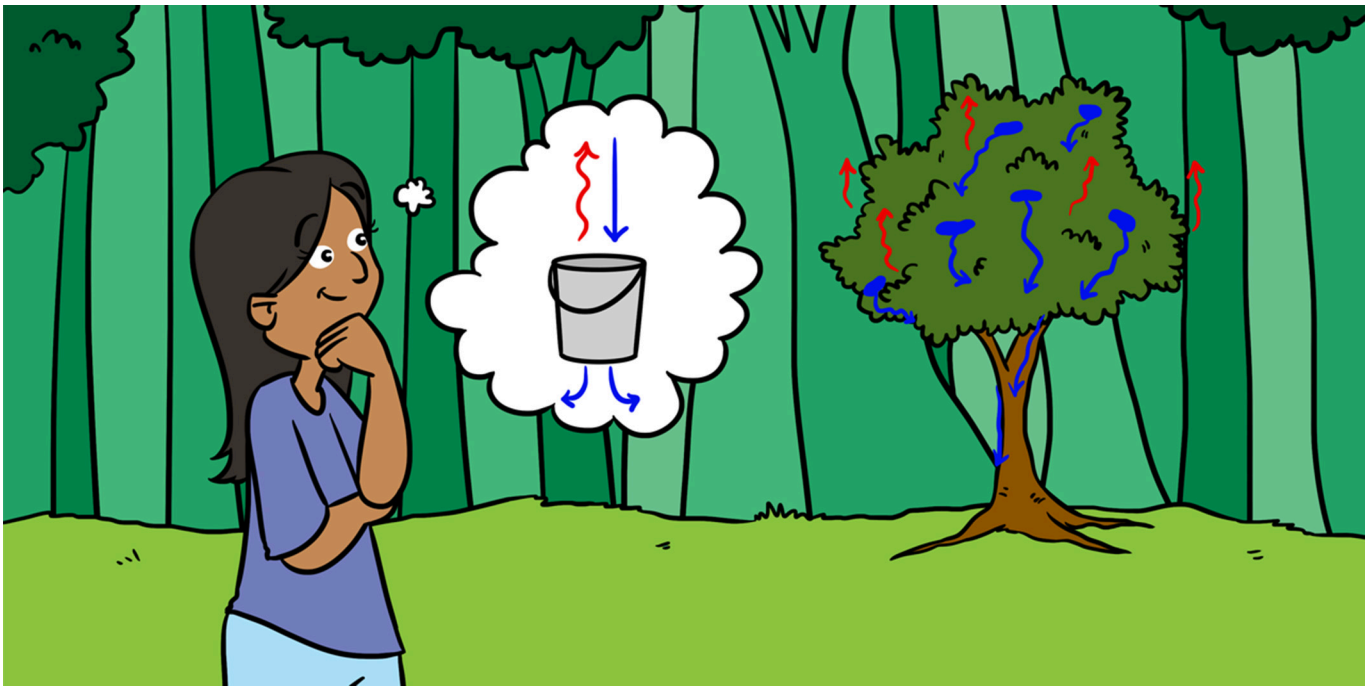
الرياضيات والاقتصاد
نُشر على الإنترنت بتاريخ: 20 نوفمبر 2023
doi: 10.3389/frym.2022.762009-ar



كيف تساعدنا الرياضيات في التنبؤ بتدفق المياه في الغابات؟

Katarina Zabret[1,2*], Mojca Šraj[1] و John T. Van Stan II[3]
[1]كلية الهندسة المدنية والجيوديسية، جامعة ليوبليانا، ليوبليانا، سلوفينيا
[2]معهد مياه جمهورية سلوفينيا، ليوبليانا، سلوفينيا
[3]قسم العلوم البيولوجية والجيولوجية والبيئية، جامعة ولاية كليفلاند، كليفلاند، أوهايو، الولايات المتحدة

تتعدد طرق تدفق المياه عبر الغابات، لذلك من الصعب فهم مكان ووقت تدفقها والتنبؤ بهما. ومن الأهمية بمكان فهم كيفية تدفق المياه عبر الغابات، لأنه يؤثر على العديد من الخدمات التي تقدمها الغابات للناس، مثل الخشب الذي توفره للمنازل والهواء الأكثر نقاءً. ولدى علماء المياه (الذين يُطلق عليهم الهيدرولوجيون) طريقة لاختزال تدفق مياه الغابة المعقد إلى شيء يمكننا تفسيره باستخدام الرياضيات البسيطة: لقد حولوا الغابات إلى دِلاء! وفي هذا المقال، نصف «الحديقة المائية» للغابة، حيث تمتلأ دِلاء أوراق الشجر واللحاء وتفرغ في بعضها بعضًا أو على أرضية الغابة. وتساعدنا هذه الدِلاء على وصف تدفقات المياه في الغابات والتنبؤ بها باستخدام العمليات الحسابية والإحصائية البسيطة. ويتمحور تركيزنا حول تدفق مياه الأمطار أثناء تصريفها خلال ظلة الشجر إلى الأرض، مما يساهم في توفير المياه اللازمة لنمو الأشجار وملء المياه الجوفية التي نشربها.

المراجعون الصغار

ELI, ELLA, JACK
العمر: 13

ELLE
العمر: 12

JOSI
العمر: 9

MANVI
العمر: 13

SAHANA
العمر: 13

علماء المياه وشغفهم بالدِلاء

الماء عنصر مهم من عناصر الطبيعة ومجتمعاتنا وحياتنا الفردية. وهو يدور طوال الوقت، من اليابسة إلى الغيوم، ويعود في شكل هطول، يملأ الأنهار والبحيرات والبحار ويعيد شحن مستودعات المياه الجوفية ويشكّل الجريان السطحي ويرطب الحقول والغابات ويسقي النباتات والأشجار. تُسمى حركة الماء هذه بدورة الماء في الطبيعة ويضطلع بدراستها العلماء الذين يُطلق عليهم الهيدرولوجيون. يرصد الهيدرولوجيون عمليات المياه المختلفة في الطبيعة، في محاولة لفهمها والتنبؤ بها. غير أن بعض تدفقات المياه يصعب متابعتها؛ فمثلًا من الصعب مراقبة الماء السائل وهو يتحول إلى غاز غير مرئي من خلال التبخر. ولهذا يكون من الصعب فهم دورة الماء، بل من الأصعب تفسيرها أو التنبؤ بها. وللتفكير في هذه العمليات المعقدة، يتخيل الهيدرولوجيون أن جميع هذه العمليات تشبه حديقة مائية كبيرة مليئة بالدلاء المترابطة. يمتلئ بعض الدلاء بالمطر، والبعض الآخر بالثلج، والبعض الآخر ملئ بالفعل بالمياه التي تبدأ في الفيضان.

يبدو هذا «النموذج» الذهني للطبيعة مجنونًا، ولكنه في الواقع مفيد للغاية في مساعدتنا على فهم المياه وإدارتها. كيف؟ حسنًا، دعونا نبدأ أولًا بالإقرار بشيء واضح: أن الطبيعة معقدة للغاية، لذا قد يصعب فهمها والتنبؤ بها. وحتى عندما نركز على جزء واحد مهم من دورة الماء في الطبيعة، مثل «كيف يعيد المطر تغذية التربة في الغابة؟»، سيظل الكثير من التعقيد قائمًا [1]. فمثلًا، للوصول إلى التربة، يجب أن تمر مياه الأمطار من خلال ظلة شجر الغابة، التي لها أوراق وفروع تبرز في جميع الاتجاهات والزوايا (شكل 1A). وفي أي مرحلة أثناء العاصفة، يمكن أن تُحجز مياه الأمطار أو تتحرك أو تتناثر في أي مكان في جميع أنحاء ظلة شجر الغابة تلك! فكيف يمكننا تتبع كل المياه، في جميع الأوقات أثناء العاصفة وفي جميع الأماكن في ظلة الشجر لنفهم مقدار المطر الذي يصل إلى التربة (شكل 1B) ؟ *الإجابة هي أننا لا يمكننا ذلك*، على الأقل ليس من دون نفقات وصعوبة هائلة. بيد أن الهيدرولوجيين الذين يستخدمون نهج «الحديقة المائية» يدرسون هذه العملية المعقدة باستخدام أسلوب علمي يُسمى الاختزالية، وهي طريقة لوصف شيء معقد بطريقة بسيطة. ويمكن النظر إلى جميع تلك الفروع والأوراق على أنها دِلاء (شكل 1C). وبغض النظر عن مكان وجود الأمطار في ظلة شجر الغابة، فهي توجد الآن ببساطة في دلو. وعندما يمتلأ دلو ظلة الشجر، تتسرب مياه الأمطار الزائدة إلى التربة الموجودة بالأسفل. ومن المزايا الأخرى لهذا الاختزال (تحويل ظلة الشجر إلى دلو) هي أننا يمكننا الآن استخدام الرياضيات لوصف عملية التبخر (ت) - التي تُسمى اعتراض هطول الأمطار- ببعض العمليات الحسابية البسيطة:

ت = م - ط - ق

الهيدرولوجي (Hydrologist)

هو العالم الذي يدرس المياه وحركتها حول الكوكب.

التبخر (Evaporation)

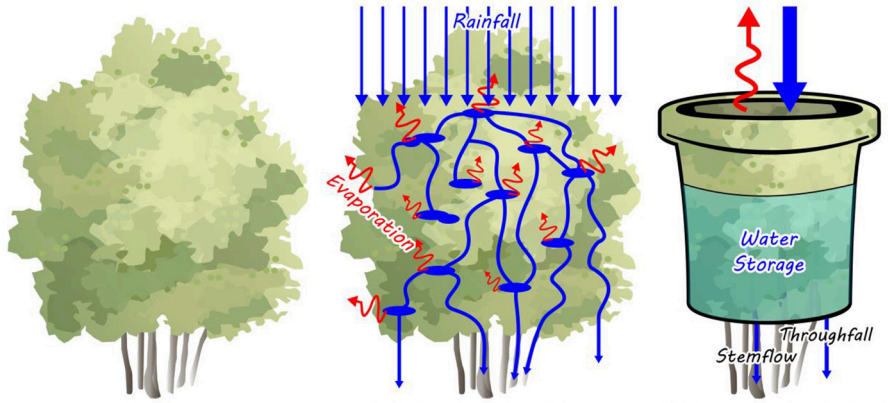
هو عملية رئيسية في دورة المياه تحدث عندما يتحول الماء السائل إلى غاز.

الاختزالية (Reductionism)

هي تحليل عملية معقدة ووصفها بطريقة بسيطة، بحيث يمكن للبشر فهم العملية والتنبؤ بها بصورة أفضل.

اعتراض هطول الأمطار (Rainfall interception)

هو الجزء من المطر (أو الثلج) الذي لا يصل إلى الأرض تحت النباتات، لأن بعضه يتبخر أثناء مروره عبر أوراق النباتات وأغصانها.



شكل 1

شكل 1

(A) ظلة غابة معقدة. **(B)** في الواقع، يُعد تدفق مياه الأمطار عبر الظلة إلى الأرض عملية فوضوية. توضح الأسهم الزرقاء هطول الأمطار والأسهم الحمراء التبخر. **(C)** بتطبيق الاختزال، يمكن للهيدرولوجيين إنشاء نموذج دِلاء بسيط لتسهيل عملية تدفق المياه في الغابة. ويسمح لنا هذا باستخدام الرياضيات البسيطة لوصف عملية اعتراض هطول الأمطار على أنها امتلاء الدلو وإفراغه.

في هذه المعادلة، يصعب حقًا قياس التبخر الناتج من اعتراض هطول الأمطار (ت) (في الواقع، ما زال الهيدرولوجيون لم يتوصلوا إلى كيفية قياس هذا باستمرار [2])، ولكن كل حرف من الأحرف الموجودة على الجانب الأيمن من المعادلة يمثل شيئًا يمكننا *قياسه* مباشرةً. فإذا وصفنا المطر (م) المنهمر في منطقة مفتوحة بجوار الأشجار، ووصفنا المطر الذي يقطر على الأرض أسفل الأشجار بأنه تهطال مباشر (ط)، ووصفنا المطر الذي يصب أسفل جذوع الأشجار بأنه تدفق جذعي (ق)، حينها يمكننا تقدير التبخر (ت).

التهطال المباشر (Throughfall)

هو مياه الأمطار التي تتساقط من خلال الفجوات في الغابة والتي تقطر من الأوراق والفروع إلى الأرض.

التدفق الجذعي (Stemflow)

هو مياه الأمطار التي تصب من جذع الشجرة إلى أرضية الغابة.

ثقوب في دِلاء الهيدرولوجيين

تحتوي معظم دِلاء الهيدرولوجيين على ثقب كبير في الجزء العلوي، بحيث يمكن للعواصف ملء الدِلاء ويمكن للتبخر إفراغها. وهذا هو الحال بالنسبة لدلو ظلة الشجر؛ فالمطر يملأه، في حين يتبخر بعض الماء باستمرار عائدًا إلى الغلاف الجوي. ولكن، ليكون اختزال دلو ظلة الشجر أكثر فائدة، يجب أن نحدث فيه ثقبين: أحدهما للتهطال المباشر والآخر للتدفق الجذعي. ويلزم تغيير هذه الثقوب بناءً على كمية الماء التي تدخل دلو الظلة بمرور الوقت. ولا تُعد جميع دِلاء الظلة متطابقة لأن ثمة العديد من أنواع الأشجار المختلفة.

ولنفترض أن الهيدرولوجيين يستخدمون نموذج الدِلاء لفهم والتنبؤ به. يعتمد مقدار التدفق الجذعي وتوقيته في الغالب على كمية المياه التي يمكن أن يحتفظ بها دلو الشجرة، ومدى قدرة الشجرة على تصريف مياه الأمطار إلى الجذع، وكيف تحقق العاصفة هطول الأمطار. وتُوصف جميع هذه الفئات الثلاث من خلال ما يُسمى بالمتغيرات التي تصف الخصائص أو القيم التي يمكن قياسها أو عدها. فمثلًا، بعض الأشجار لها أوراق مسطحة، والبعض له إبر، وتتساقط أوراق بعض الأشجار خلال فصل الشتاء. وقد تحتوي الأشجار على الكثير من الجذوع والفروع أو على جذع واحد رئيسي، وبعض الأشجار لها لحاء ناعم في حين أن البعض الآخر له لحاء سميك خشن. كل هذه متغيرات/خصائص مختلفة للأشجار تحدد حجم الدلو ومدى تصريف ظلة

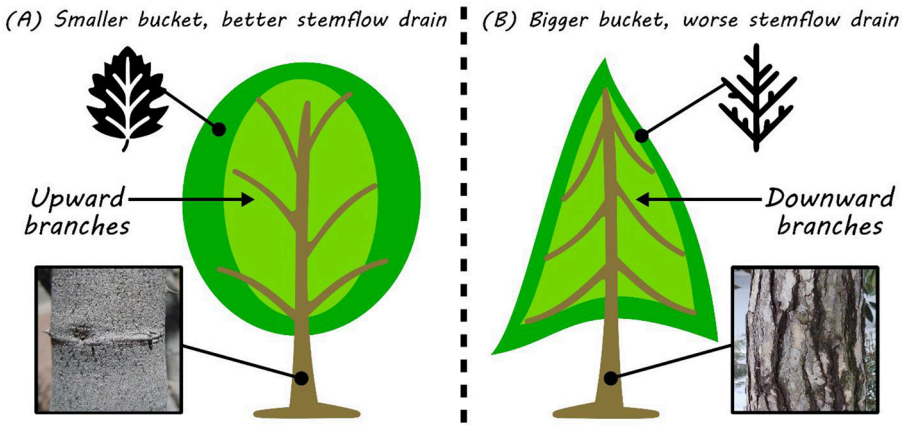
المتغيرات (Variables)

هي الخصائص أو العدد أو الكمية التي يمكن قياسها أو عدها.

الشجر لمياه الأمطار إلى ذلك الدلو (شكل 2). هذا عدد كبير من الخصائص، لذا دعونا نختزلها جميعًا إلى رقم واحد من شأنه أن يضبط كمية هطول الأمطار حسب حصة هطول الأمطار التي تحتجزها الظلة وتصرفها في الجذع. يسمي الهيدرولوجيون هذا عامل صرف الجذع (p_t)، ويمكن أن يتراوح من 0 إلى 100%! ومن ثم، فإن الدلو الذي يفيض لتكوين التدفق الجذعي لا يتلقى سوى كمية المطر (م) مضروبة في هذا المعامل ومطروحًا منها التبخر.

معامل صرف الجذع (Trunk drainage coefficient)

هو حصة المطر التي تحتجزها الظلة وتُصرف في الجذع.



شكل 2

للأنواع المختلفة من الأشجار خصائص ظلة مختلفة تؤثر على تدفق مياه الأمطار إلى الأرض. **(A)** تحتوي هذه الشجرة على دلو تخزين مياه أصغر يصرف كميات أكبر من مياه الأمطار في الجذع، مقارنةً بالشجرة المُوضحة في **(B)**، التي تحتوي على دلو تخزين مياه أكبر يصرف كميات أقل من مياه الأمطار في الجذع.

وبما أن كمية المياه في الدلو (ج) قد تكون في بعض الأحيان أقل من السعة الإجمالية للدلو، (S) يمكننا ضبط معدل التبخر [3]. وباستخدام الرياضيات، يمكننا كتابتها على النحو التالي:

$$(E\times C/S) - (R\times p_t) = R_S$$

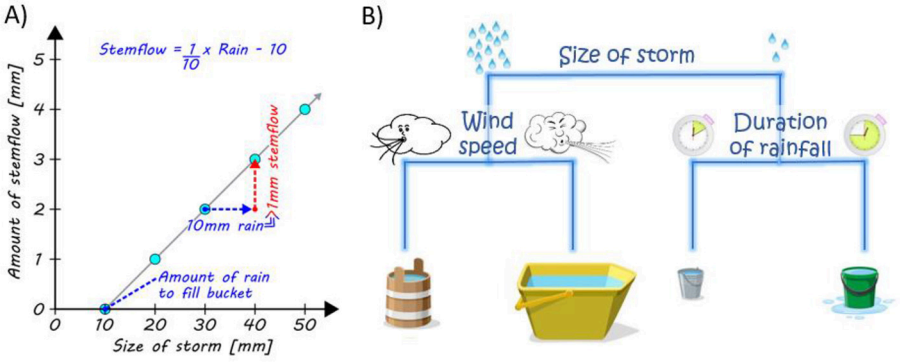
ولتقدير معدل التبخر، نحتاج أيضًا معلومات عن الطقس. فسيختلف جريان المياه في الجذع أثناء العاصفة المطرية القصيرة والكثيفة في الصيف، أو العاصفة المطرية الطويلة في الشتاء، أو الرذاذ الربيعي اللطيف. يبدو الأمر كما لو أُحدثت ثقوب مختلفة في الدلو اعتمادًا على كمية المطر التي تهطل خلال العاصفة، ومدة هطوله، ومقدار الرياح التي تهب سواء أكانت دافئة أم باردة، وما إذا كانت قطرات المطر كبيرة أم صغيرة أم متعددة أم متناثرة. إذن، ما الطريقة المفيدة للتعامل مع كل هذه الظروف المتفاعلة؟

علم الإحصاء: صناعة دِلاء لجميع الأحوال الجوية والأشجار

إذا لم نتوخ الحذر، فقد تتسبب جميع متغيرات الغابة والطقس المتفاعلة هذه في إعادة حديقتنا المائية ذات الدلو البسيط إلى فوضى معقدة. وحينها ستبدو المعادلات التي وصفناها في موضع سابق من المقال أبسط من أن تكون مفيدة. بيد أن هذا لا يحدث

لأن الهيدرولوجيين يقرنون هذه الاختزالات بأساليب رياضية أخرى، تُسمى الإحصاء. يساعدنا هذا المجال من الرياضيات على فهم كميات كبيرة من البيانات، بما في ذلك جمعها وتنظيمها وتحليلها.

فمثلًا، غالبًا ما يتطلع الهيدرولوجيون لمعرفة ما إذا كان التدفق الجذعي من شجرة معينة له علاقة بأحد متغيرات الطقس، مثل كمية الأمطار. يمكن أن تساعدنا هذه العلاقة -التي تُسمى الارتباط- في حساب حجم الدلو، ومدى تصريف ظلة الشجر لمياه الأمطار إلى الجذع، وحتى مقدار التبخر الذي يحدث على اللحاء! ويوضح شكل 3A مثالًا لشجرة تطلبت 10 ملم من هطول الأمطار لملء دلو ظلة الشجر ولجعل اللحاء مبللًا بدرجة كافية لبدء التدفق الجذعي.



شكل 3

شكل 3

تحليل إحصائي لبيانات التدفق الجذعي لنموذج الشجرة. **(A)** رسم بياني بسيط للارتباط بين هطول الأمطار والتدفق الجذعي يوضح كيف يمكن تحديد حجم الدلو (أدنى نقطة على المحور الأفقي) وتقدير معامل الصرف (الأسهم الزرقاء والحمراء). **(B)** تبسيط أسلوب إحصائي أكثر تعقيدًا يراعي المزيد من المتغيرات في تحديد أنسب نوع من أنواع الدِلاء [4]. وباستخدام المزيد من ملاحظات التدفق الجذعي لمزيد من أنواع العواصف، يمكننا اكتشاف أنواع الدِلاء التي ستكون أفضل للظروف العاصفة أو الهادئة أو للعواصف ذات الفترات المختلفة (الأطول أو الأقصر).

بمجرد أن يبدأ التدفق الجذعي، يمكن أن تصرف ظلة الشجر 1 ملم من كل 10 ملم إضافية من الأمطار إلى الجذع في شكل تدفق جذعي. لذلك، لدينا الآن حجم الدلو (10 ملم) ومعامل صرف الجذع (10/1 = 10%) لهذه الشجرة!

لا يستخدم هذا المثال سوى متغيرين فقط، ولكننا يمكننا البحث عن ارتباطات بين التدفق الجذعي وجميع متغيرات الشجرة والطقس في الوقت نفسه باستخدام أساليب إحصائية أكثر تعقيدًا. فمثلًا، يمكن للهيدرولوجيين استخدام الإحصاء لتمثيل ظلة شجر كأنواع مختلفة من الدِلاء وفقًا لظروف الطقس المختلفة (شكل 3B). وبهذه الطريقة، لا يزال بإمكان الهيدرولوجيين استخدام مفهوم الدِلاء حتى إذا كانت ظلة الشجر تستجيب بصورة مختلفة في العواصف العاتية الكبيرة مقارنةً بالعواصف الصغيرة الهادئة. وباستخدام هذه الأساليب، لا يتسنى للهيدرولوجيين إحداث الأنواع الصحيحة من الثقوب في الدلو فحسب، بل يمكنهم أيضًا فهم وجوب أن تكون بعض الثقوب أكبر أو لماذا ينبغي وضعها في موضع مختلف. فهذه الأساليب تحول الواقع الفوضوي للطبيعة إلى الحديقة المائية المهندمة والمنظمة للدلو.

أهمية دِلاء الهيدرولوجيين

الماء ضروري لجميع أشكال الحياة على سطح الأرض، لذا لا عجب أن المياه موجودة في جميع أنحاء كوكبنا؛ داخل الأرض وداخل أجسامنا! لذلك، من الصعب معرفة مكان وجود الماء، وكيف يتحرك، ومتى يكون في مكان معين. غير أن من المهم متابعة دورة الماء في الطبيعة وكيف ستؤثر أفعال الإنسان عليها وفهمهما والتنبؤ بهما. ولاختزال دورة الماء المعقدة هذه إلى شيء يمكننا نحن البشر متابعته وفهمه والتنبؤ به، يُعد نهج الدِلاء الاختزالي مفيدًا للغاية. وفي هذا المقال، تمحور تركيزنا حول نوع واحد من أنواع الدِلاء (ظلة شجر الغابة) ونوع واحد من تدفق المياه الذي يحدث أثناء العواصف في الغابة (التدفق الجذعي). ومن المهم للغاية فهم دلو الغابة وتدفقات مياهه لأن الغابات تقدم العديد من الخدمات للبشرية؛ من إنتاج الأخشاب المُستخدمة في بناء المنازل إلى تبريد الهواء. وتعتمد العديد من هذه الخدمات على طريقة تدفق المياه عبر «الحديقة المائية» للغابة. ومن خلال اختزال تعقيد دورة ماء الغابة، يمكن للهيدرولوجيين وصف تلك العمليات المعقدة باستخدام الرياضيات، التي تعرف الآن أنها بسيطة بما فيه الكفاية بحيث يتعلمها الأطفال في جميع أنحاء العالم!

إقرار

أُعد هذا المقال بوصفه جزءًا من الأنشطة المُنفذة في اليونسكو في الحد من مخاطر الكوارث المتعلقة بالمياه، جامعة ليوبليانا، سلوفينيا.

المراجع

1. Allen, S. T., Aubrey, D. P., Bader, M. Y., Coenders-Gerrits, M., Friesen, J., Gutmann, E. D., et al. 2020. "Key questions on the evaporation and transport of intercepted precipitation," in *Precipitation Partitioning by Vegetation* (Cham: Springer). p. 269–80.
2. Coenders-Gerrits, M., Schilperoort, B., and Jiménez-Rodríguez, C. 2020. "Evaporative processes on vegetation: an inside look," in *Precipitation Partitioning by Vegetation* (Cham: Springer). p. 35–48.
3. Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Robins, P. C., and Morton, A. J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.* 9:367–84. doi: 10.1016/0002-1571(71)90034-3
4. Bezak, N., Zabret, K., and Šraj, M. 2018. Application of copula functions for rainfall interception modelling. *Water*. 10:995. doi: 10.3390/w10080995

نُشر على الإنترنت بتاريخ: 20 نوفمبر 2023

المحرر: Marco Aldi

مرشدو العلوم: Hana Dobrovolny و Patricia Welch Saleeby

الاقتباس: Zabret K, Šraj M و Van Stan JT II (2023) كيف تساعدنا الرياضيات في التنبؤ بتدفق المياه في الغابات؟ Front. Young Minds.
doi: 10.3389/frym.2022.762009-ar

مُترجَم ومقتبس من: Zabret K, Šraj M and Van Stan JT II (2022) How Math Helps us Predict Water Flows in Forests. Front. Young Minds 10:762009.
doi: 10.3389/frym.2022.762009

إقرار تضارب المصالح: يعلن المؤلفون أن البحث قد أُجري في غياب أي علاقات تجارية أو مالية يمكن تفسيرها على أنها تضارب محتمل في المصالح.

حقوق الطبع والنشر © 2022 © 2023 Zabret Šraj Stan Van. هذا مقال مفتوح الوصول يتم توزيعه بموجب شروط ترخيص المشاركة الإبداعية Creative Commons Attribution License (CC BY). يُسمح بالاستخدام أو التوزيع أو الاستنساخ في منتديات أخرى، شريطة أن يكون المؤلف (المؤلفون) الأصلي أو مالك (مالكو) حقوق النشر مقيدًا وأن يتم الرجوع إلى المنشور الأصلي في هذه المجلة وفقًا للممارسات الأكاديمية المقبولة. لا يُسمح بأي استخدام أو توزيع أو إعادة إنتاج لا يتوافق مع هذه الشروط.

المراجعون الصغار

ELI, ELLA, JACK, العمر: 13
كان المقال سهل القراءة وممتعًا. ولقد تساءلنا لماذا استخدموا الدِلاء وليس الجرار أو غيرها من الحاويات، وقد أجاب المؤلفون على سؤالنا أثناء المراجعة.

ELLE, العمر: 12
اسمي إيلي، وقد بلغت من العمر 12 عامًا. أحب القطط وأتمنى لو كان لديّ واحدة. كما أنني أحب الرقص والكتابة والغناء والقراءة والرسم. وأود أن أصبح محامية عندما أكبر. ولطالما كانت موادي الدراسية المفضلة هي فنون اللغة الإنجليزية والتاريخ. ولقد شاركت في معرض العلوم طوال حياتي، وأستمتع بمشاهدة مقاطع الفيديو وقراءة المقالات لتعزيز فهمي للعالم من حولي. كما أنني شغوفة بالموضة.

JOSI, العمر: 9
اسمي جوسي. وأحب القراءة وتأليف القصص. وحيواناتي المفضلة هي الخنازير لأنها لطيفة حقًا. واللون الوردي هو لوني المفضل. والعلوم هي إحدى موادي الدراسية المفضلة إلى جانب الرياضيات. وأما عن مشروع العلوم الذي نفذته هذا العام، فقد اكتشفت فيزياء السكوتر لأن ركوب السكوتر أحد أنشطتي المفضلة.

MANVI, العمر: 13
اسمي مانفي شارما وأعيش في فورت وورث، تكساس. أحب القراءة ولعب التنس والرسم والاستماع إلى الموسيقى.

SAHANA, العمر: 13
وُلدت سهانا في كندا وانتقلت إلى الولايات المتحدة في سن الرابعة. ولديها مجموعة كبيرة من الاهتمامات والهوايات، ولكنها تحب الرياضيات والعلوم حقًا، وتقضي وقتًا إضافيًا للدراسة خلال الجائحة حتى تتمكن من إكمال دورات الرياضيات السريعة. وهي أيضًا ناشطة في الحكومة الطلابية وتكتب في جريدة المدرسة وتساعد في إعداد كتاب المدرسة السنوي. وفي وقت فراغها، تعزف البيانو وتتزلج على الجليد وتمثل في مسرحيات مدرستها.

المؤلفون

KATARINA ZABRET
باحثة شاركت في دراسات حول دور الماء في حياتنا اليومية وتفاعل الماء مع النباتات. وبصفتها طالبة دكتوراة، عملت في حديقة حضرية حيث كانت تحتفظ بأجهزة القياس وتجمع البيانات عن هطول الأمطار والتهطال المباشر والتدفق الجذعي. ومن خلال تحليل البيانات، بدأت حقًا في تقدير مدى صعوبة العمل الميداني بسبب الظروف الجوية القاسية أو بسبب التفاعلات مع الحيوانات. كما أنها تحب استخدام الأساليب الإحصائية المتقدمة للحصول على رؤى جديدة في البيانات المُجمعة. *katarina.zabret@izvrs.si

MOJCA ŠRAJ
أستاذة مشاركة في كلية الهندسة المدنية والجيوديسية، جامعة ليوبليانا. وقد درست الهندسة المدنية في الجامعة نفسها وتعمل الآن كعالمة هيدرولوجية، مما يعني أن أبحاثها مرتبطة بالمياه. ومجالات اهتمامها الرئيسية هي الفيضانات والجفاف وتحليل البيانات الهيدرولوجية وتحليل توازن المياه والنمذجة الهيدرولوجية. وهي مهتمة تحديدًا باعتراض الأشجار لهطول الأمطار، الذي كان أيضًا موضوع أطروحة الدكتوراة التي أعدتها.

JOHN T. VAN STAN
متخصص في علم البيئة المائية مهتم بما يحدث عند التقاء النباتات والمياه أثناء العواصف؛ المطر أو الثلج أو الصقيع أو غير ذلك. وهو يستمتع بالبحث في الأدوار التي تؤديها النباتات الرطبة في توازن طاقة الأرض ودورات المغذيات وعلم بيئة المناظر الطبيعية. وهو حاليًا أستاذ مشارك في جامعة ولاية كليفلاند، حيث يقود مختبر النباتات الرطبة.

النسخة العربية مقدمة من
Arabic version provided by

جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية
King Abdullah University of Science and Technology