری را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد (Leydecker, 2008, p. 85).

شکل ۱۰: بررسی اثر نیلوفر آبی



(<http://jncc.defra.gov.uk>, 2013)

۱-۲-۵- موزه صلح آرا پاچیس^{۵۶}

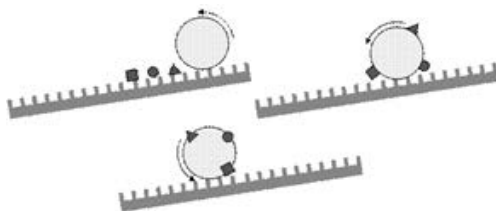
شکل ۱۱: نمای خارجی موزه



(www.sto.com, 2013)

موزه یک مثال از اثر نیلوفر آبی است که توسط ریچارد مه یو و همکاران^{۵۷} طراحی و اجرا شده است. موزه پاچیس در حال حاضر برجسته‌ترین موزه باستان‌شناسی رم است. این ساختمان سه جزیبی، متشکل از سه بخش گالری ورودی و میدان مقابل آن، ساختمان اصلی نمایشگاه است. محفظه شیشه‌ای که بخشی از ساختمان را می‌سازد. بنا مجسمه تاریخی پکس آگوستا^{۵۸} را فرا گرفته است، تا از آسیب‌های محیطی در امان باشد. بقیه ساختمان با بلوک‌های بزرگ تراورتن سفید، مرسوم در رم، که سطح آن‌ها را سفید رنگ زده‌اند، ساخته شده است (شکل ۱۱ و ۱۲). پوشش‌های خودپاک شونده بر روی این سطوح سفید رنگ اعمال شده‌اند تا پاکیزگی و دوام رنگ سفید را تضمین کنند. با توجه به آلودگی این شهر، به نظر می‌رسد که استفاده از این پوشش‌ها، روشی کارآمد و مناسب برای سفید نگه داشتن بنا در این مدت طولانی بوده است (Rahshar, 2010) (شکل ۱۳).

شکل ۱۳: اثر نیلوفر آبی در موزه آرا پاچیس



(http://library.thinkquest.org/27468/e/lotus.htm, 2013)

شکل ۱۲: نمای داخلی موزه تصویر



(www.sto.com, 2013)

جدول ۵: نمونه‌هایی از کاربرد نانو مصالح در ابنیه

نام پروژه	مکان	معمار	نوع نانو ماده و نتیجه
خانه سالمندان معلول ^{۵۹}	فریک، سوویس ^{۶۰}	والکر آرشیکتکن آ.ج. ^{۶۱}	شیشه خود تمیز شونده اینسولایت اکتیو ^{۶۲} ، بخش وسیعی از جداره راهروها را شیشه تشکیل می‌دهد که کارگران ماهر آسمان باید آن را پاک کنند. ویژگی شیشه‌های به کار رفته باعث طولانی‌تر شدن دوره‌های تمیز کردن شیشه‌ها و کاهش هزینه‌های جاری نگهداری ساختمان می‌شود (Ley-decker, 2008, p. 88).
ساختمان تجاری	پولا، کرواسی ^{۶۳}	روزان آرکیکتورا، آندریا روزان ^{۶۴}	نانو پوشش نما با اثر نیلوفر آبی، رنگ سفید این بنا از آلودگی به دور بوده و هنگام بارش باران تمام آلودگی سطح نما به سهولت شسته می‌شود. این پوشش برای یک بازه زمانی ۵ ساله نیازی به بازسازی و یا ترمیم نداشته و در هزینه‌های نگهداری بنا صرف‌جویی خواهد شد (Leydecker, 2008, p. 66).
ساختمان چندمنظوره شایتنز اشتغاسه ^{۶۵}	مونبخ، آلمان	پول آرشیکتکن، مارتین پول ^{۶۶}	پانل‌های عایق خلأ (VIP)، در این بنا از بازسوها و سطوح شیشه‌ای بسیار زیادی استفاده شده است. جهت کاهش اتلاف انرژی از عایق‌های فوق نازک مذکور استفاده شد که نه تنها منجر به مصرف کمتر انرژی شد بلکه با ضخامت کم جداره‌ها فضای مفید داخل به میزان ۱۰٪ افزایش یافت (www.detail.de, 2011).

۶. سمی بودن نانومواد

خطرهایی که تولید و استفاده از نانو مواد برای سلامت انسان دارد، هنوز به طور کامل شناخته شده نیست. پیش‌بینی می‌شود نانو ذرات ریز که ویژگی‌های حل‌شوندگی کمتری دارند، نسبت به ذرات بزرگتر بتوانند اثرات مخرب بیشتری داشته باشند. این ذرات می‌توانند از سه راه به بدن انسان نفوذ کرده و سبب آلودگی شوند؛ از راه تنفس، بلعیده شدن و از راه نفوذ از پوست (Linkov, Steevens, 2009). «نانو مواد نهفته در مصالح ساختمانی یا نانو موادی که در دیگر کاربردهای ساختمان‌سازی و احداث تسهیلات کاربرد دارند، می‌توانند از طریق ساز و کار گوناگون، سبب ساز مسمومیت سلولی شوند» (Golabchi et al., 2011, p. 102).

جدول ۶: سمی بودن نانو مواد نسبت به ارگانسیم‌های مختلف

نانو مواد	ارگانسیم	اثر سمی
نانو لوله‌های کربنی	باکتری‌ها	- دارای خاصیت ضدباکتری نسبت به برخی باکتری‌ها. - آسیب زدن به غشای سلولی
	موش‌ها	- قطع عملکرد تنفسی - آسیب زدن به DNA میتوکندری
نانوذرات سیلیکا SiO ₂	باکتری‌ها	- مسمومیت خفیف در اثر تولید اکسیژن واکنش‌پذیر ROS67
	موش صحرایی‌ها	- مسمومیت سلولی، مرگ زودرس سلول‌ها، به هم خوردن فرآیند تنظیم‌کنندگی غده، مرگ زودرس ژن‌های آلفا
نقاط کوانتومی	باکتری‌ها	- ریزباکتری‌های میله‌ای
	سلول‌های انسانی	- آزاد شدن مواد سمی ناشی از فلزات، جذب ذرات آلاینده، آسیب اکسیداسیونی به DNA
	موش‌ها	- انباشت فلزات در کلیه
نانو ذرات مس یا اکسید مس	موش‌های صحرایی	- آسیب سیتوتوکسیک در نتیجه آسیب دیدگی اکسیداسیون چندین اندامک سلولی
	موش‌ها	- مسمومیت شدید در جگر، کلیه و طحال
نانوذرات تایتانیا TiO ₂	باکتری‌ها، خزه دریایی، خرچنگ‌های کوچک و ماهی‌ها	- مرگ و میر شدید، تومور بارداری، جلوگیری از فعالیت‌های فتوسنتتیک، آسیب‌دیدگی

(Bittnar et al., 2009)

۷. جمع‌بندی

نانومواد، گونه جدیدی از مصالح ساختمانی با عملکرد بالا و چندمنظوره است. منظور از عملکرد چندمنظوره، ظهور خواصی جدید و متفاوت نسبت به خواص مواد معمولی می‌باشد؛ به گونه‌ای که مصالح بتوانند کاربردهای گوناگونی را ارائه نمایند. و خواسته‌ها و اهداف متقاضی محصول را تأمین نماید. در این مقاله به بررسی کاربردهای مختلف مصالح نانو بنیان و ارائه طرح‌هایی بر مبنای بهره‌گیری از ساختار فرمی و یاخته‌ای نانو و همچنین مزایا و معایب بهره‌گیری از این فناوری نوین پرداخته شد. نتایج این بررسی عبارتند از:

- نتایج حاصل از بهره‌گیری از فناوری نانو در حوزه معماری عبارتند از:
- کاهش ضایعات و نخاله‌های ساختمانی ناشی از سیستم سنتی ساخت و ساز (به دلیل نوعی صنعتی‌سازی محصولات)
- کاهش وزن مصالح و عناصر ساختمانی و مقاومت در برابر زلزله
- بهبود کیفیت مصالح در جهت کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی
- بهبود کیفیت مصالح در راستای رفتارهای سازه‌ای و مکانیکی بنا و مقاومت در برابر زلزله
- کاهش هزینه نگهداری به دلیل پیشگیری از آسیب‌های طبیعی و یا مکانیکی و کاهش نیاز به نگهداری
- صیانت و حفظ منابع طبیعی
- اقتصاد پویا و بازگشت سرمایه

- خلق محیطی پاسخده و ایده‌آل و جلوگیری از طراحی و ساخت بناهای فرم محور
- سازگاری با طبیعت
- ایجاد سازه‌های پایدارتر بر مبنای ساختار فرمی نانو
- بنابراین بهره‌گیری از فناوری نانو روندی اجتناب ناپذیر می‌نماید که با توجه به مزایای برشمرده شده تحولی عظیم را در دنیای ساخت و ساز به همراه خواهد داشت. به عبارت دیگر به دو شیوه می‌توان فناوری نانو را وارد عرصه معماری نمود:
- ۱- بهره‌گیری از مصالح نانو بنیان نظیر نانو پوشش‌ها نانو عایق‌ها و ...
- ۲- بهره‌گیری از ساختار فرمی و ساختار سازه‌ای نانو
- شیوه نخست ساختار و کالبد فیزیکی بنا را تحت تأثیر قرار داده و گزینه دوم معماری بنا را تحت الشعاع قرار می‌دهد بدین ترتیب زیبایی، استحکام و ایستایی، سه خصوصیتی که ویتروویوس برای یک بنا برمی‌شمرد تأمین خواهد شد.

پی‌نوشت

1. Firmitas
2. Utilitas
3. Venustas
4. Johanson
5. Dwarf
6. National Nanotechnology Initiative
7. German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)
8. Democritus
9. Nano Technology
10. Medial Forges
11. Richard Phillips Feynman
12. Norio Taniguchi
13. Bucky Ball
14. Bill Joy
15. Nano Medicine

۱۶. نانو اسمبلر (Nanoassembler)، ساخت ماشین یا مکانیک ساختاری شبیه خودش را به وجود می‌آورد یعنی ساختن ماشینی که بتواند خود را کپی کند.

17. Biotechnology
18. Nano Biotechnology

۱۹. بیونیک Bionic در لغت نامه به معنای زیستار شناختی یا به کارگیری اندام‌های ساختگی طبیعت است که برای اولین بار این واژه توسط دانشمند آمریکایی به نام جک.ای. استیل در سال ۱۹۵۹ بکار برده شد، وی بیونیک را علم سیستم‌هایی که شالوده و پایه تمامی سیستم‌های زنده است، می‌داند. به طور کلی بیونیک علمی است که به الهام‌یابی فنی از ساختارها، رفتارها و ارتباطات گوناگون عالم جانداران می‌پردازد.

۲۰. در این ساختار ۶۰، ۷۰ یا تعداد بیشتری اتم کربن می‌توانند با هم به صورت خوشه تجمع کنند و مولکولی قفس مانند بسازند. این مولکول‌ها، نیمه رسانا هستند. همچنین این مولکول‌ها حلال‌های طبیعی قابل حل هستند.

21. Carbon Fullerene
22. Buckminsterfullerene
23. Carbon Nanotube
24. Vitruvius
25. Ten Books on Architecture
26. Firmitas
27. Utilitas
28. Venustas
29. Self-Cleaning
30. Easy-To-Clean
31. Lotus Effect
32. Self - Cleaning - Photo Catalysis

33. Anti-Reflective
34. Anti-Fingerprint
35. UV Protection
36. Solar Protection
37. Anti-Fogging
38. Air-Purifying
39. Thermal Insulation
40. Fire-Proof
41. Temperature Regulation
42. Scratch Proof and Abrasion
43. Antibacterial
44. John M. Johansen
45. Nanoarchitecture; A New Species of Architecture
46. Organic Architecture
47. Frank Lloyd Wright
48. Nano Tower
49. DuBiotech
50. Allard Architecture
51. Futuristic Architecture
52. Magnetic Levitation
53. Nanoarchitecture
54. Form-Driven Practice
55. Lotus Effect
56. Ara Pacis Museum
57. Richard Meier & Partners
58. Pax Augusta
59. Disable- access Housing for Elderly People
60. Frick, Switzerland
61. Walker Architekten AG
62. Insulight Active
63. Pula, Croatia
64. Rusan Architectura, Andrija Rusan
65. Seitzstrasse Mixed- Use Building
66. Pool Architeckten, Martin Pool
67. Reactive Oxygen

References

- Allard Architecture, The Nano Tower, Retrieved 2012-04-18, Available on <http://www.allardarchitecture.com/nano%20towers>.
- Abbasalipour, S. (2007). Nano Houses Future Home, *HONAR-HA-YE-ZIBA*, 30, 83.
- Asadifard, R. (2004). *An Overview of Nanotechnology Applications*, Tehran, Technology Cooperation Office, Nano Technology Research Committee.
- Bittnar Z., Bartors P.J.M, Nemecek J., Smilauer V. & Zeman J. (2009). *Nanotechnology in Construction 3* (Proceedings of the Nicom3), 1st Edition, Springer.
- Detail de Architektupotal, Seitzstrasse, Retrieved 2011-10-22, Available on www.detail.de/artikle_seitzstrasse-23-muenchen-pool-architekten_24244_de.html.
- Elvin, G. & Carpenter, W. (2003). *The Architect's Guide to Design-Build Services*, John Wiley & Sons, NY.
- Fazeli, A., Zarei, M., Akhavan, A., Moradi, M., Darab, M., Salimi, A., Seyedmostafavi, S. T., Alikhani, S., Farazkish, M., Moaied, F., Eslamipour, F., Noroozi, S. (2005). *Nanotechnology Mirror of Creation*, Tehran: Atena Press.
- Golabchi, M., Taghizade, K. & Sorooshnia, E. (2011), *Nanotechnology in Architecture & Construction Engineering*, Tehran: University of Tehran Press.
- Gou Z. & Tan L. (2009). *Fundamentals and Applications of Nano Materials*, 1st edition, Boston, USA, ARTECH HOUSE.
- Hyer Andrew, Microchips and Nanotubes: Using Carbon Nanotubes in Electronics, Retrieved 2012-08-13, Available on <http://mitangles.wordpress.com/hyer/>
- Jncc, Self-Cleaning Paint and Fabric Inspired by the Sacred Lotus, Retrieved 2013-07-23, Available on <http://jncc.defra.gov.uk/page-5592>
- Johansen John M. (2002). *Nanoarchitecture, A New Species of Architecture*, New York: Princeton Architectural Press.
- Lamster M., Lebbeus W. & Johansen J. : Memories of Architecture's Lost Visionaries, Retrieved 2013-05-28, Available on <http://observatory.designobserver.com/feature/lebbeus-woods--john-johansen-memories-of-architectures-lost-visionaries/37088/>
- Leydecker Sylvia, Hello Nanomaterials – Towards Cultural (R) Evolution, Retrieved 2013-06-08, Available on <http://hellomaterialsblog.ddc.dk/tag/nanotechnology/feed/>
- Leydecker, Sylvia, (2008) *Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design*, BirkhauserVerlag AG.
- Lynt, S., Antoine, P. & Schneider, J. (2001). *Global Technology Revolution: Global Trends in Biotechnology, Nanotechnology, Materials Technology & Information Technology until 2015*, Tehran: Nanotechnology Policy Studies Committee Publications.
- Linkon I. & Steevens J. (2009), *Nanomaterials: Risks Benefits*, Springer.
- Michael F. Ashby, Paulo J. Ferreira, and Daniel L. Schodek, (2009): *NanoMaterials, NanoTechnologies and Design. An Introduction for Engineers and Architects*, Elsevier Ltd
- Nanotechnology Conference, (2001). *Nanotechnology, the Next Industrial Revolution*, Tehran: Atena Press.
- Olson, Gregory B (2000). Designing a New Material World, *Science*, 288 (5468), 933-998.
- Pagliaro M. (2010). *Nano –Age (How Nanotechnology Changes Our Future)*, 1st edition, WILEY – VCH.
- Rahshar, (2010). *Nanotechnology in Architecture*, Rahshar International Group, 120.
- Rennie, J. (2000). Nanotech Reality, *Science*, 282(6), 8.
- Shahverdi, M.R. & Maghrebi, M. (2004). *Nanotechnology Research Directions*, Tehran: Atena Press.
- Sto, Ara Pacis Museum Rome (Italy), Retrieved 2013-03-13, Available on [http://www.sto.com/109330_EN-References-Detailseite_\(EN\).htm?refId=94&web_title=Ara%20Pacis%20Museum](http://www.sto.com/109330_EN-References-Detailseite_(EN).htm?refId=94&web_title=Ara%20Pacis%20Museum)
- The lotus effect, Retrieved 2013-05-10, Available on <http://library.thinkquest.org/27468/e/lotus.html>.
- Wikipedia, Carbon nanotube, Retrieved 2012-04-18, Available on http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube
- Wikipedia, Expo 67, Retrieved 2012-04-18, Available on http://en.wikipedia.org/wiki/Expo_67
- Wikipedia, Fullerene, Retrieved 2012-04-18, Available on <http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene>

