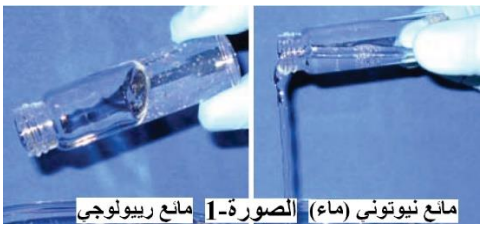
الموائع الذكية للتحكم في تقنيات حديثة

نجيب لوام
أستاذ بقسم الإعلام الآلي، المدرسة العليا للأساتذة، القبة، الجزائر

مقدمة

من ضمن المواد المعروفة حاليا بالمواد المتقدمة أو الحديثة (advanced materials)، وعلى رأسها الفئة التي تسمى بالمواد الذكية (smart materials)، تندرج الموائع التي لها قابلية التغيير المكرر في البعض من خواصها، مثل اللزوجة (viscosity)، والمعروفة بالموائع الريبولوجية (Rheological fluids). تستخدم حاليا هذه الأخيرة كوسائط (interfaces) سريعة وذات فعالية عالية ضمن منظومات التحكم في الكثير من التقنيات الحديثة.

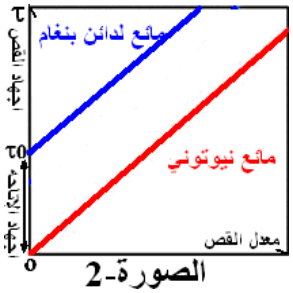
تعتبر مادة الطلاء (paint) من أكثر الموائع الريبولوجية المعروفة بانتشارها الواسع لدى العامة والتي من أهم خصائصها الريبولوجية أنّها لا تتقطع، وتسقط بسهولة تحت تأثير فعل الجاذبية مثل ما يفعله الماء العادي. يتميّز المائع الريبولوجي بقدر أدنى (τ_0) من المقاومة ضد عملية التقطع (القصّ) والتدفق تحت تأثير أي إجهاد (stress)، بينما نجد مقاومة سائل الماء لعملية التقطع شبه منعدمة. ولذا يُعرف الماء بأنّه مائع نيوتوني(Newtonian) ، أي خاضع بصفة تامة لقانون جاذبية نيوتن (الصورة-1).



الصورة-1

ومن المؤكد علميا أنّه كلما كان مقدار الإجهاد الأدنى (τ_0) أو ما يسمى بإجهاد الإتاحة (Yield stress)، المتطلب من قِبل المائع الريبولوجي للبدء في عملية التقطع عاليا، كلما كانت حالة المائع قريبة من حالة اللدائن الصلبة (لدائن بنغام Bingham plastic)، وكلما اقتربت قيمة الإجهاد الأدنى من الصفر كلما اقتربت حالة المائع من حالة السوائل النيوتونية (الماء)، مثل ما يشير إليه الرسم البياني في الصورة-2.

وبما أنّ مقدار لزوجة المائع تتأثر أساسا بشدة العوامل الخارجية، مثل الحرارة والضوء والكهرباء، فإنه يمكن الحصول على تغيير في مستوى إجهاد القص الأدنى (τ_0) للموائع بواسطة التأثير على أحد هذه العوامل الخارجية والتحكم في مستواها عن طريق الضبط، مثلا في طول موجة الإشعاع الضوئي أو في شدة الحقل الكهربائي أو المغناطيسي المسلط.



الصورة-2

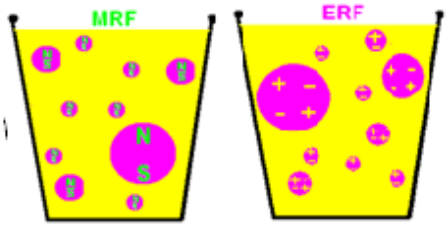
نبيّن في هذا المقال أولا المبدأ والكيفية العامة لصنع مائع ريبولوجي يسمح بالتحكم في لزوجته بواسطة الحقل الكهربائي والمغناطيسي والإشعاع الضوئي، ثم نقدم عرضا متنوعا لأهم التطبيقات الحديثة التي استخدمت فيها هذه الموائع الذكية كوسيلة للتحكم. وفي الأخير، نختم هذه الورقة بأهم المواصفات التقنية والتجارية للموائع الكهرومغناطيسية المسوّقة حاليا في العالم مع تقديم مقارنة تقنية موجزة لها.

1. كيفية صنع مائع ريئولوجي قابل للتحكم في لزوجته

بصفة عامة، يمكن صنع مائع ريئولوجي من وسط عازل للكهرباء، كالزيت الاصطناعي أو المعدني، مثل الغليكول (glycol)، وزيت السيلكون، وغير ها، وهذا عندما تصل نسبة التشبع إلى 40% بجسيمات صغيرة جدا وصلبة لها مقاس نمطي يتراوح من 3 إلى 100µm يسمح لها بالتعليق (suspension) الجيد. تتكوّن هذه الجسيمات مثلا من مادة حديدية، كالكربونيل (carbonyl iron) لتكون قابلة لاكتساب إحدى القطبيتين :

أ- القطبية الكهربائية : يكون المائع كهرو-ريئولوجي Electro-rheological fluid (ERF)

ب- القطبية المغناطيسية : يكون المائع مغناطو-ريئولوجي Magnetorheological fluid (MRF)، الصورة-3.

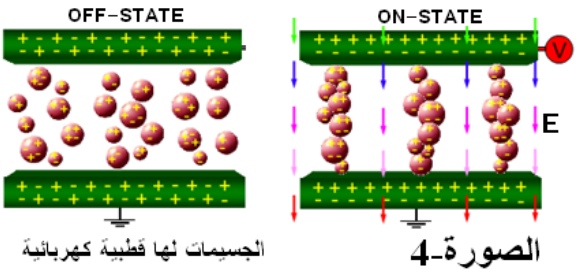


الصورة-3

وبهذه التركيبة يمكن التأثير في الجسيمات الحديدية بواسطة حقل كهربائي أو مغناطيسي كما سنبيّن أدناه.

1.1. المائع الكهرو-ريئولوجي Electro-rheological fluid (ERF)

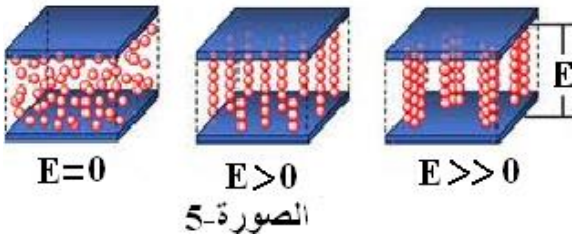
في حالة العادية، تكون للمائع الكهرو-ريئولوجيله إمكانية التدفق، مثل أي سائل بعد تجاوزه لجهد الاتاحة (τo) الخاص به. لكن في ظل وجود حقل كهربائي فستصطف الجسيمات الحديدية على شكل سلاسل كثيفة طوال خطوط الحقل لتعيق التدفق إلى أن تحوّل المائع إلى جسم شبه صلب (بلاستيك) يكون عنده جهد الاتاحة مرتفعا جدا. والمهم في هذا الأمر أنّه بإزالة الحقل الكهربائي المطبق، يعود المائع سريعا إلى حالته الأولى (السائلة) ويتدفق بعد أن تنخفض قيمة جهد الاتاحة الخاصة به، مثل ما تبيّنه الصورة-4.



الصورة-4

يتناسب مستوى الصلابة أو اللزوجة الذي يمكن أن يحصل عليه المائع بصفة طردية مع شدة الحقل الكهربائي المطبق (الصورة-5)، وبإمكانه أن يرتفع أو ينخفض بحولي مائة ألف ضعف في أقل من 10ملي ثانية

(10ms). وبهذه الوتيرة فإنّ المائع الكهرو-ريُولوجي يكون أسرع من كل المشغلات (actuators) أو الصمامات الكهروميكانيكية (Electromechanical valves) المستخدمة حاليا في عمليات التحكم.

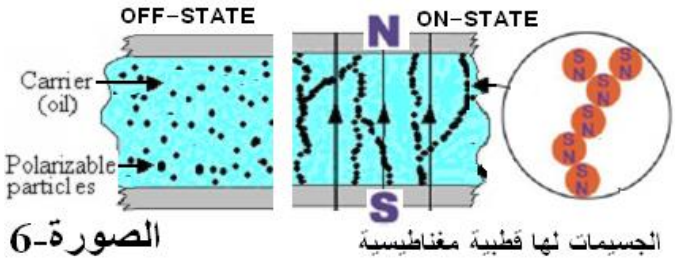


الصورة-5

2.1. المائع المغنطو-ريبولوجي Magnetorheological fluid (MRF)

يمكن صنع أبسط مائع مغنطو- ريُولوجي من وسط سائل مثل الماء، مشبع أيضا إلى نسبة تصل إلى 40% بجسيمات حديدية من مادة الكربونيل بمقاس نمطي يتراوح من 1 إلى 10µm.

وتحت تأثير حقل مغناطيسي، وبطريقة مشابهة للمائع الكهرو-ريُولوجي، تُنشأ روابط بين الجسيمات الكاسبة للقطبية المغناطيسية بشدة متناسبة مع قوة الحقل المطبق، لتكوّن سلاسل كثيفة في اتجاه خطوط الحقل، وتُحوّل المائع إلى جسم شبه صلب (بلاستيك) بجهد إتاحة مرتفع جدا (الصورة-6)، تصل قوة تصديه لعملية القص إلى غاية 50-100 kPa مع تطبيق حقل مغناطيسي بشدة 150-250 kA/m.



الصورة-6

ومثل ما هو الحال بالنسبة للمائع الكهرو-ريُولوجي، فبإلغاء الحقل المغناطيسي ينخفض جهد الاتاحة ويعود المائع المغنطو-ريُولوجي إلى حالته الأولى (السائلة) وبسرعة أكبر من تلك التي يرجع بها المائع الكهرو- ريبولوجي إلى حالة السائل.

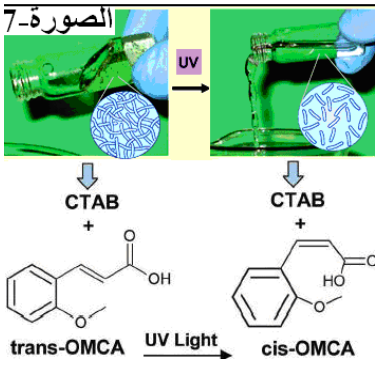
ومن أهم مميزات المائع المغنطو-ريُولوجي أنّه لا يتأثر كثيرا مثل المائع الكهرو-ريُولوجي بعوامل الرطوبة والتخثر أو الحرارة، سواء أكان ذلك أثناء صنعه أو استخداماته، وهو مختلف تماما عن الموائع المغناطيسية (Magneto fluids) أو الموائع الحديدية (Ferrofluids) المعروفة والتي لا تتغير لزوجتها تحت تأثير الحقل المغنطيسي، والتي يكون مقاس جسيماتها بصفة عامة أقل من 1 µm.

3.1. المائع الفوطو-ريبولوجي Photorheological fluid (PRF)

هو المائع الذي تتأثر لزوجته بنسبة طول موجة الإشعاع الضوئي المسلط عليه. ويمكن إنشاؤه أساسا من وسط حساس للإشعاع البنفسجي (ملح أو حمض معدني)، مثل حمض trans-ortho-methoxycinnamic (OMCA) والمضاف إليه عنصر فاعل كيمائي مثل cetyltrimethylammonium bromide (CTAB).

في أغلب الأحيان، يكون الخليط CTAB/OMCA على شكل سباغيتي أو ديدان ملتوية على بعضها البعض في محلول مائي.

الصورة-7



يمكن خفض مستوى لزوجة المائع الفوطو- ريبولوجي بحوالي 1000 إلى 10000 ضعف، أو إلى أن يقترب من مستوى لزوجة الماء تحت تأثير إشعاع فوق البنفسجي بطول موجة أقل من 400nm، وفقا لقاعدة التحويل الكيميائية (الايزوميرة الضوئية) أو trans to cis photoisomerization للرابط المضاعف عند OMCA، كما تبيّنه الصورة-7.

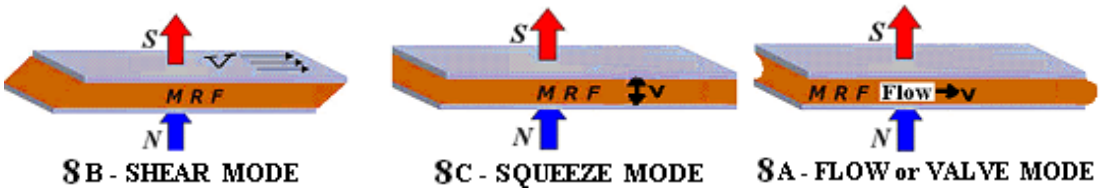
ورغم أنّ الايزوميرة الضوئية (photoisomerization) عملية عكسية من الناحية المبدئية، فإن التحوّل (cis to trans isomerization) هو أيضا ممكن، إلاّ أن عودة لزوجة المائع الفوطو- ريبولوجي الى مستواها الأول لا تحصل بسهولة بعد توقيف الإشعاع المسلط عليه. وهذا يمثل أحد العيوب أو الأسباب التي قللت من السعي وراء انتشار وتطوير المائع الفوطو- ريبولوجي في مجالات التحكم الصناعي.

تنحصر حاليا استخدامات المائع الفوطو- ريبولوجي في صنع بعض المجسات والمفاتيح الدقيقة (microsensors & microvalves) التي تعمل فقط باتجاه واحد. وإضافة لهذا، فكلفة صنع الموائع الفوطو- ريبولوجية ما زالت جدّ مرتفعة بالمقارنة مع كلفة صنع المائعين الكهرو- ريبولوجي و المغنطو- ريبولوجي.

2. كيفية استغلال الموائع الكهرو والمغناطو ريبولوجية

يتم استغلال المائع الكهرو والمغناطو ريبولوجي القابل للتحكم في لزوجته بإحدى الطرق الثلاث الآتية:

- ✓ **طريقة التدفق** (flow or valve mode) : تكون للمائع خلالها حرية التحرك أو التدفق بين حاجزين ثابتين كما تبيّنه الصورة-8A.
- ✓ **طريقة القص** (shear mode) : يكون المائع خلالها محتبسا بين حاجزين لهما إمكانية التحرك والانحياز عن بعضهما البعض أفقيا، انظر الصورة- 8B.
- ✓ **طريقة الكبس** (squeeze mode) : يكون المائع خلالها محتبسا بين حاجزين لهما إمكانية التقارب أو التباعد عن بعضهما البعض عموديا، انظر الصورة- 8C.



1.2. طريقة التدفق

تُستخدم أساسا في تصميم المساعدات dampers (الصورة-9)، ووسائل امتصاص الصدمات shock absorbers (الصورة-10)، ذات العوامل القابلة للتغيير السريع.

وفي هذه الطريقة يتم ضبط لزوجة وحركة المائع بدفعه إلى التنقل بين عدة غرف وقنوات داخل هذه الأجهزة بواسطة قطبية كهربائية أو مغناطيسية مثبّتة.

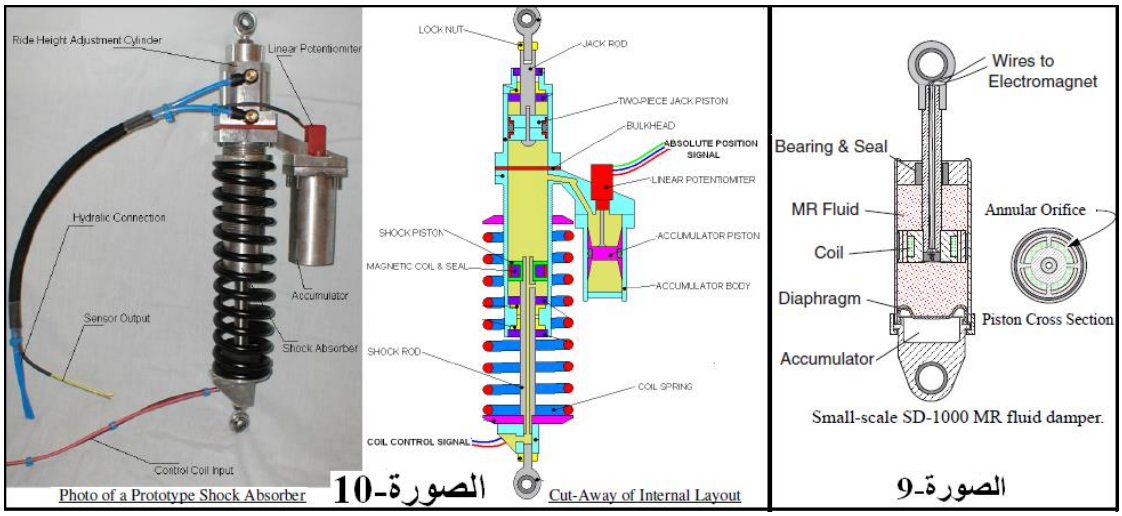
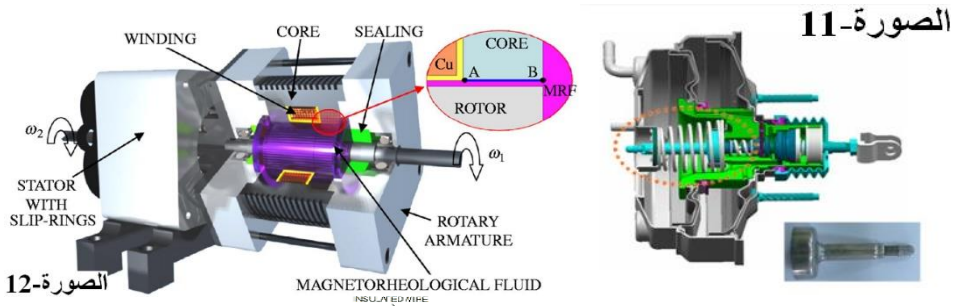


Photo of a Prototype Shock Absorber — الصورة-10 — Cut-Away of Internal Layout

الصورة-9

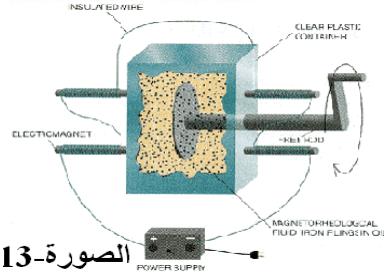
2.2. طريقة القص (shear mode)

تكون طريقة القصّ بقطبين لهما إمكانية الانحياز السريع عن بعضهما البعض أفقيا، وتصلح أساسا لتصميم أجهزة الفتح والإقفال السريع، مثل ما تتطلّبه حركة القوابض (clutches) و فرامل (brakes) سيارات السرعة (الصور 11-12)، وبصفة عامة تستخدم أيضا للتحكم في الحركات الدورانية (الصورة-13).



الصورة-12

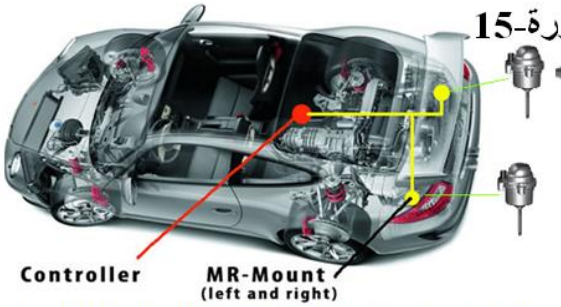
الصورة-11



الصورة-13

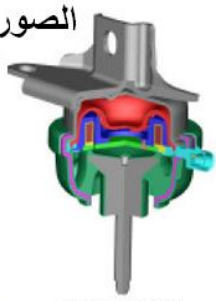
3.2. طريقة الكبس (squeeze mode)

تُستخدم طريقة الكبس أساسا في تصميم أجهزة الحمل (mounts)، انظر الصورة-14، ومقاومة الضغط المرتفع بواسطة قطبية كهربائية أو مغناطيسية لها إمكانية القيام بحركة تباعد أو تقارب عمودية ضئيلة بمقاس الميليمتر (الصورة-15). وتُستخدم حاليا خاصة في تصميم نظم ومعدات حمل هياكل المركبات (powertrain mount) ونظم الإخماد للمنشآت المقاومة للزلازل.



The new Porsche 911 GT3 showing the location of the two MR Powertrain mounts and the electronic controller

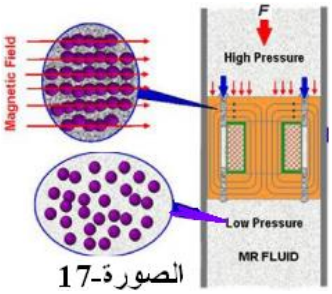
الصورة-15


The Delphi MR powertrain mount

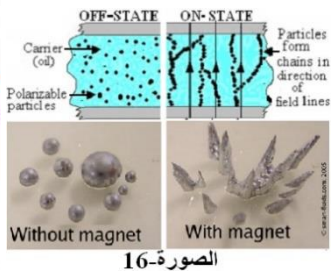
الصورة-14

تكمن أهمية الموائع الريئولوجية القابلة للتحكم أيضا في إتاحة وسائط (Interfaces) بسيطة وسريعة الاستجابة، خاصة بين دوائر التحكم الإلكترونية وعناصر الأنظمة الميكانيكية، وكذا في توفير مشغلات سريعة تعمل بسرعة فائقة للتحكم في قوى ميكانيكية وهيدروليكية هائلة.

ولكي يتم الاستغلال الجيد والفعّال للمائع الكهرو-ريولوجي أو المغنطو-ريولوجي يجب التّأكد عند تصميم أي جهاز يستخدمه، من أنّ خطوط حقل التحريض فيه متعامدة تماما مع اتجاه حركة المائع التي يراد مضايقتها، وذلك لأنّ الخواص الميكانيكية للمائع الريولوجي في حالة تواجد حقل تحريضي (ON-state) ليست هي نفسها في جميع الاتجاهات، أي أنّها لاتناظرية (anisotropic) كما تبيّنه الصور-16-17.



الصورة-17



الصورة-16

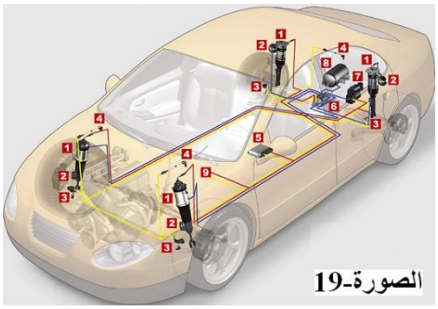
3. أمثلة على أهم التطبيقات الحديثة للمائع الريولوجي القابل للتحكم في لزوجته

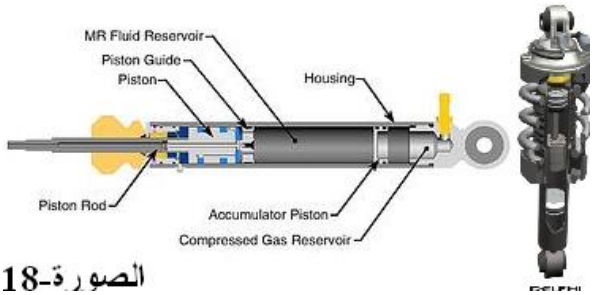
التطبيقات الحديثة للمائع الريولوجي، بإحدى الطرق الثلاث المذكورة سابقا عديدة، ومنها على سبيل المثال:

1.3. التطبيقات في مجال ميكانيكيا السيارات

يستخدم المائع المغنطو- ريولوجي في تصميم المساعدات الذكية من نوع MagneRide (الصور18-19)، والمنتَجة من قِبل شركة Delphi Corporation (Troy, MI) والتي تتطلبها نظم تعليق السيارات المتطورة مثل Audi R8, Cadillac STS, Ferrari .599GTB.

إن تطبيقات المائع الريولوجي في تصميم نظم تعليق السيارات الحديثة هي حاليا الأكثر انتشارا وربحية بالنسبة للشركات المنتجة والتجارية.


الصورة-19



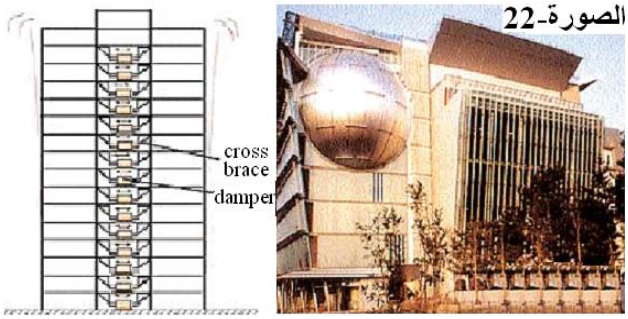
الصورة-18

الصورة-20

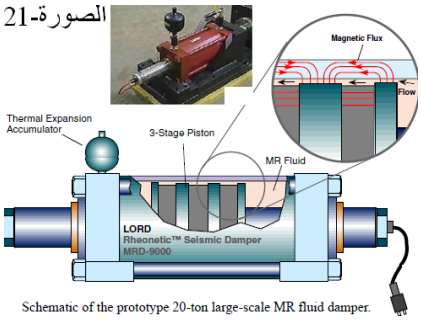
من جهة أخرى، تسعى المشاريع الجارية حاليا في مجال تطبيقات المائع الريبولوجي في تصنيع السيارات الحديثة، إلى التخفيف من وزن هذه الأخيرة بتقليص عدد كبير من القطع والعناصر الميكانيكية التقليدية كالصمامات وأجهزة امتصاص الصدمات وغيرها، بنسبة تصل إلى غاية 40%. فسيتم مثلا استبدال الروابط الميكانيكية، بين عجلة القيادة وعجلات السياقة بتوصيلات سلكية كهربائية لتعمل بالنظام المسمى steer-by wire. ويوجد أيضا مشروع للنظام clutch-by wire، وآخر للنظام brake-by wire (الصورة-20) إلى غير ذلك، مما يجعل سيارات المستقبل أقل وزنا، وأكثر راحة وعزلة عن اهتزازات المحرك والعجلات.

2.3. في مجال المنشآت المقاومة للزلازل

أنجزت اليابان بمساعدة الشركة الأمريكية .Lord Corp، المتخصصة الأولى في إنتاج المائع الريبولوجي وتطبيقاته، عدة مبانٍ حديثة مقاومة للزلازل باستخدام معدات امتصاص الصدمات سريعة وذكية (الصورة-21) تعمل بالمائع الريبولوجي، ولها قدرة التحمل تفوق 20 طنا، مثلما هو مطبق في المبنى المشهور لمتحف العلوم والتقنيات البارزة باليابان (الصورة-22)، وأيضا في مبنى المسجد الأعظم بالجزائر العاصمة.



الصورة-22

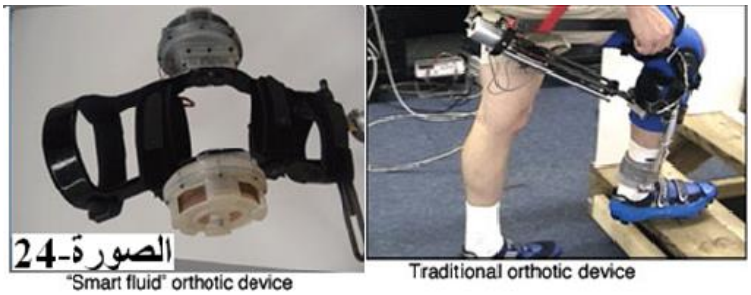


الصورة-21
Schematic of the prototype 20-ton large-scale MR fluid damper.

كما توصلت شركة Lord Corp إلى حل مشكلة اهتزاز الكوابل الحاملة للجسر الشهير في الصين Bridge DingTong (الصورة-23) الذي كان يتعرض للرياح العاتية والسريعة بكثرة.

3.3. التطبيقات في المجال الطبي

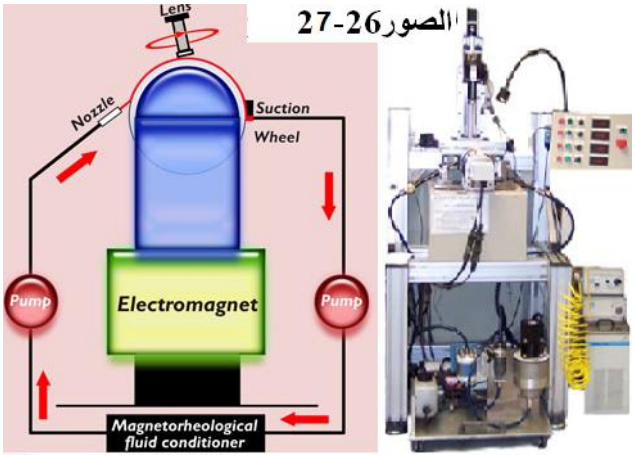
تم تطوير في جامعة نورث إيسترن Northeastern الأمريكية جهازا خفيفا يساعد على دعم وتأهيل حركة الرُّكبة، تحت مسمى AKROD، وذلك باستخدام المائع الريولوجي كوسيلة للفرملة الذكية والسريعة المتطلبة في تأمين حركة متوازنة للجسم (الصورة-24).



وباستخدام المائع الريولوجي، تم أيضا إنجاز جهاز يساعد على تشغيل اليد الاصطناعية التي تتطلب مشغلات خفيفة وسريعة متصلة بإشارات وأوامر آنية يصدرها الدماغ حسب الحاجة الطارئة كما هو موضح في الصورة-25.

4.3. التطبيقات في مجال صقل المواد الصلبة مثل العدسات البصرية والحجارة الكريمة

تمكنت إحدى الشركات المتخصصة في هذا المجال من توظيف المائع الريولوجي ضمن حركة دورانية واحتكاكية، بتدفق مقنّن، مدفوعة من مضخة كما تبيّنه الصورتان 26-27، وهذا لإنجاز أداة صقل مرنة وذكية لا تكلّ بكثرة الاستخدام ولا تحتاج إلى التغيير بصفة مكررة، مع تحقيق دقة عالية في الأداء تصل إلى غاية 10nm. وذلك بتطبيق سريع ومبرمج لحقل مغناطيسي يتحكم آنيا في لزوجة المائع الريولوجي بطريقة التدفق المبرمج.



الصور26-27

5.3. تطبيقات في المجال العسكري

شرعت الولايات المتحدة مؤخرا في إطار المشروع الذي سمّته "مقاتل المستقبل" بتصميم سترة "خفيفة" ومرنة مقاومة للرصاص، محشوة بمائع ريبولوجي يسمح لها بالتحوّل آنيا عند صدمة الرصاص إلى درع صلب شديد الحماية، وهذا باستخدام طريقة الكبس للمائع الذكي (الصورة-28).

الصورة-28

الصورة-29

6.3. التطبيقات في مجال التقنيات الإلكترونية

تم إنجاز عدة أجهزة ووسائل تسمى بالإلكترونيات المرنة (flexible electronics) بإدماج المائع الكهرو-ريبولوجي ضمن تصميم البعض من عناصرها بطريقة الكبس للمائع، مثل لوح مفاتيح قابل للطي لجهاز الحاسوب (الصورة-29).

4. فاعلية ومحدودية المائع الريبولوجي القابل للتحكم

تعتمد فاعلية وجودة المائع الريبولوجي أساسا على قدرته على تحمل الضغط المرتفع ونوعية وحجم جسيماته.

- تتناسب قوة المائع على تحمّل الضغط العالي طرديا مع قدرة التشبع بالمغناطيسية عند الجسيمات التي تكوّنه. وأفضل جسيمات متوفرة حاليا لهذا الغرض هي التي صنعت من مادتي الحديد والكوبالت حيث وصلت قدرة التشبع بالمغناطيسية عندها إلى غاية 2.4 تسله. لكن صنع هذا المركب مكلف جدا حاليا بالنسبة لمعظم التطبيقات العملية المطلوبة. وعليه تبقى الجسيمات المكونة من الحديد الخالص مثل الكربونيل، هي المناسبة عمليا بقدرة تشبع بالمغناطيسية تصل إلى 2.15 تسله. نشير إلى أنّ قوة المائع المغنطو- الريبولوجي تفوق قوة المائع الكهرو- الريبولوجي بحوالي 20-50 ضعفا، ذلك لأنّه مكون أساسا من الجسيمات القابلة للقطبية المغناطيسية التي تتحمّل أكثر شدة الضغط.

- بما أنّ الجسيمات الحديدية هي ثقيلة نسبيا، فإنّها ترسب مع مرور الزمن. وعليه تقلّل من فعالية المائع الريبولوجي. ولذا يتطلب من فترة إلى أخرى تغير أو تجديد هذا الأخير في الأجهزة التي تستخدمه.

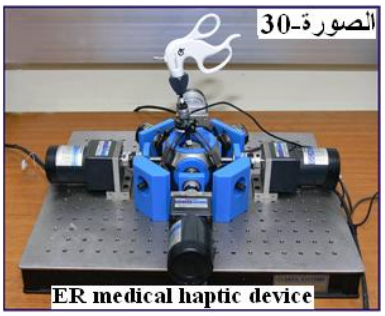
للتقليل من سرعة ترسب الجسيمات الحديدية يلجأ المنتجون حاليا إلى تغليف هذه الأخيرة بمادة خفيفة عازلة تعطي ناتجا معروفا بالسرفكتنت (surfactant) يقاوم أكثر فعل الجاذبية والترسب بسبب الزيادة في حجم الجسيم على حساب الوزن. ومن أنواع السرفكتنت الأكثر استخداما حاليا في هذا المجال نجد : oleic acid , citric acid , soy lecithin.

- القطر النمطي للجسيمات القابلة للمغنطة يتراوح من 3 إلى 5µm. والجسيمات بقطر أقل تعلق بشكل أفضل، غير أنها مكلفة، وعامة تصنع من أكاسد (oxydes)، واستخدامها يتيح موائع ذات استقرار جيّد بلزوجة طيّعة، لكن بقوة لا تتجاوز 5KPa.

نلاحظ أن جسيمات حديد الكاربونيل التجارية وغير المكلفة نسبيا لا يقل قطرها عامة عن 1.5µm، وشركة لورد الأميركية تنتج منها حاليا ثلاثة أنواع مشهورة من الموائع المغنطو-ريبولوجية بالمواصفات المبينة في الجدول الموالي (www.mrfluids.com) :

Property	MR Fluids	ER Fluids
Max. Yield Stress τ_0	50–100 kPa	2–5 kPa
Maximum Field	~250 kA/m	~4 kV/mm
Apparent Plastic Viscosity η	0.1–10 Pa-s	0.1–1.0 Pa-s
Operable Temp. Range	-40–150 °C	+10–90 °C
Stability	Unaffected by most impurities	Cannot tolerate impurities
Density	3–4 g/cm^3	1–2 g/cm^3
η/τ_0^2	10^{-11}–10^{-10} s/Pa	10^{-8}–10^{-7} s/Pa
Maximum Energy Density	0.1 Joules/cm^3	0.001 Joules/cm^3
Power Supply (typical)	2–50 V, 1–2 A	2000–5000 V, 1–10 mA

أخيرا، يتميز المائع المغنطو-ريبولوجي عن المائع الكهرو-ريبولوجي بقدرة تشغيلية منخفضة (low-voltage) وهو لا يتضرر كثيرا من درجات الحرارة القصوى أو الدنيا، وتقنيته تسمح بمرونة وموثوقية كبيرة في تصميم نظم التحكم، إلاّ أنّ بعض الخبراء يعتبرون أنّ المائعين مكملان لبعضهما في كثير من التطبيقات. ذلك أنّ المائع المغنطو-ريبولوجي يصمد بشكل جيد أمام القوى العالية والضغط المرتفع، وأنّ المائع الكهرو-ريبولوجي يناسب أفضل تطوير وتسيير مشغلات نظم التحكم ذات الحجم الصغير. وعلى سبيل المثال، تتطلب نظم تعليق السيارات الصناعية والمنشآت المقاومة للزلازل، قوى معتبرة مثل تلك التي يسمح بها المائع المغنطو-ريبولوجي. بينما تقتضي تطبيقات حديثة، مثل التي تدعّم اليد الاصطناعية المستخدمة في المختبرات، قوى صغيرة وفضاء ضيقا لا يتحمل الأقطاب الضخمة للمغناطيس bulky magnets المتطلبة لتشغيل المائع المغنطو-ريبولوجي (الصورة-30). وعليه فإنّ المائع الكهرو-ريبولوجي الذي يكفيه فقط توصيلات سلكية عادية لتغذيته يكون هو الأنسب في هذه المجال.



الصورة-30

5. مقارنة لخواص أهم الموائع الريبولوجية الذكية المسوقة حاليا

الخواص	المائع الكهرو-ريبولوجي ERF	المائع المغنطو-ريبولوجي MRF
مادة الجسيمات العلقة	نشاء الذرى،البوليمر، الزيوليت	الحديد، الفلاذ، ....
مقاس الجسيمات	0.1-100 µm	0.1-10 µm
الوسط الحامل (الحاضن)	زيوت، جل عازل ، البوليمر،	زيوت اصطناعية، سوائل قطبية وغير قطبية، ماء، ....
الكثافة	1-2 g/cc	3-5 g/cc
لزوجة الحالة الغير منشطة (off state) عند 25 °C	50-2000 mPa-s	50-1000 mPa-s
حقل التحريض	3-5 kV/mm	150-350 kA/m
التغيير الناتج عن التحريض	10KPa=τo(E)	100KPa=τo(B)
مصدر التحريض النمطي	الجهد العالي	المغناطيس الكهربائي أو الدائم
الزمن النمطي للاستجابة	100-200 ms	1-10 ms

6. خواص بعض الموائع الذكية التجارية

المائع البيولوجي	الوسط الحامل	الكثافة g/cc	النطاق الحراري	اللزوجة
MRX-126PD	Hydrocarbon oil	2.66	-40°C to 150°C	
MRX-140ND	Hydrocarbon oil	3.64	-40°C to 150°C	
MRX-242AS	Water	3.88	5°C to 90°C	
MRX-336AG	Silicone oil	3.47	-50°C to 200°C	
ERF-3S-I	Silicone oil	1.054	-10°C to 120°C	127 mPa-s
ERF-3S-II	Silicone oil	0.93	-10°C to 120°C	518 mPa-s
ERF-G01	Silicone oil	.	-10°C to 120°C	3452 mPa-s

المراجع

1. P.W. Elder, Raghavan, A.M. Rakesh Kumar and Ketner, T.S. Davies : A simple Class of Photorheological Fluids: Surfactant Solutions with Viscosity Tunable by Light', Journal of the American Chemical Society, Vol. 129, 6, 2007.

2. N. Louam : Les Fluides Rhéologiques Intelligents et leurs Applications Energétiques et Technico-Industrielles. Revue des Energies Renouvelables, CDER, Vol. 16, 4, Alger, 2013.

3. J.M. Se & J. Huang : Magnetorheological Fluids and their Properties, International Journal of Modern Physics B, Vol.19, 1-3, 2005.

4. Scientific Report, P. Grad : Against the Flow, Technical Articles of the Institution of Engineering and Technology, Office Savoy Place, London, WC2R 0BL, Registration Number 909719, 2007.

5. Scientific Report : Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions, In the Proceedings of the 12th International Conference, held in Philadelphia, USA, August 16-20, 2010. Published by R. Tao, World Scientific Publishing Co., 2011.

6. G. Yang : Large-Scale Magneto Rheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling, Testing and Control, PhD Thesis, Dissertation, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2001.