Fluid Mechanics ميكانيكية الموائع
تطبيقاتها في البايوميكانيك

Prepared by:
Prof. Dr. Ahmed Waleed Abdulrahman
Assist. Prof. Dr. Mohammed Mutlak Badr

fppt.com

يعد كل من الهواء والماء وسط مائع وإن هذا الوسط يسلط قوة على الاجسام خلال حركتها فيه، وإن بعض تلك القوى تبطيء تقدم حركة الجسم والبعض الاخر يعطي دعماً أو دافعاً للحركة.. إن الحركة في الرياضة تتأثر بواسطة محيط الموائع الذي تحدث فيه، فبعض الالعاب الرياضية مثل الركض وبعض فعاليات الرمي أو إطلاق الكرات في العاب اخرى، نجد أن مقاومة الهواء تبطيء حركة الاجسام بنسب مختلفة، وكذلك فأن إحتكاك جلد السباح مع جزيئات الماء في أثناء السباحة يولد مقاومة أكبر من الماء على السباح، والسباح نجده يتعامل مع اثنين مختلفين من محيط المائع (الماء والهواء) في وقت واحد وحركة السباح تتأثر بواسطة تأثير كل منهما على ذلك الجزء من الجسم الذي يتحرك خلالهما.

- المائع من وجهة النظر الميكانيكية: هو أية مادة تتجه الى الجريان أو تغير شكلها باستمرار عندما تعمل عليها بعض القوى، وهذا يشمل الماء والهواء والغاز.
- إن تأثير الموائع على جسم يتحرك خلالها يعتمد على: 1.سرعة الجسم 2.سرعة المائع.
- خصائص الموائع: هناك 3 عوامل تؤثر في مقدار قوة المائع وهي:
- 1.كثافة المائع 2.الوزن النوعي 3.اللزوجة

fppt.com

الطوفان (Buoyancy):

هي قوة المائع والتي تعمل بإتجاه عمودي الى الاعلى ويتحدد مقدار قوة الطوفان من خلال قاعدة ارخميدس "إن مقدار قوة الطوفان التي تعمل على الجسم مساوية الى وزن المائع المزاح بواسطة الجسم".

قوة الطوفان (Fb)= حجم الجسم (Vd) × الوزن النوعي للمائع (Y)

مثال/ إذا كان حجم كرة ماء (^{3}m0,2) تغطس بشكل كامل في الماء عند درجة حرارة (20).. فما مقدار قوة الطوفان؟

الحل/

$$Fb = Vd \times Y$$

$$= (^3m0,2) \times (^3m /N9790)$$

= 1958نيوتن

قوة طوفان ماء البحر أعلى من قيمة الماء العذب.. علل ذلك.

لأن كثافة ماء البحر (^{3}m /Kg1026) أعلى من كثافة الماء العذب (^{3}m /Kg998).

ماهو مركز الطوفان؟

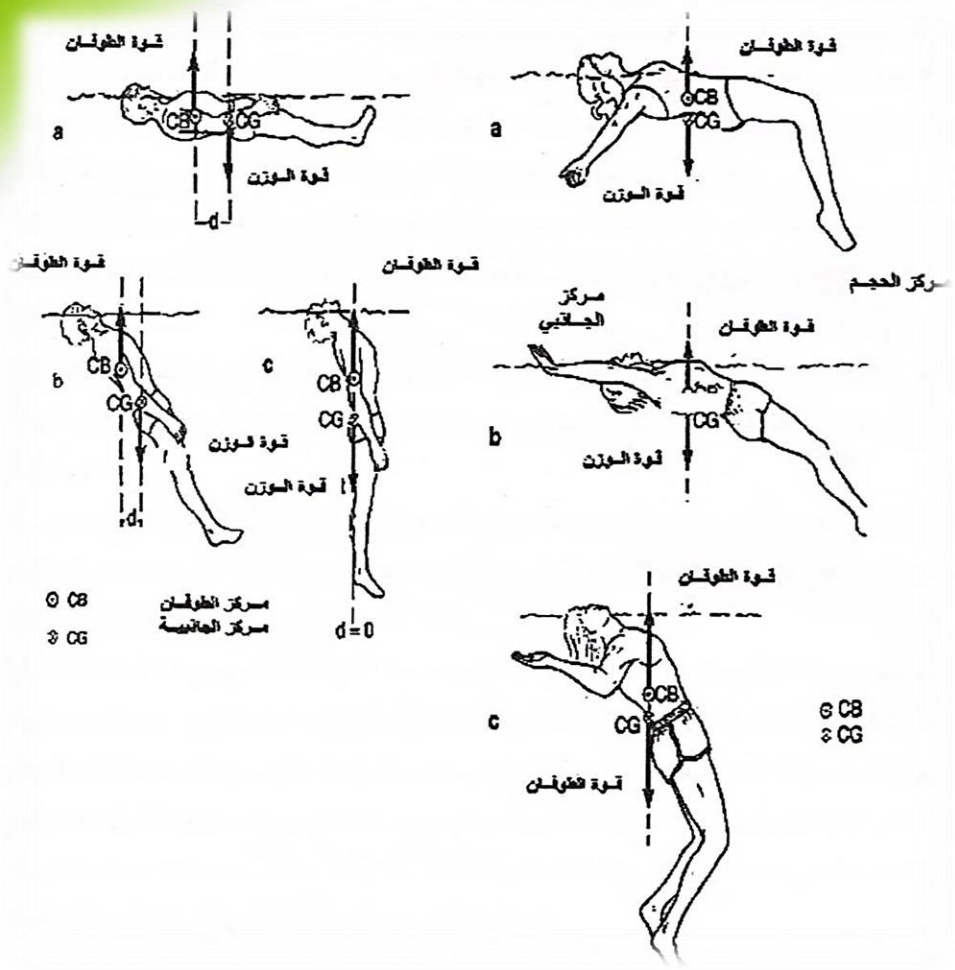
هو مركز حجم الجسم والتي تعمل عليها قوة الطوفان.. ومركز الحجم هي النقطة التي يكون فيها الحجم متعادل التوزيع في جميع الاتجاهات

fppt.com

- الطفو (Flotation):
- قابلية طفو الجسم في وسط من الموائع تعتمد على العلاقة بين قوة الطوفان ووزن الجسم.. وعندما يكون الوزن وقوة الطوفان القوتان الوحيدتان العاملتان على الجسم ومتساويتان بالمقدار فإن الجسم يطفو في حال سكون متوافق مع أساسات الموازنات الثابتة.. أما اذا كانت قيمة الوزن أعلى من قيمة قوة الطوفان فإن الجسم سوف يغرق ويتحرك الى الاسفل.
- إمكانية البعض من الطوفان بجهد قليل وبوضع ساكن وعدم إمكانية البعض الاخر.. علل ذلك.
- إن هذا الاختلاف في قابلية الطوفان يعود الى وظائف كثافة الجسم (كثافة العظام والعضلات تكون أعلى من كثافة الدهون).
- مثال/ عند حبس كمية كبيرة من هواء التنفس في رئتي فتاة كتلتها (Kg22) وحجم جسمها ($0,025 m^3$). هل تستطيع أن تطفو في ماء عذب إذا كان الوزن النوعي للماء ($9810 N/m^3$)؟
- الحل/ قوة الطوفان (Fb)= حجم الجسم (Vd) × الوزن النوعي للمائع (Y)
- = ($0,025 م^3$) × ($9810 م^3$)
- = 245,25نيوتن
- وزن جسمها معادل الى كتلتها مضروبة في تعجيل الجاذبية:
- الوزن (W)= (22) × 9,81م/ ث^2)
- = 215,82نيوتن

fppt.com

- كثير من الاشخاص يستطيعون الطوفان من خلال زيادة حجم الهواء المنتشر داخل الرئتين كوسيلة لزيادة حجم الجسم بشكل جزئي دون التغيير في وزن الجسم.
- إن توجه جسم الانسان للطفو في الماء يتحدد بواسطة موقع مركز ثقل جاذبية الجسم ككل بالنسبة الى مركز الحجم الكلي، وإن الموقع المحدد بشكل دقيق لمركز ثقل الجاذبية أو مركز الحجم منوع بحسب الابعاد والقياسات الجسمية وتركيبة الجسم..
- علل: يكون موقع مركز ثقل الجسم نوعاً ما أدنى من مركز الحجم... بسبب كبر حجم الرئتين وقلة وزنها، وبهذا الفرق بين موقع المركزين الجذب والحجم سوف يتولد عزماً يعمل على دوران الجسم بسبب قوتين تعملان بشكل متعامد وهما:
- 1.قوة الوزن (CG) التي تعمل على مركز الجذب.
- 2.قوة الطوفان (CB) التي تعمل على مركز الحجم.



العزم المبذول بواسطة قوى الجاذبية يسبب دوران الجسم

fppt.com

- **علــل:**
- **يستعمل مدربو السباحة عند تعليم المبتدئين في الطوفان على الظهر، بعض الوسائل أو الادوات بين الرجلين... للحصول على الخط المستقيم للجسم في الماء قبل الاسترخاء في الطوفان ، حيث أن هذا الوضع (له علاقة بعزم القصور الذاتي ونق) يقلل من العزم العامل على غرق الاطراف السفلى.**
- **يقوم بعض السباحين في الطوفان على الظهر برفع الذراعين فوق الرأس... وذلك لسحب نقطة مركز الجذب لاعلى الجسم بموضع قريب من نقطة مركز الحجم.**
- **السحب (Drag):**
- **هي قوة تتسبب بواسطة فعل حركة المائع التي تعمل بإتجاه جريان المائع، وبشكل عام تعد قوة السحب قوة مقاومة أو قوة إبطاء لحركة جسم الانسان خلال المائع وهي تعمل على الجسم بحركة مرتبطة بالمائع.**
- **تأثير السرعة النسبية للحركة على قوة السحب:** حيث أن تأثير السحب يزداد كلما كانت السرعة عالية وكما يحدث في رياضة الدراجات والتزلج على الجليد والهبوط بالمظلات.
- **تأثير الزيادة والنقصان في كثافة المائع على قوة السحب:** إن نقصان كثافة الهواء بـ (زيادة الارتفاع) يؤدي الى تغيير نسبي في قوة السحب وبالتالي يؤثر بشكل أو بأخر على النتائج المتحققة.

علل: تحقيق الكثير من الارقام العالمية في الالعاب الاولمبية التي أقيمت في مدينة مكسيكو المرتفعة عن سطح البحر (2250م)... وذلك بسبب نقصان في قوة السحب العاملة على المتنافسين نتيجة نقصان مقاومة الهواء (كثافة الهواء) بسبب الارتفاع عن مستوى سطح البحر.

fppt.com

مركبات السحب الكلى او المقاومة الكلية:

1.إحتكاك الجلد (Skin Friction):

هي إحدى مركبات السحب الكلي.. إن مقاومة السطح أو مقاومة اللزوجة تكون مشابهة الى قوة الاحتكاك، وإن احتكاك الجلد ينجم من إنزلاق الترابط بين الطيات المتتابعة لجريان المائع بالقرب من سطح حركة الجسم.

إن اتجاه قوة الجسم المبذولة على المائع تولد (طبقات الحد الفاصل) ونتيجة قوة رد فعل المائع على الجسم بإتجاه مختلف يعرف إحتكاك الجلد.

العوامل المؤثرة على قوة السحب (مقاومة إحتكاك الجلد) والتي تزداد بزيادة:

1.السرعة النسبية لجريان المائع 2.مساحة سطح الجسم 3.خشونة سطح الجسم 4.لزوجة المائع

تطبيقات رياضية للتقليل من إحتكاك الجلد:

من خلال فهم العوامل سابقة الذكر للرياضيين نجدهم مستعدين لتبديل نسبة خشونة سطح اجسامهم من خلال إرتداء الملابس المحكمة لاشكال اجسامهم والمصنوعة من القماش الناعم بدلاً من الملابس الفضفاضة والمصنوعة من القماش الخشن.

متسابقو التزلج – ملابس محكمة وناعمة – تقل نسبة قوة السحب 10%

متسابقو الدراجات – ملابس ذات كم كامل للذراعين ورباط ناعم فوق الاحذية – تقل نسبة مقاومة الهواء 6%

السباحون الذكور – يحلقون شعر أجسامهم – تقل نسبة إحتكاك الجلد 10%

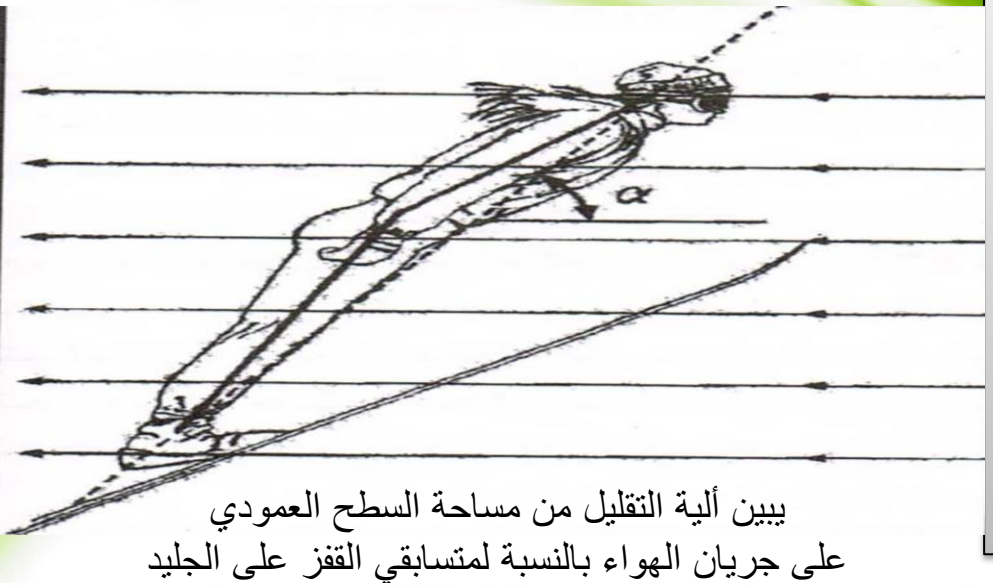
fppt.com

2.شكل الجسم (Form Drag):

المركبة الثانية للسحب الكلي العاملة على حركة الجسم خلال المائع وتسمة (شكل السحب) والذي يعرف ايضاً بـ (مقاومة الشكل)، ويعد العامل الرئيسي للتعكر لعموم السحب في معظم حركات البشر والمقذوفات.

العوامل المؤثرة في مقاومة الشكل:

1.السرعة النسبية للجسم بالنسبة للمائع 2.مقدار إنحدار الضغط بين أمام وخلف الجسم 3.حجم مساحة السطح العمودي على الجريان.



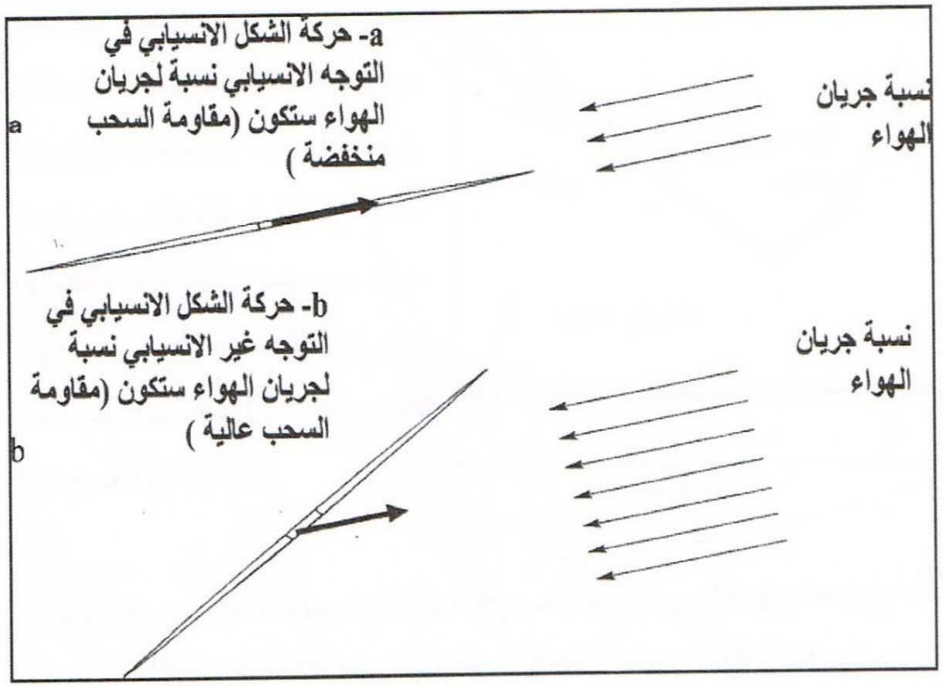
يبين ألية التقليل من مساحة السطح العمودي على جريان الهواء بالنسبة لمتسابقي القفز على الجليد

تطبيقات رياضية (مقاومة الشكل):

الخط الانسيابي لشكل الجسم العام يقلل من قيمة الضغط الانحداري، ففي رمي الرمح إن الخط الانسيابي يقلل من كمية التعكر المتولدة ويعزز تقليل الضغط السلبي المتولد على الجزء الخلفي لجسم الرمح، على إفتراض أن وضع الجسم أكثر دقة سيقلل سطح منطقة القذف الموجهة عمودياً على مجرى المائع.

متسابقو الدراجات والمتزلجون يفترض وضع أجسامهم مع أصغر مساحة محتملة موجهة عمودياً على مجرى الهواء.

متسابقو الدراجات يستعملون عجلات صلبة لانها تولد عكرة اقل من العجلات المرنة.



تاثير مقاومة الشكل على الرمح في الموائع

fppt.com

3.سحب الموج (Wave Drag):

النوع الثالث من السحب ويظهر عند الاسطح البينية لنوعين مختلفين من الموائع كالسطح البيني بين الماء والهواء، عندما يحرك السباح أجزاء من جسمه على طول مساره عبر الهواء وبشكل بيني مع الماء، حيث ستتولد الموجات في المائع الاكثر كثافة (الماء) وان قوة رد فعل الماء تعمل على السباح على شكل موجة سحب، وأنقوة موجة السحب تزداد بزيادة:

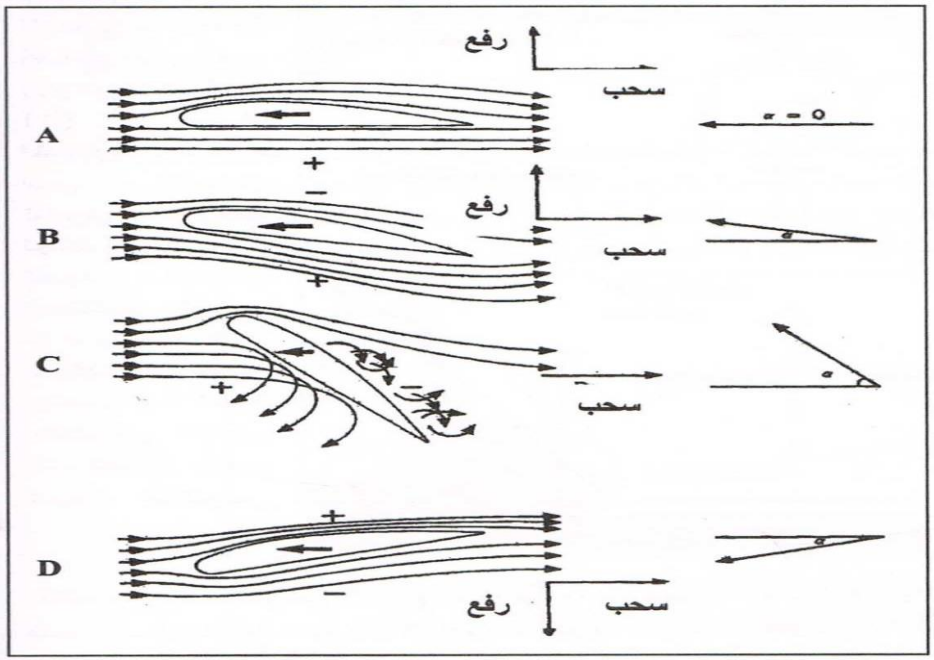
1.حركة الجسم الاكثر الى الاعلى والى الاسفل 2. سرعة السباح

قوة الرفع (Lift Force):

وهي القوة التي تتولد عمودياً الى الاعلى على مجرى المائع ويتحدد إتجاهها إعتماداً على إتجاه مجرى المائع وتوجه الجسم.

fppt.com

- يهتم الرياضيون بتحسين ادائهم عن طريق التحكم في قوة المقاومة المؤثرة في الجسم كذلك بذل الجهد للتحكم في قوة الرفع.
- يحاول رماة القرص والرمح ان تكون مواجهة الاداة بمقدار ضئيل من المقاومة وفي الوقت نفسه تتعرض الى اقصى قدر من الرفع لكي تتمكن من البقاء في الهواء ويزيد زمن طيرانها.
- يعتمد مقدار الرفع والمقاومة عند أي سرعة جريان جزئيا على وضعية الجسم.
- في حال كون الجسم في وضع متعامد مع اتجاه قدوم الجريان فانه سوف يكون له قوة مقاومة عالية وقليل من أو بدون قوة رفع.
- اذا كان الجسم موازي للجريان فسوف يكون له اقل قوة مقاومة ممكنة دونما قوة رفع او قليل منها.



توضيح العلاقة بين قوتي السحب والرفع

fppt.com

تأثير ماكنوس
Magnus Effect

قبل الشروع في هذا الموضوع يجب أن نقول ان الميكانيكية الاساسية لانحناء كرة القدم هي تقريبا نفسها بالنسبة لكرة البيسبول والغولف والتنس وغيرها.

ومن هنا يمكن ان نعرف "تاثير ماكنوس بانه قوة تعبر عن تزايد الضغط في مناطق الجسم ونقصانه في المناطق المقابلة، نتيجة دوران الجسم حول احد المحاور اثناء انطلاقه في الهواء".

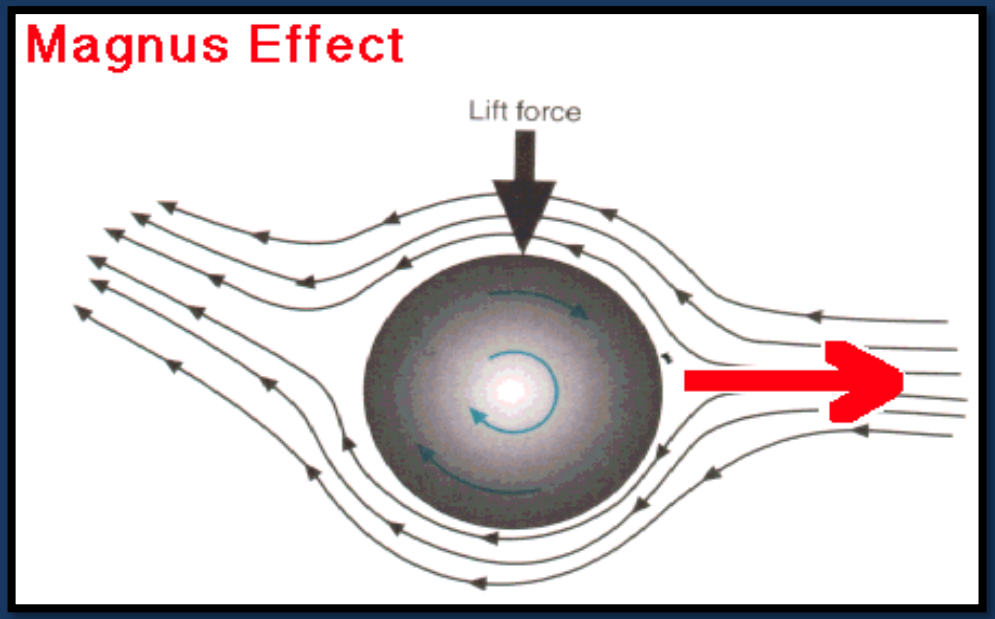
وهذا الاختلاف بالضغط يحدث وفقا لاتجاه الدوران من الاعلى الى الاسفل، فاذا كان الدوران من الاعلى الى الاسفل، فان الضغط المسلط على الجهة العلوية يكون اكبر من الضغط المسلط على الجهة السفلية، اما اذا كان الدوران من جهة اليمين الى جهة اليسار فان الضغط المسلط على جهة اليمين اكبر من قيمة الضغط المسلط على جهة اليسار، لذلك يميل الجسم باتجاه المنطقة قليلة الضغط بسبب تزايد الضغط بالجهة الاخرى وينحرف على مساره الحقيقي خصوصا بالثلث الاخير من هذا المسار.

وعلى هذا الاساس تبنى التدريبات في كيفية تسليط القوة على احد جانبي الجسم المقذوف بحيث تكون قوة لامركزية من اجل تسليط عزم دوران يسبب دوران الجسم لجهة الضغط الضعيفة.

اما اذا كانت القوة المسلطة بمركز ثقل الجسم (خطية) فيكون الجسم دون دوران حول أي محور وتكون قوة الهواء كقوة معيقة تتناسب طرديا مع مسطح الجسم مما يسبب ضغطا على الجسم يسبب له حركة تموجية يمينا ويسارا وفق انسياب الهواء على نقاط مسطح الجسم والتي قد تكون كثيرة في جهة او قليلة في جهة اخرى مما يسبب حركته يمين او يسار اعلى او اسفل.

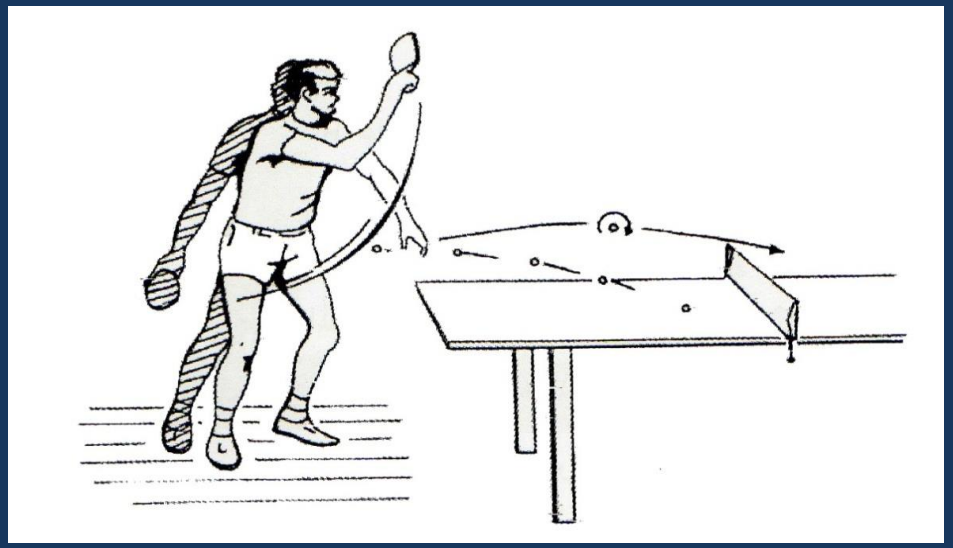
الديناميكية الهوائية للكرة:(Aerodynamics of sports balls)

لو افترضنا ان كرة تلف حول محورها ويتدفق الهواء حولها عموديا على مستوى اللف كما في الشكل المرفق.

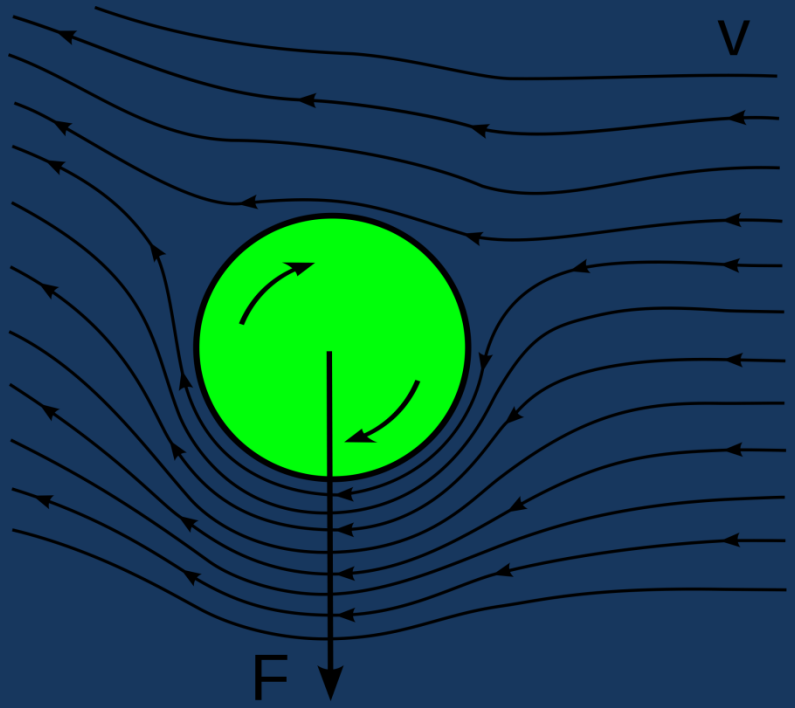


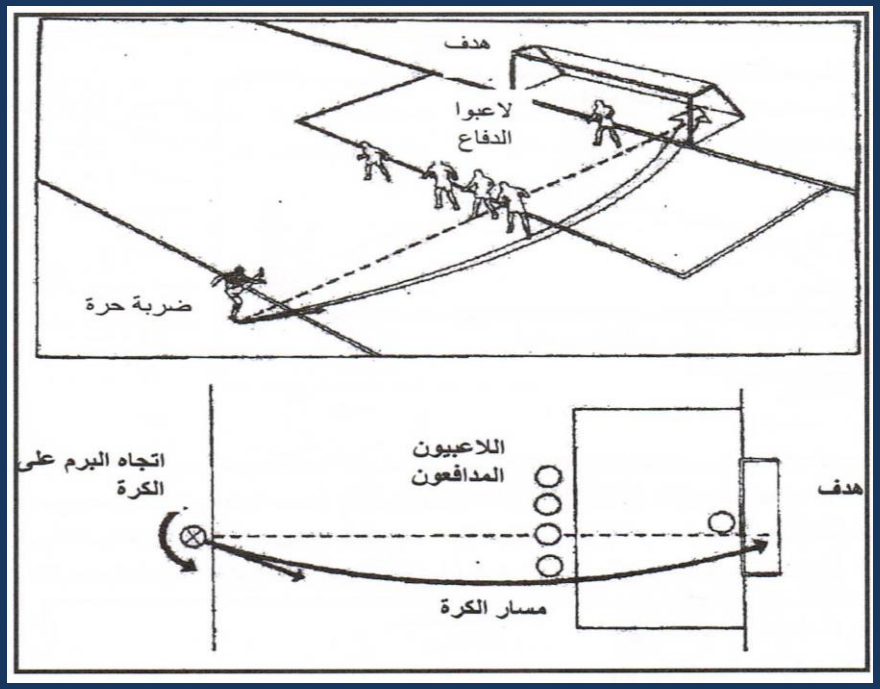
شكل يوضح تاثير ماكنوس على الكرة

عندئذ سيتحرك الهواء بشكل اسرع مقارنة بمنتصف الكرة حيث أن محيط الكرة يتحرك في نفس اتجاه تدفق الهواء، وهذا يقلل الضغط وفقا لمبدأ برنولي.. ويحدث التأثير العكسي في الجهة الأخرى من الكرة حيث يتحرك الهواء بشكل ابطئ بالنسبة لمنتصف الكرة، ولهذا يكون لدينا عدم توازن في القوى مما قد يؤدي الى تغيير مسار الكرة.. يسمى تغيير الكرة لمسارها اثناء الطيران بتاثير ماغنوس.



استخدام مبدأ ماكنوس في العاب المضرب





يبين المسار القوسي لكرة القدم بسبب البرم
الجانبي على الكرة

أهمية ميكانيكا الموائع و النمذجة البايوميكانيكية الحاسوبية

- قد يتبادر الى الذهن ان بحوث ميكانيكا الموائع صعبة التنفيذ و تتطلب مستلزمات و أدوات تحليل و تفسير غير متوفرة او باهظة، الثمن و هذا نسبيا صحيح!
- لكن الأدوات الحاسوبية الحديثة تتيح هامش تطور عالي جدا و مرن الى الحدود التي يتيحها أصول علم البايوميكانيك الرياضي.
- تستخدم الأبحاث الحديثة ديناميكا الموائع الحسابية لنمذجة التفاعل بين الرياضي والمائع دون الحاجة لنفق هوائي أو أحواض سحب في كل مرة.
- يتم تقسيم المجال حول الجسم إلى شبكة معقدة Meshing لحساب توزيع الضغط بدقة.
- تساعد هذه المحاكاة في تصميم بدل السباحة، الخوذات الهوائية للدراجين، وتطوير تكنيك "القبضة" في التجديف.
- قبل الانتقال الى فكرة جديدة، ما الذي نقصده **بتوزيع الضغط** في أعلاه؟

fppt.com

- 1. ديناميكا الموائع الحسابية Computational Fluid Dynamics – CFD
- تعتبر الـ CFDالأداة المركزية في محاكاة حركة الأجسام في الموائع. تعتمد العملية على تقسيم الفراغ المحيط بالرياضي أو الأداة إلى ملايين الخلايا الصغيرة تسمى Mesh .
- حل معادلات الحركة: يقوم الحاسوب بحل معادلات **Navier-Stokes** لكل خلية على حدة، مما يسمح برؤية "توزيع الضغط" و"متجهات السرعة" بدقة لا يمكن للعين البشرية أو الكاميرات العادية رصدها.
- تحليل الاضطراب Turbulence Modeling: الموائع حول الأجسام الرياضية ليست دائماً انسيابية و المحاكاة المتقدمة تستخدم نماذج حاسوبية و إحصائية مثل k-\epsilon أو LES للتنبؤ بالدوامات الصغيرة التي تنشأ خلف جسم السباح أو الدراج، والتي تستهلك طاقة كبيرة من الرياضي.
- طيب، ما الذي نفهمه عند ملاحظة كلمة (طاقة) في أعلاه؟
- هذه نقطة ممتازة لتحليل و تفسير مختلف الأهداف التدريبية او التعليمية من خلال ادماج مفاهيم الطاقة الحركية و فهم قوانين نيوتن.

fppt.com

- 2. المحاكاة المقترنة Fluid-Structure Interaction – FSI
- هذا هو المستوى الأكثر تعقيداً، حيث لا يتم محاكاة المائع وحده، بل يتم محاكاة تفاعل المائع مع تشوه الجسم.
- مثال في التجديف: محاكاة كيفية انحناء "المجداف" عند دخوله الماء وتأثير هذا الانحناء على قوة الدفع الناتجة.
- مثال في القفز بالزانة: تحليل تدفق الهواء حول الزانة أثناء انحنائها وتأثير ذلك على استقرار الرياضي.
- 3. محاكاة "النظام السيبراني-البشري" Human-Cyber Systems
- في الدراسات الحديثة المنشورة في دوريات مثل Journal of Biomechanics، يتم دمج نماذج العظام والعضلات (Musculoskeletal\ Models)مع محاكاة الموائع.
- الهدف تحديد الزاوية المثالية للمفصل (مثل مفصل المرفق في السباحة) التي تحقق أقصى دفع مائي بأقل جهد عضلي ممكن.
- تحسين الأداء: المحاكاة تسمح باختبار "ماذا لو؟" (What-if\ scenarios). مثلاً: "ماذا لو زادت سرعة دوران الذراع بـ 5\%، كيف سيؤثر ذلك على السحب الموجي؟".
- ان اختبارات ماذا لو تعتبر مقاربة إحصائية حديثة نسبيا و ممتازة جدا في تخصصنا و ذات نتائج موضوعية لكن تحتاج قبل الدخول اليها قدرا من الفهم للرياضيات البايوميكانيكية فضلا عن المام بمفاهيم الإحصاء.

fppt.com

. فوائد المحاكاة مقارنة بالتجارب الميدانية

- تتفوق المحاكاة على الأساليب الإحصائية التقليدية في البحث العلمي الرصين لعدة أسباب تقنية:
- عزل المتغيرات: حيث يمكن تثبيت كثافة المائع ولزوجته بدقة 100 % واختبار تأثير "شكل الجسم" فقط، وهو أمر مستحيل في الميدان.
- الوصول إلى البيانات غير المرئية: توفر المحاكاة خرائط حرارية للضغط Pressure\ Maps على سطح الجسم، مما يوضح النقاط التي تسبب أعلى مقاومة.
- التكلفة والوقت: اختبار 50 تصميمًا مختلفًا لخوذة دراجات هوائية عبر المحاكاة أسرع وأرخص بكثير من تصنيعها واختبارها في نفق هوائي wind Tunnel
- التوجهات البحثية الحالية Q1 Journals Context حيث تتجه الأبحاث الآن نحو استخدام الذكاء الاصطناعي التفسيري XAI لربط نتائج المحاكاة بقرارات المدربين اللحظية، بحيث تخبر المحاكاة الرياضي: "إذا خفضت رأسك بمقدار 2 cm، ستقلل المقاومة الهوائية بنسبة 3 % مما يوفر لك 0.5 ثانية في السباق".
- ملاحظة مهمة جدا: بصفتكم مدمنين على أدوات الذكاء الاصطناعي، لا تعتبر النقطة أعلاه دعم لفكرة (توليد الأفكار) بل هي دعوة لاستخدام (الذكاء الاصطناعي التفسيري) و هو الذكاء العلمي الرصين المسموح في مجال البحث العلمي.
- **ملاحظة منهجية حول المحاكاة**
- **جميع المصادر تؤكد أن دقة المحاكاة تعتمد على أسس الثبات عند التكرار ، حيث تتم مقارنة نتائج البرنامج (مثل Ansys Fluentأو OpenFOAM مع تجارب فيزيائية حقيقية لضمان أن قيم معامل السحب cd المحسوبة حاسوبياً تطابق الواقع بدقة لا تقل عن 95 %.**

fppt.com

المصادر

1.سمير مسلط الهاشمي؛ البايوميكانيك الرياضي، ط3: (بغداد، النبراس للطباعة والتصميم،2010).
2.صريح عبدالكريم الفضلي؛ تطبيقات البيوميكانيك فى التدريب الرياضي والاداء الحركى، ط2: (بغداد، جامعة بغداد، 2010).
3.صريح عبدالكريم الفضلي ووهبي علوان البياتي؛ موسوعة التحليل الحركى، ج1: (بغداد، مطبعة دي العكيلي، 2007).
4.طلحة حسام الدين؛ مباديء التشخيص العلمي للحركة: (القاهرة، دار الفكر العربي، 1994).
5.محمد جاسم محمد الخالدي؛ البايوميكانيك فى التربية البدنية والرياضة: (بغداد، جامعة الكوفة، 2012).
6.ياسر نجاح حسين واحمد ثامر محسن؛ التحليل الحركي الرياضي: (النجف الاشرف، دار الضياء للطباعة، 2015
7.د.حسين مردان؛ محاضرات في البايوميكانيك: (كلية التربية الرياضية، جامعة القادسية).
8 .James G.Hay; The Biomechanics of Sports Techniques, 3rd edition: (New Jersey, prentice – Hall,1985).

المصادر

- 1. في مجال ديناميكا الموائع الحسابية CFD والسباحة:
- Bixler, B., & Riewald, S. (2002). "Analysis of swimming stroke efficiency using computational fluid dynamics." Journal of Biomechanics, 35(5), 713-719.
- هذا البحث يعد حجر الزاوية في استخدام معادلات Navier-Stokesلتقييم كفاءة السحب والدفع في السباحة.
- Marinho, D. A., et al. (2010). "Numerical simulation of quaternary swimming gliding: A CFD study." International Journal of Sports Medicine, 31(05), 316-322.
- يوضح كيفية استخدام الـ CFDلتحليل السحب الاحتكاكي والضغط في وضع الانسياب (.Streamline)
- 2.في مجال أيروديناميكا الأدوات الرياضية وتأثير ماغنوس:
- Goff, J. E. (2013). "A review of recent research into the aerodynamics of sport projectiles." Sports Engineering, 16(3), 137-154.
- مرجع شامل لتحليل قوى الرفع والسحب وتأثير ماغنوس على الكرات الطائرة (قدم، تنس، جولف).
- Passmore, M. A., et al. (2008). "The aerodynamics of a spinning soccer ball." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology.
- 3.في مجال النمذجة الرياضية والتحليل التنبئي:
- Payne, G. W., et al. (2016). "The use of computational fluid dynamics in the design of elite cycling equipment." Sports Engineering.
- دراسة تطبيقية حول تقليل المقاومة الهوائية عبر المحاكاة الحاسوبية للخوذ والملابس.
- Van Houwelingen, J., et al. (2021). "Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment." Sports Biomechanics.
- مراجعة نقدية لمقارنة نتائج الأنفاق الهوائية (Wind\ Tunnels)مع المحاكاة الرقمية (.CFD)
- 4.في التفاعل بين الهيكل والمائع (:FSI)
- Nakamura, K., et al. (2013). "Fluid-structure interaction analysis of a swimming human arm." Journal of Biomechanical Science and Engineering.
- بحث متخصص في كيفية تأثر الأنسجة الرخوة (العضلات والجلد) بضغط الماء وتغييرها لخصائص التدفق.

fppt.com

شكرا لطيب الاستماع