

## مروری بر محرک های غیر موتوری و روشهای شبیه سازی ماهیچه در رباتیک :

مهدی جلالی

مهندسی رباتیک

دانشگاه صنعتی شاهرود

[Mehdy.jalaly@gmail.com](mailto:Mehdy.jalaly@gmail.com)

### خلاصه:

یکی از مسایل مهم در صنعت امروزی و دستگاه های تولیدی و همین طور رباتیک اعم از صنعتی و غیر صنعتی محرک ها (actuators) هستند. هر دستگاه مکانیکی با هر مقدار پیچیدگی دارای حداقل یک محرک می باشد. تا کنون محرکهای بسیاری طراحی و ساخته شده اند و به خوبی پاسخگوی نیازها بوده اند. اما نیاز به محرک های جدید غیر موتوری چندی است که احساس شده است و تحقیق در مورد آنها آغاز شده و همچنان ادامه دارد. در این مقاله به بررسی برخی محرک های غیر موتوری به خصوص smaها و eapها خواهیم پرداخت. همچنین برخی روشهای بکارگیری آنها و بعضی از کاربرد های آنها شرح داده خواهد شد.

**کلمات کلیدی :** ماهیچه های مصنوعی، SMA (آلیاژهای شکل پذیر حافظه دار) ، Nitinol ، EAP ( پلیمرهای تحریک شونده با/الکتریسیته )

### ۱ - مقدمه :

همانگونه که ذکر شد در این مقاله به مبحث محرک های غیر موتوری و کاربرد ها و روشهای بکارگیری آنها در رباتیک خواهیم پرداخت. همین محرک ها به طور کلی به چند دسته تقسیم می شوند : بادی -روغنی و ابی یا هیدرولیکی- آلیاژهای شکل پذیر حافظه دار و پلیمر های تحریک شونده با الکتریسیته . مورد های اول و دوم دارای قدرت نسبتا مناسبی هستند و برای استفاده در صنعت کاملا مناسب اند. اما به غیر از موارد صنعتی مواردی دیگر نیز وجود دارند که نمی توان از یان نوع محرک های سنگین و پرهزینه و البته پر سروصدا استفاده کرد . مثلا در ربات های الهام گرفته شده از طبیعت (و حتی ربات های انسان نما) . در این مقاله به بررسی دو محرک اخر یعنی smaها و eapها که هر دو مربوط به مبحث مواد هوشمند هستند پرداخته ایم . ابتدا به شرح کلی و مواد بکار رفته برای ساخت و سپس به موارد کاربرد آنها خواهیم پرداخت. در اخر نیز به مقایسه ای کوتاه بین آنها می پردازیم که البته هر کدام شامل چندین نوع می باشند.

### ۲- آلیاژهای شکل پذیر حافظه دارد ( SMA ) :

این آلیاژها ترکیبی از دو یا چند عنصر می باشند که با نسبت های گوناگون با هم ترکیب شده اند و دارای سختی و خاصیت متری خوبی هستند و برخی نسبت به تغییرات دما واکنش نشان می دهند . در سال 1932 آلیاژ طلا - کادمیوم تولید و مورد آزمایش قرار گرفت . این آلیاژ رفتار خاصی در دماهای متفاوت از خود نشان می داد که باعث شد

کار بر روی آن و آلیاژهایی از این دست صورت بگیرد تا آنکه در سال 1960 آلیاژ نیکل - تیتانیوم کشف شد و تا به امروز نیز پرکاربردترین می باشد. علاوه بر این، آلیاژهای دیگری نیز وجود دارند که خاصیت‌های مشابهی دارند مانند برنج (مس و روی) و مواد فرومغناطیس، اما همانطور که ذکر شد پر استفاده‌ترین آنها همان نیکل - تیتانیوم (Ni-Ti) می باشد به NITINOL معروف است. روشهای تبدیل این آلیاژ مستلزم طی کردن مراحل پیچیده‌ای است، زیرا Ti عنصر فعالی است. به همین دلیل ذوب کردن باید در محیطی بی اثر صورت گیرد. ذوب پلاسما، ذوب پرتو الکترونی و ذوب در خلاء از جمله این روشها می باشند. همینطور تولید آن برای مصارف خاص نیز بسیار مشکل است، زیرا آلیاژهایی که برای خواص شکل پذیری و حافظه داری ساخته می شوند معمولاً نقطه جوش بالایی دارند.

اما علت نامگذاری این آلیاژها به نام حافظه دار اثری است که دما روی آنها می گذارد. این آلیاژها را در فاز دمایی بالا austenite و در فاز دمایی پایین martensite می نامند. هنگامی که دمای آلیاژ بالا می رود (معمولاً توسط عبور جریان)، SMA به حالتی بسیار سخت تر تغییر شکل می دهد و منقبض می شود، در واقع این گرما آلیاژ را به شکلی غیرقابل ارتجاع و محکم تبدیل می کند. اما هنگامی که سیم سرد می شود دوباره به حالت عادی و اولیه و آزادی خود می رسد. سرد کردن SMA ها معمولاً همراه با نیروی باز گرداننده ای است که به آن وارد می کنند، زیرا بدون این نیرو ساختمان کریستال آلیاژ به هم می خورد و خواص خود را از دست می دهد. این نیرو می تواند توسط یک نفر و یا هر عامل دیگر اعمال شود. [۱]

از مزایای این آلیاژها قابلیت تحمل نیروی زیاد است که حتی در حدود ۷۰۰ Mpa می باشد. معمولاً NiTiNol را با روشهای خاصی به صورت سیم درآورده و از آن استفاده می کنند. میزان نیروی قابل تحمل توسط سیم وابسته به قطر سیم می باشد که هر چه بیشتر باشد می تواند نیروی بیشتری را نیز تحمل کند. در صورت لزوم سیمهای NiTiNol را به صورت موازی به کار می برند تا بتوانند نیروی بیشتری را تحمل کنند. همچنین به علت قابلیت شکل پذیری بالا در موارد بسیاری از جمله محرکها استفاده می شوند. موتورهای عادی حجیم و بزرگ هستند و از زغالها و چرخ دنده های زیادی در آنها استفاده می شود در حالی که این آلیاژ سبک و قابل انعطاف است و به راحتی استفاده می شود. اما SMA ها علاوه بر مزایای بی شماری که دارند دارای معایبی چند نیز می باشند. یکی از آنها دوره عمر (cycle life) کم آنها است.

یعنی پس طی تعداد سیکل محدودی دیگر خواص اصلی خود را از دست می دهند و عملاً غیرقابل استفاده می شوند. مشکل دیگر زمان پاسخگویی آنها به تحریک است. یعنی پس اعمال جریان به SMA مدت زمانی وابسته به نوع آلیاژ طول می کشد تا به طور دلخواه منقبض شود. این زمان طولانی است که از چند ثانیه تا حتی چند دقیقه متغیر است. از دیگر معایب SMA ها میزان انقباض کم آنهاست. این مقدار در حدود ۶٪ است که در انواع جدید آنها تا ۸٪ نیز افزایش یافته است. برای بهبود این مشکل معمولاً طول سیم را بلندتر در نظر می گیرند و قطر آنرا نازکتر آخرین عیب و اشکال وارده بر SMA ها نبودن قابلیت کنترل بر میزان تغییر طول آنها می باشد. البته روشهایی میکرو پروسسوری برای برطرف کردن این شکل استفاده شده است.

آلیاژ NiTiNol در حدود ۵۰٪ نیکل و ۵۰٪ تیتانیوم دارد. با تغییر این نسبت و یا اضافه کردن مواد دیگر این SMA خواص تازه ای پیدا می کند. مثلاً هنگامی که میزان Ni به اندازه تنها ۱٪ افزایش یابد، دمای تبخیر فاز در آلیاژ کاهش می یابد، اما مقاومت حاصل در فاز austenite افزایش می یابد. همچنین با افزودن آهن یا کرم دمای تبدیل کاهش می یابد. [۲]

SMA ها کاربرد فراوانی دارند. در رباتیک اغلب به عنوان محرک به کار می روند. یعنی بیشتر به صورت سیم باعث حرکت اتصالات ولینک ربات می شوند. معمولاً ربات های حشره مانند (insect-robot) دارای پاهایی از جنس SMA می باشند. ربات های پرنده دارای محرک بالی از این جنس هستند، همچنین برخی رباتهایی که شنا می کنند و با مثل مار می خزند. اما به جز در رباتیک در پزشکی نیز استفاده زیادی دارند که از جمله آن ابزارهای جراحی

کوچک می‌باشد. حتی در لوله‌های آندوسکوپی نیز از SMA به علت قابلیت شکل‌پذیری بالا استفاده می‌شود. مته‌های دندانپزشکی و سیم‌های ارتودنسی نیز از جنس SMA هستند. به علاوه فریم بسیاری از عینک‌ها و یا آنتن تلفن‌های همراه از این آلیاژها ساخته می‌شوند، چرا که قابلیت ارتجاعی بسیار بالایی دارند.

حال به مقایسه آنها با دو محرک رایج دیگر یعنی موتورهای DC و سلونوئیدها می‌پردازیم. در مقایسه با موتورهای کوچک DC می‌توان گفت که این موتورهای کوچک کشتاور کمی ایجاد می‌کنند و به علاوه دارای سرعت زیادی نیز می‌باشند، بنابراین در کاربردهای عملی این موتورها احتیاج به یک جعبه دنده برای بالا بردن کشتاور و پایین آوردن سرعت دارند. به علاوه اگر احتیاج به یک حرکت خطی باشد، موتور نیاز به یک سیستم مکانیکی پیچیده برای تبدیل حرکت دورانی به خطی دارند. اما این محرک‌ها نیرو را منتقل از سرعت آن تولید کرده و در هر حالت خطی و چرخشی قابل استفاده‌اند حرکت خطی را سریعتر از موتورهای ایجاد می‌کنند و وزن کمتری نیز دارند و در مقایسه با مینی موتورهای 2 تا 5 برابر کار تندتر هستند. اما سلونوئیدها نیز محرک‌هایی هستند که دارای سیستم روشن و خاموش می‌باشند و سرعت و نیروی آنها نیز قابل کنترل نیست. برای این امر، آنها احتیاج به راه‌اندازهای خارجی (external drivers) سنسورهای نگه دارنده (end stop sensor) و کنترلر دارند. این در حالی است که این ماهیچه‌ها یک نیروی قابل کنترل ثابت ملایم و یکنواختی را در طول حرکت خود تولید می‌کنند. این ماهیچه‌ها که از جنس SMA ها هستند دارای خواص دیگری نیز می‌باشند محرک‌های نانو ماهیچه‌ای در بازه دمایی (70-75) بکار می‌رفتند میزان توان مصرفی آنها به عوامل زیادی بستگی دارد. این محرک بیشترین توان را در زمان انقباض مصرف می‌کند که میزان آن به سرعت انقباض مورد نظر ما وابسته است. برای انقباض سریع توان بالا لازم است و برعکس. برای اینکه محرک در حالتی ثابت باقی بماند توان کمتری لازم است این ماهیچه‌ها درعین کوچکی دارای قدرت زیادی هستند اما اعمال نیروهای بزرگ بر آنها باعث آسیب دیدن آنها می‌گردد که معمولاً قابل رویت نیست. بلکه آسیب وارده در عملکرد ماهیچه مشاهده می‌شود. در این موارد ماهیچه کند شده و توان خروجی آن پایین می‌آید، همین طور طول عمر (cycle life) آن نیز کاهش می‌یابد. [۳]

اما این سیم‌های NiTiNol کاربردهای دیگری نیز دارند محصولات به طور چشمگیری در صنعت، صنایع فضایی، توماسیون و حتی فرآیندهای تولید به کار می‌روند و در دمای اتاق به راحتی تحت نیروی کمی کشیده می‌شوند و این سیم‌ها نیز می‌توانند به عنوان محرک در سیستم‌های شبیه‌سازی شده بیولوژیکی به کار روند، زیرا حرکتی که آنها ایجاد می‌کنند بسیار شبیه به حرکت طبیعی اعضای بدن می‌باشد. رباتهای انسان نمای بسیاری تاکنون توسط این محرک‌ها ساخته شده‌اند.

### ۳- پلیمرهای تحریک شونده با الکتریسته (EAPs):

همانگونه که از نام EAP معلوم است، پلیمرهایی هستند که توسط الکتریسته تحریک می‌شوند. علم مربوط به این پلیمرها تقریباً جدید است. این علم تا قبل از سال 1999 پیشرفت زیادی نداشت. در واقع EAP ها شاخه‌ای از عالم گسترده مواد هوشمند هستند که هر روز در حال پیشرفت است.

EAP ها دارای انواع زیادی نیز می‌باشند. بار کوهن (Bar cohen) که یکی از فعالان در این زمینه می‌باشد، در سال 2001 آنها را به دو گروه اصلی تقسیم کرد که براساس نوع تحریک آنها می‌باشد. این دو گروه عبارتند از EAP های الکترونیکی و EAP های یونی که هر کدام نیز دارای انواعی می‌باشند که برخی از آنها به صورت زیر است:

Electronic EAP	Ionic EAP
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Dielectric EAP</li> <li>* Electrostrictive paper</li> <li>* Liquid crystal elastomer</li> <li>* Ferroelectric Polymers</li> <li>* Electrostrictive grafted elastomers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Carbon nanotubes (CN)</li> <li>* Conductive Polymers (CP)</li> <li>* Ionic Polymer gels (IPG)</li> <li>* Ionic Polymer metallic composites (IPMC)</li> </ul>

این دو دسته از EAP ها هرکدام معایب و مزایایی نیز دارند که به آنها اشاره می‌کنیم. مزایای EAP های الکترونیکی عبارتند از:

دوام بسیار زیاد در شرایط اتاق، پاسخ دهی سریع در حد میلی ثانیه، باقی ماندن در حالت خمیدگی با تحریک DC، در حالت تحریک نیروی نسبتاً خوبی تحمل می‌کند.

و اما معایب آنها بدین شرح است:

نیازمند ولتاژ بالایی در حدود  $150 \text{ MV/m}$  برای تحریک می‌باشند، در دمای پایین تحریک آن به خوبی صورت نمی‌گیرد.

و اما مزایای EAP های یونی بدین صورت است:

توانایی خم شدن زیاد، توانایی استفاده‌های خمشی به صورت مناسب و نیازمند ولتاژ تحریک پایینی هستند.

معایب آنها نیز از این قرار است:

به جز CP ها تحت ولتاژ DC کشش تحمل نمی‌کنند، زمان پاسخ دهی آنها طولانی می‌باشد، EAP های خمشی در حالت تحریک نیروی کمی تحمل می‌کنند، در حالت محلول ماده با ولتاژ  $1.23 \text{ V}$  هیدرولیز می‌شود، به جز در CP ها تشکیل یک ماده پایدار مشکل است به خصوص در IPMC ها در حالت کلی EAP ها با عبور جریان الکتریکی می‌توانند بسته به پلاریته ولتاژ خم و راست شوند. [۴]

EAP ها کاربردهای بسیار زیادی دارند. به خصوص در رباتیک که به عنوان محرک کاربرد دارند. از جمله کاربرد آنها در رباتیک می‌توان به ساخت ماهیچه‌های مصنوعی و برخی رباتهای خاص از جمله ربات‌های مار مانند اشاره کرد. یکی از موارد استفاده آنها ساخت وسایل نقلیه پرنده کوچک (MAV, micro air vehicle) توسط مواد مگنتواستریکتیو (magnetostricting) می‌باشد. MAV ها یکی از ابزارهای جدید نظامی هستند و بالهای آنها به علت کوچکی در مقایسه با نمونه طبیعی بزرگتر آنها انرژی کمتری مصرف می‌کنند. EAP ها در ساخت مکانیزم‌های میکرو الکترو مکانیکی (MEMS, micro electro-mechanic) نیز نقش مهمی برعهده دارند.

یکی از انواع EAP های یونی نانو تیوب‌های تک دیواره کربنی هستند. تحقیقات وسیعی بر روی این ابزار جدید در حال انجام است که برخی از آنها حاکی از این است که آنها می‌توانند تنش و حتی کرنش بیشتری نسبت به ماهیچه‌های عادی تحمل کنند. اما در چند سال اخیر تنوع شکل‌گیری کربن خالص توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است. دو نوع جدید از این مواد فولرین‌ها (fullerenes) و نانو تیوب‌های کربنی (CN, carbon nanotubes) می‌باشند. فولرین‌ها شبیه یک توپ سه بعدی می‌باشند که اتم‌های کربن در آن به صورت 6 ضلعی به هم متصل‌اند.

نانوتیوب‌های کربنی لوله‌های بسیار باریک و بلند هستند. قطر آنها در حدود چند نانومتر می‌باشد که از نظر مولکولهای عادی، بیشتر نیست و طول آنها در حد چند میکرومتر و یا حتی چند میلی‌متر می‌باشد. در الکترونیک این نانو تیوب‌ها با عنوان سیم‌های کوانتومی و نقاط (dots) کوانتومی مورد بحث قرار می‌گیرند. آنها می‌توانند به عنوان اجزای ترانزیستورهای اثر میدان (FET) نیز به کار روند.

تحقیقات توسط اشعه X نشان داده است که شبکه کندویی شش ضلعی صفحات گرانبه در اثر جریان الکتریسته گسترش می‌یابند. محاسبات مکانیک کوانتوم پیش‌بینی کرده است که این حالت در مورد CN ها نیز صادق است. یعنی با افزایش تعداد الکترون‌ها روی یک تیوب طول آن افزایش پیدا می‌کند. این پدیده می‌تواند در محرک‌های الکترومکانیکی مورد استفاده قرار گیرد. تغییر طول نسبتاً زیاد و حالت الاستیک CN ها باعث شده که از آنها به فراوانی استفاده شود. در حال حاضر آزمایش‌های مکانیکی بر روی CN ها به شدت انجام می‌شود، پدیده تغییر شکل این مواد می‌تواند با کاغذ بوکی (Bucky paper) کاملاً مشاهده شود. کاغذ بوکی را در محلول آب و نمک فرو می‌بریم و آنرا به صورت الکتروشیمیایی حدود ۱V توسط الکتروود تحریک می‌کنیم. حال تغییر طول نانوتیوب‌ها را می‌توان از طریق تغییر طول باریکه کاغذ بوکی مشاهده کرد که با چشم غیرمسلح نیز دیده می‌شود. در حال حاضر این موضوع مورد آزمایش و بررسی می‌باشد و امید است که در ساخت ماهیچه‌های بیولوژیک مورد استفاده قرار گیرد. نوع دیگری از EAP های یونی (perfluorinated ion-exchange membrane platinum) یا PIED ها هستند. ماهیچه‌های PIED معمولاً (ion-exchange membrane, IEM) تشکیل شده‌اند که به صورت شیمیایی بر دو طرف یک الکتروود از جنس پلاتین نشسته‌اند. برای حفظ قابلیت محرکی این ماهیچه‌ها باید به صورت دائم مرطوب نگه داشته شوند. زیرا آب به عنوان یک واسطه برای انتقال یونها می‌باشد. یکی از خواص جالب این ماده توانایی جذب حلال‌های قطبی مثل آب به مقدار بسیار زیاد می‌باشد.

هنگامی که ولتاژی در حدود ۲V یا بیشتر بر یک لایه بریده شده از PIED اعمال می‌شود، باریکه بریده شده به سمت آند خم می‌شود و با افزایش ولتاژ به ۶V یا ۷V خمش بیشتری در ماهیچه دیده می‌شود. اما هنگامی که یک ولتاژ متناسب به آن اعمال شود، شروع به نوسان می‌کند. میزان این نوسان علاوه بر ولتاژ اعمالی به فرکانس آن نیز بستگی دارد. فرکانس‌های پایین (کمتر از ۰.۱Hz تا ۰.۰۱Hz) باعث جابجایی بیشتری در باریکه می‌شوند که در نمونه آزمایشی خاص حدود 1 اینچ می‌باشد. بنابراین حرکت ماهیچه کاملاً قابل کنترل توسط منبع ولتاژ اعمالی می‌باشد. اگر یک منبع ۷V را با فرکانس ۱Hz به ماهیچه اعمال کنیم که بیشتر از 0.1 اینچ جابجایی خواهد داشت. حال اگر این فرکانس به ۰.۵Hz برسد میزان جابجایی به حدود 0.25 اینچ می‌رسد اما با کاهش فرکانس به ۰.۱Hz این مقدار به 0.7 اینچ خواهد رسید. [۵]

PIED ها کاربردهای فراوانی دارند که بیشتر در سیستم‌های رباتیکی است. این ماهیچه‌ها با قابلیت خمشی زیاد می‌توانند در نقش مجری نهایی که یک پنجره رباتیکی است و عمل گرفتن شیء را انجام می‌دهد عمل کنند. که تنها با اعمال ولتاژی، انگشتان ساخته شده از PIED از هم بار شده و پس از رسیدن باز و به محل مورد نظر با معکوس کردن ولتاژ اعمالی انگشتان بسته می‌شوند و جسم در بین آنها نگه داشته می‌شود.

EAP ها در ساخت حشرات رباتیکی نیز کاربرد دارند. این حشرات کاربردهای بسیاری داشته و دارند. به عنوان نمونه با ساخت یک حشره کوچک و نصب ابزار الکترونیکی مناسب بر روی آن می‌توان از بخشهای غیرقابل رویت یک سیستم یا حتی کارخانه بازدید کرد.

نوعی از EAP ها که IPMC نامیده می‌شوند در صنایع فضایی کاربرد بسیاری دارند، بدین صورت که می‌توانند در ساخت یک پنجه رباتیکی و یا حتی یک پاک کننده سطح (dust wiper) به کار برده شوند. مثلاً به این نمونه توجه کنید، تجربیات زیادی از دو کاوشگر path finder و Viking که به مریخ فرستاده شدند به دست آمده که یکی از آنها حاکی از این است که پس مدتی کار بر روی سطح سیاره، غبار بر روی اجزای خارجی کاوشگر می‌نشیند و عملکرد آنرا تضعیف می‌کند. به عنوان مثال اگر این غبارها روی سطح مولدهای خورشیدی را بگیرند باعث می‌شود که به تدریج تولید انرژی آنها کاهش یافته و در نهایت متوقف شود و یا حتی بر روی دوربین مادون قرمز آن قرار گیرد و باعث مختل شدن عملیات جستجوی کاوشگر شود. پس بدین منظور برای حل این مشکل پاک‌کننده‌های سطحی تعبیه شده که محرک آنها EAP می‌باشد. علت انتخاب EAP ها برای این امر خواص فوق‌العاده آنها از جمله ولتاژ

تحریک پایین ، چگالی کم قابلیت ارتجاعی و خمشی زیاد و زمان پاسخدهی بسیار کم می باشد که آنها را نسبت به دیگر محرک ها مثل EAC , SMA برتری بخشیده است . این نوع EAP ها ( IPMC ها ) حتی در دمای پایین فضا ( حدود  $140^{\circ}\text{C}$  ) به خوبی کار می کنند ، در شرایط خلاء مشکلی برای کار کردن ندارند و در فرکانس  $0.3\text{Hz}$  میزان خم شدن آنها  $90^{\circ}$  درجه می باشد که با عوض شدن پلاریته جهت خم شدن هم عوض می شود . IPMC ها معایبی هم دارند که الکترولیز شدن در ولتاژ  $1.03\text{V}$  یکی از آنهاست . شکل دیگر محتوی آبی آنهاست که همواره باید مرطوب باشند ، زیرا در شرایط خشک پس چند سیکل از کار می افتند . [۶]

در پایان به جدولی توجه کنید که مقایسه ای اجمالی بین چند محرک و ماهیچه مرسوم صورت گرفته است :

#### ۴ - نتیجه گیری :

به طور کلی دو محرکی که ذکر شد دارای مزایای هستند اعم از سبکی و سادگی کاربرد آنها در سیستم های مکانیکی .

	Electrostatic Silicon Elastomer	polymer electrostrictor	SMA	single crystal electrostrictor	single crystal magnetostrictor
بیشترین حدکشش در حال تحریک	۳۲٪	۴ %	۸٪	۱/۷٪	۲ %
نیروی قابل تحمل	$0.2 \text{ MPa}$	$0.8 \text{ MPa}$	$700 \text{ MPa}$	$65 \text{ MPa}$	$100 \text{ MPa}$
زمان پاسخدهی	$\mu \text{ sec}$	$\mu \text{ sec}$	sec to min	$\mu \text{ sec}$	$\mu \text{ sec}$
چگالی	$1.5 \frac{\text{gr}}{\text{cc}}$	$3 \frac{\text{gr}}{\text{cc}}$	$6 \frac{\text{gr}}{\text{cc}}$	$7.5 \frac{\text{gr}}{\text{cc}}$	$9.5 \frac{\text{gr}}{\text{cc}}$
میدان الکتریکی لازم برای تحریک	$144 \frac{\text{V}}{\mu \text{m}}$	$150 \frac{\text{V}}{\mu \text{m}}$	—	$12 \frac{\text{V}}{\mu \text{m}}$	$2500 \text{ Qc}$

اما هنوز فراگیر نشده اند و بطور عمده بجز در مواردی خاص در بازار موجود نیستند و در مرحله تحقیقات می باشند. امید است با فعالیت های گسترده و تحقیقات وسیع که روی آنها در حال انجام است در آینده نزدیک نقش مهمی را در محرک ها به عهده گیرند.

#### ۵- مراجع :

- [1] scientific American mag . octobr 2003
- [2] [www.Memory-metal.de](http://www.Memory-metal.de)
- [3] [www.robotstore.com/shapememoryalloys.asp](http://www.robotstore.com/shapememoryalloys.asp)
- [4] [www.cimss.vt.edu](http://www.cimss.vt.edu)
- [5] <http://me.unm.edu/~shah/>
- [6] [www.motionnet.com](http://www.motionnet.com)