# الفصل

الكينماتيكا ثنائية الأبعاد

الشكل 3-1 الحركة التي نختبرها كل يوم، لحسن الحظ، غير مجهدة كركوب قطار ملاهي كهذا في متنزه بورت أفينشورا العالمي في إسبانيا. بالرغم من ذلك، أغلب الحركات تكون منحنية، وليست مستقيمة. الحركة على مسار منحنى هي حركة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد، ويمكن وصفها على نحو مماثل للحركة أحادية البعد. (credit: Boris23/Wikimedia Commons)



**مخطط الفصل**

**3-1 الكينماتيكا في بعدين: مقدمة**

* الإشارة إلى أن الحركة في بعدين تتكون من مركبتين أفقية ورأسية.
* فهم استقلالية المركبتين الأفقية والرأسية في الحركة ثنائية الأبعاد.

**3-2 جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية**

* فهم قواعد الجمع والطرح والضرب الاتجاهي باستخدام الطرق البيانية.
* تطبيق طرق بيانية لجمع المتجهات وطرحها لحساب إزاحة الأجسام المتحركة.

**3-3 جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية**

* فهم قواعد الجمع والطرح الاتجاهي باستخدام الطرق التحليلية.
* تطبيق طرق تحليلية لحساب المركبتين الرأسية والأفقية للمتجهات.
* تطبيق طرق تحليلية لتحديد مقدار واتجاه المتجه المحصل.

**3-4 حركة المقذوفات**

* تعريف الكميات المتعلقة بالمقذوفات وشرحها، مثل التسارع بسبب الجاذبية والمدى والارتفاع الأقصى والمسار.
* حدد موقع المقذوف وسرعته عند نقاط مختلفة في مساره.
* تطبيق مبدأ استقلالية الحركة لحل مسائل حركة المقذوفات.

**3-5 جمع السرعات المتجهة**

* تطبيق مبادئ جمع المتجهات لحساب السرعة النسبية المتجهة.
* توضيح أهمية المراقب في قياس السرعة.

**مقدمة عن الحركة ثنائية الأبعاد** قوس كرة السلة، مدار القمر الصناعي، سباح يغوص في حمام سباحة، دم يتدفق من جرح، وجرو يطارد ذيله ليست سوى أمثلة على حركات على طول مسارات منحنية. في الواقع، تتبع معظم الحركات في الطبيعة مسارات منحنية وليس خطوط مستقيمة. الحركة على طول مسار منحني على سطح مستوي أو مستوى (مثل كرة على طاولة بلياردو أو متزلج على حلبة للتزلج) ثنائية الأبعاد، وبالتالي توصف بواسطة الكينماتيكا ثنائية الأبعاد. الحركة غير المحدودة في مستوى، مثل السيارة التي تسير على طريق جبلي متعرج، توصف بواسطة الكينماتيكا ثلاثية الأبعاد. كل من الكينماتيكا الثنائية والثلاثية الأبعاد امتداد بسيط للكينماتيكا أحادية البعد التي درسناه لفهم الحركة في خط مستقيم في الفصل السابق. سيسمح لنا هذا الامتداد البسيط بتطبيق الفيزياء على العديد من المواقف، كما أنه سيُنتج عنه رؤى غير متوقعة حول الطبيعة.

## 3-1 الكينماتيكا في بعدين: مقدمة

A picture containing street, city, road, way

Description automatically generated

الشكل 3-2 من النادر أن يتمكن المشاة والسائقون في مدينة مثل نيويورك من السير في خطوط مستقيمة إلى وجهاتهم. بدلاً من ذلك، يجب عليهم السير في الطرق وعلى الأرصفة، في مسارات منحنية، ثنائية الابعاد. (credit: Margaret W. Carruthers)

### الحركة ثنائية الأبعاد: السير في مدينة

لنفترض أنك تريد المشي من نقطة إلى أخرى في مدينة ذات مربعات سكنية موحدة، كما موضح في الشكل 3-3.

Chart

Description automatically generated

الوجهة

9 مربعات شرقًا

نقطة البداية

5 مربعات شمالًا

الشكل 3-3 يمشي أحد المشاة في مسار ثنائي الأبعاد بين نقطتين في المدينة. في هذا المثال، كل المباني مربعة ولها نفس الحجم.

لا يمكنك السير في خط مستقيم- فقط المروحيات يمكنها فعل هذا في المدينة، لذا فأنت مضطر لاتخاذ مسار ثنائي الأبعاد، مثل المسار الموضح. تمشى 14 مربع، 9 شرقًا يليها 5 شمالًا. ما البعد بين النقطتين؟

يقول المثل القديم: إن أقصر مسافة بين نقطتين هي خط مستقيم. يشكل ضلعا المسار والخط المستقيم مثلثًا قائمًا، وبالتالي يمكن استخدام مبرهنة فيثاغورس ،لإيجاد البعد بين النقطتين.

A picture containing polygon

Description automatically generated

الشكل 3-4: تربط مبرهنة فيثاغورس طول ضلعا المثلث القائم الزاوية ، بالوتر بالعلاقة  
 . ولحساب :

الوتر في المثلث هو البعد بين النقطتين، وفي هذه الحالة يكون طوله بوحدات المربعات ، أقصر من الـ 14 مربع المقطوعة. (لاحظ أننا نستخدم ثلاثة أرقام معنوية في الإجابة. على الرغم من أن الرقمين "9" و "5" يبدو أن لهما رقم معنوي فقط، إلا أنهما رقمان متقطعان discrete. في هذه الحالة "9 مربعات" هي نفسها "9.0 أو 9.00 مربعات.” لقد قررنا استخدام ثلاثة أرقام معنوية في الإجابة لإظهار النتيجة بشكل أدق.)

Diagram

Description automatically generated

الوجهة

9 مربعات شرقًا

نقطة البداية

مسار المروحية  
10.3 مربع

5 مربعات شمالًا

الشكل 3-5 المسار المستقيم الذي تتبعه المروحية بين النقطتين أقصر من المربعات الـ 14 التي يسيرها المشاة. جميع المربعات لهانفس الحجم.

حقيقة أن المسافة المستقيمة (10.3 مربع) في الشكل 3-5 أقل من إجمالي المسافة المقطوعة (14 مربع) هي مثال على خاصية عامة للمتجهات. (تذكر أن **المتجهات** لها مقدار واتجاه.)

أما بالنسبة للحركة أحادية البعد، فإننا نستخدم الأسهم لتمثيل المتجهات. يتناسب طول السهم مع مقدار المتجه. يُوضح طول السهم بالشُرَط في الشكل 3-3 والشكل 3-5، يشير السهم في نفس اتجاه المتجه. فيما يخص الحركة ثنائية الأبعاد، يمكن تمثيل مسار الجسم بثلاثة متجهات: متجه المسار المستقيم بين النقطتين الأولى والنهائية، ومتجه المركبة الأفقية للحركة، ومتجه المركبة الرأسية للحركة. تضاف المركبتان الأفقية والرأسية للحركة معًا لإعطاء المسار المستقيم. على سبيل المثال، لاحظ المتجهات الثلاثة في الشكل 3-5. الأول يمثل إزاحة 9 مربعات شرقًا. يمثل الثاني إزاحة 5 مربعات شمالًا. يُجمع هذان المتجهان لإعطاء المتجه الثالث، المُمثل لإزاحة كلية مقدارها 10.3 مربع. المتجه الثالث هو المسار المستقيم بين النقطتين. في هذا المثال، لاحظ أن المتجهين المجموعين متعامدان مع بعضها البعض وبالتالي يشكلان، مع المتجه المحصل، مثلثًا قائم الزاوية. هذا يعني أنه يمكننا استخدام مبرهنة فيثاغورس لحساب مقدار الإزاحة الكلية. (لاحظ أنه لا يمكننا استخدام مبرهنة فيثاغورس لجمع متجهين غير متعامدين. سندرس تقنيات لجمع المتجهات التي لها أي اتجاه، وليس فقط المتعامدة، في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية** و**جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية**.)

### استقلالية الحركات المتعامدة

الشخص الذي يسلك المسار الموضح في الشكل 3-5 يمشي شرقًا ثم شمالًا (اتجاهان متعامدان). المسافة التي يمشيها هو شرقًا، تتأثر فقط بحركته أو حركتها باتجاه الشرق. وبالمثل، فإن المسافة التي يمشيها شمالًا، تتأثر فقط بحركته باتجاه الشمال.

#### استقلالية الحركة

المركبتين الأفقية والرأسية للحركة ثنائية الأبعاد مستقلة عن بعضها البعض. أي حركة في الاتجاه الأفقي لا تؤثر على الحركة في الاتجاه الرأسي والعكس صحيح.

هذا صحيح في موقف بسيط مثل السير في اتجاه واحد أولاً، متبوعًا بآخر. وينطبق ذلك أيضًا على الحركة الأعقد التي تتضمن حركة في اتجاهين في آن. على سبيل المثال، دعنا نقارن حركة كل من كرتي بيسبول. تُسقط كرة من السكون، وفي نفس اللحظة، تُلقى أخرى أفقيًا من نفس الارتفاع وتتبع مسارًا منحنيًا. التقط ستروبوسكوب مواضع الكرتين عند فترات زمنية متساوية خلال سقوطها.

Chart

Description automatically generated

الشكل 3-6 يوضح حركة كرتين متطابقتين- إحداهما تسقط من سكون والأخرى لها سرعة أفقية أولية. كل موضع لاحق، هو موضع الكرتين عند نفس الزمن. تمثل الأسهم السرعتين الأفقية والرأسية عند كل موضع. الكرة على اليمين لها سرعة أفقية ابتدائية، بينما الكرة على اليسار ليس لها سرعة أفقية. على الرغم من الاختلاف في السرعة الأفقية، فإن السرعة والمواضع الرأسية متطابقة لكلتا الكرتين. هذا يدل على أن الحركتين الرأسية والأفقية مستقلتان.

من اللافت للنظر أنه لكل لقطة من الستروبوسكوب، المواضع الرأسية للكرتين متطابقة. يشير هذا التطابق إلى أن الحركة الرأسية مستقلة عن الحركة الأفقية. (بافتراض عدم وجود مقاومة للهواء، فإن الحركة الرأسية لجسم يسقط تتأثر بالجاذبية فقط، ولا تتأثر بأي قوى أفقية.) يُظهر الفحص الدقيق للكرة الملقاة أفقيًا أنها تقطع نفس المسافة الأفقية بين اللقطات. هذا يرجع إلى حقيقة أنه لا توجد قوى مؤثرة على الكرة في الاتجاه الأفقي بعد رميها. هذه النتيجة تعني أن السرعة الأفقية ثابتة، ولا تتأثر بالحركة الرأسية ولا بالجاذبية (الرأسية). لاحظ أن هذه الحالة صحيحة فقط في الظروف المثالية. في العالم الحقيقي، ستؤثر مقاومة الهواء على سرعة الكرتين في كلا الاتجاهين الأفقي والرأسي.

يتكون المسار المنحني، ثنائي الأبعاد، للكرة الملقاة أفقيًا من حركتين مستقلتين أحاديتا البعد (أفقية ورأسية). إن مفتاح تحليل هذه الحركة، التي تسمى حركة المقذوفات، هو تحليلها إلى حركتين على طول اتجاهين متعامدين. يمكن تحليل الحركة ثنائية الأبعاد إلى مركبتين متعامدتين لأن المركبتين مستقلتان عن بعضهما البعض. سنرى طريقة تحليل المتجهات في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية** و**جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية**. سنجد أن مثل هذه التقنيات مفيدة في العديد من مجالات الفيزياء.

## 3-2 جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية

Map

Description automatically generated

الشكل 3-8 يمكن تحديد الإزاحة بيانيًا باستخدام خريطة ذات مقياس، مثل خريطة جزر هاواي في الصورة. تشتمل الرحلة من هاواي إلى مولوكا على عدد من أجزاء الرحلة. يمكن جمع هذه الأجزاء بيانياً باستخدام مسطرة لتحديد إجمالي الإزاحة ثنائية الأبعاد للرحلة. (credit: US Geological Survey)

### المتجهات في بعدين

**المتجه** كمية لها مقدار واتجاه. الإزاحة والسرعة والتسارع والقوة، على سبيل المثال، كلها متجهات. في الحركة أحادية البعد أو الحركة في خط مستقيم، يمكن تحديد اتجاه المتجه ببساطة بعلامة زائد أو ناقص. ومع ذلك، في بعدين (2D)، نحدد اتجاه المتجه بالنسبة لإطار مرجعي (أي، نظام إحداثيات)، باستخدام سهم له طول يتناسب مع مقدار المتجه ويشير في اتجاه المتجه.

يوضح الشكل 3-9 مثال على التمثيل البياني للمتجه، باستخدام مثال الإزاحة الإجمالية للشخص الذي يمشي في مدينة الذي ناقشناه في **الكينماتيكا في بعدين: مقدمة**. سنستخدم نظام الترميز القائل بأن الرمز الذي فوقه سهم مثل ، يُشير إلى المتجه . يُشار إلى مقداره بالرمز دون السهم مثل واتجاهه بالرمز.

ملحوظة: في الرسوم التوضيحية يُستخدم نظام آخر، فيه يُشار إلى المتجه برمز غامق مثل  وإلى مقداره بالرمز .

#### المتجهات في هذا الكتاب

في هذا الكتاب، سنمثل المتجه بمتغير فوقه سهم. على سبيل المثال، سوف نمثل القوة بالمتجه ، والتي لها مقدار واتجاه. سنمثل مقدار المتجه بالمتغير فقط دون السهم، مثل ، وسنشير إلى اتجاهه بالزاوية .

Diagram

Description automatically generated

9 مربعات شرقًا

نقطة البداية

مسار المروحية  
10.3 مربع

5 مربعات شمالًا

الشكل 3-9 شخص يمشي 9 مربعات شرقًا و5 مربعات شمالًا. الإزاحة 10.3 مربعات بزاوية شمال الشرق.

A picture containing text, device

Description automatically generated

10.3 وحدة

الشكل 3-10 لوصف المحصلة للشخص الذي يمشي في المدينة في الشكل 3-9 بيانيًا، نرسم متجه يمثل الإزاحة الكلية . باستخدام منقلة (أداة قياس الزوايا)، نرسم خط بزاوية بالنسبة للمحور الأفقي (اتجاه الشرق). الطول للسهم يتناسب مع مقدار المتجه ويقاس بمسطرة على طول الخط. في هذا المثال، المقدار للمتجه هو وحدات، واتجاهه ( ) شمال الشرق.

### جمع المتجهات: طريقة "رأس إلى ذيل"

طريقة "**رأس إلى ذيل"** طريقة بيانية لجمع المتجهات الموضحة في الشكل 3-11 أدناه وفي الخطوات التالية. **ذيل** المتجه هو نقطة بداية المتجه، ورأس المتجه هو رأس السهم (النهاية المدببة للسهم).

A picture containing text, device, gauge

Description automatically generated

10.3 وحدة

الشكل 3-11 طريقة **"رأس إلى ذيل"**: طريقة رأس إلى ذيل لجمع المتجهات بيانيًا موضحة لإزاحتي الشخص الذي يمشي في المدينة في الشكل 3-9. (أ) ارسم متجهًا يمثل الإزاحة إلى الشرق. (ب) ارسم متجهًا يمثل الإزاحة إلى الشمال. يجب أن تنشئ ذيل هذا المتجه من رأس المتجه الأول الذي يشير إلى الشرق. (ج) ارسم خطًا من ذيل المتجه الذي يشير إلى الشرق إلى رأس المتجه الذي يشير إلى الشمال لتكوين المجموع أو **المحصلة** . يتناسب طول السهم مع مقدار المتجه 10.3 وحدة. واتجاهه هو الزاوية مع اتجاه الشرق (أو المحور الأفقي) الذي يمكن قياسه بمنقلة يساوي .

**الخطوة** 1: مثّل المتجه الأول عن طريق رسم سهم (9 مربعات إلى الشرق) باستخدام المسطرة والمنقلة.

Chart, histogram

Description automatically generated

9 وحدات

الشكل 3-12

**الخطوة** 2: مثّل المتجه الثاني عن طريق رسم سهم (5 مربعات إلى الشمال)، ضع ذيل المتجه الثاني على رأس المتجه الأول.

Chart, box and whisker chart

Description automatically generated

الشكل 3-13

**الخطوة** 3: إذا كان هناك المزيد من المتجهات، فاستمر في هذه العملية لجمع كل هذه المتجهات. لاحظ أنه في مثالنا، يوجد متجهان فقط، لذلك انتهينا.

**الخطوة** 4: ارسم سهم من ذيل المتجه الأول إلى رأس المتجه الأخير. هذا هو ناتج الجمع، أو **محصلة** المتجهين.

A picture containing text, device

Description automatically generated

10.3 وحدة

الشكل 3-14

**الخطوة** 5: لمعرفة **مقدار** المحصلة، قس طوله بمسطرة. (لاحظ أنه في معظم الحسابات، سنستخدم مبرهنة فيثاغورس لتحديد هذا الطول).

**الخطوة** 6. للحصول على **اتجاه** **المحصلة**، قس الزاوية التي يصنعها مع الإطار المرجعي باستخدام منقلة. (لاحظ أنه في معظم الحسابات، سنستخدم العلاقات المثلثية لتحديد هذه الزاوية.)

تقتصر صحة طريقة جمع المتجهات بيانيًا على دقة الرسم ودقة أدوات القياس. وهي صالحة لأي عدد من المتجهات.

**جمع المتجهات بيانيًا باستخدام طريقة "رأس إلى زيل": امرأة تتمشى**  
استخدم الطريقة البيانية لجمع المتجهات لإيجاد الإزاحة الكلية للشخص الذي يسير في المسارات الثلاثة التالية (الإزاحات). أولاً، تمشي 25.0 مترًا في اتجاه شمال الشرق. ثم تمشي مسافة 23.0 مترًا متجهة شمال الشرق. أخيرًا، استدارت وسارت 32.0 مترًا في اتجاه جنوب الشرق.



**مثال 3-1**

**طريقة الحل**مثل كل متجهات الإزاحة بيانيًا، سمي المتجهات كالآتي: الأول والثاني والثالث ، اجعل طول السهم متناسب مع المسافة التي يمثلها وحدد الاتجاهات بالنسبة لاتجاه الشرق. ستوفر طريقة "رأس إلى ذيل" الموضحة أعلاه طريقة لتحديد مقدار واتجاه الإزاحة المحصلة، المشار إليها بـ .

**الحل**

(1) ارسم متجهات الإزاحة الثلاثة.

A picture containing text, device, gauge

Description automatically generated

الشكل 3-15

(2) ضع رأس كل متجه على ذيل متجه آخر (وفقًا لطريقة "رأس إلى ذيل") مع الحفاظ على مقدار واتجاه كل متجه.

Chart, line chart

Description automatically generated

الشكل 3-16

(3) ارسم المحصلة،

Chart, diagram, line chart

Description automatically generated

الشكل 3-17

(4) استخدم مسطرة لقياس مقدار  ، ومنقلة لقياس اتجاه . يمكن تحديد اتجاه المحصلة بعدة طرق، أسهل طريقة هي قياس الزاوية بين المتجه وأقرب محور أفقي أو رأسي. نظرًا لأن المتجه الناتج يقع جنوب المحور المشير باتجاه الشرق، فإننا نقلب المنقلة رأسًا على عقب ونقيس الزاوية بين المحور المتجه شرقًا والمتجه.

A picture containing chart

Description automatically generated

الشكل 3-18

في هذه الحالة، الإزاحة الكلية مقدارها 50.0 م وفي اتجاه جنوب الشرق. باستخدام مقدار المتجه واتجاهه، يمكن التعبير عن هذا المتجه بهذه الطريقة: و جنوب الشرق.

**المناقشة**  
يمكن تطبيق الطريقة البيانية " رأس إلى ذيل" لجمع المتجهات على أي عدد من المتجهات. من المهم أيضًا ملاحظة أن المحصلة مستقلة عن الترتيب الذي تتم فيه عملية جمع المتجهات. لذلك، يمكننا جمع المتجهات بأي ترتيب كما هو موضح في الشكل 3-19 وسنحصل – دائمًا- على نفس الحل.

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-19

هنا، نرى أنه عند جمع نفس المتجهات بترتيب مختلف، نحصل على نفس الحل. هذه الخاصية صحيحة في كل الحالات وهي خاصية مهمة للمتجهات. جمع المتجهات **تبادلي**. يمكن جمع المتجهات بأي ترتيب.

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑1 |  |

(هذا صحيح أيضًا لجمع الاعداد - تحصل على نفس النتيجة سواء قمت بجمع أو ، على سبيل المثال).

### طرح المتجهات

طرح المتجهات هو امتداد، مباشر، لجمع المتجهات. لتعريف الطرح (سنفترض أننا نريد طرح من ، نكتب ، يجب علينا أولاً تحديد ما نعنيه بالطرح. يُعرَّف سالب المتجه بأنه ، بيانياً، يكون لسالب أي متجه نفس المقدار، ولكن عكس الاتجاه، كما هو موضح في الشكل 3-20. أي أن، له طول مساوي لـ ، لكنه يشير إلى الاتجاه المعاكس. ببساطة، نقلب المتجه، ليشير إلى الاتجاه المعاكس.

A picture containing text, device, gauge

Description automatically generated

الشكل 3-20 سالب المتجه هو مجرد متجه آخر له نفس المقدار، ولكنه يشير إلى الاتجاه المعاكس. لذلك، سالب المتجه ؛ له نفس المقدار، ولكن في الاتجاه المعاكس.

يُعرَّف طرح المتجه من المتجه ببساطة على أنه جمع و . لاحظ أن الطرح الاتجاهي هو جمع سالب المتجه المطروح. ترتيب الطرح لا يؤثر على الناتج.

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑2 |  |

هذا مشابه لطرح الكميات العددية (على سبيل المثال، ). مرة أخرى، تكون النتيجة مستقلة عن الترتيب الذي تُجرى به عملية الطرح. عند طرح المتجهات بيانياً، يتم استخدام الأساليب الموضحة أعلاه، كما يوضح المثال التالي.

**طرح المتجهات بيانيًا: امرأة تبحر بقارب**  
تتبع المرأة، التي تبحر بقارب في الليل، الاتجاهات المؤدية إلى الرصيف. نصت التعليمات على الإبحار أولاً مسافة 27.5 مترًا في اتجاه شمال الشرق من موقعها الحالي، ثم السفر 30.0 مترًا في اتجاه شمال الشرق (أو غرب الشمال). إذا أخطأت المرأة وسافرت في الاتجاه المعاكس في الجزء الثاني من الرحلة، فأين تنتهي؟ قارن هذا الموقع بموقع الرصيف.



**مثال 3-2**

A picture containing text, gauge, device

Description automatically generated

الشكل 3-21

**طريقة الحل**سنمثل المرحلة الأولى من الرحلة بالمتجه ، والمرحلة الثانية من الرحلة بالمتجه . يقع الرصيف عند الموقع . إذا سافرت المرأة عن طريق الخطأ في الاتجاه المعاكس في الجزء الثاني من الرحلة، فسوف تقطع مسافة (30.0 مترًا) في اتجاه جنوب الشرق. نمثل هذا بـ ، كما هو موضح أدناه. المتجه له نفس مقدار ولكنه في الاتجاه المعاكس. وبالتالي، سوف ينتهي بها الأمر عند الموقع ، أو .

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-22

سنجري جمع اتجاهي لمقارنة موقع الرصيف ، مع الموقع الذي وصلت إليه المرأة عن طريق الخطأ ، .

**الحل**

1. لتحديد المكان الذي تصل إليه المرأة بالصدفة، ارسم المتجهين و .
2. ضع رأس المتجه على ذيل الآخر.
3. ارسم المحصلة .
4. استخدم مسطرة ومنقلة لقياس مقدار واتجاه .

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-23

في هذه الحالة، و جنوب الشرق.

1. لتحديد موقع الرصيف، نكرر نفس الطريقة لجمع المتجهين و . نحصل على المحصلة :

Chart

Description automatically generated

الشكل 3-24

في هذه الحالة، و شمال الشرق.

يمكننا أن نرى أن المرأة ستنتهي على بعد كبير عن الرصيف إذا سافرت في الاتجاه المعاكس في الجزء الثاني من الرحلة.

**المناقشة**

نظرًا لأن طرح متجه يكافئ جمع سالب المتجه المطروح (نفس المتجه، ولكن في عكس الاتجاه)، فإن الطريقة البيانية لطرح المتجهات هي نفسها طريقة الجمع.

### ضرب المتجهات في الكميات العددية

إذا قررنا أن نسير أبعد ثلاث مرات في الجزء الأول من الرحلة المذكورة في المثال السابق، فسنمشي ، أو مترًا، في اتجاه شمال الشرق. هذا مثال على ضرب عدد موجب (**كمية عددية**) في متجه. لاحظ أن المقدار يتغير، لكن الاتجاه يظل كما هو.

إذا كان العدد سالب، فإن ضربه في المتجه يغير مقدار المتجه ويكون المتجه الجديد في عكس اتجاه المتجه الأصلي. على سبيل المثال، إذا ضربت المتجه في ، يتضاعف المقدار ويُعكس الاتجاه. يمكننا تلخيص هذه القواعد في الآتي: عند ضرب المتجه في العدد ،

* يصبح مقدار المتجه القيمة المطلقة لـ
* إذا كان موجبًا، فإن اتجاه المتجه لا يتغير،
* إذا كان سالب، يُعكس الاتجاه.

في حالتنا، و . تُضرب المتجهات في أعداد في العديد من الحالات. لاحظ أن القسمة هي عكس الضرب. على سبيل المثال، القسمة على 2 هي نفسها الضرب في القيمة ( ). قواعد ضرب المتجهات في الأعداد هي نفسها للقسمة؛ عامل المقسوم عليه على أنه عدد قياسي بين 0 و1.

### تحليل المتجهات إلى مركبات

في الأمثلة أعلاه، جمعنا المتجهات لتحديد المحصلة. ومع ذلك، في كثير من الحالات، سنحتاج إلى عكس ذلك. سنحتاج إلى إيجاد المتجهات التي جمعها معًا ينتج متجه معين. في معظم الحالات، يتضمن ذلك تحديد **المركبتين** المتعامدتين لمتجه ما، على سبيل المثال، المركبتان و أو مركبتا الشمال والجنوب أو الشرق والغرب.

على سبيل المثال، قد نعلم أن الإزاحة الكلية لشخص يسير في مدينة هي 10.3 مربعات في اتجاه شمال الشرق ونريد معرفة عدد المربعات في اتجاه الشرق والشمال التي سارها الشخص. تسمى هذه الطريقة " إيجاد المركبات" أو الإزاحة في الاتجاهين الشرقي والشمالي، وهي معكوس العملية المتبعة لإيجاد الازاحة الكلية. هناك العديد من التطبيقات في الفيزياء حيث يكون هذا أمرًا مفيدًا. سنرى هذا قريبًا في **حركة المقذوفات**، وأكثر من ذلك بكثير عندما نغطي **القوى** في **علم الديناميكا: قوانين نيوتن للحركة.** إيجاد المركبات على طول المحاور المتعامدة (مثل الشمال والشرق)، جزء أساسي فيهم. ولأن المركبتين متعامدتان، المثلثات القائمة أساسية في إيجادهما. التقنيات التحليلية المقدمة في **جمع والمتجهات طرحها: الطرق التحليلية** مثالية لإيجاد المركبات.

## 3-3 جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية

تَستخدم **الطرق التحليلية** لجمع المتجهات وطرحها الهندسة وعلم المثلثات بدلًا من المسطرة والمنقلة في الطرق البيانية. مع ذلك، يستعان بجزء من الطريقة البيانية، لأنه لا يزال علينا تمثيل المتجهات بواسطة أسهم لتسهيل التصور. وبالرغم من هذا، فإن الطرق التحليلية أكثر إيجازًا وصحةً ودقةً من الطرق البيانية محدودة الصحة. يحد صحة الطرق التحليلية ودقتها، فقط، الصحة والدقة التي تعرف بها الكميات الفيزيائية.

### تحليل المتجهات الى مركبات متعامدة

تسير الطرق التحليلية والمثلثات القائمة جنبًا إلى جنب في الفيزياء لأن الحركات على طول الاتجاهات المتعامدة مستقلة عن بعضها البعض. نحتاج، غالبًا، إلى فصل المتجه إلى مركباته المتعامدة. على سبيل المثال، بالنسبة للمتجه في الشكل 3-26، قد نرغب في إيجاد المتجهين المتعامدين، و ونضيفهما لإنتاج .

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-26 المتجه ، ذيله عند أصل نظام إحداثيات، ويظهر معه مركبتاه في اتجاه و ، و . هذه المتجهات تشكل مثلث قائم الزاوية. تُلخص العلاقات التحليلية بين هذه المتجهات أدناه.

و يُعرفا على أنهما مركبتا على طول المحورينو. المتجهات الثلاثة ، و تشكل مثلث قائم:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑3 |  |

لاحظ أن هذه العلاقة بين مركبتي المتجه والمتجه تكون صحيحة فقط للكميات المتجهة (التي لها كل من مقدار واتجاه). هذه العلاقة لا تنطبق على المقادير فقط. على سبيل المثال، إذا كان في اتجاه الشرق و في اتجاه الشمال و في اتجاه شمال الشرق، فمن الصحيح أن  
 . مع ذلك، فليس صحيحًا أن مجموع مقادير المركبات يساوي مقدار المحصلة. أي أن،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑4 |  |

وهكذا،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑5 |  |

إذا كان المتجه معلومًا، فإن مقداره (طوله) وزاويته (اتجاهه) معلومان. لإيجاد مركبتي المتجه في اتجاه و ، نستخدم علاقات المثلث القائم التالية.

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑6 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑7 |  |

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-27 تربط المتطابقات المثلثية بين مقداري المركبتين للمتجهين و ، والمحصلة والزاوية . هنا نرى أن و .

افترض، على سبيل المثال، أن هو المتجه الممثل للإزاحة الكلية لشخص يمشي في المدينة التي قابلناها في الكينماتيكا في بعدين: مقدمة وجمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية.

Chart, line chart

Description automatically generated

الوجهة

نقطة البداية

الشكل 3-28 يمكننا استخدام العلاقتين و لتحديد مقدار المركبتين الأفقية والرأسية في هذا المثال.

إذا كان و ، فإن

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑8 |  |
| ‏3‑9 |  | |

### حساب المحصلة

إذا عُلِمت المركبتان المتعامدتان و لمتجه، يمكن إيجاد تحليليًا. لإيجاد المقدار والاتجاه لمتجه بواسطة مركبتيه المتعامدين و ، نستخدم العلاقات التالية:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑10 |  |
| ‏3‑11 |  | |

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-29 يمكن تحديد مقدار واتجاه المحصلة بمجرد حساب المركبتين الأفقية والرأسية .

لاحظ أن المعادلة هي مبرهنة فيثاغورس التي تربط بين ضلعي المثلث القائم الزاوية وطول الوتر. على سبيل المثال، إذا كانت و ، 9 و5 مربعات، على التوالي، فإن   
 ، وهذا يتسق مع مثال الشخص الذي يسير في المدينة. وأخيرًا، فإن الاتجاه هو ، نفس الاتجاه، أيضًا.

تحديد المتجهات ومركبات المتجهات بالطرق التحليلية

تُستخدم المعادلتان و لإيجاد المركبتين المتعامدتين للمتجه - أي الانتقال من و إلى و . المعادلتان و تستخدم لإيجاد المتجه من مركبتيه المتعامدتين—أي، الانتقال من و إلى و . كلتا العمليتان أساسيتان للطرق التحليلية لجمع المتجهات وطرحها.

### جمع المتجهات باستخدام الطرق التحليلية

لمعرفة كيفية جمع متجهات باستخدام المركبتين المتعامدتين، انظر الشكل 3-30، حيث يُجمع المتجهان و لإنتاج .

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-30 المتجهان و هما جزآ المشي، و هي المحصلة أو الإزاحة الكلية. يمكنك استخدام طرق تحليلية لتحديد مقدار واتجاه .

إذا كان و يمثلان جزأين من المشي (إزاحتان)، فهذا يعني أن هي الإزاحة الكلية. الشخص الذي يمشي ينتهي به الأمر عند رأس . هناك طرق عديدة للوصول إلى نفس النقطة. على وجه الخصوص، يمكن للشخص أن يسير أولًا في اتجاه ، ثم في اتجاه . هذان المساران هما المركبتان الأفقية والرأسية، و . إذا كنا نعلم و ، يمكننا أن نجد و باستخدام المعادلتين و  
 . عندما تستخدم الطريقة التحليلية لجمع المتجهات، يمكنك تحديد المركبات أو مقدار واتجاه المتجه.

**الخطوة** 1: حدد المحورين و اللذين سيستخدمان في المسألة. ثم جد مركبات كل متجه على طول كل محور. استخدم المعادلتين و لإيجاد المركبات. في الشكل 3-31، المركبات هي و و و . الزوايا التي يصنعها المتجهين و مع المحور هي و ، على التوالي.

Chart, line chart

Description automatically generated

الشكل 3-31 لجمع المتجهين و ، حدد أولًا المركبات الأفقية والرأسية. المركبات هي و و و ، المتجهات المنقطة في الصورة.

**الخطوة** 2. جد مركبتي المحصلة على طول كل محور، عن طريق جمع مركبات المتجهات على طول هذا المحور. كما هو مبين في الشكل 3-32،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑12 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑13 |  |

Chart, line chart

Description automatically generated

الشكل 3-32 مجموع مقدار و هو مقدار المحصلة على المحور الأفقي. بالمثل، مجموع مقدار و هو مقدار المحصلة على المحور الرأسي.

المركبات الموجودة على نفس المحور، مثل المحور الأفقي، هي متجهات على طول نفس الخط، وبالتالي يمكن جمعها مثل الأعداد. وينطبق الشيء نفسه على المركبات الموجودة على طول المحور الرأسي. (على سبيل المثال، يمكن السير 9 مربعات باتجاه الشرق على مرحلتين، أولًا 3 مربعات شرقًا وثانيًا 6 مربعات شرقًا، تكون المحصلة 9 مربعات، لأنهم في نفس الاتجاه.) لذلك تحليل المتجهات إلى مركبات على محورين، يجعل من السهل جمعها. الآن بعد أن عرفت مركبتي ، يمكن إيجاد مقدارها واتجاهها.

**الخطوة** 3 للحصول على مقدار المحصلة ، استخدم مبرهنة فيثاغورس:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑14 |  |

**الخطوة** 4. للحصول على اتجاه المحصلة:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑15 |  |

يوضح المثال التالي هذه الطريقة لجمع المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة.

**جمع المتجهات باستخدام طرق تحليلية**  
اجمع المتجه و المبينين في الشكل 3-33، باستخدام المركبات المتعامدة على طول المحورين و . المتجه يمثل الجزء الأول من المسير، حيث يمشي الشخص في اتجاه شمال الشرق. المتجه يمثل الجزء الثاني من المسير، حيث يمشي الشخص في اتجاه شمال الشرق.



**مثال 3-3**

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-33 المتجه مقداره واتجاهه شمال المحور . المتجه مقداره واتجاهه شمال المحور . يمكن استخدام الطرق التحليلية لتحديد مقدار واتجاه .

**طريقة الحل**

مركبات و على طول المحور و تمثل المسير في اتجاه الشرق والشمال للوصول إلى نقطة النهاية. بمجرد إيجادهما، يمكن جمعهما لإيجاد المحصلة.

**الحل**   
باتباع الطريقة الموضحة أعلاه، أولًا نجد مركبات و على طول المحورين و . لاحظ أن ، ، ، و . نجد المركبات على طول محور من العلاقة ، والتي تعطي

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑16 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑17 |  |

وعلى نحو مماثل، مركبات يمكن الحصول عليها من العلاقة :

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑18 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑19 |  |

مركبتي المحصلة على طول المحورين و هما:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑20 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑21 |  |

الآن يمكننا حساب مقدار المحصلة باستخدام مبرهنة فيثاغورس:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑22 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑23 |  |

أخيرًا، نجد اتجاه المحصلة:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑24 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑25 |  |

Chart

Description automatically generated

الشكل 3-34 باستخدام الطرق التحليلية، حددنا مقدار ( ) واتجاهه ( ).

**المناقشة**

يوضح هذا المثال جمع المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة. طرح المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة مشابه تمامًا للجمع؛ إنه جمع سالب المتجه.

تُطرح المتجهات عن طريق جمع سالب المتجه. أي أن، . وبالتالي، فإن طريقة طرح المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة مطابقة لطريقة الجمع. مركبات هي سالب متجهات . وبالتالي، فإن مركبات و للمحصلة هي

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑26 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑27 |  |

وباقي الطريقة مطابقة لطريقة الجمع. (انظر الشكل 3-35.)

يُعد تحليل المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة مفيدًا جدًا في العديد من مجالات الفيزياء، لأن الكميات المتعامدة غالبًا ما تكون مستقلة عن بعضها البعض. في الجزء القادم، **حركة المقذوفات**، يساعد استخدام المركبات المتعامدة في توضيح الصورة وتبسط الفيزياء.

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-35 طرح المتجهين الموضحين في الشكل 3-30. مركبتا هي سالب مركبتي . طريقة الطرح هي نفس طريقة الجمع.

## 3-4 حركة المقذوفات

**حركة المقذوفات** هي **حركة** جسم قُذف أو رمي في الهواء ويخضع فقط لتسارع الجاذبية. يسمى الجسم المرمي **مقذوف**، لأن مساره يشبه **مسار** **المقذوفات**. حركة الأجسام الساقطة، كما تم تناولها **في أساسيات حل مسائل الحركة أحادية البعد**، هي نوع بسيط، أحادي البعد، من حركة المقذوفات التي لا يوجد فيها حركة أفقية. في هذا الجزء، نأخذ في الاعتبار حركة المقذوفات ثنائية الأبعاد، مثل حركة كرة القدم أو أي جسم آخر تكون مقاومة الهواء له مهملة.

أهم حقيقة، يجب تذكرها هنا، هي أن الحركات على طول المحاور المتعامدة مستقلة عن بعضها البعض. وبالتالي، يمكن تحليلها بشكل منفصل. تمت مناقشة هذه الحقيقة في **الكينماتيكا في بعدين: مقدمة**، حيث شاهدنا أن الحركات الرأسية والأفقية مستقلة عن بعضها البعض. مفتاح تحليل حركة المقذوفات ثنائية الأبعاد هو فصلها إلى حركتين، واحدة على طول المحور الأفقي والأخرى على طول المحور الرأسي. (هذا الاختيار للمحاور هو الأكثر منطقية، لأن التسارع بسبب الجاذبية رأسي - وبالتالي، ليس هناك تسارع على طول المحور الأفقي، عندما تكون مقاومة الهواء مهملة.) كما هو معتاد، نسمي المحور الأفقي المحور والمحور الرأسي المحور . يوضح الشكل 3-36 رمز الإزاحة، حيث تُعرّف بأنها إجمالي الإزاحة و و هما مركبتاها على طول المحورين الأفقي والرأسي، على التوالي. مقادير هذه المتجهات هي و و . (لاحظ أنه في الجزء الأخير، استخدمنا الرمز لتمثيل المتجه الذي مركبتاه و . إذا واصلنا على هذا النمط، كنا سنرمز للإزاحة بالرمز ومركبتيها بـ و . ولكن، لتبسيط الترميز، سنرمز للمركبتين بالرمزين و .)

لوصف الحركة، بالطبع، يجب أن نتعامل مع السرعة والتسارع، وكذلك مع الإزاحة. يجب أن نجد مركباتهم على طول المحورين و أيضًا. سنفترض أن جميع القوى باستثناء الجاذبية (مثل مقاومة الهواء والاحتكاك، على سبيل المثال) مهملة. في هذه الحالة، يمكننا إيجاد مركبتي التسارع بسهولة:  
 (لاحظ أن هذا يفترض أن الاتجاه لأعلى هو الاتجاه الموجب. إذا اخترت نظام احداثيات فيه الاتجاه لأسفل هو الموجب، فإن التسارع بسبب الجاذبية يكون موجب أيضًا.) لأن الجاذبية رأسية، . كلا التسارعين ثابتان، لذلك، يمكن استخدام معادلات الكينماتيكا للعجلة الثابتة.

#### مراجعة معادلات الكينماتيكا (للعجلة الثابتة)

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑28 |  |
| ‏3‑29 |  |
| ‏3‑30 |  |
| ‏3‑31 |  |
| ‏3‑32 |  |

A picture containing skiing

Description automatically generated

الشكل 3-36 الإزاحة الكلية لكرة القدم هي على أي نقطة على مسارها. المتجه له مركبتان على طول المحورين الأفقي والرأسي و . مقدار الإزاحة هو ويصنع زاوية مع الأفقي.

مع هذه الافتراضات، تُستخدم الخطوات التالية بعد ذلك لتحليل حركة المقذوفات:

**الخطوة** 1 حلل الحركة إلى مركبات أفقية ورأسية على طول المحورين و . هذان المحوران متعامدان، لذلك نحصل عليهم من خلال العلاقتين و . مقدار مركبتا الإزاحة على طول هذين المحورين هو و . مقدار مركبتي السرعة المتجهة هما و ، حيث مقدار السرعة المتجهة و اتجاهها، كما هو موضح في الشكل 3-37. يُشار إلى القيم الأولية باللاحقة السفلية 0، كالمعتاد.

**الخطوة** 2. تَعامل مع الحركة كحركتين مستقلتين أحاديتي البعد، واحدة أفقية والأخرى رأسية. معادلات الحركة الأفقية والرأسية تكون على الصور التالية:

**الحركة الأفقية ( )**

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑33 |  |
| ‏3‑34 |  |

**الحركة الرأسية ( )**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ‏3‑35 |  | |
| ‏3‑36 |  |
| ‏3‑37 |  |
| ‏3‑38 |  |

**الخطوة** 3. احسب القيم المجهولة في الحركتين المنفصلتين – إحداهما أفقية والأخرى رأسية. لاحظ أن المتغير المشترك الوحيد بين الحركتين هو الزمن . إجراءات حل المسائل هنا هي نفسها المذكورة في **الكينماتيكا أحادية البعد** وهي موضحة في الأمثلة أدناه.

**الخطوة** 4. أعد الجمع بين الحركتين (الأفقية والرأسية) لإيجاد الإزاحة الكلية والسرعة المتجهة . نظرًا لأن الحركات على طول و متعامدتان، فإننا نجد هذه المتجهات باستخدام التقنيات الموضحة في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية؛** باستخدام العلاقتين و ، حيث اتجاه الإزاحة و هي اتجاه السرعة :

الإزاحة والسرعة الكلية

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑39 |  |
| ‏3‑40 |  |
| ‏3‑41 |  |
| ‏3‑42 |  | |

Chart

Description automatically generated

الشكل 3-37 (a) نحلل حركة المقذوف ثنائية الأبعاد إلى حركتين مستقلتين أحاديتي البعد على طول المحورين الأفقي والرأسي. (b) الحركة الأفقية بسيطة، لأن و ثابت. (c) السرعة الرأسية تقل كلما ارتفع الكائن؛ عند نقطة أقصى ارتفاع، السرعة الرأسية تساوي صفر. مع سقوط الكائن ناحية الأرض مرة أخرى، السرعة الرأسية تزداد في المقدار، مرة أخرى، لكن في عكس اتجاه السرعة الرأسية الأولية. (d) الحركتان الأفقية والرأسية تجمعان معًا للحصول على السرعة المتجهة الكلية عند أي نقطة على المسار.

**قذيفة الألعاب النارية تنفجر عالياً بعيدًا**  
أثناء عرض الألعاب النارية، أطلقت قذيفة في الهواء بسرعة أولية تبلغ 70.0 م / ث بزاوية فوق الأفقي، كما هو موضح في الشكل 3-38. يُضبط الفتيل لإشعال القذيفة بمجرد وصولها إلى أعلى نقطة فوق سطح الأرض. (أ) احسب الارتفاع الذي تنفجر عنده القذيفة. (ب) كم من الوقت يمضي بين إطلاق القذيفة والانفجار؟ (ج) ما الإزاحة الأفقية للقذيفة عندما تنفجر؟



**مثال 3-4**

**طريقة الحل**

لأن مقاومة الهواء مهملة بالنسبة للقذيفة قبل الانفجار، يمكن استخدام طريقة التحليل الموضحة أعلاه. يمكن تقسيم الحركة إلى حركتين أفقية ورأسية حيث و . يمكننا بعد ذلك افتراض أن و كلاهما يساوي صفر، ثم نحسب الكميات المطلوبة.

**الحل لـ (أ)**

نعني بكلمة "الارتفاع" الموضع الرأسي فوق نقطة البداية. تكون نقطة أقصى ارتفاع، عند . نظرًا لأننا نعلم السرعتين الابتدائية والنهائية بالإضافة إلى الموضع الأولي، فإننا نستخدم المعادلة التالية لإيجاد :

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑43 |  |

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-38 مسار قذيفة الألعاب النارية. ضُبط الفتيل لتفجير القذيفة عند أعلى نقطة في مسارها، والتي وجدنا أنها تقع على ارتفاع 233 مترًا وعلى بعد 125 مترًا أفقيًا.

نظرًا لأن كل من و يساوي صفر، تصبح المعادلة أبسط

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑44 |  |

منها نحسب

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑45 |  |

الآن يجب أن نجد ، مركبة السرعة الابتدائية الرأسية. تعطى بالعلاقة ، حيث هي السرعة الابتدائية وتساوي ، و هي الزاوية الابتدائية. لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑46 |  |

و تساوي

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑47 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑48 |  |

**مناقشة لـ (أ)**

لاحظ أنه لأن الاتجاه لأعلى موجب، فإن السرعة الابتدائية موجبة، وكذلك أقصى ارتفاع، لكن التسارع بسبب الجاذبية سالب. لاحظ، أيضًا، أن أقصى ارتفاع يعتمد فقط على المركبة الرأسية للسرعة الأولية، بحيث يصل أي مقذوف ذي مركبة سرعته الأولية تساوي 67.6 م / ث إلى أقصى ارتفاع قدره 233 م (عند إهمال مقاومة الهواء). الأعداد في هذا المثال معقولة بالنسبة لعروض الألعاب النارية الكبيرة، التي تصل قذائفها إلى مثل هذه الارتفاعات قبل أن تنفجر. في الحياة العملية، مقاومة الهواء ليست مهملة تمامًا؛ أي أن قيمتها صغيرة، وبالتالي يجب أن تكون السرعة الأولية أكبر، إلى حد ما، من المذكورة في المثال السابق للوصول إلى نفس الارتفاع.

**الحل (ب)**

كما هو الحال في العديد من مسائل الفيزياء، هناك أكثر من طريقة لحساب زمن الوصول إلى أعلى نقطة. في هذه الحالة، أسهل طريقة هي استخدام العلاقة . لأن تساوي صفر، هذه المعادلة تصبح، أبسط،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑49 |  |

لاحظ أن السرعة الرأسية النهائية عند أقصى ارتفاع تساوي صفر. لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑50 |  |

**مناقشة لـ (ب)**

هذه الزمن مناسب، أيضًا، للألعاب النارية الكبيرة. إذا رأيت إطلاق الألعاب النارية من قبل، ستلاحظ مرور عدة ثوان قبل انفجار القذيفة. (هناك طريقة أخرى لإيجاد الزمن وهي باستخدام العلاقة  
 وحل المعادلة التربيعية لحساب الزمن .)

**الحل لـ (ج)**

لأن مقاومة الهواء مهملة، والسرعة الأفقية ثابتة، كما هو موضح أعلاه. الإزاحة الأفقية هي السرعة الأفقية مضروبة في الزمن، من العلاقة ، حيث تساوي صفر:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑51 |  |

حيث هي المركبة الأفقية للسرعة، التي تعطى بالعلاقة . لذلك

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑52 |  |

الزمن لكلا الحركتين له نفس القيمة، لذلك تساوي

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑53 |  |

**المناقشة لـ(ج)**

سرعة الحركة الأفقية ثابتة في غياب مقاومة الهواء. يمكن أن تكون الإزاحة الأفقية مفيدة في منع شظايا الألعاب النارية من السقوط على المتفرجين. بمجرد أن تنفجر القذيفة، يكون لمقاومة الهواء تأثير كبير، لذلك، ستسقط العديد من الشظايا لأسفل مباشرةً.

عند حل الجزء (أ) في المثال السابق، التعبير المستخدم لحساب يمكن استخدامه لحركة أي مقذوف عند إهمال مقاومة الهواء. تذكر أنه إذا كان أقصى ارتفاع ، فإن

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑54 |  |

تُعرّف هذه المعادلة أقصى ارتفاع للمقذوف وتعتمد فقط على المركبة الرأسية للسرعة الابتدائية.

#### تحديد نظام الإحداثيات

من المهم إعداد نظام إحداثيات عند تحليل حركة المقذوفات. جزء من تحديد نظام الإحداثيات هو تحديد نقطة الأصل للموضعين و . غالبًا ما يكون من الملائم اختيار نقطة الأصل كالموضع الأولي للجسم؛ أي أن و . من المهم أيضًا تحديد الاتجاهات الموجبة والسالبة في الاتجاهين و . عادةً، نحدد الاتجاه الرأسي الموجب بأنه الاتجاه الصاعد لأعلى، وعادة ما يكون الاتجاه الأفقي الموجب هو اتجاه حركة الجسم. إذا كان نظام الإحداثيات كما ذكرنا، فإن التسارع الرأسي، ، سالب (لأنه يتجه لأسفل نحو الأرض). من المفيد أحيانًا أخرى تحديد الإحداثيات بطريقة مختلفة. على سبيل المثال، إذا كنت تحلل حركة كرة ألقيت لأسفل من أعلى جرف، فقد يكون من المنطقي اختيار الاتجاه لأسفل هو الاتجاه الموجب؛ لأن حركة الكرة تكون فقط في الاتجاه لأسفل. في هذه الحالة، التسارع سالب.

**حساب حركة المقذوف: قذيفة هوت روك**  
كيلويا في هاواي هو البركان الأكثر نشاطًا في العالم. تقذف البراكين النشطة جدًا الصخور الحمراء الساخنة والحمم البركانية وليس الدخان والرماد. افترض قذف صخرة كبيرة من البركان بسرعة 25.0 م / ث وبزاوية فوق الأفقي، كما هو موضح في الشكل 3-39. تضرب الصخرة جانب البركان على ارتفاع 20.0 مترًا أقل من الارتفاع الأولي. (أ) احسب الزمن الذي تستغرقه الصخرة لاتباع هذا المسار. (ب) ما مقدار واتجاه سرعة الصخرة عند الاصطدام؟



**مثال 3-5**

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-39 مسار صخرة مقذوفة من بركان كيلويا.

**طريقة الحل**

مرةً أخرى، سيتيح لنا تحليل هذه الحركة ثنائية الأبعاد إلى حركتين مستقلتين أحاديتي البعد إيجاد الكميات المطلوبة. يعتمد الزمن الذي تقضيه القذيفة في الهواء على الحركة الرأسية وحدها. سنحسب أولًا. بينما ترتفع الصخور وتنخفض رأسيًا، تستمر الحركة الأفقية بسرعة ثابتة. يَطلب هذا المثال السرعة النهائية. وبالتالي، سنحتاج إلى جمع السرعتين الرأسية والأفقية للحصول على و عند الزمن النهائي المحسوب في الجزء الأول من المثال.

**الحل ل (أ)**

خلال وجودها في الهواء، ترتفع الصخرة ثم تنخفض إلى الموضع النهائي أقل من الارتفاع الابتدائي. يمكننا أن نجد زمن هذه الحركة باستخدام

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑55 |  |

إذا اعتبرنا الموضع الأولي يساوي صفر، فإن الموضع النهائي . السرعة الابتدائية الرأسية تساوي . بالتعويض عن القيم المعلومة نحصل على

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑56 |  |

بإعادة ترتيب المعادلة التربيعية للمتغير :

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑57 |  |

هذا التعبير هو معادلة تربيعية لها الصورة ، حيث الثوابت و و . نحصل على حلول هذه المعادلة من الصيغة التربيعية:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑58 |  |

من هذه المعادلة نحصل على حلين: و . القيمة السالبة للزمن تقتضي وصول الصخرة لنقطة النهاية قبل بداية الحركة، وهذا حل غير منطقي لذلك نرفضه.

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑59 |  |

**مناقشة لـ (أ)**

يعتمد زمن حركة المقذوف على حركته الرأسية فقط. لذا فإن أي مقذوف سرعته الأولية الرأسية 14.3 م / ث ويهبط 20.0 م تحت موضعه الأولي، سوف يقضي 3.96 ث في الهواء.

**الحل لـ (ب)**

باستخدام القيم المعلومة لنا، يمكننا حساب و وجمعهما لحساب السرعة الكلية والزاوية التي تصنعها مع المحور الأفقي. لأن ثابتة، يمكننا حسابها عند أي موضع أفقي. لذلك:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑60 |  |

نحصل على السرعة النهائية من المعادلة:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑61 |  |

وجدنا في الجزء (a) أن تساوي . لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑62 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑63 |  |

لإيجاد قيمة السرعة النهائية ، نجمع مركبتيها المتعامدتين، باستخدام العلاقة التالية:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑64 |  |

منها نحصل على

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑65 |  |

يمكننا حساب الاتجاه من المعادلة:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑66 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑67 |  |

وهكذا،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑68 |  |

**مناقشة لـ (ب)**

الزاوية السالبة تعني أن اتجاه السرعة تحت الأفقي. تتسق هذه النتيجة مع حقيقة أن السرعة الرأسية النهائية سالبة ومن ثم تتجه إلى الأسفل - كما قد تتوقع لأن الارتفاع النهائي أقل بمقدار 20.0 مترًا من الارتفاع الأولي. (انظر الشكل 3-39.)

من أهم الأشياء التي توضحها حركة المقذوفات أن الحركتين الرأسية والأفقية مستقلتان عن بعضها البعض. كان جاليليو أول شخص يفهم هذه السمة تمامًا. استخدمها للتنبؤ بمدى القذيفة. على الأرض المستوية، نُعرف **المدى** بأنه المسافة الأفقية التي تقطعها قذيفة. كان جاليليو وآخرين مهتمين بمدى المقذوفات للأغراض العسكرية في المقام الأول - مثل تصويب المدافع. ومع ذلك، فإن دراسة مدى المقذوفات يمكن أن يلقي الضوء على ظواهر أخرى مثيرة للاهتمام، مثل مدارات الأقمار الصناعية حول الأرض. دعونا نبحث في مدى القذيفة أكثر.

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-40 مسارات المقذوفات على الأرض المستوية. (a) كلما زات السرعة الابتدائية ، زاد المدي للمقذوف لنفس زاوية القذف الابتدائية. (b) تأثير الزاوية الابتدائية على مدي المقذوف لنفس السرعة الابتدائية. لاحظ أن المدى هو نفسه لـ و ، لكن، أقصى ارتفاع مختلف.

كيف تؤثر السرعة الابتدائية للقذيفة على مداها؟ من الواضح أنه كلما زادت السرعة الأولية، زاد المدى، كما هو موضح في الشكل 3-40 (أ). الزاوية الأولية لها أيضًا تأثير كبير على المدى، كما هو موضح في الشكل 3-40 (ب). فيما يخص السرعة الأولية الثابتة، مثل التي يمكن أن ينتجها مدفع، يكون أقصى مدى هو المدى عند الزاوية . هذا صحيح فقط عند إهمال مقاومة الهواء. إذا أخذت مقاومة الهواء بعين الاعتبار، تكون الزاوية القصوى تقريبًا. ومن المثير للاهتمام، أنه لكل زاوية ابتدائية ماعدا ، هناك زاويتان تعطيان نفس المدى- مجموع هاتين الزاويتين . يعتمد المدى أيضًا على قيمة تسارع الجاذبية . تمكن رائد الفضاء آلان شيبرد من ضرب كرة الغولف لمسافة كبيرة على القمر لأن الجاذبية تكون أضعف هناك. يُعطى مدى المقذوف على أرض مستوية حيث تكون مقاومة الهواء مهملة من العلاقة

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑69 |  |

حيث هي السرعة الأولية و هي الزاوية الأولية مع الأفقي. يُترك إثبات هذه المعادلة كتمرين للقارئ، ولكنه يتناسب مع السمات الرئيسية لمدى المقذوفات كما هو موضح.

عندما نتحدث عن مدى قذيفة على أرض مستوية، نفترض أن صغيرة جدًا مقارنة بمحيط الأرض. ومع ذلك، إذا كان المدى كبير، فإن الأرض تنحني أسفل القذيفة وتسارع الجاذبية يغير اتجاهه على طول المسار، ولذلك المدى أكبر مما يُتوقع بمعادلة المدى المذكورة أعلاه (انظر الشكل 3-41). إذا كانت السرعة الأولية كبيرة بما فيه الكفاية، فإن المقذوف يدخل مدار. هذه الاحتمالية معروفة قبل قرون من تحقيقها. عندما يكون جسم ما في مدار، تنحني الأرض تحتها بنفس معدل سقوطه. وهكذا، يسقط الجسم باستمرار، ولكنه لا يصطدم بالسطح أبدًا. ستُغطى هذه الجوانب وغيرها من جوانب الحركة المدارية، مثل دوران الأرض، بأسلوب تحليلي وبعمق أكبر لاحقًا في هذا الكتاب.

نرى أن التفكير في موضوع واحد فقط، مثل مدى المقذوف، يمكن أن يقودنا إلى مواضيع أخرى، مثل مدارات الأرض. في **جمع السرعات**، سوف ندرس جمع السرعات، والتي تعد جانبًا مهمًا في الكينماتيكا ثنائية الأبعاد، وسوف نقدم أيضًا رؤى تتجاوز الموضوع نفسه.

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-41 قذيفة ثم قمر صناعي. في كل حالة موضحة هنا، يتم إطلاق قذيفة من برج مرتفع للغاية لتجنب مقاومة الهواء. كلما زادت السرعة الأولية، ازداد نطاق القذيفة، ويصبح أطول مما سيكون عليه على الأرض المستوية، لأن الأرض تنحني تحت مسار القذيفة. إذا كانت السرعة الأولية كبيرة بما يكفي، يتحقق المدار.

## 3-5 جمع السرعات

### السرعة النسبية

إذا جدف شخص بقارب عبر نهر سريع التدفق وحاول التوجه مباشرة إلى الشاطئ الآخر، فإن القارب يتحرك بشكل قطري مائل بالنسبة للشاطئ، كما في الشكل 3-43. لا يتحرك القارب في الاتجاه الذي يشير إليه. السبب، أن النهر يحمل القارب في اتجاه مجرى النهر. وبالمثل، إذا حلقت طائرة صغيرة في رياح قوية، يمكنك أحيانًا أن ترى أن الطائرة لا تتحرك في الاتجاه الذي تُشير إليه، كما هو موضح في الشكل 3-44. تتحرك الطائرة للأمام بشكل مستقيم بالنسبة للهواء، لكن حركة الكتلة الهوائية بالنسبة إلى الأرض تحمل الطائرة ناحية الجانب.

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-43 قارب يحاول عبور النهر سيتحرك بشكل قطري بالنسبة إلى الشاطئ كما هو موضح. سرعتها الكلية (السهم الغامق) بالنسبة إلى الشاطئ هو مجموع سرعته بالنسبة إلى النهر وسرعة النهر بالنسبة إلى الشاطئ.

Diagram

Description automatically generated

شكل 3-44 تحمل الرياح الطائرة المتجهة شمالًا إلى الغرب وتبطئ سرعتها. لا تتحرك الطائرة بالنسبة للأرض في الاتجاه الذي تشير إليه؛ بدلًا من ذلك، تتحرك في اتجاه سرعتها الكلية (السهم الغامق).

في كلا الموقفين، يكون للجسم سرعة بالنسبة إلى وسط (مثل النهر) ويكون لهذا الوسط سرعة بالنسبة إلى مراقب ثابت. سرعة الجسم بالنسبة للمراقب هي مجموع متجهات السرعة، كما هو موضح في الشكل 3-43 والشكل 3-44. هذان الموقفان ليسا سوى حالتين من العديد من الحالات التي يكون من المفيد فيها جمع السرعات. في هذا الجزء، نعيد أولاً فحص كيفية جمع السرعات، ثم سندرس جوانب معينة للسرعة النسبية.

كيف نجمع السرعات؟ السرعة متجه (لها مقدار واتجاه)؛ تنطبق قواعد جمع المتجهات التي تمت مناقشتها في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق البيانية** و**جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية** على جمع السرعات، كأي متجه آخر. في الحركة أحادية البعد، جمع السرعات بسيط – حيث تُجمع مثل الأرقام العادية. على سبيل المثال، إذا كان لاعب هوكي يتحرك بسرعة مباشرةً نحو المرمى ويدفع الكرة في نفس الاتجاه بسرعة بالنسبة لجسمه، فإن سرعة الكرة بالنسبة إلى حارس المرمى الثابت، الذي يقف أمام المرمى.

في الحركة ثنائية الأبعاد، يمكن استخدام تقنيات بيانية أو تحليلية لجمع السرعات. سنركز على التقنيات التحليلية. تُعِطي المعادلات التالية العلاقات بين مقدار واتجاه السرعة ( و )ومركبتيها ( و ) على طول محورين و لنظام الإحداثيات المختار:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑70 |  |
| ‏3‑71 |  |
| ‏3‑72 |  |
| ‏3‑73 |  | |

Chart, line chart

Description automatically generated

شكل 3-45 السرعة، ، لكائن يتحرك بزاوية بالنسبة للمحور الأفقي هي مجموع المركبتين و .

هذه المعادلات صالحة لأي متجهات وكُيفت خصيصًا للسرعة. تُستخدم أول معادلتين لإيجاد مركبتي السرعة عندما يكون مقدارها واتجاهها معروفين. تُستخدم أخر اثنتين لإيجاد مقدار واتجاه السرعة عندما تكون مركبتاها معروفتين.

**تجربة منزلية: السرعة النسبية للقارب** املأ نصف حوض الاستحمام بالماء. خذ قارب لعبة أو أي شيء آخر يطفو على الماء. انزع سدادة المصرف حتى يبدأ تصريف الماء. حاول دفع القارب من أحد جانبي الحوض إلى الجانب الآخر عموديًا على تدفق المياه. ما الطريقة التي يجب أن تدفع بها القارب حتى ينتهي في الاتجاه المقابل مباشرةً؟ قارن بين اتجاه تدفق المياه واتجاه القارب والسرعة الفعلية للقارب.

**جمع السرعات: قارب على نهر**



**مثال 3-6**

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-46 قارب يحاول السفر مباشرة عبر نهر بسرعة 0.75 م / ث. يتدفق التيار في النهر بسرعة 1.20 م / ث إلى اليمين.

راجع الشكل 3-46، الذي يُظهر قاربًا يحاول العبور مباشرة عبر النهر. دعونا نحسب مقدار واتجاه سرعة القارب بالنسبة لمراقب على الشاطئ، . تبلغ سرعة القارب، ، 0.75 م / ث في الاتجاه بالنسبة للنهر وسرعة النهر، ، 1.20 م / ث إلى اليمين.

**طريقة الحل**

نبدأ باختيار نظام إحداثيات له محور موازٍ لسرعة النهر، كما هو موضح في الشكل 3-46. نظرًا لأن القارب يتوجه مباشرة نحو الشاطئ الآخر، فإن سرعته بالنسبة إلى الماء تكون موازية للمحور وعمودية على سرعة النهر. وبالتالي، يمكننا جمع السرعتين باستخدام المعادلتين

.

**الحل**

مقدار السرعة الكلية هو

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑74 |  |

حيث

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑75 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑76 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑77 |  |

وهكذا،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑78 |  |

اتجاه السرعة الكلية يعطى بالعلاقة:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑79 |  |

وهكذا،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑80 |  |

**المناقشة**

يتوافق كل من مقدار واتجاه السرعة الإجمالية مع الشكل 3-46. لاحظ أنه نظرًا لأن سرعة النهر كبيرة مقارنة بسرعة القارب، فإنه ينجرف بسرعة في اتجاه مجرى النهر. تتضح هذه النتيجة من خلال الزاوية الصغيرة ( فقط) للسرعة الكلية بالنسبة إلى ضفة النهر.

**حساب السرعة: سرعة الرياح تتسبب في انجراف الطائرة**  
احسب سرعة الرياح للموقف الموضح في الشكل 3-47. من المعروف أن الطائرة تتحرك بسرعة 45.0 م / ث في اتجاه الشمال بالنسبة للكتلة الهوائية، في حين أن سرعتها بالنسبة إلى الأرض (سرعتها الإجمالية) تبلغ 38.0 م / ث في اتجاه غرب الشمال.



**مثال 3-7**

Diagram

Description automatically generated

الشكل 3-47 من المعروف أن الطائرة تتجه شمالًا بسرعة 45.0 م / ث، على الرغم من أن سرعتها بالنسبة إلى الأرض تبلغ 38.0 م / ث بزاوية غرب الشمال. ما سرعة الرياح واتجاهها؟

**طريقة الحل**

هذه المسألة، تختلف نوعًا ما عن المثال السابق، نعرف السرعة الكلية وهي مجموع سرعتين أخريين، (الريح) و (الطائرة بالنسبة إلى الكتلة الهوائية). الكمية معروفة، ومطلوب منا إيجاد . لا يوجد سرعات متعامدة مع بعضها البعض، ولكن من الممكن إيجاد مركباتها على طول محورين متعامدين مشتركين للسرعات كلها. إذا تمكنا من إيجاد مركبتي ، فيمكننا دمجهما لإيجاد مقدارها واتجاهها. كما هو مبين في الشكل 3-47، نختار نظام الإحداثيات الذي فيه محور في اتجاه الشرق ومحور باتجاه الشمال (وموازي لـ ). (قد ترغب في إلقاء نظرة على مناقشة جمع المتجهات باستخدام المركبات المتعامدة في **جمع المتجهات وطرحها: الطرق التحليلية**.)

**الحل**

لأن هي ناتج الجمع الاتجاهي لـ و ، فإن كل من مركبتيها و هو مجموع مركبات سرعة الرياح والطائرة على طول المحورين و ، على التوالي. لاحظ أن الطائرة لها مركبة سرعة رأسية فقط، لذلك و . أي

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑81 |  |

و

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑82 |  |

ويمكننا استخدام المعادلتين السابقتين لحساب

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑83 |  |

لأن

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑84 |  |

الإشارة السالبة تشير إلى الحركة باتجاه الغرب وهذا يتفق مع مخطط المسألة. الآن، يمكننا حساب . لاحظ أن

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑85 |  |

لأن ، لذلك

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑86 |  |

الإشارة السالبة تشير إلى الحركة باتجاه الجنوب وهذا يتفق مع مخطط المسألة.

الآن، نعلم المركبات المتعامدة لـ و ، لذلك يمكننا حساب مقدار واتجاه . أولًا، المقدار هو

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑87 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑88 |  |

الاتجاه هو

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑89 |  |

وهذا يعطينا

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑90 |  |

**المناقشة**

تتسق سرعة واتجاه الرياح مع التأثير الكبير للرياح على السرعة الإجمالية للطائرة، كما هو موضح في الشكل 3-47. نظرًا لأن الطائرة تقاتل مزيجًا قويًا من الرياح العرضية والرياح الامامية، فإنها سرعتها الإجمالية أقل بكثير من سرعتها بالنسبة إلى الكتلة الهوائية وفي اتجاه مختلف، أيضًا.

لاحظ أنه في أخر مثالين، تمكننا من تسهيل الحساب باختيار نظام إحداثيات له محور موازٍ لإحدى السرعات. سنجد مرارًا وتكرارًا أن اختيار نظام إحداثيات مناسب يجعل حل المسائل أسهل. على سبيل المثال، في حركة المقذوفات، نستخدم دائمًا نظام إحداثيات بمحور موازٍ للجاذبية.

### السرعات النسبية والنسبية الكلاسيكية

خلال جمع السرعات، أكدنا على أن السرعة تكون بالنسبة لبعض الإطارات المرجعية. تسمى هذه السرعات **بالسرعات النسبية**. على سبيل المثال، تختلف سرعة الطائرة بالنسبة إلى كتلة الهواء عن سرعتها بالنسبة إلى الأرض. وكلاهما يختلف تمامًا عن سرعة الطائرة بالنسبة إلى ركابها (والتي يجب أن تكون قريبة من الصفر). السرعات النسبية هي أحد جوانب **النسبية**، والتي تُعرّف بأنها دراسة كيفية قياس أو إدراك المراقبين المختلفين، الذين يتحركون بالنسبة لبعضهم البعض، لنفس الظاهرة.

لقد سمع الجميع تقريبًا عن النسبية وألبرت أينشتاين (1879-1955)، أعظم فيزيائيين القرن العشرين. أحدث أينشتاين ثورة في نظرتنا إلى الطبيعة من خلال **نظريته النسبية الحديثة**، والتي سنقوم بدراستها في فصول لاحقة. السرعات النسبية، في هذا الجزء، هي جوانب من النسبية الكلاسيكية، كان أول من ناقشها بطريقة صحيحة هما جاليليو وإسحاق نيوتن. **النسبية الكلاسيكية** تقتصر فقط على الحالات التي تكون فيها السرعات أقل من حوالي 1٪ من سرعة الضوء - أي أقل من . معظم الأشياء التي نتعامل معها في الحياة اليومية تتحرك أبطأ من هذه السرعة.

دعونا نفكر في مثال على ما يراه مراقبين مختلفين في موقف حلله غاليليو منذ فترة طويلة. لنفترض أن بحارًا على قمة صاري سفينة متحركة يُسقط منظاره. أين سيصطدم بسطح السفينة؟ هل سيصطدم بقاعدة الصاري أم سيصطدم خلف الصاري لأن السفينة تتحرك إلى الأمام؟ الجواب هو أنه إذا كانت مقاومة الهواء مهملة، فإن المنظار سيصطدم بقاعدة الصاري عند نقطة أسفل نقطة إسقاطه مباشرةً. الآن دعونا نفكر فيما يراه مراقبين مختلفين أثناء سقوط المنظار. أحدهما على السفينة والآخر على الشاطئ. المنظار ليس لها سرعة أفقية بالنسبة للمراقب على السفينة، لذا يراه المراقب، الذي على السفينة، يسقط مباشرةً أسفل الصاري. (انظر الشكل 3-48.) ولكن المراقب على الشاطئ، يرى المنظار والسفينة يتحركان نفس المسافة للأمام أثناء سقوط المنظار؛ لأن المنظار والسفينة لهما نفس السرعة الأفقية بالنسبة له. يرى هذا المراقب المسار المنحني الموضح في الشكل 3-48. على الرغم من أن المسارات تبدو مختلفة بالنسبة إلى المراقبين، فإن كل منهما يرى نفس النتيجة - يقع المنظار عند قاعدة الصاري وليس خلفها. للحصول على الوصف الصحيح للحركة، من الضروري معرفة السرعات الصحيحة بالنسبة إلى المراقب.

Chart, radar chart

Description automatically generated

الشكل 3-48 النسبية الكلاسيكية. نفس الحركة كما رآها مراقبان مختلفان. يرى المراقب على السفينة المتحركة أن المنظار يسقط من أعلى صاريها مباشرةً لأسفل. يرى المراقب على الشاطئ أن المنظار يأخذ المسار المنحني، ويتحرك للأمام مع السفينة. يرى كلا المراقبين المنظار يضرب سطح السفينة عند قاعدة الصاري. تختلف السرعة الأفقية الأولية بالنسبة لكلا المراقبين.

**حساب السرعة النسبية: أحد ركاب طائرة يُسقط عملة معدنية**  
يُسقط أحد ركاب طائرة قطعة نقود معدنية أثناء تحرك الطائرة بسرعة 260 م / ث. ما سرعة العملة المعدنية عندما تضرب الأرض على بعد 1.50 متر من نقطة إطلاقها: (أ) بالنسبة للطائرة؟ (ب) بالنسبة إلى الأرض؟



**مثال 3-8**

Graphical user interface, Word

Description automatically generated with medium confidence

الشكل 3-49 حركة عملة معدنية سقطت داخل طائرة كما يراها مراقبان مختلفان. (أ) يرى المراقب في الطائرة أن العملة المعدنية تسقط مباشرة لأسفل. (ب) يرى المراقب على الأرض أن العملة تتحرك أفقيًا تقريبًا.

**طريقة الحل**

يمكن حل كلتا المسألتين بالطرق المستخدمة في سقوط الأجسام والمقذوفات. في الجزء (أ)، السرعة الابتدائية للعملة صفر بالنسبة للطائرة، وبالتالي فإن هذه الحركة هي حركة جسم ساقط (حركة أحادية البعد). في الجزء (ب)، تكون السرعة الابتدائية 260 م / ث أفقيًا بالنسبة للأرض والجاذبية رأسية، أيضًا، لذا فإن هذه الحركة عبارة عن حركة مقذوفات. في كلا الجزأين، من الأفضل استخدام نظام إحداثيات ذي محورين رأسي وأفقي.

**الحل لـ (أ)**

باستخدام المعلومات المعطاة، نلاحظ أن السرعة والموضع الابتدائيين يساويان صفر، والموضع النهائي 1.50 م. يمكن إيجاد السرعة النهائية باستخدام المعادلة:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑91 |  |

التعويض عن القيم المعلومة في المعادلة يعطينا

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑92 |  |

لذا

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑93 |  |

نعلم أن أخذ الجذر التربيعي لـ 29.4 يُعطي جذرين: و . نختار الجذر السالب لأننا نعلم أن السرعة تتجه لأسفل، وقد حددنا الاتجاه الموجب هو الاتجاه لأعلى. لا توجد سرعة ابتدائية أفقية بالنسبة للطائرة ولا تسارع أفقي، وبالتالي فإن الحركة مباشرةً لأسفل بالنسبة للطائرة.

**الحل لـ (ب)**

نظرًا لأن السرعة الرأسية الأولية تساوي صفر بالنسبة إلى الأرض والحركة الرأسية مستقلة عن الحركة الأفقية، فإن السرعة الرأسية النهائية للعملة المعدنية بالنسبة إلى الأرض هي نفسها في الجزء (أ). ولكن على عكس الجزء (أ)، هناك مركبة أفقية للسرعة. بالرغم من ذلك، نظرًا لعدم وجود تسارع أفقي، فإن السرعتين الأفقية الأولية والنهائية متساويتان ويساويان يمكن جمع مركبتي السرعة على طول المحورين و لإيجاد مقدار السرعة النهائية:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑94 |  |

وهكذا،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑95 |  |

هذا يعطينا

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑96 |  |

يعطى الاتجاه بالعلاقة:

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑97 |  |

لذلك،

|  |  |
| --- | --- |
| ‏3‑98 |  |

**المناقشة**

في الجزء (أ)، تكون السرعة النهائية بالنسبة للطائرة هي نفسها إذا أسقطت العملة من السكون على الأرض وسقطت 1.50 متر. هذه النتيجة تناسب تجربتنا؛ تسقط الأشياء في الطائرة بالطريقة نفسها في أثناء طيران الطائرة أفقيًا كما في حالة سكون الطائرة على الأرض. هذه النتيجة صحيحة أيضًا في حالة السيارات المتحركة. في الجزء (ب)، يرى المراقب على الأرض حركة مختلفة كثيرًا للعملة. تتحرك الطائرة أفقيًا بسرعة كبيرة. كما ذكرنا، في بعدين، لا تُجمع المتجهات مثل الأرقام العادية - السرعة النهائية في الجزء (ب) ليست ؛ بل . كان لابد من حساب مقدار السرعة إلى خمسة أرقام لملاحظة الفرق عن سرعة الطائرة. تشبه الحركتين كما يراهما المراقبان المختلفان (أحدهما في الطائرة والآخر على الأرض) في هذا المثال تلك التي نُوقشت للمنظار الذي أُسقط من صاري سفينة متحركة، باستثناء أن سرعة الطائرة أكبر بكثير، لذلك فإن المراقبين يرون مسارين مختلفين تمامًا. (انظر الشكل 3-49). بالإضافة إلى ذلك، يرى كلا المراقبين أن العملة سقطت 1.50 مترًا رأسيًا، لكن الشخص الموجود على الأرض يرى أيضًا أنها تتحرك للأمام 144 مترًا (تُرك هذا الحساب للقارئ). وهكذا، يرى أحد المراقبين مسارًا رأسيًا، والآخر يرى مسارًا أفقيًا تقريبًا.

#### عمل روابط: النسبية وآينشتاين

نظرًا لأن أينشتاين كان قادرًا على تحديد كيفية إجراء القياسات بوضوح (بعضها يتضمن الضوء) ولأن سرعة الضوء هي نفسها لجميع المراقبين، فإن النتائج غير متوقعة بطريقة مذهلة. يختلف الزمن مع اختلاف المراقب، وتُخزن الطاقة في صورة زيادة في الكتلة، وهناك، أيضًا، المزيد من المفاجآت.