بِسْمِ اللهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شجره طیّبه

پژوهشی در باب نقش درخت مثمر در نجات چرخه حیات و احیای تمدن نوین اسلامی

ترسیم وضعیت موجود و مطلوب، طرح مبانی و اصول راهبردی

به انضمام مقالات زیر در نقش بی‌بدیل درخت در رفع بحران آب:

۱. میرآب؛ بازخوانی نقش درخت در چرخهٔ آب
۲. درختان شارژ آب‌های زیرزمینی را به حداکثر رساندند
۳. پمپ بیوتیک

تنظیم: پائیز ۱۴۰۰ / شهر مقدس قم

ستاد راهبری محیط زیست، کشاورزی و منابع طبیعی حوزه‌های علمیه

مسیر ارتباطی: ۰۹۱۹۰۴۸۰۳۸۰

|۱۰|

فهرست

چکیـده ۳

ترسیم وضعیت موجود با بیان چیستی‌ها، هست‌ها و نیست‌های موضوع چرخه‌حیات ۵

۱. تخریب گستردهٔ طبیعت و اختلال در چرخه‌حیات ۵

۲. امکان تداوم حیات، مقدمهٔ ظهور تمدن ۶

۳. درخت، کلید تأمین ضروریات تمدن ۷

۳-۱. جایگاه درختان در تعدیل حرارت و گرمای زمین ۷

۳-۲. نقش بی‌بدیل درختان در تأمین و احیای چرخه آب ۸

۳-۲-۱. درختان و تصفیهٔ آب ۹

۳-۲-۲. کمک به تولید ابر ۹

۳-۲-۳. پمپاژ رطوبت توسط درختان (پمپ بیوتیک) ۱۰

۳-۳. نقش درختان در احیای چرخه خاک ۱۰

۳-۳-۱. اهمیت درختان در جلوگیری از فرسایش خاک ۱۱

۳-۳-۲. جایگاه درختان در تعدیل نمک خاک ۱۱

۳-۳-۳. درختان و فشردگی بیش از حد خاک ۱۲

۳-۴. نقش درختان در احیای چرخه هوا ۱۲

۴. کمپین‌های درختکاری در دنیا ۱۲

- خلاصه بخش ترسیم وضعیت موجود ۱۴

ترسیم وضعیت مطلوب با بیان چرایی‌ها و حکمت‌ها بر اساس مبانی ۱۵

مقدمه: لزوم توسعه فقه ۱۵

مبانی عام: ۱۶

الف. انسان: خلیفه و جانشین خدا در زمین ۱۶

ب. انسان: تولیدگر در نگاه اسلام؛ مصرف‌گرا در نگاه غرب ۱۷

مبانی خاص: ۱۹

الف. عمرانِ طبیعت، تکلیف دینی انسان ۱۹

ب. باغ، محیطِ زیست اولیه و آرمانی حیات انسان ۲۰

بیان چگونگی‌ها، بایدها و نبایدها با طرح اصول راهبردی ۲۱

۱. اتکا به انگیزه و توان مردم برای احیای طبیعت با تمرکز بر «شوق‌ثمر» ۲۱

۲. اولویت کاشت درخت بر ساختمان‌سازی در ایجاد سکونتگاه ۲۲

۳. اولویت ایجاد باغات و جنگل‌ها بر تجارت و صنعت ۲۳

۴. اولویت کاشت درخت با هدف تولید غذای آماده، سالم و در دسترس برای تامین امنیت غذایی ۲۴

۵. رعایت تنوع زیستی و تراکم در کاشت درختان و ایجاد پوشش‌گیاهی ۲۵

۶. منع کاشت درختان غیر بومی، مهاجم و بی‌ثمر ۲۶

- خلاصه بخش‌های ترسیم وضعیت مطلوب و اصول راهبردی ۲۸

«گیـاه و درخـــت و سبـزه و آنچـه از آن‌ها ناشـی می‌شـود، در ساخـت تـمدّن بشـری یک پایـهٔ مهم و اسـاسی است.»
امـام‌خامنـه‌ای‌حفـظه‌الله

چکیـــده

با شروع عصر مدرن تهاجم گسترده‌ای توسط انسان به طبیعت شروع شد. ذخایر و منابعی که اغلب تجدید ناپذیر هستند با سرعتی بیش از آنچه به طور طبیعی تولید می‌شوند، در حال مصرف و تمام شدن هستند. حاصل این تهاجم گسترده و سرطان مصرف، آلودگی‌های گسترده‌ای است که دامن آب و خاک و هوا را گرفته و رفته‌رفته قابلیت کرهٔ زمین را برای سکونت از بین می‌برد.

بر اساس فحصی که در نصوص دینی صورت گرفت، انسان به عنوان خلیفهٔ خداوند در زمین وظیفه‌ای الهی برای حفظ و عمران زمین دارد. این عمران و آبادانی منحصر به ساخت و سازهایی برای سکونت و رفاه موقت تعداد محدودی از انسان‌ها در دنیای فانی و گذرا نیست؛ بلکه حفظ طبیعت و ایجاد شرایط بهتر برای حیات تمامی انسان‌ها و دیگر مخلوقات در ادوار مختلف را شامل می‌شود؛ یعنی رعایت عدالت در هستی و در بین نسل‌ها.

راه حلِ برآمده از منابع دینی و یافته‌های جدید علوم تجربی برای احیای طبیعت، عمران زمین، مواجهه با بحران‌های زیست محیطی، خشکسالی و تغییرات اقلیمی، کاشت درخت و احیای باغات و جنگل‌ها است. درخت، کلید حفظ و احیای چرخه‌های زیستی در طبیعت و رمز اصلاح وضع تهدید کننده‌ای است که تمدن بشری و زیست دیگر موجودات را به خطر انداخته است.

اما با دو مشکل جدی برای کاشت درختان مواجه هستیم: اولاً: کمبود آب، ثانیاً: کمبود منابع مالی، امکاناتی و انسانی دولت‌ها.

مشکل نخست را تحقیقات علمی جدید رفع نموده و به صورت نظری و عملی اثبات کرده است که بر خلاف تفکر موجود، درخت تنها یک مصرف کننده در طبیعت نیست؛ بلکه جذب و نگهداری آب، تولید هوای سالم، احیای خاک و تولید غذای سالم از جمله فواید زائد الوصف درخت است و این چرخه‌حیات است که برای ادامهٔ زندگی در زمین وابسته به درخت می‌باشد. نتایج آزمایشات میدانی بر این استوار است که کاشت حساب شدهٔ درخت می‌تواند رطوبت را به دل سرزمین‌های خشک پمپاژ کرده و سفره‌های آب‌های زیرزمینی را مجدداً شارژ کند. در واقع چنین نتیجه می‌گیریم درخت بیش از آن که به خاک، هوا و آب نیازمند باشد تنها به همت انسان در جهت کاشت و داشت آن نیازمند است. لذا راه زمینه سازی برای ایجاد یک تمدن پایدار با قدرت رفع نیازهای گوناگون بشر، چیزی نیست جز رسیدن به راهی در جهت انگیزش انسان برای کاشت درخت و رفع مشکل دوم.

انگیزهٔ کاشت درخت می‌بایست در دل تک تک افراد جامعه جوانه زده تا با حرکتی عمومی و جریانی اجتماعی، زمین آباد گردد؛ امر مهمی که از توان حکومت‌ها در جهان خارج است.

برانگیختن بشر امروزی برای کاشت درختی که ثمر عینی و سریع آن را نمی‌بیند، بسیار مشکل بوده و دولت‌ها نیز با تصدی‌گری، توفیق چندانی در کاشت درختان غیر مثمر نداشته‌اند. توصیه به کاشت و داشت درخت مثمر به دلیل لمس و مشاهدهٔ ثمرات رنگارنگ‌اش برای مردم انگیزه‌بخش خواهد بود و کلید حل مشکل دوم است. توصیه‌ای راهبردی که از متون دینی برآمده و منطبق با فطرت انسان‌هاست. به عبارت دیگر: **شـوق‌ثـمر** (اشتیاق رسیدن به محصول و میوه)، همان انگیزه‌ای است که می‌توان با گفتمان‌سازی در مورد آن، تبدیل به همت و اراده‌ای جمعی برای کاشت درختان توسط مردم گردد.

ایجاد باغ و کاشت درختان مثمر به صورت مردمی، نظام‌های حاکمیتی را از کاشت درختان غیربومی و مهاجم بی‌نیاز کرده و از هزینه‌های هنگفت و جبران ناپذیری که به دولت‌ها و طبیعت تحمیل می‌شود، جلوگیری خواهد کرد.

زنده کردن شـوق‌ثـمر در قلوب مردم مقدمهٔ احیای طبیعت است و انگیزهٔ انسان را به جریان انداخته تا آگاهانه به سمت عملی نمودن این بخش عبادی از دین، حرکت کند و نتیجهٔ این اشتیاق، ایجاد باغ و انبوه درختان مثمر است که با عدم تصدی‌گری ساختارهای حکومتی به عنوان یکی از پایه‌های مهم و اساسی در تحقق تمدن نوین اسلامی قلمداد می‌شود.

برای تحقق این مهم، قدم اول کاشت درختان مثمر توسط مردم در مناطق غیر شهری و قدم ایده‌آل بعدی، حرکت به سمت ساخت شهرهای جدید بر مبنای شجرهٔ طیبه و رسیدن به «**بلد طیّب**» با حداقل تولید آلودگی‌های زیست محیطی است. درختانی که تأمین کنندهٔ امنیت غذایی مردم هستند. این تنها راه برای **نجات چرخه‌حیات** در زمین است.

ترسیم وضعیت موجود با بیان چیستی‌ها، هست‌ها و نیست‌های موضوع چرخه‌حیات

۱. تخریب گستردهٔ طبیعت و اختلال در چرخه‌حیات

تداخلات یا بهتر بگوییم تهاجماتی که انسان در در سه قرن اخیر به طبیعت کرده است همگی بر این پایه استوارند که طبیعتی که خداوند آن را در متقن‌ترین و بهترین شکل ممکن خلق کرده است[۱، ۲، ۳، ۴] را تغییر دهد و بتواند بر آن غلبه کند تا به منافع بیشتری برسد. این مداخلات منجر به شکل گیری **زنجیره‌ای** از اتفاقات شده که فساد و تباهی کره زمین به خاطر کارهایی که انسان مرتکب شده در دریا و خشکی به چشم می‌آید.[۵]

بر اساس گزارش سازمان ملل از سال ۲۰۰۰ تخریب طبیعت با سرعت فوق العاده‌ای افزایش یافته است. یک‌سوم از زمین به دلیل استفاده از سموم و آفت‌کش‌ها آلوده شده است. رفتارهای انسان، برخی گیاهان و جانوران را نابود کرده و تعادل تولید و جذب دی‌اکسید کربن را به هم ریخته است.

تنها در فاصلهٔ سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ جهان سالانه ۲۶ میلیون هکتار درخت از دست داده است. یعنی هر سال چیزی حدود کل مساحت انگلستان! [۶] تخمین زده شده است در سه دهه گذشته ۱۷۸ میلیون هکتار از مساحت جنگل‌ها کاسته شده است.[۷]

در نتیجهٔ جنگل زدایی‌هایی که توسط انسان‌ها به منظور باز شدن فضا برای کشاورزی، دامداری و یا استفاده از چوب درختان صورت گرفته است، ۱۷ درصد از مساحت جنگل های بارانی آمازون – که یک‌تنه بیش از ۴۰ درصد از اکسیژن زمین را تولید می‌کنند – از بین رفته است.[۸]

---

[۱] ﴿قَالَ رَبُّنَا الَّذِی أَعْطَی کُلَّ شَیْءٍ خَلْقَهُ ثُمَّ هَدَی﴾ طه – ۵۰.

گفت: پروردگار ما کسی است که به هر موجودی، آفرینش [ویژه] او را [آن گونه که سزاوارش بود] به وی عطا کرده، سپس هدایت نمود.

[۲] ﴿وَتَرَی الْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً وَهِیَ تَمُرُّ مَرَّ السَّحَابِ صُنْعَ اللَّهِ الَّذِی أَتْقَنَ کُلَّ شَیْءٍ إِنَّهُ خَبِیرٌ بِمَا تَفْعَلُونَ﴾ نمل – ۸۸.

و کوه ها را می بینی [و] آنها را [در جای خود] بی حرکت می پنداری، در حالی که آنها مانند ابر گذر می کنند. آفرینش خداست که [آفرینش] هر چیزی را محکم و استوار کرده است؛ یقیناً او به آنچه انجام می دهید، آگاه است.

[۳] ﴿الَّذِی أَحْسَنَ کُلَّ شَیْءٍ خَلَقَهُ وَبَدَأَ خَلْقَ الْإِنْسَانِ مِنْ طِینٍ﴾ سجده – ۷.

همان کسی که هر آنچه آفرید را نیکو ساخت، و آفرینش انسان را از گِل آغاز کرد.

[۴] ﴿وَالْأَرْضَ مَدَدْنَاهَا وَأَلْقَیْنَا فِیهَا رَوَاسِیَ وَأَنْبَتْنَا فِیهَا مِنْ کُلِّ شَیْءٍ مَوْزُونٍ﴾ حجر– ۱۹.

و زمین را گستراندیم و در آن کوه‌های استوار قرار دادیم، و از همه چیز به قدر و اندازهٔ معین، موزون و متناسب در آن پدید آوردیم.

[۵] ﴿ظَهَرَ الْفَسَادُ فِی الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا کَسَبَتْ أَیْدِی النَّاسِ لِیُذِیقَهُمْ بَعْضَ الَّذِی عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ یَرْجِعُونَ﴾ روم – ۴۱.

در خشکی و دریا به سبب اعمال زشتی که مردم به دست خود مرتکب شدند، فساد و تباهی نمودار شده است تا [خدا کیفر] برخی از آنچه را انجام داده اند به آنان بچشاند، باشد که [از گناه و طغیان] برگردند.

[۶] https://washingtonpost.com/graphics/۲۰۲۰/climate-solutions/trillion-tree-reforestation-climate-change-philippine

[۷] https://worldwildlife.org/photos/deforestation-in-borneo

[۸] https://sciencing.com/trees-important-ecosystem–۵۸۹۵۱۵۸.html

طبیعت که تا دیروز با تولید و تجدید منابع با سرعتی هماهنگ با نیازهای واقعی انسان، تمام احتیاجات او را پاسخ می‌گفت[۹] با شروع تمدن جدید و سرسام‌گونگیِ مصرف، از نیازهای روزافزون انسان جا ماند.
اندیشمندان نیز در تعیین چگونگی مواجهه فرهنگ‌ها و تمدن‌ها با غرب دچار سرگردانی شدند. زیرا مصرف‌زدگی روی دیگر انسان را نمایانده بود و با حاکم شدن مصرف‌گرایی، تفکر و رفتار انسان ابعاد جدیدی پیدا کرد که تا پیش از این در حیات بشر سابقه نداشت.
با گسترش تمدن غرب و ایجاد نیازهای کاذب، بشر شروع به استفادهٔ بی‌مهابا از منابع پیرامون خود کرد و با پایان یافتن این منابع، مصرف‌گراییِ افسار گسیخته انسان را به سمت سلطه بر طبیعت، جوامع و تغییرات وسیع در جغرافیای طبیعی و انسانی سوق داد. تغییراتی که ممکن است هیچگاه به حالت سابق باز نگردد.
علیرغم وعده‌های دانشمندان در ابتدای قرن جدید که مدعی بودند با پیشرفت علم و تکنولوژی، تخریب محیط زیست متوقف شده و انسان زندگی مسالمت آمیزی در زمین خواهد داشت، فناوری‌ها و تکنولوژی‌های نوین هم دردی از انسان دوا نکرد. پیشرفت علوم غربی تنها توانسته است ما را قادر کند تا دودکش‌های بلندتری ساخته و آلودگی‌ها را چند متر بالاتر رها کنیم و رو رویارویی با مشکل را کمی به تعویق اندازد. علاوه بر این‌که در برخی موارد مشکلات و سموم جدیدی اضافه کرده که خود تبدیل به مشکلات پیچیده‌تری شده‌اند. تهاجمی که در چند قرن اخیر توسط انسان به طبیعت صورت گرفته به حدی فراگیر است که اثرات مخربش بر تنوع زیستی، کشاورزی و سلامت جسمی و روحی انسان و دیگر موجودات قابل انکار نیست.
در حقیقت تاریخ بشری در نقطه‌ایست که باید انتخاب کند به سمت حیات آرمانی برود یا نابودی قریب‌الوقوع را بپذیرد.[۱۰]
با این تفاصیل قطع درختان، ویران کردن جنگل‌ها و مراتع، در ردیف فاجعه‌هایی است که بزرگ‌ترین زیان‌ها را برای جوامع بشری به دنبال دارد و سلامت محیط‌زیست را به صورتی جدی به خطر می‌اندازد.
تخریب جنگل‌ها و مراتع، از مهم‌ترین مصادیق قاعدهٔ «لاضرر» است. آن هم نه آسیبی که یک فرد یا حتی یک نسل را به مخاطره بیاندازد؛ بلکه ضررهای ناشی از تخریب گسترده و وقف نشدن اراده‌های انسانی در راستای احیای زیست‌بوم کرهٔ زمین دامن اعصار و نسل‌های آینده را نیز خواهد گرفت.
به طوری که دانشمندان تخمین می‌زنند با تداوم شرایط فعلی قابلیت حیات انسانی بر روی زمین بعد از سال ۲۱۰۰ با تردید جدی مواجه باشد.[۱۱]

۲. امکان تداوم حیات، مقدمهٔ ظهور تمدن

نقطه شروع تمدن، اقامت و سکونت جمعی انسان‌ها در یک ناحیه است. تمدن از اصل عربی «مدینه» گرفته شده و به معنای اقامت در شهر و خو گرفتن به اخلاق مردم آن به کار رفته است.[۱۲]

---

[۹] این معنا در قرآن کریم چنین بیان شده است: ﴿إِنَّا كُلَّ شَيءٍ خَلَقنَاهُ بِقَدَر﴾ قمر – ۴۹. ما هر چیزی را به اندازه آفریدیم.
[۱۰] امیرالمومنین علیه‌السلام: «أَيُّهَا اَلنَّاسُ مَنْ سَلَكَ اَلطَّرِيقَ اَلْوَاضِحَ وَرَدَ اَلْمَاءَ وَ مَنْ خَالَفَ وَقَعَ فِي اَلتِّيهِ» نهج البلاغه – خطبهٔ ۲۰۱.
ای مردم، هر که در راه روشن و آشکار رود به آب رسد؛ و هر که از آن تخلّف جوید در بیابان سرگردان بماند.
[۱۱] https://youmatter.world/en/definition/definitions-sustainability-definition-examples-principles
[۱۲] التحقیق – ج۱۱ – ص۵۵، «مدن».

اما چه می‌شود که شرایط یک منطقهٔ خاص برای عده‌ای از انسان‌ها جذابیت پیدا کرده و باعث می‌شود تا جایی را برای سکونت انتخاب کنند؟

اولین شرطی که منطقهٔ مورد نظر برای شروع تمدن لازم دارد «**امکان تداوم حیات**» است. هرچه دسترسی انسان به امکانات حیاتی در آن سرزمین بیشتر باشد، مدت و کیفیت و در نتیجه جذابیت سکونت بیشتری پیدا خواهد کرد. تمام انسان‌ها برای حیات، ادامهٔ زندگی و حفظ سلامت خود نیازمند حرارت، هوا، آب و غذای سالم هستند.

در ضرورت هوا همین نکته کافی است که ما بدون اختیار تنفس می‌کنیم. یعنی آنقدر به هوا نیازمندیم که نمی‌توانیم برای استفاده از هوا تصمیم بگیریم و بر اساس اراده و اختیار خود به نفس کشیدن ادامه دهیم یا از نفس کشیدن دست بکشیم.

حدود دو سومِ بدن ما از آب تشکیل شده و به همین میزان، زمین را نیز آب فرا گرفته است. در واقع آب مایهٔ حیاتِ موجودات زنده است.[۱۳]

جدا از اینکه غذا خوردن برای ما لذت‌بخش است در حقیقت ما برای تأمین نیازهای جسمی خود (فراهم نمودن حرارت بدن و چرخه تولید و بازیافت اعضاء بدن) نیازمند خوردن غذا هستیم. تمام مواد و عناصری که انسان برای ادامهٔ حیات نیاز دارد در خاک موجود است و ما یا به طور مستقیم با خوردن نمک یا به واسطهٔ گیاهان و یا با واسطه‌های بیشتر و از طریق مصرف محصولات حیوانی از موهبت این مواد موجود در خاک استفاده می‌کنیم.

۳. درخت، کلید تأمین ضروریات تمدن

برای روشن شدن نقش درخت در برآورده‌ساختن نیازهای انسان و بسترسازی برای تمدن در ادامه به نقش احیاء کنندهٔ درخت در تامین ضروریات انسان در تعدیل حرارت و سه اکوسیستم بزرگِ آب، خاک و هوا می‌پردازیم.

۳-۱. جایگاه درختان در تعدیل حرارت و گرمای زمین

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد **بهترین راه مقابله با تغییرات گستردهٔ آب و هوا و گرم شدن زمین، کاشت درخت در مقیاس وسیع است.**[۱۴] حتی یک درخت هم تأثیر مستقیمی بر روی آب و هوای اطراف خود و جهان دارد؛ این را در یک روز گرم که به باغ و بوستان رفته‌اید به وضوح حس کرده‌اید. تخمین زده می شود که درختان جنگل‌های آمازون دمای هوا را ۳/۶ تا ۶/۳ درجه فارنهایت کاهش می دهند. در قرن گذشته میانگین دما در سراسر جهان ۱/۴ درجه فارنهایت افزایش یافته است.[۱۵] کنترل دما به این صورت است که درخت بیش از ۸۰ درصد از نور و گرمای خورشید را برای فتوسنتز جذب می‌کند و ۱۵ درصد را به جو منعکس می‌کند.

---

[۱۳] ﴿وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ﴾ انبیاء – ۳۰. و هر چیز زنده‌ای را از آب آفریدیم.

[۱۴] JEAN-FRANCOIS BASTIN & YELENA FINEGOLDCLAUDE GARCIA & MOLLICONE & REZENDE & ROUTHCONSTANTIN M. ZOHNER & THOMAS W. CROWTHER: The global tree restoration potential – Science - Jul ۲۰۱۹ - Vol ۳۶۵, Issue ۶۴۴۸ - pp. ۷۶–۷۹ : www.science.org/doi/abs/۱۰.۱۱۲۶/science.aax۰۸۴۸

[۱۵] https://sciencing.com/deforestation-affect-air–۱۰۶۳۲.html

علاوه بر این با سایه‌ای که به وجود می‌آورند زمین اطراف خود را نیز خنک می‌کنند. خنک شدن سطح زمین مساوی است با درنگ بیشتر آب در خاک که رطوبت را در خاک حفظ می‌کند. سودی که درخت از این **چرخه** می‌برد این است که زمان بیشتری برای جذب مواد موجود در آب پیدا می‌کند. اما جذب بیشتر آب توسط درخت، خبر خوبی برای انسان و کل اکوسیستم هم هست: وقتی که مواد مغذی از طریق ریشه به درخت منتقل شد، بخار آب توسط برگ‌ها از طریق فرآیندی موسوم به «تعرّق» به هوا بازگردانده می‌شود. بخار آب به صورت باران تجمع کرده و می بارد؛ زمین را خنک کرده و مواد مغذی را مجدداً به گیاهان باز می‌گرداند. (در مبحث چرخه آب، به این مسئله خواهیم پرداخت.)
در واقع درخت تضمین می‌کند که چرخه زیست در محدودهٔ دمایی متعادلی کار کند. بدون جنگل، زمین مقدار بیشتری گرمای خورشید را بازتاب داده و به هوا برمی‌گرداند، فرصت جذب آب را از خاک می‌گیرد و پوشش گیاهی را خشک می‌کند. پس بدون درخت، خشکسالی و طبعاً گرم شدن کره زمین سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

۳-۲. نقش بی‌بدیل درختان در تأمین و احیای چرخه آب[۱۶]

با احیای درخت تنها هوا و خاک اصلاح نمی‌شوند؛ چرخِ چرخه آب هم با درخت می‌چرخد.[۱۷] یافته‌های جدید علوم تجربی باعث شده است دانشمندان که به خیال خود داشتند پروندهٔ درخت را می‌بستند، خود را هنوز در ابتدای راه کشف رفتار درخت در چرخه آب ببینند. تصوراتی که در گذشته در مورد نقش درخت در چرخه آب وجود داشت، امروزه در حال دگرگونی است. به خلاف تصور رایج که در مناطق خشک برای صرفه جویی در مصرف آب از کاشت درخت جلوگیری می‌شود، با آزمایشاتی که به تازگی با روش‌های مختلف صورت گرفت، روشن شد که درخت در عین حال که یک تنه نیمی از بار چرخه آب را به دوش می‌کشد، آب را بر سر سفره‌های زیرزمینی نیز می‌برد.[۱۸] دانشمندان تجربی با انجام آزمایشاتی در غرب آفریقا دریافتند وقتی تعداد مشخصی از درختان وجود دارد میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی به حداکثر می‌رسد و در مناطقی که پوشش جنگلی از بین رفته است به دلیل این‌که آب به صورت سطحی جاری است و تبخیر خاک زیاد است، هرچند آب کمتری از طریق درختان استفاده می‌شود، اما آب‌های زیرزمینی به مقدار بسیار کمتری شارژ می‌شوند.[۱۹]
نکتهٔ جالب توجه این است که این تحقیق در یکی از خشک ترین مناطق زمین – بورکینافاسو – صورت گرفته که ۷۰ درصد از مناطق خشک و بیابانی شرایطی مانند آن یا بهتر از آن دارند!

---

[۱۶] برای بررسی تفصیلی نقش کلیدی درخت در پاسداری از چرخهٔ آب و بیان راهبرد حل بحران آب از طریق کاشت درخت، به مقاله‌ای که تحت عنوان «**میــرآب**» به پیوست آمده است، رجوع کنید.

[۱۷] امام صادق ﷺ: «إِنَّ اَللَّهَ عَزَّ وَ جَلَّ اِخْتَارَ لِأَنْبِيَائِهِ اَلْحَرْثَ وَ اَلزَّرْعَ كَيْلاَ يَكْرَهُوا شَيْئاً مِنْ قَطْرِ اَلسَّمَاءِ» الکافی- ج ۵ – ص ۲۶۰.
به راستی خداوند عزّ و جلّ برای پیامبرانش، کاویدن زمین و کشاورزی را برگزید، تا بارانی را که از آسمان می‌بارد ناخوش ندارند.

[۱۸] U.Ilstedt , A.Bargués Tobella , H.R.Bazié , J.Bayala , E.Verbeeten , G.Nyberg , J.Sanou , L.Benegas, D.Murdiyarso, H.Laudon, D.Sheil & A.Malmer - Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics - Scientific Reports volume ۶, Article number: ۲۱۹۳۰ (۲۰۱۶):
www.nature.com/articles/srep۲۱۹۳۰
اصل مقالهٔ فوق با عنوان «درختان شارژ آب‌های زیرزمینی را به حداکثر رساندند» در پیوست آمده است، و به طور مشروح روش‌ها و آزمایشات صورت گرفته را توضیح می‌دهد.

[۱۹] https://forestsnews.cifor.org/۴۰۷۰۲/finding-water-amid-the-trees?fnl=en

۳-۲-۱. درختان و تصفیهٔ آب

باغ‌ها و جنگل‌ها مانند یک **اسفنج بزرگ** در هنگام بارندگی آب را در خاک خود جذب می‌کنند. قبل از این که آب را مصرف کنند لازم است تا توسط ریشه‌ها فیلتر شود. عارضهٔ جانبی فیلتر شدن توسط ریشه‌ها پالایش آب از آلودگی‌ها قبل از بازگشت به چرخه است. درختان پس از این‌که سهم اندک خود را برداشتند، مجدداً و به آرامی باقی مانده را به نهرها یا سفره‌های زیرزمینی بازمی‌گردانند.[۲۰]

درخت از دو جهت دیگر به چرخه آب و مخصوصاً بارش باران کمک می‌کند: بافتن ابر و پمپاژ رطوبت:

۳-۲-۲. کمک به تولید ابر

آزمایشات اخیر نشان داده است که درختان نقش اصلی را در تولید رطوبت جوی ایفاء می‌کنند. بیش از ۷۰ درصد رطوبت جوی تولید شده در مناطق خشک – برخلاف آنچه در گذشته تصور می‌شد که از دریاچه‌ها یا رودخانه‌ها و... باشد – از گیاهان ناشی می‌شود.[۲۱] باران تنها زمانی می‌تواند ببارد که آب موجود در لایه‌های بالای اتمسفر به صورت قطرات متراکمی تبدیل شود. در حین فرآیند تعرق (بازگشت بخار به جو) درختان آب را خالص باز نمی‌گردانند. درخت در ضمن تعریق، گردهٔ گیاهان، میکروارگانیسم‌ها و ذرات ریز بیولوژیکی‌ای به نام «بیوآئروسل» (هواپخش‌های طبیعی) را به بخار اضافه کرده است. این ذرات ریز مانند یک تور باعث گرد هم آمدن قطرات آب می‌شوند و بارش باران را تسهیل می‌کنند.[۲۲] کاری که در صورت از بین رفتن درختان با صرف هزینه‌های بسیار باید به صورت مصنوعی انجام شود.

---

[۲۰] https://greenfleet.com.au/news/role-trees-water-cycle

[۲۱] https://forestsnews.cifor.org/۴۹۰۱۰/linking-trees-and-water?fnl=

[۲۲] Cindy E.Morris ,Franz Conen , J.Alex Huffman , Vaughan Phillips , Ulrich Pöschl , David C. Sands - Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere - Global Change Biology - Volume ۲۰, Issue ۲ p. ۳۴۱–۳۵۱
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/۱۰.۱۱۱۱/gcb.۱۲۴۴۷

۳-۲-۳. پمپاژ رطوبت توسط درختان (پمپ بیوتیک)

یکی دیگر از شگفتی‌هایی که به تازگی کشف شده و جامعهٔ علمی و زیست محیطی را با تغییر زاویه نگاه جدّی مواجه کرده است عملیات پمپاژ رطوبت توسط درختان است.[۲۳] این نظریه به زبان ساده در صدد بیان این نکته است که رطوبت جوّی تولید شده توسط جنگل‌ها فقط در حوضهٔ آبریز محلی خودشان باقی نمی‌ماند: و در واقع بیشترش به وسیلهٔ باد به سائر مناطق، کشورها یا حتی قاره‌های دیگر منتقل می‌شود و با مکشی که به خاطر جنگل صورت می‌گیرد دوباره هوای مرطوب و ابر به سمت مناطق درختکاری شده کشیده می‌شود.[۲۴]

گوئی درخت مهمانی است که به قول معروف روزی‌اش را نیز با خود به همراه آورده است.

توجه داشته باشید که داریم از یک «**چرخه**» صحبت می‌کنیم.[۲۵] یعنی هنگامی که خاک به اندازه کافی مرطوب است، بهره‌وری گیاهان و جامعه اکولوژیکی به طور کلی حداکثری می‌شود و همین امر دوباره باعث شکل‌گیری ابرهای بارانی تا نقاط دور دست خواهد شد. باید واقف بود اگر این چرخه توسط انسان به هم بخورد یا حفظ و تداوم نیابد، سرنوشت زمین، بیابانی به وسعت کل زمین و نابودی بشر خواهد بود؛ چیزی شبیه مریخ!

۳-۳. نقش درختان در احیای چرخه خاک

ساده‌ترین کار خاک فراهم آوردن بستری سرشار از مواد مغذی برای گیاهان است. با تصفیهٔ آب باران، از راه یافتن سموم و مواد مضر به لایه‌های زیرین زمین جلوگیری می‌کند و با جذب آب مانع راه افتادن سیل و آب‌گرفتگی می‌شود. همچنین می‌تواند مقدار زیادی کربن آلی[۲۶] را ذخیره کند و بار مشکلات هوا در برابر آلاینده‌ها را سبک کند.[۲۷]

---

[۲۳] https://acp.copernicus.org/articles/۱۳/۱۰۳۹/۲۰۱۳/

به دلیل پیچیدگی و وابستگی مفاهیم این نظریه با علوم تجربی تخصصی، اصل این مقاله نیز پیوست شده است. این مقاله که نظریهٔ «پمپ بیوتیک» برای اولین بار در آن ارائه شد به نوبهٔ خود حواشی جالبی داشت. این نظریه یک اصل فیزیکی جدید را بر اساس شواهدی که به دست آورده است اثبات می‌کند: تراکم هوا باعث ایجاد جریان‌های هوا می‌شود نه دمای آن. این نظر که در تقابل با نظریات قدیمی در فیزیک بود باعث برآشفته شدن فضای علوم تجربی شد. چرا که با اثبات این نظریه این جنگل‌ها هستند که نقش اصلی در انتقال ابر و بارش باران در سائر نقاط را ایفاء می‌کنند.

به همین دلیل این مقاله تا دو سال و نیم پس از پذیرفته شدن توسط مرجع علمی Atmospheric Chemistry and Physics (شیمی و فیزیک اتمسفر) چاپ نشد و در هنگام چاپ نیز یادداشت بلندی توسط تحریریهٔ این مجله به آن پیوست شده بود که دلیل چاپ این مقاله را علیرغم وجود مخالفت‌های شدید، عدم وجود اشتباه در نظریهٔ ارائه شده دانستند و از دانشمندان درخواست کردند در صورتی که استدلال علمی برای رد این نظریه دارند به مجله ارسال کنند.

[۲۴] https://forestsnews.cifor.org/۴۹۰۱۰/linking-trees-and-water?fnl=

[۲۵] این چرخه به خوبی در این آیه به تصویر کشیده شده است: ﴿أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَلَكَهُ يَنَابِيعَ فِي الْأَرْضِ ثُمَّ يُخْرِجُ بِهِ زَرْعًا مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهُ ثُمَّ يَهِيجُ فَتَرَاهُ مُصْفَرًّا ثُمَّ يَجْعَلُهُ حُطَامًا إِنَّ فِي ذَٰلِكَ لَذِكْرَىٰ لِأُولِي الْأَلْبَابِ﴾ زمر – ۲۱.

آیا ندانسته ای که خدا از آسمان آبی نازل کرد، پس آن را به صورت چشمه‌هایی در زمین درآورد، آن گاه به وسیله آن زراعتی را که رنگ هایش گوناگون است، بیرون می‌آورد، سپس [آن زراعت] خشک می‌شود، در نتیجه آن را به رنگ زرد بینی، پس آن را ریز ریز و در هم شکسته می‌کند؛ بی‌تردید در این [دگرگونی‌ها] برای خردمندانْ هشدار و عبرتی است.

[۲۶] کربنی که به صورت معدنی در خاک موجود است.

[۲۷] https://gardenhealth.com/advice/soil-and-compost/the-importance-of-soil

انسان تنها موجودی است که می‌تواند خاک را آلوده کند. خاک بی‌دفاع‌ترین موجودی است که در طبیعت مورد تهاجم انسان قرار گرفته است؛ فلذا انسان در رابطه با خاک باید با احتیاط و لطافت بیشتری عمل کند. زیرا به خلاف زمان بسیار طولانی‌ای که برای به وجود آمدن خاک حاصلخیز نیاز است، در صورت بی توجهی انسان و عدم حفظ و نگه‌داریِ او، خاک به سرعت – گاهی در چند ثانیه! – تخریب می‌شود. به دلیل زمان طولانی‌ای که برای تولید و حاصلخیز شدن هر سانت خاک لازم است،[۲۸] خاک جزء منابع تجدیدناپذیر به شمار می‌رود. خاک به سرعت از بین می رود اما طی هزاره‌ها جایگزین می‌شود و این یکی از بزرگترین تهدیدهای جهانی برای آیندهٔ انسان است. متاسفانه انسان‌ها با دفع نامناسب زباله‌های ناشی از منابع شهری یا صنعتی، پس‌آب‌های آلوده، سموم و آفت‌کش‌های کشاورزی، فعالیت‌های صنعتی و انتشار مواد هسته‌ای و رادیواکتیو در حال تبدیل خاک به قبرستانِ عظیم مواد مضر هستند.[۲۹]

۳-۳-۱. اهمیت درختان در جلوگیری از فرسایش خاک

فرسایش و بازیافت خاک هرچند یک فرآیند طبیعی است و با سرعتی هماهنگ با چرخه تولید مجدد خاک، همواره در حال وقوع است ولی برخی از فعالیت‌های بشری، سرعت سرسام‌آوری به آن بخشیده است. طبق بررسی‌های صورت گرفته در صورتی که روند کنونی ادامه پیدا کند، تا ۶۰ سال آینده خاک سطحی (قابل کشت و زرع) را به کلی از دست می‌دهیم.[۳۰] **متاسفانه ایران با میانگین فرسایش سالانه ۱۶ تن در هکتار، در مقام نخست فرسایش خاک جهان قرار دارد.**[۳۱، ۳۲] درخت با روش‌های گوناگونی می‌تواند جان دوباره‌ای در خاک بدمد: درختان به دلیل شاخ و برگی که دارند از فرسایش خاک به دلیل فروافتادن قطرات باران یا وزش شدید باد به سطح خاکِ ناپایدار جلوگیری می‌کنند. ریشه‌های درختان نیز با پنجه درافکندن در خاک، آن را در جای خود محکم می‌کند. درختان حتی به تولید خاک هم سرعت می‌بخشند؛ ریشه‌ها قلوه سنگ‌های زیرزمین را خرد کرده و یک قدم به خاک شدن نزدیک‌شان می‌کنند و در روی زمین نیز با افتادن برگ‌ها، در زمانی بسیار کوتاه‌تر خاکی غنی از برگ‌های تجزیه شده می‌سازند.[۳۳]

۳-۳-۲. جایگاه درختان در تعدیل نمک خاک

کاشت درخت مانعِ از دست رفتن خاک به خاطر شوری بیش از حد می‌شود. با به راه افتادن آب بر روی زمین – چه آب باران، چه آبیاری – آب پس از مدتی جذب خاک شده و نمک موجود در آن بر روی سطوح بالایی خاک باقی می‌ماند . این مسئله در دراز مدت منجر به نمک‌زار شدن خاک می‌شود.
ریشه‌های درختان مواد آلی آب از جمله نمک را جذب کرده و از این طریق ظرفیت جذب آب را به صورت چشمگیری افزایش می‌دهند. در برخی موارد کاشت درخت در زمین‌های بایر باعث بهره‌برداری مجدد از خاک شده است.[۳۴]

---

[۲۸] حداقل ۲۰۰ سال برای تولید یک سانتیمتر و ۳۰۰۰ سال برای حاصلخیزشدنش.

[۲۹] https://environmentalpollutioncenters.org/soil

[۳۰] https://heartofenglandforest.org/news/trees-and-soil-protection

[۳۱] https://isna.ir/xdMfKv

[۳۲] https://jahanesanat.ir//?p=۵۴۰۶۹

[۳۳] https://heartofenglandforest.org/news/trees-and-soil-protection

[۳۴] http://fao.org/۳/u۵۶۲۰e/u۵۶۲۰e۰۵.htm

۳-۳-۳. درختان و فشردگی بیش از حد خاک

یکی دیگر از خطراتی که شیوه‌های غلط کشاورزی در دراز مدت برای خاک به وجود آورده است فشردگی بیش از حد است. هنگامی که خاک فشرده شود، آب نمی‌تواند به سطوح پایین خاک نفوذ کند. در نتیجه سطح آب‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد و چاه‌ها و چشمه‌ها خشک می‌شوند. کاشت درخت حتی در زمین‌هایی که فشرده شده‌اند به تجزیهٔ ساختار خاک کمک کرده و سرعت نفوذ بارندگی را در خاک بهبود می‌بخشد.[۳۵] زیرا علاوه بر این‌که ریشه‌ها در خاک نفوذ کرده و لایه‌های سخت شده را متعادل می‌کنند، موجوداتی مانند کرم‌ها و مورچه‌ها نیز پیرامون درخت لانه سازی می‌کنند و روزنه‌های ریز و مؤثری برای ورود آب و هوا باز می‌کنند. برای عمران و آبادانی خاک لازم است جنگل‌های طبیعی ایجاد یا ترمیم شوند و الگویی که قرن‌هاست در کشاورزی سنتی استفاده می‌شود و در ترکیبی متناسب، درختکاری، زراعت و دامداری در کنار هم صورت می‌پذیرد و آسیبی به خاک وارد نمی‌آورد را احیاء کرد.

۳-٤. نقش درختان در احیای چرخه هوا

تأثیر درختان بر چرخه هوا را بیشتر شنیده‌اید. دی‌اکسید کربن یکی از گازهای گلخانه‌ای است که با جلوگیری از خروج گرمای اتمسفر زمین به گرم‌تر شدن زمین کمک می‌کند. درختان در فرآیندی که به «ترسیب کربن» معروف است ۹۰ درصد[۳۶] از این دی‌اکسید کربن را با فتوسنتز از هوا خارج کرده و از کربن تغذیه می‌کنند تا آن را به شاخ و برگ خود تبدیل کرده یا به عنوان کربن آلی در خاک ذخیره کنند.[۳۷] یک هکتار جنگل، شش تن دی‌اکسید کربن را جذب و چهار تن اکسیژن تولید می‌کند که این مقدار برای برآوردن نیازهای سالانهٔ ۱۸ نفر کافی است.[۳۸]

٤. کمپین‌های درختکاری در دنیا

انسان تازه به فوائد و تأثیرات ناشناختهٔ درخت چشم گشوده و همین باعث شده تا اقداماتی که برای نجات زمین و انسان در حال شکل گیری است بیش از پیش جدی گرفته شود. به عنوان نمونه یک مجموعهٔ خصوصی با مدیریت جوانی به نام «شوبهندو شارما» توانسته ارادهٔ جمعی انسان‌ها را جهت داده و در **۲۵ شهر جهان ۷۵ جنگل** احداث کند! از آن‌جا که جنگل‌های پدید آمده توسط این گروه بر پایهٔ مدلی از کاشت انواع درختان[۳۹] در کنار هم احداث شده‌اند، پس از سه سال آبیاری به اکوسیستم کوچکی تبدیل می‌شود که برای ادامهٔ حیات روی پای خودش تکیه می‌کند و هیچ نیازی به آبیاری دستی و تصدی‌گری و دخالت‌های انسانی ندارد.[۴۰]

---

[۳۵] https://syngenta.com/en/innovation-agriculture/our-stories/trees-forever-partnership

[۳۶] André Gonçalves - Editor & Head Of English Market - Published at ۲۰۲۰, January ۳۱th https://youmatter.world/en/planting-trees-stop-climate-change/

[۳۷] Sarah Fecht - Columbia Climate School - February ۲۵, ۲۰۲۱ https://news.climate.columbia.edu/۲۰۲۱/۰۲/۲۵/carbon-dioxide-cause-global-warming/

[۳۸] https://savatree.com/whytrees.html

[۳۹] این الگو سال‌ها در کشاورزی سنتی استفاده شده و می‌شود.

[۴۰] https://ted.com/talks/shubhendu_sharma_how_to_grow_a_forest_in_your_backyard?language=en

در جدول زیر نیز به تعدادی از کمپین‌ها و موسسات مذهبی، دولتی و مردمی که هدف خود را کاشت درخت قرار داده‌اند، اشاره شده است:

نام	محدوده	هدف	وب سایت
ابتکار دیوار سبز بزرگ	آفریقا (ساحل)	احیای زمین های تخریب شده، کربن جدا شده و ایجاد مشاغل سبز تا سال ۲۰۳۰ برای کاهش بیابان زایی	unccd.int/actions/great-green-wall-initiative
کمپین یک تریلیون درخت	جهانی	کاشت و حفاظت از **یک تریلیون** درخت برای کاهش تغییرات آب و هوایی و ارتقاء رفاه تا سال ۲۰۵۰	trilliontrees.org/home
نهضت درخت	جهانی	کاهش گازهای گلخانه‌ای	tree-nation.com
کاشت گیاه برای سیاره	جهانی	این پلت فرم از پروژه‌های کاشت درخت در سراسر جهان با هدف کاشت **یک تریلیون** درخت پشتیبانی می‌کند.	www.plant-for-the-planet.org/fa/home
چالش بُن (آلمان)	جهانی	بازسازی ۱۵۰ میلیون هکتار زمین جنگل زدایی شده و تخریب شده تا سال ۲۰۲۰ و ۳۵۰ میلیون هکتار تا سال ۲۰۳۰ در سراسر جهان	bonnchallenge.org
جنگل زداییِ سونامی یک میلیارد درخت	پاکستان	بازگرداندن و کاشت درخت در **۳۵۰۰۰۰ هکتار** از جنگل‌های تخریب شده	ejatlas.org/conflict/billion-tree-tsunami-afforestation-project
برنامه یک میلیارد درخت (دولت نیوزلند)	نیوزلند	برنامه جنگل کاری و جنگل کاری با هدف کاشت **یک میلیارد** درخت برای تنوع بخشیدن به کاربری های موجود در سراسر نیوزلند و بهبود عملکرد اقتصادی و اجتماعی	mpi.govt.nz/funding-and-programmes/forestry/one-billion-trees-programme/about-the-one-billion-trees-programme/
برنامه پناهگاه جنگل شمالی (دولت چین)	چین	**بیش از ٦٦ میلیارد درخت از سال ۱۹۷۸ برای جلوگیری از گسترش مناطق خشک کاشته شده**	nature.com/articles/d۴۱۵۸۶-۰۱۹-۰۲۷۸۹-w
کمپین ۵۰ میلیون برای جنگل‌های ما	ایالات متحده آمریکا	کمپین جنگل کاری با هدف کاشت **۵۰ میلیون** درخت برای مقابله با تلفات جنگل به دلیل اختلالات طبیعی	nationalforests.org/get-involved/tree-planting-programs
ابتکار ۷۳ میلیون درخت در آمازون (NGO)	برزیل	برنامه جنگل کاری با هدف کاشت **۷۳ میلیون** درخت در جنگل‌های بارانی آمازون برای مبارزه با از بین رفتن جنگل	smithsonianmag.com/smart-news/brazil-begins-effort-effort-eplant-۷۳-million-trees-amazon-۱۸۰۹۶۷۰۸۶/
۶۰ میلیون درخت	ایتالیا	کاشت یک درخت برای هر شهروند ایتالیایی برای مبارزه با تغییرات آب و هوایی	www.alberitalia.it

خلاصه بخش ترسیم وضعیت موجود

با دقت در نقش وسیع و احیاءکنندهٔ درخت در تمام چرخه‌های طبیعت متوجه می‌شویم کلید حفظ و اصلاح وضع تهدید کننده‌ای که زیست انسان و دیگر موجودات را به خطر انداخته است، کاشت درخت و احیای باغات و جنگل‌هاست.

با مرور یافته‌های جدید در علوم تجربی به این نتیجه رسیدیم که **بر عکس تفکر موجود، درخت صرفاً یک مصرف کننده در طبیعت نیست و این چرخه‌حیات است که برای ادامهٔ حیات وابسته به درخت است و درخت هم بیش از آن که به خاک، هوا و آب نیازمند باشد تنها به همت انسان در جهت کاشت و داشت آن نیازمند است.** لذا راه زمینه سازی برای ایجاد یک تمدن پایدار با قدرت رفع نیازهای گوناگون بشر، چیزی نیست جز رسیدن به راهی در جهت انگیزش انسان برای کاشت و داشت درخت.

ترسیم وضعیت مطلوب با بیان چرایی‌ها و حکمت‌ها بر اساس مبانی

مقدمه: لزوم توسعه فقه

توجه به حفظ و بازسازی طبیعت که خانهٔ اصلی و آرمانی انسان به شمار رفته و توسط نبی مکرم ﷺ به عنوان مادر انسان‌ها معرفی شده است[۴۱]، ایجاب می کند که با پرداختن به «**فقه تکوین**» رابطه انسان را با عالم تکوین تنظیم کند تا جانی دوباره به تمدن انسانی و کالبد بشری که لابلای چرخ‌دنده‌های تمدن جدید گیر کرده دمیده شود و با معکوس کردن زنجیرهٔ اتفاقاتی که به تخریب زمین انجامیده تمدن انسانی را از نو بنا کنیم.

حدود و ثغور چگونگی بهره‌برداری انسان از طبیعت تا امروز با قوانین بشری به نفع سرمایه داران کلان و سودجویان و استعمارگران تعیین شده است. نتیجهٔ این نفع‌پرستی جز از بین رفتن محیط زیست انسان نبوده و نخواهد بود. فلذا **لازم است با نگاهی جدید، قوانین الهی را برای حفظ و بازسازی این امانت خداوندی استخراج نموده و انسان را از نابودی حتمی که در سایه قوانین منفعت جویانهٔ بشری انتظارش را می‌کشد نجات دهیم.** در این راستا صرف حفاظت هم ما را به سرمنزل مقصود نخواهند رساند و لازم است برنامه‌ای برای احیای مجدد اکوسیستم داشته باشیم.

اسلام به عنوان دین خاتم، تمام شئون و زوایای زندگی بشر را در بر می‌گیرد و ادعا می‌کند هیچ نقطه‌ای از سلوک دنیوی و اخروی انسان از چشم اسلام پنهان نمانده و با تنظیم و تعالی حیات انسان از طریق انجام عبادات و دستورات اسلام در باب زندگی، سعادت او را در افق ابدیت تضمین می‌کند. علم فقه نیز در همین جهت، خود را عهده‌دار بیان عبادات دانسته و در تلاش است تا از راه‌هایی که در شرع معتبر تلقی می‌شوند وظایف مسلمین را کشف و ابلاغ کند تا پس از یقین اجمالی به اشتغال ذمه، با برآورده شدن انتظارات و دستورات خداوند برائت یقینی حاصل شده و انسان به بهای واقعی خود، یعنی بهشت[۴۲] دست پیدا کند. از همین رو علم فقه در دوره‌های مختلف زندگی بشر همواره همراه انسان بوده است و کوشیده است عرصه‌های مختلف زندگی بشر را پوشش دهد.

تا به امروز هرگاه در فقه به محیط‌زیست پرداخته شده تنها به زاویهٔ تاثیرش در حفظ سلامتی و احکام فردی‌ای همچون بول نکردن پای درخت میوه دار و ... اکتفا شده و از ارائهٔ طرحی که احیای کل چرخه محیط‌زیست را با احیای نقش بی بدیل انسان در این راستا مد نظر داشته باشد غفلت شده است. عمل به دستور الهی مبنی بر عمران و آبادی زمین با کارهایی که وضع موجود را حفظ کنند به دست نمی‌آید. زیرا حفظ در اینجا درست مثل آن است که سرعت ماشینی که در حال رسیدن به ته دره است را در یک محدودهٔ ثابتی نگه داریم!

---

[۴۱] نبی مکرم ﷺ: «حَافِظُوا عَلَى اَلْوُضُوءِ وَ خَيْرُ أَعْمَالِكُمُ اَلصَّلاَةُ وَ تَحَفَّظُوا مِنَ اَلْأَرْضِ فَإِنَّهَا أُمُّكُمْ وَ لَيْسَ فِيهَا أَحَدٌ يَعْمَلُ خَيْراً أَوْ شَرّاً إِلاَّ وَ هِيَ مُخْبِرَةٌ بِهِ.» تفسیر کنز الدقائق و بحر الغرائب – ج۱۴– ص۳۹۰. بحارالأنوار– ج۷– ص۹۷.
مواظبت بر وضو کنید، و بهترین اعمال شما نماز است، و زمین را محترم شمارید که مانند مادرتان است و هرکس کار خوب یا بدی روی آن انجام دهد از آن خبر دهد.

[۴۲] امیرالمومنین علیه‌السلام: «أَلَا حُرٌّ يَدَعُ هَذِهِ اللُّمَاظَةَ لِأَهْلِهَا إِنَّهُ لَيْسَ لِأَنْفُسِكُمْ ثَمَنٌ إِلَّا الْجَنَّةَ فَلَا تَبِيعُوهَا إِلَّا بِهَا.» نهج البلاغه – حکمت – ۴۵۶.
آیا آزاد مردی پیدا می‌شود که این ته مانده دنیا را به اهلش وا گذارد؟ بدانید جان شما بهایی جز بهشت ندارد، به کمتر از آن نفروشید.

از طرف دیگر **یکپارچگی چرخه‌حیات** موجب می‌شود هرگونه اقدامی در تمام زیست‌کره ضرب شود. به همین دلیل لازم است تا طرح بی‌خطری برای احیای زمین در دست داشته باشیم تا تلاش ما در این جهت، نتایج فاجعه‌باری به بار نیاورد.

فقهاء همواره در تلاش بوده‌اند تا بیان دقیق و کاملی از عبادات داشته و با انجام وظیفه‌ای رسولانه، اعمال و عبادات را به مسلمین منتقل کنند. با جستجو در منابع اجتهادی شیعه متوجه می‌شویم قسمتی که به بیان نسبت و رابطهٔ انسان با طبیعت می‌پردازد، از نظرها پنهان مانده است. خطری که از ناحیهٔ بهره‌برداری‌های نامناسب بشری، سلامت و حیات زمینی را تهدید می‌کند، ضرورت پرداختن به آن را در **صدر اولویت‌های تمدنی** قرار داده است.

اما غفلت تاریخی فقهاء از این حوزه باعث شده عرصه برای جولان قوانین و دستورات بشری باز شده و از رنسانس و عصر صنعتی به این سو، انسانی به تدوین قانون و قواعد بهره‌برداری از طبیعت بپردازد که خود بزرگترین مهاجم و نابود کننده آن است. فلذا لازم است تا با نگرشی نو با استفاده از نصوصی که تا به اینجا ذکر شد – از جمله آیه هفتم سورهٔ کهف و حدیث اتقوا الله فی عباده و بلاده – و قواعدی همچون «لا ضرر و لا ضرار» به فقه تکوین و محیط زیست پرداخته و جلوی تخریب محیط زیست را گرفته و اراده‌های انسانی را برای عمران و احیای زمین بسیج کنیم.

بنا بر آن‌چه تا به این‌جا ذکر کردیم **مسیر عمران بی‌خطر کرهٔ زمین با درخت شروع می‌شود و تنها راهی که امکان معکوس کردن جریان دومینوی تخریبی که چند قرن است شروع شده احیای درخت، جنگل و باغات است.**

نقشی که درخت در چرخه‌حیات دارد چیزی بسیار فراتر از مصرف آب و نور و بازدهی اکسیژن است. درخت پایش در چرخه آب و خاک است و سرش در چرخه هوا. در واقع همهٔ اکوسیستم‌های طبیعی[۴۳] برای درست کار کردن وابسته به درخت هستند.

مبانی عام:

الف. انسان: خلیفه و جانشین خدا در زمین

نگاه توحیدی، کل نگر، جامع‌نگر و تفاوت انگار، ما را به تعریف دیگری از هستی و نقش آدمی در زمین می‌رساند. با این نگاه انسان به عنوان خلیفه و جانشین خدا[۴۴] حفظ زیست و زندگی، حراست از چرخه‌حیات و تعالی هستی به عهدهٔ اوست. همچنین با این نگرش زمین گاهواره‌ایست[۴۵] که فراهم شده تا انسان در آن با آرامش به رشد و تعالی خود و دیگر موجودات مشغول باشد. بنا بر گفتهٔ زمین شناسان دست کم شش دورهٔ زمین شناسی بر کرهٔ خاکی گذشته تا قابلیت و استعداد حضور انسان را بیابد!

---

[۴۳] تا به امروز هشت اکوسیستم تعریف شده است:

الف. زمین‌های زراعی ب. جنگل‌ها ج. آب‌های شیرین د. اقیانوس‌ها ه. کوه‌ها و. مراتع ز. شهرها ح. معادن.

[۴۴] ﴿إِذْ قالَ رَبُّکَ لِلْمَلائِکَةِ إِنِّی جاعِلٌ فِی الْأَرْضِ خَلِیفَةً﴾ بقره – ۳۰.

و آن زمان را یاد آر که پروردگارت به فرشتگان گفت: به یقین جانشینی در زمین قرار می‌دهم.

[۴۵] ﴿أَلَمْ نَجْعَلِ الْأَرْضَ مِهاداً﴾ نباء – ۶. آیا زمین را بستر آرامش قرار ندادیم؟

در تصویر اسلامی از هستی و انسان، مطابق با آیه هفتم سوره کهف[۴۶] **هر چه بر روی زمین است امانتی است که به وسیله آن و کیفیت تعامل ما با آن، معیار ارزش عمل انسان مشخص می‌شود.** در این آیه با به کار رفتن صلاح و فساد در رابطهٔ انسان با طبیعت، توسعه‌ای در مصادیق صلاح و فساد ایجاد شده است. توسعه‌ای که اجازه می‌دهد صلاح و فساد را علاوه بر حوزه‌های اخلاقی و رفتاری مصطلح، در رابطه با محیط زیست هم جاری بدانیم.

از سوی دیگر **بنابر سخن أمیرالمؤمنین علیه‌السلام تقوای الهی و مسئولیت الهی انسان علاوه بر خداوند و دیگر انسان‌ها، زمین و چهارپایان را نیز شامل شده و از آن سؤال خواهد شد.**[۴۷] در مقابل اهل فساد و دگرگون‌طلبی با سلب مسئولیت از خود در قبال طبیعت و انسان برای کسب منافع زودگذر، دست به تغییراتی در آفرینش الهی زده[۴۸] و به گفتهٔ خداوند وقتی که به قدرت و مکنت می‌رسند به کشتار و نابودی انسان‌ها و نسل‌ها و زراعت‌ها می‌پردازند.[۴۹]

ب. انسان: تولیدگر در نگاه اسلام؛ مصرف‌گرا در نگاه غرب

حیات یا فساد، دگرگونی و نابودی زمین، بستگی تامّی به چگونگی بهره‌برداری انسان از زمین دارد. اگر کمّیت یا کیفیت بهره‌برداری از زمین را خواسته‌های نفسانی معین کند، نتیجه‌ای جز فساد و مرگ زمین در پی نخواهد داشت. در حقیقت عطش مصرفی که با خواسته‌های نفسانی انسان شعله می‌گیرد، تا مصرف آخرین عنصرِ زمین خاموش نخواهد شد.

فرهنگ اسلام و مدنیّت غرب پاسخ‌های متناقضی به تمایلات انسان می‌دهند. تفکر مبتنی بر تمدن غرب، أصل اساسی‌اش را ارضاء نمودن این تمایلات قرار داده و از آن‌جا که بشرِ بریده از ماوراء را مالک و صاحب زمین می‌داند، خود را مجاز به هرگونه تصرفی در طبیعت می‌بیند و در این تصرفات تنها به تمایلات نفسانی خود توجه دارد.

با این نگرش یک معادلهٔ ساده باعث نابودی زمین می‌شود: «**جمعیت** × **مصرف** = **نابودی زمین**»

لذا هر چه بر جمعیت دنیا افزوده شود با تغییر مستقیمی که در این معادله ایجاد می‌شود، معادله به نابودی زمین منجر خواهد شد مگر این‌که به سمت تغییر چگونگی تصرفات(الگوی مصرف) خود در طبیعت حرکت کنیم. الگویی که چیستی محصولات مصرفی، چگونگی تحقق مصرف و چرایی مصرف را نشان داده و در کل با افزایش و کاهش آن می‌توان به صورت مستقیم در این معادله تاثیر گذاشته و باعث نابودی یا جلوگیری از نابودی زمین شد.

---

[۴۶] ﴿إِنَّا جَعَلْنَا مَا عَلَى الْأَرْضِ زِينَةً لَهَا لِنَبْلُوَهُمْ أَيُّهُمْ أَحْسَنُ عَمَلا﴾ کهف – ۷. مسلماً ما آنچه را [از درخت، نبات، حیوان، دریا و دیگر آثار] روی زمین است، زینت زمین قرار دادیم تا آنان را آزمایش کنیم که کدامشان از جهت عمل نیکوترند.

[۴۷] أمیرالمؤمنین علیه‌السلام: «اتّقُوا اللّه فی عِبادِهِ وبِلادِهِ، فإنّکُم مَسؤولُونَ حتّی عنِ البِقاعِ والبَهائمِ، أطِیعُواللّه و لاتَعصُوهُ» نهج البلاغه – خطبهٔ ۱۶۷.

از خدا بترسید درباره بندگان او و سرزمین‌هایش؛ زیرا شما حتی نسبت به قطعه‌های زمین‌ها و چارپایان نیز باید پاسخگو باشید. از خدا اطاعت کنید و نافرمانی او نکنید.

[۴۸] ﴿وَلَأُضِلَّنَّهُمْ وَلَأُمَنِّيَنَّهُمْ وَلَآمُرَنَّهُمْ فَلَيُبَتِّكُنَّ آذَانَ الْأَنْعَامِ وَلَآمُرَنَّهُمْ فَلَيُغَيِّرُنَّ خَلْقَ اللَّهِ ...﴾ نساء – ۱۱۹.

[شیطان:] و یقیناً آنان را گمراه می‌کنم، و دچار آرزوهای دور و دراز می‌سازم، و آنان را وادار می‌کنم که گوش‌های چهارپایان را بشکافند، و فرمانشان می‌دهم که آفرینش خدایی را تغییر دهند...

[۴۹] ﴿و إِذَا تَوَلَّى سَعَى فِي الْأَرْضِ لِيُفْسِدَ فِيهَا وَيُهْلِكَ الْحَرْثَ وَالنَّسْلَ وَاللَّهُ لَا يُحِبُّ الْفَسَادَ﴾ بقره – ۲۰۵.

و هنگامی که [چنین دشمن سرسختی] قدرت و حکومتی یابد، می‌کوشد که در زمین فساد و تباهی به بار آورد، و زراعت و نسل را نابود کند؛ و خدا فساد و تباهی را دوست ندارد.

ارضاء مداوم تمایلات نفسانی در انسان موجب شده است تا به طور افسار گسیخته‌ای به طبیعت هجوم آورد و بدون در نظر گرفتن هرگونه مصلحتی به مصرف منابع زمین بپردازد. اما مشکل اینجاست که معضل مصرف گرایی حتی با برآورده کردن تمام درخواست‌های نفس حل نمی‌گردد؛ چرا که نفس همواره به دنبال خواسته‌های جدیدتر و بیشتر است و تا دنیا دنیاست روی رضایت و آسایش را نخواهد دید.

اما به خلاف روشی که فرهنگ غرب برای پاسخ‌دهی به تمایلات نفسانی انسان دارد، دین بر مبنای اصول هستی‌شناسانه و انسان‌شناسانه‌اش، اساس روش تربیتی خود را بر کنترل و مقید ساختن این تمایلات با قوانین الهی قرار داده است. دین با تعریف مجدد انسان و بازشناساندن جایگاه و مسئولیت او در هستی و همچنین بازشناسی مفاهیمی مانند فقر و غناء، رضایت و آسایش، لذت و رنج و... افق تازه‌ای فراروی انسان مدرن قرار می‌دهد. در واقع اسلام با تغییر الگوی مصرف بشر در صدد است انسان را از سرطان مصرفی که تمام وجود او را فراگرفته، برهاند؛ سرطان مصرفی که تنها برنامهٔ غرب برای مواجهه با آن، قتل عام حداقل یک سوم از جمعیت زمین تحت عنوان سیاست‌های کنترل جمعیت است! برای مثال دین با تعریف صحیحی که از مفهوم فقر و ثروت واقعی ارائه می‌کند، بدون آن‌که خود را درگیر پروسهٔ دائمیِ ارضاء امیال نفس بکند، ریشهٔ حرص و زیاده خواهی را می‌خشکاند. ثروتمندی و غنا در نظر دین حالتی بیرونی نیست که با درهم و دلار به چنگ آید بلکه وصفی درونی است که صرفاً با قناعت و شناخت ساز و کار رزاقیّت خداوند به دست می‌آید. زیرا تا وقتی حرص بر انسان مستولی است به آرامشی که در تمام حیات زمینی خود به دنبال آن است نخواهد رسید.

نگرشی که دین در انسان به وجود می‌آورد مسیر تازه‌ای پیش روی انسان قرار می‌دهد که در آن انسان با آگاهی نوینی که از ساختمان وجودی خود و هدف و مسیرش در هستی پیدا کرده است، دیگر خود را موجودی صرفاً مصرف کننده نمی‌داند. به عبارت دیگر تا وقتی تلقی ما از انسان دیگرگون نشده باشد، نمی‌توانیم شاهد انقلابی در الگوی مصرف بشریت باشیم.

برای جلوگیری از سرنوشت تلخی که پیش روی ماست دو راه حل وجود دارد:

۱. کاهش جمعیت، که نسخهٔ کاملا غربی این فاجعه است. دانشمندان غربی در این راه، به جای کنترل مصرفِ افسارگسیخته، به دنبال کاهش مصرف کننده‌ها هستند.

۲. درمان سرطان مصرف، که نسخهٔ انقلاب اسلامی این بیماری است.

شرط لازم در درمان سرطان مصرف این است که فراموش نکنیم ما همه در حیات یکدیگر موثریم پس همهٔ ما مسئولیم! لذا با کاهش مصرف و پرهیز از مصارف غیر ضروری، سرطان مصرف کنترل می‌شود، رفته‌رفته با تغییر در الگوی مصرف و بهینه شدنش، مصرف‌زدگیِ بشر مدرن درمان شده و وضعیت به حالت آرمانی‌ای که خداوند برای حیات انسان در نظر داشته است برمی‌گردد. اصلاح ریشه‌ایِ الگوی مصرف از اقداماتی هر چند کوچک در جهت بهبود شرایط حیات برای موجودات و تولید محصولات و خدماتی که چرخه‌حیات را به خطر نمی‌اندازند، آغاز می‌شود تا تغییرات بنیادین در معادلهٔ فوق الذکر صورت گرفته و شرایط ایده‌آل برای نجات زمین و ادامهٔ حیات محقق گردد.

این چنین است که انسان می‌تواند به عنوان جانشین خدا در زمین به جای پایمال کردن مواهب طبیعی و انقراض گونه‌های مختلف، سبب احیاء هستی و حیات در کل زمین شود. به عبارت دیگر معادلهٔ غرب در عالَم اسلام شکل متفاوتی به خود می‌گیرد: «**جمعیت** × **عمران طبیعت** = **احیای زمین**»

مبانی خاص:
الف. عمرانِ طبیعت، تکلیف دینی انسان

خداوند هیچ یک از اجزاء هستی را بی هدف و پوچ نیافریده است.[۵۰] حتی برای کوچکترین جزء هستی نیز مسیر و مقصدی در نظر دارد که ذره‌صفت به سوی آن در حرکت است.[۵۱] خداوند در جای‌جای قرآن کریم آفرینشِ تمام یا قسمتی از هستی را «بودن برای انسان» معرفی می‌کند [۵۲، ۵۳، ۵۴] و به صراحت در حدیثی قدسی می‌فرماید: «خلقت الاشیاء لأجلک و خلقتک لی. تمام چیزها را برای تو، و تو را برای خودم خلق کردم.»[۵۵] انسان به عنوان موجودی که در بالاترین درجات وجودی نشسته و هستی معطوف به اوست، مانند دیگر اجزاء هستی هدفی دارد که کلیّت آن به روشنی در آیهٔ ﴿وَ ما خَلَقْتُ الْجِنَّ وَ الْإِنْسَ إِلَّا لِيَعْبُدُونِ﴾[۵۶] آن را عبودیت خداوند تعبیر می‌کند. نحوهٔ عبودیت و گام نهادن در صراط مستقیم و شناخت شرایط و چگونگی عبادت را نیز تمام و کمال از زبان رسولان در طول تاریخ بیان نموده تا حجتی بر هیچ کس وجود نداشته باشد.[۵۷] در بین تمام موجودات یک وظیفه، مختص انسان است که در این آیه به او ابلاغ شده است: **﴿هُوَ أَنْشَأَكُمْ مِنَ الْأَرْضِ وَاسْتَعْمَرَكُمْ فِيهَا﴾[۵۸] او شما را از زمین پدید آورد و بر عمران و آبادی آن گماشت.** با این اوصاف مأموریت اختصاصی بشر در کرهٔ خاکی در راستای خلافت الهی انسان این است که در کنار عمران و آبادی زمین، در مدیریت آن به گونه‌ای عمل کند که همهٔ موجوداتی که در زمین مشغول حیات‌اند به کمال شایسته و بایستهٔ خویش برسند. سنت الهی در خلقت به گونه‌ایست که حفظ و ایجاد درخت به عهده انسان نهاده شده و احیای این سنت، تکلیفی است که تنها انسان با ارادهٔ خود قادر به انجام آن است تا بتواند ثمرات رنگارنگ این نعمت مبارک را برای خود و آیندگان به ارث بگذارد. امام صادق علیه‌السلام خطاب به مفضّل بن عمر فرمودند: «و خلق له الشجر؛ فکلف غرسها و سقیها و القیام علیها.» خداوند درخت را برای انسان خلق نمود و وظیفهٔ کاشت، آبیاری، به پا داشتن و حفظ و تعالی درخت را تکلیف انسان قرار داده است.[۵۹] علاوه بر حیث فردی در عمران و آبادی زمین، یکی از مهم‌ترین کارهای حکومت اسلامی توجه ویژه به آبادی زمین است.

---

[۵۰] ﴿وَمَا خَلَقْنَا السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضَ وَ مَا بَيْنَهُمَا لَاعِبِينَ﴾ دخان – ۳۸. و ما آسمان‌ها و زمین و آنچه را میان آن دو است، به بازی نیافریده‌ایم.

[۵۱] ﴿وَأَنَّ إِلَى رَبِّكَ الْمُنْتَهَى﴾ نجم – ۴۲. و اینکه پایان [همه امور] به سوی پروردگارتوست.

[۵۲] ﴿هُوَ الَّذِي خَلَقَ لَكُمْ مَا فِي الْأَرْضِ جَمِيعًا...﴾ بقره – ۲۹. اوست که همه آنچه را در زمین است برای شما آفرید،...

[۵۳] ﴿وَالْأَرْضَ وَضَعَهَا لِلْأَنَامِ، فِيهَا فَاكِهَةٌ وَالنَّخْلُ ذَاتُ الْأَكْمَامِ، وَالْحَبُّ ذُو الْعَصْفِ وَالرَّيْحَانُ» الرحمن – ۱۰ و ۱۱ و ۱۲.

و زمین را برای [زندگی] مردم [در طول تاریخ و در عرض جغرافیا] قرار داد؛ در آن میوه‌ها و نخل‌ها با خوشه‌های غلاف‌دار است؛ و دانه‌های با سبوس و کاه و گیاهان خوشبوست.

[۵۴] همچنین می‌توان به آیات ۳ تا ۱۸ سوره نحل نیز اشاره کرد.

[۵۵] شرح کافی – مولا صالح مازندرانی– ج ۴ – ص ۲۲۸.

[۵۶] ذاریات – ۵۶.

[۵۷] ﴿رسُلًا مُبَشِّرِينَ وَمُنْذِرِينَ لِئَلَّا يَكُونَ لِلنَّاسِ عَلَى اللَّهِ حُجَّةٌ بَعْدَ الرُّسُلِ﴾ نساء – ۱۶۵.

پیامبرانی که مژده رسان و بیم دهنده بودند تا مردم را [در دنیا و آخرت در برابر خدا] پس از فرستادن پیامبران، عذر و بهانه و حجتی نباشد.

[۵۸] هود – ۶۱.

[۵۹] بحار الأنوار – ج ۳ – ص ۸۶.

أمیرالمؤمنین علیه‌السلام در فرمانی که به مالک اشتر عطاء کردند فرموده‌اند: «همت اصلی تو باید بر آبادی زمین باشد نه گرفتن مالیات و خراج.»[۶۰] ثمرات مادی و معنوی درخت چیزی نیست که اختصاص به یک نسل یا یک فرد داشته باشد زیرا در حدیثی از امام صادق علیه‌السلام از چیزهایی که حتی پس از مرگ هم به انسان سود می‌رساند را درختی نام برده‌اند که مؤمن آن را کاشته است.[۶۱] چرا که بهره‌ای که درخت به انسان و به کل چرخه‌حیات می‌رساند، طبق خبرهای نبی گرامی اسلام صلی‌الله‌علیه‌وآله نزد خداوند برابر با صدقه خواهد بود.[۶۲] [۶۳] [۶۴] نقش کلیدی درخت در تمام چرخه‌حیات تا حدی مدّ نظر اهلبیت بوده است که نبی‌مکرم صلی‌الله‌علیه‌وآله در حدیثی اهمیت کاشت درخت را اینگونه به تصویر کشیده‌اند: «اگر نشانه‌های قیامت آشکار شد و شما نهالی در دست دارید، اگر می‌توانید کار خود را رها نکنید و به کاشت درخت ادامه دهید!»[۶۵]

ب. باغ، محیطِ زیست اولیه و آرمانی حیات انسان

خداوند متعال در قرآن کریم با تصویرسازی و ارائهٔ امثال گوناگون به آدمی خط مشی داده تا با بهره‌گیری از الگوهای مطرح در قرآن راه سعادتمندی خویش را پیدا کند. جنت[۶۶]، فردوس[۶۷]، بهشت یا همان باغ سرسبز پر ثمر، بهترین محل برای زندگی انسان است که به بهترین شکل ممکن در قرآن کریم مطرح گردیده است.

---

[۶۰] امیرالمومنین علیه‌السلام: «وَ لْيَكُنْ نَظَرُكَ فِي عِمَارَةِ اَلْأَرْضِ أَبْلَغَ مِنْ نَظَرِكَ فِي اِسْتِجْلاَبِ اَلْخَرَاجِ. لِأَنَّ ذَلِكَ لاَ يُدْرَكُ إِلاَّ بِالْعِمَارَةِ وَ مَنْ طَلَبَ اَلْخَرَاجَ بِغَيْرِ عِمَارَةٍ أَخْرَبَ اَلْبِلاَدَ وَ أَهْلَكَ اَلْعِبَادَ وَ لَمْ يَسْتَقِمْ أَمْرُهُ إِلاَّ قَلِيلاً.» نهج البلاغه – عهدنامه مالک اشتر.

[۶۱] امام صادق علیه‌السلام: «ستَّةٌ تَلْحَقُ الْمُؤْمِنَ بَعْدَ وَفَاتِهِ وَلَدٌ يَسْتَغْفِرُ لَهُ وَ مُصْحَفٌ يُخَلِّفُهُ وَ غَرْسٌ يَغْرِسُهُ وَ قَلِيبٌ يَحْفِرُهُ وَ صَدَقَةُ يُجْرِيهَا وَ سُنَّةٌ يُؤْخَذُ بِهَا مِنْ بَعْدِهِ.» الکافی – ج ۷ – ص ۵۷. من لا یحضره الفقیه، ج۴، ص: ۲۴۶. شش چیز بعد از وفات مومن به او ملحق شده [و به او فایده می دهد]: فرزندی که برایش طلب آمرزش کند، قرآنی که او از خود به یادگار گذاشته و پس از مرگش خوانده می‌شود، درختی که کاشته، چاه آبی که حفر نموده [و وقف کرده]، صدقه جاریه‌ای که از خود به جا گذارده است، روش نیکوئی که پس از مرگش مردم به آن عمل می‌کنند.

[۶۲] نبی مکرم صلی‌الله‌علیه‌وآله: «مَن نَصَبَ شَجَرَةً و صَبَرَ عَلی حِفظِها والقِیامِ عَلَیها حَتّی تُثمِرَ کانَ لَهُ فی کُلِّ شَی ءٍ یُصابُ مِن ثَمَرِها صَدَقَةٌ عِندَاللّه» میزان الحکمه – حدیث ۹۱۴۳.

هر کس درختی بکارد و در نگهداری آن بکوشد تا میوه دهد، در برابر هرچه از آن میوه به دست آید، پاداشی نزد خدا خواهد داشت.

[۶۳] نبی مکرم صلی‌الله‌علیه‌وآله: «مَنْ غَرْسَ غَرْساً فَأَثْمَرَ أَعْطَاهُ اللَّهُ مِنَ الْأَجْرِ قَدْرَ مَا يَخْرُجُ مِنَ الثَّمَرَةِ.» مستدرک الوسائل – ج۱۳ – ص۴۶۰.

هر کس درختی بنشاند و به بار بنشیند، خدا به اندازه‌ای که میوه از آن فراهم آید به او پاداش می‌دهد.

[۶۴] نبی مکرم صلی‌الله‌علیه‌وآله: «مَا مِنْ مُسْلِمٍ يَغْرِسُ غَرْساً يَأْكُلُ مِنْهُ إِنْسَانٌ أَوْ دَابَّةٌ أَوْ طَيْرٌ إِلَّا أَنْ يُكْتَبَ لَهُ صَدَقَةٌ إِلَى يَوْمِ الْقِيَامَةِ.» مستدرک الوسائل– ج۱۳– ص۲۶. هر مسلمانی نهالی بنشاند و از حاصل آن انسانی یا موجودی یا پرنده‌ای بخورد، برای او تا روز قیامت صدقه نوشته می‌شود.

[۶۵] نبی مکرم صلی‌الله‌علیه‌وآله: «إِنْ قَامَتِ السَّاعَةُ وَ فِي يَدِ أَحَدِكُمُ الْفَسِيلَةُ فَإِنِ اسْتَطَاعَ أَنْ لَا تَقُومَ السَّاعَةُ حَتَّى يَغْرِسَهَا فَلْيَغْرِسْهَا.» کنزالعمّال – حدیث ۹۰۵۶. مستدرک الوسائل– ج۱۳ – ص۴۶۰.

[۶۶] جَنّة و مشتقات دیگر آن از ریشهٔ «جنن» که در معنای باغ به کار رفته است، ۱۱۲ بار در قرآن کریم تکرار گردیده است.

[۶۷] فردوس در تمامی لغت‌نامه‌ها معنایی معادل باغ و بوستان دارد، مانند آنچه در لسان العرب ذیل این ریشه آمده است: الفِرْدَوْسُ: البُستان؛ قال الفرَّاء: هو عرَبیّ. قال ابن سیده: الفِرْدَوْس الوادی الخَصِیب عند العرب کالبُستان، وهو بِلِسان الرُّوم البُسْتان. والفِرْدَوْس: الرَّوْضة؛ عن السیرافی. والفِرْدَوْس: خُضْرةالأعْناب. قال الزجاج: وحقیقته أنه البستان الذی یجمع ما یکون فی البَساتین، وکذلک هو عند أهل کل لغة.

از سکونت اولیهٔ آدم و حوا در باغ[۶۸] گرفته تا حیات ابدی نسل مومن و متکامل فرزندان آدم در جنات نعیم[۶۹] [۷۰]. لذا درخت نه تنها اولین مقدمه در ایجاد تمدن بشری بوده و هست، بلکه به عنوان نقطهٔ آرمانی در تمدن، بیشترین وزن را در همزیستی با انسان دارد؛ به صورتی که به محل زندگی انسان متمدن باغ اطلاق می‌شود نه ساختمان!

بیان چگونگی‌ها، بایدها و نبایدها با طرح اصول راهبردی

۱. اتکا به انگیزه و توان مردم برای احیای طبیعت با تمرکز بر «شوق ثمر»

اصلی‌ترین هدفی که خداوند برای فرستادن پیامبران در نظر داشته است، قیام مردم به حق و جامهٔ عمل پوشاندن به آن توسط خود مردم معرفی شده است.[۷۱]

بر همین مبنا اصل اول برای تحقق نقش پذیری آدمی در زمین برای حفظ حیات، حراست از چرخه زیست و تعالی هستی به عنوان خلیفه و جانشین خدا، ترویج کاشت و داشت درختان مثمر به دست خود مردم است؛ نه حکومت‌ها و موسسه‌های دولتی و غیر دولتی. چرا که درخت بیش از آن که به خاک، هوا و آب نیازمند باشد تنها به همت انسان در جهت کاشت و داشت آن نیازمند است.[۷۲]

لذا راه زمینه سازی برای ایجاد یک تمدن پایدار با قدرت رفع نیازهای گوناگون بشر، چیزی نیست جز رسیدن به راهی در جهت انگیزش انسان برای کاشت درخت؛ و شوق ثمر، آدمی را در کارزار مجاهدتی بی‌پایان برای حفظ و تعالی چرخه زیست ملموسی قرار خواهد داد که باب فهم و تولد آگاهی را در سرشت انسان فراهم می‌کند.[۷۳]

---

[۶۸] ﴿وَقُلْنَا يَا آدَمُ اسْكُنْ أَنْتَ وَزَوْجُكَ الْجَنَّةَ وَكُلَا مِنْهَا رَغَدًا حَيْثُ شِئْتُمَا وَلَا تَقْرَبَا هَذِهِ الشَّجَرَةَ فَتَكُونَا مِنَ الظَّالِمِينَ﴾ بقره – ۳۵.

و گفتیم: ای آدم! تو و همسرت در این بهشت سکونت گیرید و از هر جای آنکه خواستید فراوان و گوارا بخورید، و به این درخت نزدیک نشوید که [اگر نزدیک شوید] از ستمکاران خواهید شد.

[۶۹] ﴿إِنَّ الَّذِينَ آمَنُوا وَعَمِلُوا الصَّالِحَاتِ كَانَتْ لَهُمْ جَنَّاتُ الْفِرْدَوْسِ نُزُلًا﴾ کهف – ۱۰۷

مسلماً کسانی که ایمان آورده و کارهای شایسته انجام داده‌اند، بهشت‌های فردوس جای پذیرایی آنان است.

[۷۰] ﴿الَّذِينَ يَرِثُونَ الْفِرْدَوْسَ هُمْ فِيهَا خَالِدُونَ﴾ مومنون – ۱۱

وارثانی که [از روی شایستگی] بهشت فردوس را به میراث می‌برند [و] در آن جاودانه‌اند.

[۷۱] ﴿لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ﴾ حدید – ۲۵

[۷۲] امام صادق علیه‌السلام: «وَ خُلِقَ لَهُ الشَّجَرُ فَكُلِّفَ غَرْسَهَا وَ سَقْيَهَا وَ الْقِيَامَ عَلَيْهَا.» توحید المفضل، ص: ۸۶.

و درخت برای او (انسان) آفریده شده است، و او مکلّف است که آن را در زمین بنشاند و آب دهد و به آن رسیدگی کند.

[۷۳] ﴿وَالَّذِينَ جَاهَدُوا فِينَا لَنَهْدِيَنَّهُمْ سُبُلَنَا وَإِنَّ اللَّهَ لَمَعَ الْمُحْسِنِينَ﴾ عنکبوت – ۶۹.

و کسانی که برای [به دست آوردن خشنودی] ما [با جان و مال] کوشیدند، بی تردید آنان را به راه‌های خود [راه رشد، سعادت، کمال، کرامت، بهشت و مقام قرب] راهنمایی می‌کنیم؛ و یقیناً خدا با نیکوکاران است.

در واقع شوق ثمر محرک اراده، همت و توان انسانی است؛ همت و اراده‌ای که با ایجاد تداوم در چرخه‌حیات ، باعث سرسبزی محیط پیرامونی انسان در گذشته بوده و تحقق دوبارهٔ آن نیز دور از انتظار نیست.[۷۴]

همچنین با تجربه ثابت شده که تصدی‌گری دولت‌ها در موضوعات مختلف، راهبردی شکست خورده است و از سوی دیگر با توجه به اینکه مردم‌نهاد کردن امور از شاخص‌های بی‌بدیل نظام مقدس جمهوری اسلامی می‌باشد، به جای برنامه‌ریزی‌های دولتی و حاکمیتی برای کاشت درخت، می‌بایست با مردم‌پایه کردن جریان درخت کاری، شرایط را به گونه‌ای فراهم کرد تا مردم با علاقه و اشتیاق خود در این امر خطیر وارد میدان شده و با دست خود زمین خدا را سرسبز کنند و علاوه بر ثمرات رنگارنگ مادی، با ارتباط نزدیکی که با جریان حیات در طبیعت پیدا می‌کنند، نهال اعتقاد به خداوند نیز در ضمیرشان پا بگیرد.

۲. اولویت کاشت درخت بر ساختمان‌سازی در ایجاد سکونتگاه

یکی از تفاوت‌های اصلی ما در الگوی اسلامی ایرانی پیشرفت با نوع طاغوتی توسعه و تمدن، اولویت‌گذاری متفاوت در ایجاد محل سکونت مردم است. در تفکر اقتباسی از غرب و شرق، با صرف تلاش و هزینه‌های گزاف ابتدا به دنبال ساخت مسکن برای مردم بوده و سپس با انتقال آب و انرژی سعی در حفظ حیات مردم می‌کنیم و در آخر نیز به صورت تجملی و در صورتی که هنوز از منابع تخصیص داده شده چیزی باقی‌مانده باشد با کاشت درخت در صدد ایجاد فضای سبز خواهیم بود. اما با تفکر اسلامی و تجربه شده در فرهنگ غنی ایرانی می‌بایست ابتدا با کاشت شجرهٔ طیبه[۷۵] و ایجاد باغ‌های متنوع میوه، زمینهٔ حیات مادی و طراوت روحی انسان را فراهم کرد و سبب جذب جمعیت به سمت نقاط هدف گردید[۷۶] و سپس به مسکن سازی و ساخت شهر و روستا پرداخت. در واقع باید گفت که در نگاه اسلام، ساختمان نماد تمدن نبوده و این انبوه درختان میوه هستند که نماد تمدن و حضور انسان متمدن در نقطه‌ای از زمین می‌باشند.

---

[۷۴] امام صادق علیه‌السلام: «مَكْرُوهٌ قَطْعُ النَّخْلِ وَ سُئِلَ عَنْ قَطْعِ الشَّجَرَةِ قَالَ لَا بَأْسَ قُلْتُ فَالسِّدْرِ قَالَ لَا بَأْسَ بِهِ إِنَّمَا يُكْرَهُ قَطْعُ السِّدْرِ بِالْبَادِيَةِ لِأَنَّهُ بِهَا قَلِيلٌ وَ أَمَّا هَاهُنَا فَلَا يُكْرَهُ.» الكافی – ج۵ – ص۲۶۴. وسائل الشیعهٔ – ج۱۹– ص۴۰.

بریدن درخت خرما کراهت دارد. همچنین در مورد بریدن درخت (غیر مثمر) پرسیده شد. فرمود: اشکالی ندارد. پرسیدم: بریدن درخت سدر چه‌طور؟ فرمود: اشکالی ندارد؛ تنها در صورتی بریدن درخت سدر کراهت دارد که در بیابان قرار گرفته باشد، چرا که در بیابان درخت (سدر) کم است، ولی اینجا (یعنی در شهر که اتفاقاً به برکت همت مردم، پر از درخت است) کراهت ندارد.

[۷۵] ﴿أَلَمْ تَرَ كَيْفَ ضَرَبَ اللَّـهُ مَثَلًا كَلِمَةً طَيِّبَةً كَشَجَرَةٍ طَيِّبَةٍ أَصْلُهَا ثَابِتٌ وَفَرْعُهَا فِي السَّمَاءِ، تُؤْتِي أُكُلَهَا كُلَّ حِينٍ بِإِذْنِ رَبِّهَا وَيَضْرِبُ اللَّـهُ الْأَمْثَالَ لِلنَّاسِ لَعَلَّهُمْ يَتَذَكَّرُونَ﴾ ابراهیم – ۲۴ و ۲۵.

آیا ندانستی که خدا چگونه مثلی زده است؟ کلمه پاک [که اعتقاد واقعی به توحید است] مانند درخت پاک است، ریشه‌اش استوار و پابرجا و شاخه‌اش در آسمان است. میوه‌اش را به اجازه پروردگارش در هر زمانی می‌دهد. و خدا مَثَل‌ها را برای مردم می‌زند تا متذکّر حقایق شوند.

[۷۶] ﴿رَبَّنَا إِنِّي أَسْكَنْتُ مِنْ ذُرِّيَّتِي بِوَادٍ غَيْرِ ذِي زَرْعٍ عِنْدَ بَيْتِكَ الْمُحَرَّمِ رَبَّنَا لِيُقِيمُوا الصَّلَاةَ فَاجْعَلْ أَفْئِدَةً مِنَ النَّاسِ تَهْوِي إِلَيْهِمْ وَارْزُقْهُمْ مِنَ الثَّمَرَاتِ لَعَلَّهُمْ يَشْكُرُونَ﴾ ابراهیم – ۳۷.

پروردگارا! من برخی از فرزندانم را در درّه‌ای بی کشت و زرع نزد خانه محترمت سکونت دادم؛ پروردگارا! برای اینکه نماز را بر پا دارند؛ پس دل‌های گروهی از مردم را به سوی آنان علاقمند و متمایل کن، و آنان را از انواع محصولات و میوه‌ها روزی بخش، باشد که سپاس گزاری کنند.

سرسبزی و محوریت درختان در شهرسازی اسلامی در قرآن تحت عنوان «**بلد طیّب**» آمده است.[۷۷، ۷۸] نشانه‌ای که خداوند متعال مبنی بر وفور درختان مثمر در شهر طیب ذکر کرده، شاهدی بر نقش پررنگ درخت در شهر آرمانی اسلام و درهم‌آمیختگی شهرسازی و باغکاری است. امری که همچنین با توجه به چگونگی پرداخت امیرالمؤمنین علیه‌السلام به ساخت و توسعهٔ شهرها – به خصوص ایجاد باغ‌های گسترده و حفر چاه توسط شخص امام – در نوع تمدن سازی ایشان به وضوح دیده می‌شود. **لذا به حرکت انداختن ارادهٔ انسان برای حفظ و تعالی چرخه زیست از مجرای کاشت و داشت درختان مثمر، راهبرد مؤثر برای زمینه سازیِ تمدن نوین اسلامی است.**

باید گفت برای ایجاد این باغات، نیازی به آب‌رسانی گسترده و سیستمی هم نیست. چرا که با توجه به میزان بارندگی در هر منطقه و استفاده از درختان بومی‌ای که می‌توانند به صورت دیم به حیات خود ادامه دهند، – مانند زیتون و انجیر – در سال‌های نخست تنها به چند مرتبه آبیاری دستی در سال نیازمندیم.

۳. اولویت ایجاد باغات و جنگل‌ها بر تجارت و صنعت

اصل دیگری که تمدن اسلامی را از دیگر مکاتب بشری جدا می‌کند، اصالت دادن به کار و تلاش و نهی از اخذ ربا است. لذا کار در زمین و کسب روزی به واسطهٔ کشت و زرع از ویژگی‌های رهبران اسلامی و الگویی برای پیروان آن‌ها بوده است.[۷۹] صراحت در تقدم ایجاد باغ نسبت به جمع‌آوری پول و سرمایه، اینگونه در روایتی بیان گردیده است: «زراره گوید: امام صادق علیه‌السلام فرمود: «هیچ چیز در آنچه انسان به ارث می‌گذارد بر او سخت‌تر و سنگین‌تر از مالِ ساکت (و راکد) نمی‌آید.» پرسیدم: پس چه کند؟ فرمود: «باغ یا بوستان یا خانه بخرد.»[۸۰]

---

[۷۷] ﴿لَقَدْ كَانَ لِسَبَإٍ فِي مَسْكَنِهِمْ آيَةٌ جَنَّتَانِ عَنْ يَمِينٍ وَشِمَالٍ كُلُوا مِنْ رِزْقِ رَبِّكُمْ وَاشْكُرُوا لَهُ بَلْدَةٌ طَيِّبَةٌ وَرَبٌّ غَفُورٌ﴾ سبا – ۱۵.

یقیناً برای قوم سبا در جای اقامتشان نشانه‌ای [از قدرت و رحمت خدا] وجود داشت، دو باغ از طرف راست و چپ. [گفتیم:] از رزق و روزی پروردگارتان بخورید، و برای او سپاس گزاری کنید، سرزمینی خوش و دلپذیر [دارید]، و پروردگاری بسیار آمرزنده.

[۷۸] ﴿وَالْبَلَدُ الطَّيِّبُ يَخْرُجُ نَبَاتُهُ بِإِذْنِ رَبِّهِ وَالَّذِي خَبُثَ لَا يَخْرُجُ إِلَّا نَكِدًا كَذَلِكَ نُصَرِّفُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَشْكُرُونَ﴾ اعراف – ۵۸.

و زمین پاک است که گیاهش به اذن پروردگارش بیرون می‌آید، و زمینی که ناپاک است، جز گیاهی اندک و بی‌سود از آن بیرون نمی‌آید؛ این گونه نشانه‌ها را برای گروهی که سپاس گزارند [به صورت‌های گوناگون] بیان می‌کنیم.

[۷۹] سَهْلُ بْنُ زِيَادٍ عَنِ الْجَامُورَانِيِّ عَنِ الْحَسَنِ بْنِ عَلِيِّ بْنِ أَبِي حَمْزَةَ عَنْ أَبِيهِ قَالَ: رَأَيْتُ أَبَا الْحَسَنِ علیه‌السلام يَعْمَلُ فِي أَرْضٍ لَهُ قَدِ اسْتَنْقَعَتْ قَدَمَاهُ فِي الْعَرَقِ فَقُلْتُ لَهُ جُعِلْتُ فِدَاكَ أَيْنَ الرِّجَالُ فَقَالَ «يَا عَلِيُّ قَدْ عَمِلَ بِالْيَدِ مَنْ هُوَ خَيْرٌ مِنِّي فِي أَرْضِهِ وَ مِنْ أَبِي» فَقُلْتُ لَهُ وَ مَنْ هُوَ فَقَالَ «رَسُولُ اللَّهِ صلی‌الله‌علیه‌وآله وَ أَمِيرُ الْمُؤْمِنِينَ وَ آبَائِي عَلَيْهِمُ السَّلَامُ كُلُّهُمْ كَانُوا قَدْ عَمِلُوا بِأَيْدِيهِمْ وَ هُوَ مِنْ عَمَلِ النَّبِيِّينَ وَ الْمُرْسَلِينَ وَ الْأَوْصِيَاءِ وَ الصَّالِحِينَ.» الکافی – ج ۵ – ص ۷۵. علی بن ابی حمزه گوید: امام کاظم علیه السلام را دیدم که در حال کار بر روی زمین بود و قدم‌هایش (خاک زیر پایش) از عرق خیس شده بود. عرض کردم: فدایت شوم! کارگران کجایند؟ فرمود: ای علی! کسانی با دست خود کار کردند که در روی زمین از من و پدرم بهتر بودند. عرض کردم: آنها کیانند؟ فرمودند: پیامبر خدا صلی‌الله‌علیه‌وآله ، امیر مؤمنان علیه‌السلام و پدران بزرگوارم علیهم السّلام همهٔ اینان با دست خویش به کار پرداختند. چنین کاری از عمل پیامبران، مرسلین، اوصیا و صالحان است.

[۸۰] وَ رَوَى زُرَارَةُ عَنْ أَبِي عَبْدِ اللَّهِ علیه‌السلام قَالَ: «مَا يُخَلِّفُ الرَّجُلُ بَعْدَهُ شَيْئاً أَشَدَّ عَلَيْهِ مِنَ الْمَالِ الصَّامِتِ» قَالَ قُلْتُ لَهُ كَيْفَ يَصْنَعُ قَالَ «يَضَعُهُ فِي الْحَائِطِ وَ الْبُسْتَانِ وَ الدَّارِ» من لا یحضره الفقیه – ج ۳ – ص ۱۷۰. با اندکی تفاوت: الکافی– ج ۵– ص ۹۱.

٤. اولویت کاشت درخت با هدف تولید غذای آماده، سالم و در دسترس برای تامین امنیت غذایی

رشد و تعالی انسان، غایت و هدف خلقت اوست که در عبودیت خالصانهٔ وی در پیشگاه حق تعالی متبلور می‌شود. عبودیت که حرکت و رفتاری آگاهانه است و از ایمان قلبی و بینش توحیدی سرچشمه می‌گیرد، به دلیل چگونگی ارتباط بین جسم و روح و تاثیر متقابل آن‌ها که نتیجه‌اش در رفتارهای انسان هویدا می‌گردد[۸۱] و در آیهٔ شریفهٔ ﴿يَا أَيُّهَا الرُّسُلُ كُلُوا مِنَ الطَّيِّبَاتِ وَاعْمَلُوا صَالِحًا إِنِّي بِمَا تَعْمَلُونَ عَلِيمٌ﴾[۸۲] به آن تصریح شده است، شرط لازمی دارد: مصرف **غذای طیّب** (رشد یافته و پاک).

به همین دلیل در شهر اسلامی باید شرایطی فراهم باشد تا مؤمنان با دسترسی سریع و آسان به این نوع غذا بتوانند در مسیر رشد و تعالی گام بردارند؛ چرا که تازگی نیز یکی از ملزومات طیّب بودن غذاست. این شرایط در «بلد طیّب» و شهر اسلامی با وجود باغ و تولید میوه‌جات گوناگون غذایی بدین شکل در قرآن کریم به تصویر کشیده شده است: ﴿لَقَدْ كَانَ لِسَبَإٍ فِي مَسْكَنِهِمْ آيَةٌ جَنَّتَانِ عَنْ يَمِينٍ وَشِمَالٍ كُلُوا مِنْ رِزْقِ رَبِّكُمْ وَاشْكُرُوا لَهُ بَلْدَةٌ طَيِّبَةٌ وَرَبٌّ غَفُورٌ﴾[۸۳]

نکتهٔ جالب این است که همین قوم سبأ وقتی به سبب إعراض مستحق عذاب می‌شوند، این شرط لازم حرکت توحیدی – یعنی غذای طیبی که از میوه‌جات نیروبخش به دست می‌آمد – از دسترس ایشان خارج می‌گردد و درختان پر ثمر به درختان غیر مثمر و کم ثمر تبدیل می‌شوند.[۸۴] در آخر نیز تمدن این قوم، نابود و عبرتی برای دیگران می‌گردد. حال با درس‌آموزی از این سنت الهی و حرکت در مسیری خلافِ آنچه تا به امروز طی شده است، می‌توان مقدمات ایجاد دوبارهٔ «بلد طیّب» را فراهم نمود. مانند اقدامِ الگوساز امام کاظم علیه‌السلام در قطع درخت کم‌ثمرِ سدر و کاشت درخت انگور به جای آن.[۸۵] در شرایط بحرانی نیز این درختان مثمر هستند که برای تأمین غذا به کمک بشریت می‌آیند.

---

[۸۱] این مطلب نیازمند دلایل و مستندات خود است که در مبانی انسان‌شناسانه «نظام جامع سلامت در اسلام» به اثبات رسیده است.

[۸۲] مومنون – ۵۱.

[۸۳] سبا – ۱۵.

[۸۴] ﴿فَأَعْرَضُوا فَأَرْسَلْنَا عَلَيْهِمْ سَيْلَ الْعَرِمِ وَبَدَّلْنَاهُمْ بِجَنَّتَيْهِمْ جَنَّتَيْنِ ذَوَاتَيْ أُكُلٍ خَمْطٍ وَأَثْلٍ وَشَيْءٍ مِنْ سِدْرٍ قَلِيلٍ﴾ سبا – ۱۶.

ولی [آنان از سپاس گزاری در برابر نعمت، و از فرمان ها او و دعوت پیامبرشان] روی گرداندند، در نتیجه سیل [ویران گر] «عرم» را بر ضد آنان جاری کردیم [که دو باغ آباد راست و چپ منطقه را نابود کرد]، و ما آن دو باغ پر حاصلشتان را به دو باغستانی تبدیل کردیم که دارای میوه هایی تلخ و درخت شوره گز و چیزی اندک از درخت سدر بودند!!

[۸۵] سَأَلْتُ أَبَا الْحَسَنِ علیه‌السلام عَنْ قَطْعِ السِّدْرِ فَقَالَ: «سَأَلَنِي رَجُلٌ مِنْ أَصْحَابِکَ عَنْهُ فَكَتَبْتُ إِلَيْهِ قَدْ قَطَعَ أَبُو الْحَسَنِ علیه‌السلام سِدْراً وَ غَرَسَ مَكَانَهُ عِنَباً.» قرب الإسناد – النص – ص۳۶۸. الکافی – ج۵ – ص۲۶۳. وسائل الشیعهٔ – ج۱۹– ص۳۹.

احمد بن محمّد گوید: از امام رضا علیه‌السلام در مورد بریدن درخت سدر، پرسیدم. فرمودند: مردی از دوستانت از من در این مورد پرسید، در پاسخش نوشتم: امام کاظم علیه‌السلام درخت سدری را از جا کند، و به جای آن درخت انگوری در زمین نشاند.

بخش اعظم ذخیرهٔ ایده‌آل غذایی را می‌توان از محصولات استراتژیکی نظیر خرما، انجیر، بادام، گردو، روغن زیتون، کشمش و مویز تهیه کرد. [۸۶] [۸۷] [۸۸] [۸۹] [۹۰] غذاهایی آماده، مفید و نیروبخشی که به صورت جیرهٔ خشک در بلایای گوناگون طبیعی اعم از زلزله، سیل و خشکسالی، جنگ‌ها، تحریم‌ها و محاصره‌های اقتصادی و غذایی، به ساده‌ترین شکل ممکن می‌توان آن را در دسترس مردم بحران زده قرار داد تا بدون فراهم کردن امکانی خاص مانند پخت و پز، آن را مصرف نمایند. همچنین گستردگی باغات در مناطق مختلف، باعث سهولت دسترسی می‌شود و مدیریت‌های خرد محلی می‌توانند نقش آفرینی بهتری در تأمین امنیت غذایی و رفع بحران داشته باشند.

۵. رعایت تنوع زیستی و تراکم در کاشت درختان و ایجاد پوشش گیاهی

کاشت متنوع و متراکم درختان الگویی است که به صراحت در قرآن بدان اشاره شده است.[۹۱] [۹۲] [۹۳] [۹۴]

---

[۸۶] نبی مکرم ﷺ: «... اَلرَّاسِیَاتُ فِی اَلْوَحَلِ وَ اَلْمُطْعِمَاتُ فِی اَلْمَحَلِّ نِعْمَ اَلشَّیْءُ اَلنَّخْلُ...» الکافی- ج ۵- ص ۲۶۰. الخصال - ج ۱- ص ۲۴۵. الأمالی (للصدوق) - ج ۱- ص ۳۵۰. معانی الأخبار- ج ۱- ص ۱۹۶. من لا یحضره الفقیه- ج ۲- ص ۲۹۱. الأربعون حدیثا (للشهید الأول)- ج ۱- ص ۵۹. الفصول المهمهٔ فی أصول الأئمهٔ (تکملهٔ الوسائل)- ج ۳- ص ۳۷۲.

درخت‌های بلندی که در گل و لای ریشه دارند و خوراک روزهای قحط را فراهم می‌کنند (مقصود نخل خرما است)، خوب چیزیست نخل خرما.

[۸۷] امام صادق علیه‌السلام: «بَیْتٌ لاَ تَمْرَ فِیهِ جِیَاعٌ أَهْلُهُ.» مکارم الأخلاق- ج ۱- ص ۱۶۸. مستدرک الوسائل- ج ۱۶- ص ۳۸۰.

خانه‌ای که در آن خرما نباشد اهل آن خانه گرسنه‌اند (کمبود غذایی دارند).

[۸۸] امام صادق علیه‌السلام: «إِذَا أَصَابَتْکُمْ مَجَاعَةٌ فَاعْبَثُوا بِالزَّبِیبِ.» الکافی- ج ۵- ص ۳۰۸.

اگر قحطی به شما رسید، با کشمش دوران را سپری کنید.

[۸۹] نبی مکرم ﷺ: «اَلاِحْتِکَارُ فِی عَشَرَةٍ وَ اَلْمُحْتَکِرُ مَلْعُونٌ اَلْبُرِّ وَ اَلشَّعِیرِ وَ اَلتَّمْرِ وَ اَلزَّبِیبِ وَ اَلدُّرَةِ وَ اَلسَّمْنِ وَ اَلْعَسَلِ وَ اَلْجُبُنِّ وَ اَلْجَوْزِ وَ اَلزَّیْتِ.» طب النبی ﷺ - ج ۱- ص ۲۲. مستدرک الوسائل و مستنبط المسائل - ج ۱۳ - ص ۲۷۵. بحار الأنوار - ج ۵۹- ص ۲۹۲.

محتکر ملعون است و احتکار در ده چیز است و آنها عبارتند از گندم، جو، خرما، کشمش، ذرت، روغن، عسل، پنیر، گردو، زیتون.

[۹۰] رُوِیَ عَنْ غِیَاثِ بْنِ إِبْرَاهِیمَ عَنْ جَعْفَرِ بْنِ مُحَمَّدٍ عَنْ أَبِیهِ علیه‌السلام قَالَ:«لَیْسَ اَلْحُکْرَةُ إِلاَّ فِی اَلْحِنْطَةِ وَ اَلشَّعِیرِ وَ اَلتَّمْرِ وَ اَلزَّبِیبِ وَ اَلسَّمْنِ وَ اَلزَّیْتِ.» من لایحضره الفقیه-ج۳- ص۲۶۵. بدون«وَاَلزَّیْتِ» الکافی-ج ۵-ص۱۶۴. الإستبصار-ج ۳-ص۱۱۴. تهذیب‌الأحکام-ج ۷-ص۱۵۹.

احتکار نیست مگر در گندم، جو، خرما، کشمش، روغن حیوانی و روغن زیتون.

[۹۱] ﴿وَاضْرِبْ لَهُمْ مَثَلًا رَجُلَيْنِ جَعَلْنَا لِأَحَدِهِمَا جَنَّتَيْنِ مِنْ أَعْنَابٍ وَحَفَفْنَاهُمَا بِنَخْلٍ وَجَعَلْنَا بَيْنَهُمَا زَرْعًا﴾ کهف – ۳۲.

و برای مشرکان [که از معبودان باطل دم می‌زنند و دل به دنیای فانی بسته‌اند] مَثَلی بزن: دو مرد را که به یکی از آنان دو باغ انگور دادیم و اطراف آن دو باغ را با درختان خرما پوشاندیم و فاصله میان آن دو باغ را کشتزاری قرار دادیم.

[۹۲] ﴿وَفِي الْأَرْضِ قِطَعٌ مُتَجَاوِرَاتٌ وَجَنَّاتٌ مِنْ أَعْنَابٍ وَزَرْعٌ وَنَخِيلٌ صِنْوَانٌ وَغَيْرُ صِنْوَانٍ يُسْقَى بِمَاءٍ وَاحِدٍ وَنُفَضِّلُ بَعْضَهَا عَلَى بَعْضٍ فِي الْأُكُلِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَاتٍ لِقَوْمٍ يَعْقِلُونَ﴾ رعد – ۴.

در زمین قطعه‌هایی مختلف و گوناگون، و باغ‌هایی از انگور و کشتزار و درختان خرمایی است که بر یک ریشه و غیر یک ریشه [می‌رویند]. ما برخی از آنان را در میوه و محصول با آنکه از یک آب سیراب می‌شوند بر برخی دیگر برتری می‌دهیم. بی تردید در این امور برای مردمی که تعقّل می‌کنند، نشانه‌هایی [بر توحید، ربوبیّت و قدرت خدا] ست.

[۹۳] ﴿ذَوَاتَا أَفْنَانٍ﴾ الرحمن – ۴۸. [دو بهشتی که] دارای درختانی متنوع و گوناگون است.

[۹۴] ﴿مُدْهَامَّتَانِ﴾ الرحمن – ۶۴ . آن [دو بهشت دیگر] در نهایت تراکم و سرسبزی اند.

لذا با کاشت اصولی و حساب شدهٔ درختان متنوع و ایجاد همزمانِ زراعت‌های گوناگون در کنار هم، اولاً ریشهٔ گیاهان استفادهٔ بهینه‌ای از سطوح مختلف خاک می‌کنند. ثانیاً به دلیل تناسب در دریافت نور، بیشترین استفاده از نور خورشید خواهد شد. ثالثاً تاثیر آفات بر گیاهان همجوار کاهش می‌یابد. رابعاً با چرخه ایجاد شده در این الگو از باغبانی و کشاورزی هم زمان، به دلیل تفاوت در زمان برداشت هر محصول، زمین و انسان در فعالیتی دائمی برای رسیدن به ثمر خواهند ماند و بهره‌وری چندین برابر خواهد شد. چرخه‌ای که در طول سال با رشد و نمو گیاهان به صورت متراکم و متنوع و برداشت در فصول گوناگون بر روی قطعه‌ای از زمین شکل می‌گیرد. در این هم زیستی، نیازهای متفاوت گیاهان برای تقویت و ادامهٔ حیات‌شان بهتر مرتفع می‌شود و در نهایت با برداشت محصول و میوه در ادوار مختلف، نیازهای گوناگون آدمی نیز به صورت تازه‌تر و با دسترسی بیشتر فراهم می‌گردد.

٦. منع کاشت درختان غیر بومی، مهاجم و بی‌ثمر

هر چند تمام درختان در آنچه گفته شد مشترک‌اند و برای تمام اکوسیستم‌ها مفیدند، اما **در هنگام کاشت درخت باید مواظب بود که آفت نکاریم.**[۹۵]

درختانی که از دیرباز در منطقه‌ای رشد کرده و بومی آن منطقه به شمار می‌آیند طی اعصار و قرون گذشته با شرایط آن زیست‌بوم وفق پیدا کرده‌اند. اما درختانی که مهاجرند و در محیطی غیر از آنچه می‌زیسته‌اند کاشته می‌شوند به جای آن‌که خود را با محیط جدید سازگار کنند، برای بقاء خود دست به بر هم زدن تعادل طبیعی چرخه‌حیات در آن ناحیه می‌زنند.

امروزه در کشورهای مختلف قوانین سختی برای جلوگیری از کاشت درختان غیربومی(مهاجم) وجود دارد. برای مثال رؤسای جمهور آمریکا در سال‌های ۱۹۷۷ – ۱۹۹۹ – ۲۰۱۶ با صدور فرمان‌های اجرایی[۹۶] بر ممنوعیت کاشت درختان غیربومی(مهاجم) تأکید کرده‌اند.[۹۷]

رژیم صهیونیستی هم با سخت‌گیری تمام، هرگونه کاشت درختان غیربومی را تا شعاع صد کیلومتری از مرزهایش مورد تعقیب قضایی قرار می‌دهد.

---

[۹۵] نبی مکرم ﷺ: «یا حذیفه قد ذهبت الدنیا او کانک بالدنیا لم تکن» قلت فداک ابی و امی یا رسول الله فهل من علامهٔ یستدل بها علی ذلک، قال «نعم یا حذیفه احفظ بقلبک و انظر بعینک و اعقد بیدک، اذا ضیعت امتی الصلواهٔ و اتبعت الشهوات و کثر الخیانات ... و کثرت الاشجار و قلت الثمار و غلت الاسعار...» نوائب الدهور فی علائم الظهور– سید حسن میرجهانی– نجف– کتابخانه حیدریه– ۱۳۷۶– ج ۱– ص ۲۹۱، یا قم– نشر رسالت– ۱۳۹۳– ج ۱– ص ۳۲۴. محاضرهٔ الأبرار و مسامرهٔ الأخیار فی الأدبیات و النوادر و الأخبار– محیی الدین محمد علی محمد– ابن عربی– ۱۳۲۴ هـق– ج ۲– ص ۱۸، یا دارالیقظه العربیه– ۱۳۸۸ هـق– ج ۲– ص ۳۲.

ای حذیفه؛ گویا می‌بینم که دنیا از بین می‌رود یا اصلا دنیایی نبوده است. (کنایه از آخر الزمان) [حذیفه بن یمان] می‌گوید: پدر و مادرم به فدای‌تان آیا نشانه‌ای بر آن وجود دارد؟ پیامبر فرمودند: بله ای حذیفه. آنچه می‌گویم را با قلبت حفظ کن و با چشم ببین و با دستان‌ات بشمار، وقتی که أمت من نماز را پایمال گرداندند و از شهوات پیروی نمودند و خیانت زیاد شد... و درختان زیاد شده اما میوه‌ها کم اند. (کاشت درختان بدون میوه رواج یافته است.) و قیمت‌ها سر به فلک گذاشتند...

[۹۶] دستورات اجرایی دستوراتی هستند که توسط روسای جمهور ایالات متحده صادر می‌شوند و از لحاظ قدرت نفوذ، هم‌طراز قانون اساسی هستند.

[۹۷] https://invasivespeciesinfo.gov/executive-orders-invasive-species

نمونه‌های زیادی از کاشت درختان غیربومی وجود دارد که با شکست روبرو شده و تا مدت‌ها به معضلی برای طبیعت یک منطقه تبدیل شده‌اند. برای مثال درخت کهور آمریکایی[۹۸] بومی آمریکای مرکزی و شمال آمریکای جنوبی و مکزیک است که در سال ۱۹۱۷ از آفریقای جنوبی و مصر به سودان معرفی شد و به منظور تحقیقات در خارطوم کاشته شد. موفقیت این گونه در تحمل خشکسالی و تثبیت تپه‌های شنی منجر به کاشت آن در مناطقی با استعداد بیشتر خشکسالی شد. در دهۀ ۱۹۹۰ به عنوان بخشی از برنامه‌های تثبیت تپه‌های شنی در سیستم‌های آبیاری سودان هم به کار گرفته شد. ولی چیزی از کاشت گستردۀ آن نگذشته بود که به درختان دیگر حمله کرد و ده‌ها هزار هکتار را در این مناطق برای گیاهان بومی ناامن کرد.[۹۹] تا جائی که فرمان ریاست جمهوری ۱۹۹۵ متعهد شد که این گونه را از سودان ریشه کن کند. این داستان درباره درخت نیاولی[۱۰۰] – بومی استرالیا و مالزی – که در سال ۱۹۰۶ برای تولید چوب در فلوریدا کاشته شد نیز اتفاق افتاد. علاوه بر مصارف تجاری، زیبایی ظاهری این گونه رغبتی در مردم به وجود آورد و آن را در خانه‌ها به صورت زینتی نیز کاشتند. این گونه به دلیل آن‌چه «حمله به همۀ گونه زیستگاه‌های زمینی و تالابی از جمله درخت کاج، چمن زراعی و مزارع سرو» ذکر شده است، در مراتع و مکان‌های شهری و حتی در کنار جاده‌ها ممنوع است و باید ریشه کن شود.

چند دهه پیش در پاکستان نیز، درختان اکالیپتوس به وفور در سراسر کراچی کاشته شد. بعداً مشخص شد که ریشه‌های عمیق آن‌ها آب زیرزمینی را با سرعت بیشتری نسبت به گونه‌های بومی می‌مکند و ریشه‌ها نیز به زیرساخت‌های جاده‌ای، ساختمان‌های مجاور و خطوط لوله آب و فاضلاب آسیب رساند.[۱۰۱] در سال ۲۰۱۹ نیز پارلمان پاکستان دولت را به دلیل مصرف بالای آب‌های زیرزمینی ملزم به ریشه کن نمودن درختان اکالیپتوس کرد.[۱۰۲] این درخت به دلیل سرسختی‌اش امروزه یکی از معضلات زیست محیطی پاکستان است.

کشورهای اروپایی هم از این داستان مستثنی نبوده و به طور مثال به دلیل انتشار ویروسی که باعث بیماری صعب العلاج در درختان می‌شود، ده‌ها هزار کاج اروپایی قطع خواهند شد و پیش بینی می‌شود تعداد این درختان در برخی نقاط به میزان سه چهارم کاهش یابد. همچنین انتظار می‌رود که ۷۵ تا ۹۵ درصد از درختان زبان گنجشک در انگلیس طی ۲۰ تا ۳۰ سال از بین برود. تنها در سال جاری حدود ۳۰۰۰۰ درخت زبان گنجشک در حال مرگ در جنگل‌های انگلیس قطع می‌شوند. هزینه قطع درختان بیمار از ۱ میلیون پوند به ۳ میلیون پوند (کمتر از ۴ میلیون دلار) در طول سال افزایش یافته است و بهبود بعدی این درختان نیز به منابع مالی نیاز دارد. سیاست یک سازمان خیریه انگلیسی برای مبارزه با تغییرات آب و هوایی بیشتر، کاشت درختان جدید به جای درختان مرده است. این سازمان در تلاش است تا «جنگل‌های آینده» را ایجاد کند. جنگل‌هایی که در برابر تغییرات آب و هوایی مقاوم باشند، از جمله با کاشت گونه‌هایی از آب و هوای گرم تر که کمتر تحت تأثیر بیماری‌ها قرار می‌گیرند، **مانند جایگزینی درختان زبان گنجشک با گردو.**[۱۰۳]

---

[۹۸] Prosopis juliflora

[۹۹] https://researchgate.net/publication/۳۰۳۰۱۵۰۷٤_Evaluating_the_Invasion_Strategic_of_Mesquite_Prosopis_juliflora_in_Eastern_Sudan_Using_Remotely_Sensed_Technique

[۱۰۰] Melaleuca quinquenervia

[۱۰۱] https://thenews.com.pk/print/۱۳۸۱۸۹-The-eucalyptus-controversy

[۱۰۲] https://nation.com.pk/۲۷-Mar–۲۰۱۹/concern-over-planting-eucalyptus-under-green-pakistan

[۱۰۳] https://theguardian.com/environment/۲۰۲۱/dec/۰۸/national-trust-to-fell-at-least-۳۰۰۰۰-trees-hit-by-ash-dieback

به هرحال به دلیل خطراتی که ممکن است تا چند قرن ما را به خود مشغول کند لازم است تا قانون‌گذاری و اهتمام مردم و مسئولین در کشور به گونه‌ای باشد که جلوی گسترش گونه‌های مهاجم گرفته شود. زیرا شواهد قوی وجود دارد که گونه‌های مهاجم می‌توانند رفتارها و تأثیرات تهاجمی را تا ۳۰۰ سال در شرایط مشابه محیطی در نقاط مختلف جهان تکرار کنند! [۱۰۴]

• خلاصه بخش‌های ترسیم وضعیت مطلوب و اصول راهبردی

پس از نشان دادن تکلیف الهی انسان مبنی بر حفظ و عمران طبیعت، و از طرفی وضعیت نا به هنجار زمین، ضرورت ارائهٔ راه‌حلی برای عمل به این وظیفه روشن می‌گردد تا با در دست داشتن طرحی برای نجات بی‌خطرِ زمین، با به جریان انداختن اراده و انگیزهٔ انسان او را آگاهانه به سمت عملی نمودن این بخش عبادی از دین سوق دهیم.

با استفاده از نصوص دینی و یافته‌های اخیر علوم زیست محیطی روشن شد که طرح بی‌خطر برای عمران و احیای زمین، کاشت درخت و زنده‌کردن جنگل‌ها و ایجاد باغات با درختان بومی متناسب با هر منطقه است. از آن‌جا که کاشت درختان غیربومی خطرات و هزینه‌های نامعلومی روی دست حکومت و طبیعت می‌گذارد، **اصل راهبردی ما، کاشت درختان مثمر توسط مردم با عدم تصدی‌گری ساختارهای حکومتی است**. لذا ترویج کاشت درختان مثمر و شوق ثمر می‌تواند انگیزه لازم را در افراد جامعه برای احیای طبیعت زنده کند و این شاید تنها راه برای نجات چرخه‌حیات در زمین باشد.

همچنین باید گفت که ساختمان نماد تمدن نبوده و این انبوه درختان متراکم و متنوع میوه هستند که نماد تمدن و حضور انسان متمدن در نقطه‌ای از زمین می‌باشند. سرسبزی و محوریت درختان در شهرسازی اسلامی در قرآن تحت عنوان «**بلد طیّب**» آمده است. درختانی که تأمین کنندهٔ امنیت غذایی مردم هستند.

این مهم لازم دارد تا فقهاء، قانون‌گذاران و دستگاه‌های اجرایی و نظارتی با توجه ویژه‌ای به مقولهٔ حفظ و تعالی طبیعت بپردازند و از افق تازه‌ای که این وظیفه را عبادتی الهی و وظیفه‌ای انسانی می‌بینند، به تدوین احکام و قوانین فردی و حکومتی همت بگمارند تا وظیفهٔ تاریخی و الهی خود در قبال آیندگان را به انجام برسانند.

وَآخِرُ دَعْوَانا أَنِ الْحَمْدُ لِلّٰهِ رَبِّ الْعالَمِینَ

---

[۱۰۴] Franz Essl , Dietmar Moser , Stefan Dullinger , Thomas Mang , Philip E.Hulme - Selection for commercial forestry determines global patterns of alien conifer invasions - Diversity and Distributions - Volume ۱۶, Issue ۶ p. ۹۱۱–۹۲۱
https://doi.org/۱۰.۱۱۱۱/j.۱۴۷۲-۴۶۴۲.۲۰۱۰.۰۰۷۰۵.x



پیوست اول

میرآب؛ بازخوانی نقش درخت در چرخهٔ آب

بِسمِ اللهِ الرَّحمَنِ الرَّحِیمِ

«میرآب»

بازخوانی نقش درخت در چرخهٔ آب

ایمان ذکاوتمند

|۱|

بخش نخست: مقدمات

تمام جانداران به طور غریزی به دنبال حفظ بقاء خود و نوع خود هستند. اما از بین تمام موجودات تنها یک موجود است که با زیست خودعلاوه بر بقاء خودحیات دیگر موجودات را نیز تامین می‌نماید: درخت. اگر نگاهی به مجموعه‌کارهایی که یک درخت انجام می‌دهد نگاهی بیاندازید متوجه خواهید شد که او به گونه‌ای خلق شده تا بتواند کلیددارِ حفظ کیفیت حیات برای تمام اکوسیستم‌های موجود در چرخهٔ حیات باشد.[۱] فرقی نمی‌کند درختی تک افتاده در افق بیابانی باشد یا انبوهی از درختان جنگلی. درخت در جای‌جای چرخهٔ حیات ریشه دوانده و شاخه‌های پرمهرش را بر سر تمام موجودات کرهٔ زمین گسترده است. تمام راه‌ها در اکوسیستم‌های ریز و درشت در هستی، یا به درخت ختم می‌شود یا از آن عبور می‌کند. در اینجا به دنبال آن هستیم که کلیدی‌ترین نقشی که درخت در امروز و آیندهٔ بشریت ایفاء می‌کند را بررسی کنیم: «میرآبی»

دربارهٔ درگیری‌های آیندهٔ بشریت شنیده‌اید که جنگ‌های آینده نه بر سر نفت یا مرزهای کشورها که بر سر حیاتی‌ترین مسئلهٔ بقاء انسان است: آب. شاید امروزه که دسترسی به آب برای شما به راحتی باز کردن شیر آب است تصور آن‌که انسان‌ها بر سر آب با هم دعوا کنند غریب به نظر برسد اما باید به اطلاع‌تان برسانم زمزمه‌های جنگی که از آن صحبت می‌کنیم مدت‌هاست آغاز شده است. برای درک این نکته راه دوری نمی‌خواهد بروید؛ کشاورزی که امروز از حق‌آبهٔ منطقهٔ خود محروم شده است را می‌توان از کشته‌های این جنگ به حساب آورد. در عرصهٔ بین الملل هم اشاره‌ای به تنش‌های جدی که در همین چند سال اخیر بین کشورهایی چون ایران و افغانستان یا ترکیه و عراق[۲] بر سر تقسیم حق‌آبه‌های دو کشور پدید آمده است کافی به نظر می‌رسد. اما با منع کردن همسایه و به راه انداختن جنگ برای تصاحب آبِ بیشتر تنها معضلات جدیدی به لیست دور و دراز مشکلات تمدن مدرن اضافه کرده‌ایم و مرهمی بر زخم انسان نخواهد بود. تنها راه حل دائمی و البته مسالمت آمیز برای حل معضلات فردا و پس‌فردای آب، کاشت درخت و سرسبز نمودن زمین است.

با خود می‌گویید این که نشد راه حل! مگر کاشت درخت به مصرف بیشتر آب دامن نمی‌زند؟! یا کشورهایی مانند ایران که سالیانی‌ست با خشک‌سالی دست به گریبان‌اند مگر می‌توانند تقدیر دیگری جز زندگی‌ای خشک و کویری داشته و حتی خیال سرسبز شدن ایران به سرشان بزند؟ بله! با مطالعات و آزمایشاتی که به تازگی صورت گرفته و با در کنار هم قرار دادن این نتایج، به این نکته دست پیدا می‌کنیم که درخت مانند یک میهمان مبارک است که رزق خود را نیز به همراه خواهد آورد. به علاوه هرچه تعداد گیاهان بیشتری در واحه، باغ یا جنگل خود داشته باشید، اکوسیستمی که گرداگرد درختان تشکیل می‌شود بهتر با هم هماهنگ می شوند تا از منابع طبیعی مانند آب حداکثر استفاده را ببرند. در واقع یک گیاه به تنهایی، یا یک باغ کوچک، مشکل بیشتری برای زنده ماندن خواهد داشت، زیرا به تنهایی کار می کند. به یاد داشته باشید گیاهان، بیشتر دوست دارند به صورت گروهی کار کنند پس آن‌ها را تنها نکارید! درک این نکته نیازمند مقدماتی است.

در ابتدا باید بگویم تصور ما از این‌که روزی آب تمام خواهد شد نادرست است. آبی که امروز روی زمین وجود دارد به همان اندازه‌ایست که از ابتدای خلقت وجود داشته است. منابع آبی زمین به لطف چرخهٔ آب همواره در حال جا به جایی و تغییر شکل است. چیزی شبیه «پایستگی انرژی». پس در حقیقت مسئلهٔ امروز ما بر سر تمام شدن آب نیست؛ بلکه موضوع بر سر این است که چگونه این منابع را مدیریت کنیم.

تجربیات انسانی در حوزهٔ مدیریت آب تا به امروز با شکست‌های عمیقی مواجه شده است. ما سدهایی ساخته‌ایم که با حبس کردن آب در میان کوه‌ها، باعث از دست رفتن حجم عظیمی از آن به وسیلهٔ تبخیر می‌شویم. مقدار این هدر رفت آن‌قدر هست که دولت‌ها را مجبور به تن دادن به راه حل‌هایی با هزینه‌های گزاف برای ایجاد سایه بر روی سطح آب کرده باشد.[۳] سیلاب‌ها، طوفان‌ها، بارش‌های بی‌سابقه‌ای که موجب فرسایش شدید خاک شده، خشکسالی‌های بی انتها و از بین رفتن کشاورزی ها تنها بخش کوچکی از ثمراتی است که بر هم زدن چرخهٔ آب به همراه آورده است.

بر اساس پژوهش حاضر راه حل مدیریت کم‌هزینه و بی‌خطر آب توجه به نقش درخت در این چرخه و بازگرداندن نقش فراموش شدهٔ «میرآب»ـی به درخت است. درخت با قرار گرفتن در مرکز در هم تنیدهٔ چرخه‌های طبیعت، به تنهایی قادر است تا در کنار مدیریت آب و جلوگیری از هدررفت آب، جلوی فرسایش خاک را گرفته و پاکی را نیز برای هوا به ارمغان آورد. درخت برای این کار امکانات زیادی دارد. از تعدیل دما و ایجاد سایه بان به وسیلهٔ شاخ و برگ و حفظ رطوبت آب در خاک گرفته تا شارژ کردن سفره‌های زیرزمینی و حتی پمپاژ رطوبت به مناطق خشک. ما هر کدام از این بخش‌ها را به طور تخصصی بررسی می‌کنیم تا راه حل ارائه شده روشن‌تر شود. به این منظور ابتدا مقدماتی را باید عرض کنم تا در پایان بتوان این کلاف سر در گم را به درخت ختم به خیر کنیم.

مقدمهٔ اول: تعادل دما

بالا رفتن سطح دریاها، آتش‌سوزی‌های جنگل‌ها، گرمای بی‌سابقه در فصول گرم و به تازگی کشته دادن به خاطر گرمازدگی در اقصی نقاط زمین و... زنگ خطرها را دربارهٔ زیاد شدن دمای زمین به صدا درآورده است. برای ما انسان‌های عصر حاضر تغییرات دمایی به راحتی قابل مشاهده است. کافی است به عقب نشینی یخ‌ها نگاه کنیم که چگونه از گرما پا پس می‌کشند. ما در حال تجربه سریعترین نرخ عقب نشینی یخبندان در تاریخ ثبت شده هستیم![۴] اما گرمای زمین از کجا می‌آید و چرا این روزها گرما به خطری جدی تبدیل شده است؟ این سوالی است که پاسخ آن نقش درخت را روشن می‌کند.

خورشید برای اینکه سیارهٔ ما را گرم کند باید راه دور و درازی را از هم‌جوشیِ هسته‌ای تا روی پوست شما طی کند. خورشید که از این زاویه مانند یک نیروگاه عظیم عمل می‌کند، به واسطهٔ هم‌جوشی هسته‌ای[۵] هیدروژن درونش و تبدیل هیدروژن به هلیوم، انرژی زیادی را تولید می‌کند که باعث می شود مقدار زیادی "تابش الکترومغناطیسی"[۶] از خود ساطع کند.

این تشعشعات که بیشتر به صورت نور مرئی آزاد می‌شوند علت اصلی گرمابخشیِ آفتاب است.[۷] با برخورد اشعهٔ خورشید با اتمسفر زمین، ابتدا لایهٔ اوزون اشعه‌های مضر – مانند اشعهٔ ماوراء بنفش که آسیب‌های جدی به پوست و چشم وارد می‌کند – را منعکس کرده و به فضا باز می‌گردند. [۸] از آنجا که جو زمین بی‌رنگ است و امکان جذب بیش از اندازهٔ گرما را ندارند، مولکول‌های موجود در اتمسفر چیزی حدود ۵۴ درصد از انرژی خورشید را هنگام ورود جذب می‌کنند و این گرما را در سراسر سیاره پخش می‌کنند.[۹] اتمسفر زمین همچنین انرژی منعکس‌شده را از سطح سیاره را به دام می‌اندازند و مانع هدررفتِ گرما می‌شوند. پس اتمسفر زمین یکی از ستون‌های تعادل دما در زمین است و همان‌طور که از گرم شدن بیش از حد زمین جلوگیری می‌کنند، از سرد شدن بیش از حد سیاره نیز جلوگیری می‌کنند. برای مثال در کرهٔ ماه که اتمسفر محافظی ندارد، دما می تواند از ۱۲۱ درجه سانتیگراد زیر نور و منفی ۱۵۷ درجه سانتیگراد در سایه متغیر باشد![۱۰] اگر زمین به طور مداوم انرژی خورشیدی را بدون هیچ راهی برای از دست دادن انرژی، دریافت می‌کرد به طور مداوم گرمتر می شد. ولی زمین از طریق بازتاب تشعشعات الکترومغناطیسی به وسیلهٔ جوّ، گرما را به فضا بازمی‌تاباند و از گرم شدن بیش از حد سیاره جلوگیری می‌کند.

مقدار گرمایی که در این فرآیند بازتاب می‌شود به نوع گازهای موجود در جو وابسته است. برخی از گازها گرما را به جای اینکه بازتاب دهند به خود جذب می‌کنند. به همین دلیل باعث اختلال در تابش مجدد تشعشعات می‌شوند. در صورتی که نظم و مقدار این تابش و بازتاب تغییر کند، تغییرات زیست‌محیطی گسترده‌ای در تمام زمین اتفاق می‌افتد. یکی از خطرناک‌ترینِ این گازها دی‌اکسید کربن است.

«اثر گلخانه‌ای» یا دی‌اکسید کربن چطور شما را خواهد کشت؟!

با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن موجود در اتمسفر، تحمل گرمایی زمین تغییر می کند و انرژی بیشتری در جو زندانی می‌شود و گرمای کمتری به فضا باز می‌گردد؛ پدیده ای که به عنوان "اثر گلخانه ای شناخته" می شود.در واقع کربن موجود در لایه های بالایی زمین با جذب گرما به خود و سپس انتقال آن به زمین مثل شعلهٔ بالاییِ فر عمل می‌کنند. هنگامی که این ترکیبات تابش مادون قرمز از سطح را جذب می کنند، جو گرم می شود. انرژی منعکس شده به سمت زمین، سطح را بیشتر گرم می کند و باعث می شود زمین تشعشعات مادون قرمز بیشتری ساطع کند.

این چرخه‌ای ایجاد می‌کند که زمین را به سمت گرم‌تر شدن سوق می‌دهد. [۱۱]

مقدمهٔ دوم: چرخهٔ آب – آب بی قرار

گام ۱: تبخیر

چرخهٔ آب با تبخیر آغاز می شود. آب انرژی گرمایی خورشید را جذب می‌کند و به بخار تبدیل می شود. اجسام آبی مانند اقیانوس ها، دریاها، دریاچه ها و بدنه رودخانه ها منبع اصلی تبخیر هستند. آب به خاطر یکی از ویژگی‌هایش به نام "گرمای ویژه" [۱۲] همان کاری را در طبیعت می‌کند که در بدن شما هم به آن مشغول است. ظرفیت گرمایی بالای آب اجازه می‌دهد تا دمای داخلی بدن تنظیم شود. به طور دقیق، آب باید ۴۱۸۴ ژول گرما (۱ کیلو کالری) جذب کند تا دمای یک کیلوگرم آب ۱ درجه سانتیگراد افزایش یابد.[۱۳] برای مثال در حین برف‌بازی یا پیاده روی زیر آفتاب تابستانی دمای بدن شما هرگز به پای شدت دمای بیرونی نمی‌رسد. همانطور که یکی از کارهای سیستم جریان خون در بدن شما، علاوه بر رساندن مواد مغذی به سلول‌ها، متعادل نگاه داشتن دمای بدن است، چرخهٔ آب هم باعث تعادل دما در زمین می‌شود. در واقع با عبور خون از دل اعضایی که دمای بیشتری تولید کرده‌اند، آب موجود در خون، حرارت را به خود جذب کرده و در هنگام گذر از زیر پوست یا اعضایی که خنک‌ترند این گرما را آزاد می‌کند.

همین مسئله باعث شده تا آب به عنصری غیرقابل جایگزینی برای خنک کنندگی ماشین‌آلات در صنعت هم تبدیل شود. همین یک قلم را در نظر بیاورید: آتشفشان‌هایی که زیر سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها هستند بسیار بیشتر از سطح زمین است. می‌توانید تصور کنید اگر تنها چند ساعت آبی نباشد که جلوی ورود گرما و مواد مذاب آتشفشان‌ها به زمین را بگیرد، چقدر دما بالاتر می‌رود؟! گرمای ویژهٔ آب وقتی که تغییر قیافه می‌دهد و به بخار یا یخ تبدیل می‌شود وضوح بیشتری دارد. آب برای تبخیر از محیط پیرامون‌اش گرما را جذب می‌کند و در هنگامی که قرار است متراکم شده و مجددا به مایع تبدیل شود نیز گرما آزاد می‌کند.[۱۴] به همین خاطر دمای یک منطقه نیز به چرخهٔ آب بستگی دارد.

گردش ترموهالین

یکی دیگر از تاثیراتی که چرخهٔ آب بر دما می‌گذارد جذب حرارت خورشید به سطح خود و پخش کردن آن است. وقتی در یک روز گرم در برابر آفتاب باشید بدن شما هم همین فرآیند را انجام می‌دهد: گرمایی که از سطح پوست دریافت می‌کند را به درون بدن می‌برد. جایی که آفتابی در کار نیست تا با خنک کردن آن، بتواند به وظایف خود در تعدیل دمای بدن عمل کند. در دریاها هم کار به همین شکل است: درست است که سطح دریاها غالبا آرام است اما در دلشان طوفانی برپاست؛ به طوری که دریا یک لحظه آرام و قرار ندارد.

سطح وسیع آب‌های زمین، حرارت خورشید را به خود جذب کرده و با جریان‌هایی که در دریاها به واسطهٔ گرم شدن روی آن و بادها شکل گرفته است، مانع بالا رفتن دما می‌شود. قسمتی از گردش آب در اقیانوس‌ها به دلیل نسبت دقیقی است که بین آب شور و شیرین و حرارت وجود دارد. در این گردش، آب به خاطر تفاوت دما و اختلاف چگالی آب‌های شور و شیرین در مقیاس جهانی به حرکت درمی‌آید. سرعت این گردش که نامش "دماشوری" (ترموهالین) است در حدود یک سانتی‌متر در ثانیه است. تخمین زده می‌شود هر گردش آب در این چرخه، حدود یک قرن به طول می‌انجامد؛ اما علیرغم کندی سرعت آب، این گردش تا بستر دریا ادامه می‌یابد و جریاناتی را پدید می‌آورد که اقیانوس جهانی را در بر می‌گیرند.[۱۵] آب در اقیانوس اطلس شمالی پایین می‌رود و به سمت جنوب آفریقا حرکت می کند. در اقیانوس هند و بیشتر در اقیانوس آرام بالا می‌رود، سپس به سطح نزدیک شده و راهی اقیانوس اطلس می‌شود تا دوباره در اقیانوس اطلس شمالی پایین رفته و چرخه دوباره و دوباره از نو شروع شود. ترموهالین در تعادل دمای آب‌های دریاها و – با آنچه ذکر شد – جلوگیری از بالا رفتن دمای تمام کرهٔ زمین نقش اساسی دارد.[۱۶] وظیفهٔ دقیق درخت در این پروسه را پس از ذکر سفره‌های زیر زمینی بازگو خواهم کرد.

گام ۲: تراکم

در ارتفاعات بالا بخارات آب به دلیل دمای پایین و فشار بالای هوا، به ذرات بسیار ریز یخ یا قطرات آب تبدیل می شود. با نزدیک شدن این ذرات به یکدیگر، ابرها و مِه‌ها را در آسمان تشکیل می‌شوند.

گام ۳: تصعید

به غیر از تبخیر، تصعید نیز به بخار آب در هوا کمک می کند.[۱۷] تصعید زمانی شتاب می گیرد که دما کم یا فشار زیاد باشد. صفحات یخی قطب شمال و قطب جنوب و کلاهک های یخی روی کوه‌ها بیشترین بخار آبِ تصعیدی را در هوا آزاد می‌کنند.

گام ٤: بارش

سپس ابرها (بخارهای متراکم شده) به دلیل باد یا تغییر دما به صورت بارش می‌ریزند. در ارتفاعات بالا دما پایین است و از این رو قطرات انرژی گرمایی خود را از دست می دهند. با رسیدن پای قطرات به زمین هر کدام راهی منزلی می‌شوند که باید بروند مگر اینکه ما راهشان را منحرف کنیم.

از این مرحله به بعد کار درخت به عنوان میرآب آغاز می‌شود و مدیریت آب را به عهده می‌گیرد.

گام ۵: تعرق

پس از باران مقداری از آن جذب خاک شده و وارد فرآیند تعرق می‌شود. تعرق فرآیندی شبیه تبخیر است که در آن آب توسط گیاهان به بخار تبدیل می‌شود. ریشهٔ گیاهان آب را جذب می‌کند و آن را به سمت برگ ها می راند که برای فتوسنتز استفاده می شود. آب اضافی از طریق " اسمز "ها (روزنه‌های بسیار ریز برگ‌ها) به صورت بخار آب از برگ ها خارج می‌شود. این مرحله را در مقدمهٔ بعد زیر ذره‌بین خواهیم گذاشت.

گام ٦: روان‌آب

آبی که نتواند در زمین نفوذ کند به شکل روان‌آب روی زمین جاری می‌شود تا دوباره راهی برای بازگشت به چرخه پیدا کند. با برخورد قطرات آب با زمین و عبور از سطح زمین، خاک سطحی – حاصلخیزترین و قیمتی‌ترین بخش خاک – و مواد معدنی را همراه با خود به حرکت درمی‌آورد. هرسال نهرها حدود ۱۷میلیارد تن مواد فرسایش‌یافته را از خشکی به اقیانوس‌ها، دریاها یا دریاچه‌ها منتقل می کنند.[۱۸] در صورتی که روان‌آب‌ها یکدیگر را پیدا کنند و به هم بپیوندند سیل‌هایی را پدید خواهند آورد که هیچ چیزی در برابر آن قدرت ایستادگی ندارد .

آنچه این چرخه را مخصوصا در محیط‌های شهری با اخلال گسترده مواجه می‌نماید فرش شدن زمین با پوشش‌هایی است که اجازهٔ نفوذ آب در زمین را نداده و باعث ایجاد روان‌آب وسیلاب می‌شوند. در ابعاد وسیع‌تر چوب لای چرخهٔ آب در تمام طبیعتِ زیست‌کره می‌گذارد.

گام ۷: نفوذ

آب اگر بتواند قدری بر روی خاک درنگ کند، رفته‌رفته جذب خاک شده و وارد زمین می‌شود تا بر سر سفره‌های زیرزمینی بنشیند. با عبور آب از دل خاک‌های فشردهٔ لایه‌های پایین‌تر، املاح و شوری آن فیلتر می‌شود تا چیزی که پس از گذر از تنگناها به سفره‌ها می‌رسد آبی خالص و زلال باشد. یعنی آبی که قابلیت استفاده توسط موجودات زنده را داشته باشد.

انسان مدرن جنگی را از تمام جهات بر علیه آب آغاز کرده است: بهره برداری انسان از آب‌های سطحی که در صنعت، آشامیدن و کشت استفاده می‌شود باعث از دست رفتن سریع ذخائر آب شده. بشر مدرن با ایجاد شهرها و مناطقی که آب را از سفره‌های زیرزمینی دریغ می‌کنند راه تأمین آب زلال و صاف سفره‌ها را بست. علاوه بر این‌ها انسان معاصر با اختراعات جدیدش دندان‌ها را برای تهاجم جدیدی تیز کرده است: جنگ را از سطح زمین به صدها متر پایین تر هم کشانده و به سفره‌هایی که روز به روز در حال کوچک‌تر شدن‌اند هم هجوم برده و سفرهٔ کریمانهٔ آب‌های زیرزمینی را از نعمت آب می‌روبد. به وظیفهٔ درخت در قبال فرسایش و نفوذ دادن آب، در فصل معماری خاک می‌پردازم.

گام ۸: بازگشت به دریا

سفره‌های زیرزمینی که در بخش‌هایی از خود با زمین هم سطح باشند آب خود را به شکل چشمه‌ها و آبگیرها بروز می‌دهند و با پیوستن چشمه‌ها و رودها به یکدیگر عازم دریا می‌شوند تا دوباره سوار گردونهٔ آب شوند.

مقدمه سوم: زیست درخت

اگر نگاهی به ساختار عناصر تشکیل دهندهٔ چوب نگاهی بیاندازیم به خوبی متوجه این نکته خواهیم شد که غذی اصلی درختان را کربن تشکیل می‌دهد. سلولز N (C۶, H۱۰, O۵) جزء اصلی دیوارهٔ سلولی درختان بوده و ۵۰ تا ۸۰ درصد از چوب را تشکیل داده است. مواد تشکیل دهندهٔ چوب درختان از این قرار است: ۵٪ کربن، ۴۲٪ اکسیژن، ۶٪ هیدروژن، ۱٪ نیتروژن، ۱٪ مواد معدنی.

به طور خلاصه درختان در فرآیندی شیمیایی آب و اکسیژن و کربن را گرفته و به وسیلهٔ فتوسنتز ،کربن را به گلوکز و غذای خود تبدیل کرده و آب و اکسیژن را دوباره به هوا باز می‌گرداند.

مراحل فتوسنتز:

۱. گیاهان آب و مواد معدنی را از طریق ریشه خود جذب می کنند تا شیره بسازند.

۲. هنگامی که آب از طریق ریشه به داخل مکیده می شود، وارد نوعی لولهٔ گیاهی در پوسته داخلی درخت می‌شود که آب را به بالای درخت می‌برد. شیره از طریق درخت به برگ ها می رسد. برگ ها CO ۲ و نور را جذب می کنند.[۱۹] برگ گیاهان دارای روزنه‌های ریزی به نام «استوما» هستند که غالبا در زیر برگ‌ها وجود دارند[۲۰] و از طریق آن‌ها هوا را برای فیلتر کردن کربن به درون خود جذب می‌کنند.

۳. برگ ها از کلروفیل و انرژی خورشید برای تبدیل CO ۲ و آب به گلوکز استفاده می کنند و به دلیل گرمای ویژهٔ آب، برگ‌ها حرارت زیادی را باید برای این فرآیند جذب کنند. [۲۱]

۴. اکسیژن و آب آزاد می شود و گلوکز درخت را تغذیه می کند که توسط شیره به سراسر گیاه منتقل می شود. با از دست دادن آب در برگ‌ها، فشار آب در سایبان بالایی کاهش می یابد که با کمک اختلاف فشار هیدرواستاتیک باعث می شود آب دوباره از ریشه به سمت برگ ها بالا برود و این مراحل دوباره تکرار شوند. [۲۲] نود درصد آب درخت در نهایت پراکنده شده و از روزنه های برگ آزاد می شود.[۲۳]

برای اینکه متوجه شوید یک درخت چه اندازه کربن را در خود جای داده است درختی ۱۰۰۰ کیلوگرمی با رطوبت ۱۰۰ درصد را تصور کنید. اکنون می‌دانیم که این درخت ۵۰۰ کیلوگرم آب و ۵۰۰ کیلوگرم جرم خشک است.

و می‌دانیم که ۴۷.۵ درصد از آن جرم خشک، کربن است. این یعنی ۲۳۷.۵ کیلوگرم کربن. به لطف نسبت جرم مولی، می‌توانیم CO_2 را تجزیه کنیم و متوجه شویم که برای ایجاد ۱ کیلوگرم کربن در درخت به ۳.۶۷ کیلوگرم کربن دی‌اکسید نیاز است.[۲۴]

بخش دوم: نقش درخت در کاهش دما و مدیریت آب

وظایفی که درخت در قبال چرخهٔ آب انجام می‌دهد را نباید منحصر به مصرف آب و تبخیر آن کرد. درخت به عنوان موجودی که حافظ حیات بر روی زمین است با سرک کشیدن به تمام حوزه‌های چرخهٔ حیات دستی به سر و روی آن خواهد کشید و از روز قبل بهترش خواهد کرد. باور کنید یا نه حتی یک درخت هم در جلوگیری از سقوط حیات در زمین به خوبی مؤثر است. پس از مقدماتی که ذکر شد به معجزات روزمره‌ای که درخت برای انسان انجام می‌دهد می‌پردازم.

الف. کاهش و تعدیل دما

تمام تغییرات اقلیمی ریشه در تغییرات دما دارند. زیرا به زبان ساده، تغییرات آب و هوایی چرخهٔ طبیعت که به دست انسان‌ها مختل شده را تشدید می کند: به دلیل گرمایش بالا، آب از خشکی و دریا تبخیر می‌شود و در نهایت به صورت باران و برف به زمین بازمی گردد. با افزایش دمای هوا، آب بیشتری به هوا تبخیر می شود و هوای گرم‌تر می‌تواند بخار آب بیشتری را در خود نگه داشته و سپس به صورت باران و برف پایین بفرستد. چیزی که مشکلات بزرگی مانند سیل و طوفان‌های شدید در سراسر جهان پدید آورده است. درست در همان زمان که برخی از مناطق با طوفان های قوی تر مواجه می شوند، برخی دیگر به خاطر بی‌نظمی ایجاد شده در چرخه، هوای خشک و حتی خشکسالی بیشتری را تجربه می کنند.[۲۵] چرا که با افزایش دما، تبخیر افزایش می یابد و خاک خشک می شود. خشکی خاک رفته‌رفته باعث از دست رفتن پوشش گیاهی مناطق خشک می‌شود و حتی هنگامی که باران می‌آید مقدار زیادی آب از زمین سخت و خشک – که دیگر توان جذب آب را ندارد – به رودخانه‌ها و نهرها می ریزد و باز خاک خشک می‌ماند. علاوه بر این به دلیل دماهای گرم‌تر، بیشتر بارش‌ها به صورت باران خواهد بارید نه برف. در بخش‌هایی از نیمکرهٔ شمالی ورود زودهنگام شرایط بهاره، قله‌هایی که با ذوب آرام‌آرامِ برف‌هایشان آب را در تابستان تامین می‌کردند، سریع‌تر ذوب می‌شوند و در زمستان و اوایل بهار وارد جریان رودخانه‌ها می‌شود.

نتیجه؟ تبخیر بیشتر از خاک و افزایش خطر خشکسالی و تشدید اثرات تغییرات اقلیمی.[۲۶] درست است که با خواندن سیر فساد و دگرگونی‌هایی که به وجود آمده لرزه بر ادام‌تان می‌افتد و شاید کار را از دست رفته به حساب بیاورید اما باید توجه داشت با اقدامات گروه‌های دلسوز و بسیج مردمی و آغاز درخت‌کاری و ایجاد مجدد پوشش گیاهی با همین زمین‌های کوچک و دست‌های خالی هم قادر خواهید بود چرخهٔ حیات را نجات داده و آبِ رفته را به جوی بازگردانید.

اولین هدفی که باید برای نجات دادن چرخهٔ حیات دنبال کرد کاهش دمای کرهٔ زمین است تا با حرکت به سوی آب و هوایی بهتر منابع آب با تبخیرهای نا به جا از دست نرفته و بارش‌ها به روال طبیعی خود بازگردند. توافق‌نامهٔ محیط‌زیستیِ پاریس هدف اصلی خود را "تقویت واکنش جهانی به تهدید تغییرات آب و هوایی از طریق کاهش دمای جهانی تا ۲ درجهٔ سانتی‌گراد در این قرن" قرار داده است.[۲۷] با بررسی‌های صورت گرفته که در ادامه از نظر خواهید گذراند بهترین، پایدارترین و ارزان‌ترین روش کاهش دمای زمین، حفظ و إحیای منابع آب کاشت درختان متنوع و بومی در جای جای جهان است.[۲۸]

دی‌اکسید کربن: خوراک درخت

درختان با جذب و ذخیره کردن دی‌اکسید کربن بزرگ‌ترین بار در کاهش دمای زمین را به دوش می‌کشند. درخت، به دلیل ساختار چوبش – که گفتم بیش از نیمی از آن را کربن تشکیل داده است – مشتری پر و پا قرص کربن‌اند. آن‌ها بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ کربن در زمین و به نوعی می‌شود گفت تبدیل‌کنندهٔ دی‌اکسیدکربن از گاز به جامد(تنه و بدنهٔ خود) هستند. با مصرف کربن توسط درخت، گنبد کربنیِ جو رنگ می‌بازد و جدای از هوای پاک، دمای زمین رو به کاهش می‌رود.

درخت: سپر بلای امواج

درخت در دو سطح دما را کاهش دهد: محلی و جهانی. درختان با زیستِ خود نوعی ریزاقلیم در محیط پیرامونی خود ایجاد می‌کنند که باعث خنک‌تر شدن اطراف خود خواهد شد. اما این تغییر مثبت در همان محدوده باقی نخواهد ماند. زیرا به دلیل یکپارچگی چرخهٔ حیات، هر تغییری — هر چند بسیار کوچک — باعث تحول در تمام زیست‌بوم زمین هم خواهد شد.

همواره رقابت نفس‌گیری بین آب و آفتاب در جریان است. آفتاب با حرارتی که تولید می‌کند به دنبال آخرین مولکول آب است تا آن را دوباره به چرخهٔ طبیعت بازگرداند و انسان در تلاش است تا قبل از گریختن آب و تبخیر کامل آن، بیشترین استفاده را از آن برده باشد. به همین دلیل مسئله‌ای که از دیرباز ذهن بشر را به خود مشغول داشته پیدا کردن راهی برای بهره برداری بیشتر از این گنجِ بی‌قرار بوده است.

امروزه با بی‌توجهی چند قرن اخیر انسان به حراست از طبیعت، زمین گرم‌تر شده و اشعه‌های خورشید نیز تبدیل به سلاح‌های برّنده‌تری شده‌اند. با استفادهٔ روزافزون و نادرست از منابع آب شیرین این چالش رنگ و بوی تهدیدآمیزی به خود گرفته و باعث شده است تا حفظ و بهره‌برداری صحیح از آب بیش از پیش در مرکز توجه قرار بگیرد.

درخت از راه‌های مختلفی باعث کاهش دما می‌شود: در وهلهٔ اول با باز کردن شاخ و برگ‌اش در مقابل اشعه‌های خورشید مانع رسیدن تشعشعات الکترومغناطیسی – که از این به بعد برای سهولت آن را آفتاب می‌نامیم – و گرما به سطح خاک می‌شوند. باید بگویم در حقیقت درخت و اطرافش تافتهٔ جدا بافته است!

درختان در زیر تاج شاخ و برگ خود در مقایسه با اتمسفر بیرونی محیطی جداگانه ایجاد می کنند که نتیجهٔ مجموع عملکردهای فیزیکی و فیزیولوژیکی درخت است[۲۹]. چیزی که با ورود به جنگل‌های انبوه به وضوح قابل حس است. با وارد شدن در دل جنگلی انبوه گویی وارد اقلیم دیگری می‌شوید: رطوبت و دمای هوا با مرز جنگل و چند متر بالاتر از تاجِ جنگل اصلاً قابل مقایسه نیست.

آزمایشاتی که طی یک دهه و در بیش از ۶۰ منطقه صورت گرفته نشان داده است سطوح سایه دار ۲۰ تا ۴۵ درجه فارنهایت (۱۱ تا ۲۵ درجه سانتیگراد) خنک‌تر از سطوح بدون سایه‌اند.[۳۰] تبخیر و تعرق، به تنهایی یا در ترکیب با سایه، می تواند به کاهش دمای هوا در اوج تابستان تا ۲ الی ۹ درجه فارنهایت (۱ تا ۵ درجه سانتی گراد) کمک کند.[۳۱] درختان و پوشش گیاهی زمانی که در مکان‌های حساب‌شده اطراف ساختمان‌ها یا برای سایه‌اندازی پیاده‌روها در پارکینگ‌ها و خیابان‌ها کاشته می‌شوند، با جلوگیری از تابش آفتاب به عنوان یک استراتژی کاهش مصرف انرژی تا ۳۵ درصد مفید هستند. تا حدی که در برخی مناطق آزمایش شده، نیاز به وسایل سرمایشی در تابستان کاملاً بر طرف شده بود![۳۲] – چرا که به گفتهٔ دپارتمان انرژی آمریکا، درختان می توانند دمای هوای اطراف را تا ۶ درجه فارنهایت کاهش دهد.[۳۳] البته از آنجا که هوای خنک به سمت پایین متمایل است، دمای هوا در زیر درختان می‌تواند تا ۲۵ درجه خنک تر باشد.[۳۴]

محققان در پژوهش دیگری که سیزده سال به طول انجامید و دمای هوا را در علفزار، زمین خشک و ۱۲ منطقهٔ درختکاری شده اندازه گرفتند دریافتند که میانگین دمای هوا در محل‌های بدون درخت – به طور میانگین – ۳۵.۴۵ درجهٔ سانتیگراد در مناطق درخت‌کاری شده ۳۰.۷۷ درجه سانتیگراد بود. همچنین دمای خاک در ۳ سانتی‌متر زیر سطح خاکی که زیر سایبان درخت‌ها بود ۳.۲۸ تا ۸.۰۷ درجه سانتیگراد نسبت به هوا کاهش نشان داد. [۳۵]

مطالعهٔ دیگری بر روی ۱۹ گونه از گیاهان و درختان با شاخ و برگ متفاوت و سنین مختلف نشان داد که سایه‌اندازی درختان با کاهش دما از ۲ تا ۵ درجهٔ‌سانتی گراد می‌تواند تبخیر آب از سطح خاک را به طور چشمگیری کاهش دهد.[۳۶] جلوگیری از تبخیر به وسیلهٔ سایه اندازی مختص جنگل‌ها و باغ‌های وسیع نیست؛ سایه‌اندازی حتی اگر به صورت متناوب و با شاخ وبرگ‌های جوان و نازک نیز اتفاق بیوفتد مانع تبخیر آب خواهد شد. درک این موضوع با آنچه دربارهٔ فرآیند تبخیر گفتیم روشن می‌شود: وقتی آب و رطوبت در معرض تابش یا باد قرار می‌گیرند با افزایش حرکت مولکول‌های آب، روند تبخیر آغاز می‌شود و در صورتی که مانعی جلوی تابش را نگیرد حرکت مولکول‌های آب اوج گرفته و در صورت ادامه یافتن آب به کلی از خاک و هوا رخت برمی‌بندد. سایهٔ متناوب مانع از رسیدن دما به آستانه‌ای می‌شود که مولکول‌ها فرار را بر قرار ترجیح دهند.[۳۷]

پمپاژ رطوبت توسط درختان (پمپ بیوتیک)

یکی دیگر از شگفتی‌هایی که به تازگی کشف شده و جامعهٔ علمی و زیست محیطی را با تغییر زاویه نگاه جدّی مواجه کرده است عملیات پمپاژ رطوبت توسط درختان است.[۳۸]

این نظریه به زبان ساده در صدد بیان این نکته است که رطوبت جوّی تولید شده توسط جنگل‌ها فقط در حوضهٔ آبریز محلی خودشان باقی نمی‌ماند: و در واقع بیشترش به وسیلهٔ باد به سائر مناطق، کشورها یا حتی قاره‌های دیگر منتقل می‌شود و با مکشی که به خاطر جنگل صورت می‌گیرد دوباره هوای مرطوب و ابر به سمت مناطق درختکاری شده کشیده می‌شود.[۳۹] قسمتی از فشار هوا به دلیل رطوبت موجود در آن است. به این صورت که هرچه رطوبت هوا بیشتر باشد، میزان فشار هم بالاتر است به دلیل اینکه رطوبت، از هوای معمولی سنگین‌تر است طبعاً تمایل دارد پایین‌تر قرار بگیرد. پس هر چه به زمین نزدیک‌تر باشیم رطوبت و در نتیجه فشار هوا بیشتر خواهد بود. اختلاف موجود در رطوبت و فشار هوا از طرفی و از طرف دیگر تغییر دما در ارتفاع بالاتر (موسوم به آهنگ کاهش یا لپس ریت) باعث می‌شود به خاطر «جریان همرفتی»[۴۰] جریان قوی‌ای از هوا به وجود آید. همچنین در ارتفاع بالاتر با تبدیل گاز یا رطوبت به آب یا مایع، میزان فشار هوا به طور جدی کاهش می‌یابد. به خاطر این‌که هنگامی که رطوبت به شکل گاز است فضای بیشتری می‌طلبد اما با فشرده و متراکم شدن، جا برای هوای جدید باز می‌شود. خلاء ایجاد شده در لایه های بالایی اتمسفر که پس از تبدیل گاز به مایع به وجود آمده است باید دوباره پر شود. این مرحلهٔ نخست برای تشکیل چرخهٔ هوایی عجیبی است که پدید خواهد آمد.

در مرحلهٔ بعد از آن جا که لایه های پایین‌تر هر چه در چنته داشته‌اند را برای تعدیل فشار در لایه‌های بالای اتمسفر به بالا فرستاده‌اند، حالا خودشان با فشار پایینی دست به گریبان‌اند که هر چه سریع تر باید جبران و تعدیل شود. به همین منظور طبیعت برای رفع فوری خلاء پدید آمده، به تبخیر رو می‌آورد. فشار پایینی که در نزدیکی سطح زمین توسط جنگل ایجاد شده است بستر مناسبی برای تبخیر هر چه سریع‌تر مهیا می‌کند تا این چرخه لنگ نماند. ابرهای حاصل از این فرآیند به وسیلهٔ باد به حرکت درآمده و گاهی حتی می‌توانند تا میانهٔ قاره‌های خشک را از برکت باران لبریز کنند. این پدیده در مناطق باران‌زایی مثل سواحل شدت و سرعت بیشتری دارد. مسئلهٔ عجیبی که وجود دارد این است که این چرخهٔ پمپاژ رطوبت تا جایی که جنگل امتداد داشته باشد قابل ادامه یافتن است. به عبارتی با شناخت دقیق‌تر این مکانیسم قادر خواهیم بود تا با کاشت حساب‌شدهٔ درختان حتی مناطق خشک را بدون ترس از کمبود آب یا خشکسالی احیاء کنیم.

درخت و بافتن ابر

در مقیاس وسیع‌تر یکی از روش‌هایی که درختان باعث جلوگیری از بالا رفتن حرارت سیاره می‌شوند ایجاد ابر از طریق افزایش رطوبت هواست. آزمایشات اخیر نشان داده است که درختان نقش اصلی را در تولید رطوبت جوی ایفاء می‌کنند. بیش از ۷۰ درصد رطوبت جوی تولید شده در مناطق خشک – برخلاف آنچه در گذشته تصور می‌شد که از دریاچه‌ها یا رودخانه‌ها و... باشد – از گیاهان ناشی می‌شود.[۴۱] باران تنها زمانی می‌تواند ببارد که آب موجود در لایه‌های بالای اتمسفر به صورت قطرات متراکمی تبدیل شود. در حین فرآیند تعریق (بازگشت بخار به جو) درختان آب را خالص باز نمی‌گردانند. گردهٔ گیاهان، میکروارگانیسم‌ها و ذرات ریز بیولوژیکی‌ای به نام «بیوآئروسل» (هواپخش‌های طبیعی – ذرات طبیعی ریز) را به بخار اضافه کرده است. این ذرات ریز مانند یک تور باعث گرد هم آمدن قطرات آب می‌شوند و بارش باران را تسهیل می‌کنند.[۴۲] کاری که در صورت از بین رفتن درختان با صرف هزینه‌های بسیار باید به صورت مصنوعی انجام شود. تاثیر وجود ابر بر دمای یک ناحیه تا حدی است که آزمایشات نشان داده است همانطور که الگوهای ابر در مناطق تغییر می‌یابد، دما نیز در سراسر جهان تغییر می‌کند.[۴۳]

درختِ بادشکن

در کنار تابش آفتاب، علت دیگری که تبخیر آب از سطح دریاها و دریاچه‌ها و همچنین سطوح مختلف از جمله خاک را سرعت می‌بخشد برخورد باد است. با وزش باد رطوبت موجود در هوا به حرکت درآمده و با خشک شدن هوا بستر برای تبخیر مجدد فراهم می‌شود. به علاوه اینکه با برخورد باد با سطح آب یا خاک، مولکول‌های سطحی با باد همسفر شده و از محیط فعلی خود جدا می‌شوند.

این مسئله باعث فرسایش خاک و تبخیر سریع آب از محیط می‌شود.[۴۴]

درختان اگر به صورت گروهی و متراکم (مانند باغ یا جنگل) در محیطی وجود داشته باشند دست به دست هم داده و با ارتفاعی که به باد می‌دهد مانع برخورد مستقیم باد با سطح شده و در برابر هجوم باد سدی ایجاد می‌کنند تا جلوی غارت آب و فرسایش خاک توسط باد را بگیرند.[۴۵] یکی از راه‌هایی که دانشمندان برای کاهش حجم عظیم آب تبخیر شده از سطح سدها ارائه کرده‌اند کاشت درختان در اطراف دریاچهٔ سد است. این کار می‌تواند ۱۵ تا ۲۰ درصد تبخیر آب را کاهش دهد.[۴۶]

درخت یا کولر آبی؟

راه دیگری که درخت برای خنک کردن هوا پیدا کرده است عبور دادن هوای گرم از روزنه‌های خود و برخورد آن با آب موجود در گیاه در طول فتوسنتز است. گیاهان از این نظر درست مانند یک کولر آبی عمل می‌کنند. درواقع به همین دلیل است که هوای اطراف و زیر گیاهان تا حدودی خنک تر از منطقهٔ بدون درخت است.[۴۷]

ب. آب، ذخایر و هدر رفت

در کنار فعالیت‌هایی که درخت برای کاهش دمای هوا انجام می‌دهد و به طور غیرمستقیم بر حفظ آب در زمین و رطوبت در هوا اثر می‌گذارد، مجموعه‌کارهایی هم برای حفظ مستقیم منابع آبی انجام می‌دهد. درختان آب را جذب، ذخیره و فیلتر می کنند.

کل آب موجود در کره زمین ۱۳۸۶ میلیون کیلومتر مکعب است که در سه لایهٔ اتمسفر (بالای زمین)، بیوسفر یا زیست‌کره (روی زمین)، لیتوسفر یا سنگ‌کره (زیرزمین) دیده می‌شود. آب شیرینی که بتواند مورد استفادهٔ موجودات زنده قرار گیرد تنها ۳ درصد از منابع آبی است که بیش از دو سوم آن در یخچال‌های قطبی به صورت منجمد برای روز مبادا ذخیره شده و مابقی در داخل زمین یافت می‌شوند. منابع آب شیرین هرچند با چرخیدن چرخهٔ آب قابل تجدیدند اما به دلایل گوناگون از جمله مدیریت نادرست آب توسط انسان، تبخیر بیش از حد بر اثر گرمایش زمین و... این چرخه از تأمین کافی آب شیرین بازمانده و زنگ هشدار را برای انسان به صدا در آورده است.

گیاهان با توجه به مکانیسم‌های درونی و توانایی‌های سازگاری آن‌ها، یک ضرورت واقعی در حفظ آب هستند و نقش حیاتی در چرخهٔ آب زمین دارند. در واقع به دلیل نیاز گیاه به آب، آنها برخی سازگاری‌های ساختاری برای جلوگیری از کم‌آبی کامل و در امان ماندن از تأثیرات خشکسالی دارند. این بدان معنی است که درختان فقط مصرف‌کنندهٔ آب نیستند بلکه به نوعی تأمین‌کننده و نگهدارندهٔ آن هم هستند.

بسیاری از گیاهان در محیط‌هایی زندگی می‌کنند که کمبود آب دارد. به عنوان مثال شما گیاهان را در مناطق خشک، زمین‌های متروک یا حتی در محیطی که آب یخ زده است می‌بینید.
این بدان معنی است که گیاهان باید حداکثر تلاش خود را بر حفظ و جذب آب متمرکز کنند چرا که آب در این مناطق گوهر کمیابی به شمار می‌رود. تغییر نگاه ما به چگونگی حفظ و مصرف آب درختان معادلات‌تان را دربارهٔ درخت به هم خواهد ریخت؛ به گونه‌ای که قائل می‌شوید نه تنها کاشت درختانِ بیشتر، موجب جلوگیری از هدر رفتِ آب خواهد شد، بلکه علت خشکی و خشک‌سالی را هم در عدم کاشت درخت و از بین رفتن پوشش گیاهی جست‌وجو خواهید نمود.

نفوذ آب‌های سرگردان

شرط اصلی در پر شدن سفره‌های زیرزمینی که منبع اصلی آب شیرین‌اند نفوذ پیدا کردن آب در زمین است و نفوذ آب در وهلهٔ نخست به وجود تخلخل(سوراخ و روزنه) کافی در خاک سطحی برای نفوذ بارندگی بستگی دارد. هنگامی که تخلخل خاک سطحی برای پذیرش بارندگی بسیار کم باشد یا تخلخل زیر خاک آنقدر کم باشد که اجازه نفوذ آب باران را ندهد، نفوذ محدود می‌شود و آب باران به عنوان روان‌آب از دست می‌رود.[۴۸]

درخت: معمار خاک

اگرچه ما به طور کلی خاک و غنای آن را بر حسب اجزای جامد آن یعنی شن، سیلت، رس و مواد آلی در نظر می‌گیریم، اما در اصل، فضاهای بین این ذرات هم به اندازهٔ خود ذرات جامد اهمیت دارند. به این دلیل که این سوراخ سنبه‌ها فضاهایی هستند که تمام کنش‌ها در آن اتفاق می‌افتد. مانند یک خانه که در آن همهٔ فعالیت‌های مهم در اتاق‌ها روی می‌دهد نه در دیوارها و کف. پس در حقیقت این معماری خاک است که مهم است. فضاهای منافذ در یک خاک با توجه به نوع خاک و نحوه مدیریت آن متفاوت است. خاک های زیر پوشش گیاهی طبیعی به دلیل فعالیت بیولوژیکی بالای خود گیاه و ریشه‌هایش و عدم مداخلات بشری، عموما تخلخل بالایی دارند و در مقایسه با اکثر خاک‌هایی که برای محصولات کشاورزی یا چرا استفاده می شوند از کیفیت فیزیکی برتری برخوردارند.
اثرات حفاظتی درختان برای خاک و آب، نه به دلیل وجود خود درختان، بلکه به دلیل وجود بستر برگ‌ها، شاخه‌های ریخته شده و موجوداتی است که در پناه درخت و زیر آن زندگی می‌کنند. شاخ و برگ درختان جلوی برخورد شدید قطرات باران به خاک را گرفته و قسمتی از آب را در این مرحله جذب می‌کنند.
برگ‌ها، شاخه‌ها، کنده‌های کف جنگل، مواد مغذی و رسوبات را قبل از رسیدن به خاک و سپس سفره‌های زیرزمینی به خود می‌گیرند و مهاجرت آب به کف جنگل را کند می‌کنند و در نتیجه اجازه می‌دهند زمین با حوصلهٔ بیشتری به جذب آب بپردازد. ریشه‌ها درحین اینکه قسمتی از آبی که بر زمین ریخته را برای فتوسنتز و رشد گیاه به او می‌دهند، با رشد دائمی‌شان در زیر خاک روزنه‌های ریزی ایجاد می‌کنند که از تراکم بیش از حد خاک مانع می‌شود و زمینه را برای حرکت و نفوذ آب در خاک آماده می‌کند. مقداری از این آب به نهرها و دریاچه‌ها می‌رسد و از آنجا می‌تواند به سفر خود تا شیر آب شما ادامه دهد.[۴۹]
درخت علاوه بر حفظ خاک، ظرفیت نگهداری آب را به حداکثر می‌رساند و آن‌ها را قادر می‌سازد تا برای مدت طولانی‌تری در برابر خشکسالی مقاومت کنند.[۵۰] طی آزمایشاتی که در بورکینافاسو به عنوان یکی از خشک‌ترین مناطق زمین صورت گرفت مشاهده شد که **کاشت درخت در واحه‌های بیابانی باعث شارژ مجدد سفره‌های زیرزمینی هم می‌شود.** با توجه به این نکته باید بگوییم آبخیزداری بدون در نظر گرفتن معماری خاک توسط درختان، مانند کاشت بذر در زمین سفتِ بدون شخم است! فلذا باید علاوه بر امور متداول در آبخیزداری با کاشت درختان، خاک را برای جذب حداکثر آب آماده کرد.
توسعه سطوح سخت مانند خیابان، خانه و پیاده رو در شهر نیز به اختلال سفره‌های زیرزمینی دامن زده است. چرا که سطوحی که به آب اجازهٔ نفوذ در زمین را نمی‌دهند نهایتاً تبخیر بیشتری را به جای حفظ آب در خاک به همراه می‌آورد. خاک های متراکم منجر به روان شدن زیاد آب و باران می شوند و آب چون نمی‌تواند به لایه‌های زیرین نفوذ کند نمی‌تواند زمین را به خوبی اشباع کند. [۵۱] مسئله‌ای که توجه جدی انسان‌ها برای کاشت بیشتر درخت در محیط های شهری و به وجود آوردن باغ‌ها، واحه‌ها و کمربندهای سبز در اطراف شهرها را می‌طلبد.

سلامت باشید

[۱] قال الصادق علیه السلام: «... خُلِقَ لَهُ اَلشَّجَرُ فَكُلِّفَ غَرْسَهَا وَ سَقْيَهَا وَ اَلْقِيَامَ عَلَيْهَا...» خداوند درخت را برای انسان خلق نمود و وظیفهٔ کاشت، آبیاری، به پا داشتن آن را تکلیف انسان قرار داده است. بحار الأنوار – ج ۳ – ص ۸۶

[۲]https://sharghdaily.com/fa/tiny/news-۸۵۰۷۹۵

همچنین درباره تنش آبی بین ایران و ترکیه به این لینک مراجعه کنید.

[۳] تلاش برای کاهش تبخیر از مخازن آب در دهه ۱۹۶۰با استفاده از فیلم های مولکولی تک لایه به عنوان یک مانع نفوذ ناپذیر برای سطح آب آغازشد. عمدهٔ فعالیت‌های بشری در راستای کاهش تبخیر حجم بالای آب در سدها و مخازن در ایجاد لایه ای بر سطح آب (چه به صورت سایبان، چه به صورت به آب انداختن صفحه‌های پلاستیکی یا پوشاندن سطح آب با «تک‌لایه‌ها» بوده است.

[۴] عقب‌نشینی یخچالی فرآیندی است که در آن یخچال‌ها سریع‌تر از آن‌که یخ‌هایشان با بارش جایگزین شود، ذوب می‌شوند. عقب نشینی یخبندان مقدار آب شیرین موجود بر روی زمین را محدود می کند. برای مطالعه بیشتر به مستند «تعقیب یخ» و این لینک مراجعه کنید:

https://education.nationalgeographic.org/resource/hydrologic-cycle

[۵] تبدیل عناصر سبک به عناصر سنگین‌تر به وسیلهٔ پیوند خوردن اتم‌هایشان به یکدیگر.

[۶] گرم کردن امواج الکترومغناطیسی را در ماکروفرها نیز می‌توانید حس کنید. خورشید در سرتاسر طیف الکترومغناطیسی تابش می‌کند. از پرتوهای x و پرتوهای کیهانی گرفته تا موج‌های رادیویی به طول موج‌هایی تا ۱۵ m و بیشتر. اما چون سطح آن ۶۰۰۰ سانتیگراد است، بیشتر انرژی آن در طول موج‌های نسبتاً کوتاهِ فرابنفش، مرئی و فروسرخ است. علاوه بر این، پرتوهای فروسرخ خورشید نیز برای ما منبع گرما بشمار می‌آیند.

[۷]http://wiki.avastarco.com/index.php?title=%D۸%AA%D۸%AV%D۸%A۸%D۸%B٤_%D۸%AV%D۹%٨٤%DA%A۹%D۸%AA%D۸%B۱%D۹%۸۸%D۹%۸٥%D۸%BA%D۹%۸٦%D۸%AV%D۸%BV%DB%۸C%D۸%B۳%DB%۸C

[۸]https://weather.gov/jetstream/heat#:~:text=The%۲۰sun's%۲۰radiation%۲۰strikes%۲۰the,air%۲۰rises%۲۰into%۲۰the%۲۰atmosphere.

[۹]https://sciencing.com/earth-receive-heat-sun-٤٥٦٦٦٤٤.html

[۱۰]https://earthhow.com/solar-radiation-electromagnetic/

[۱۱]https://sciencing.com/earth-receive-heat-sun-٤٥٦٦٦٤٤.html

[۱۲] گرمای ویژه مقدار گرمایی است که چیزی برای افزایش یک درجه سانتیگراد دما لازم است. آب بالاترین ظرفیت گرمایی ویژه را در بین هر مایعی دارد. مقاومت در برابر تغییرات ناگهانی دما، آب را به یک زیستگاه عالی تبدیل می کند و به ارگانیسم ها اجازه می دهد بدون تجربه نوسانات دمایی زیاد زنده بمانند. در واقع به همین علت است که تشنه شده و آب می‌نوشیم.

[۱۳] برای مقایسه، فقط ۳۸۵ ژول گرما لازم است تا ۱ کیلوگرم مس را به ۱ درجه سانتیگراد برساند:

https://usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/specific-heat-capacity-and-water

[۱٤]https://education.nationalgeographic.org/resource/hydrologic-cycle

[۱٥]https://cgie.org.ir/fa/article/۲٤۰۳۹٥/%D۸%AV%D۹%۸۲%DB%۸C%D۸%AV%D۹%۸٦%D۹%۸۸%D۸%B۳?entryviewid=۲٥۹٤۷۷

[۱٦]https://science.nasa.gov/earth-science/oceanography/ocean-earth-system/ocean-water-cycle#:~:text=Water%۲۰evaporates%۲۰from%۲۰the%۲۰surface,carbon%۲۰dioxide%۲۰and%۲۰other%۲۰gases

[۱۷] تصعید فرآیندی است که در آن یخ مستقیماً بدون تبدیل به آب مایع به بخار آب تبدیل می شود و کندتر از تبخیر است.

[۱۸]https://eolss.net/sample-chapters/c۰۱/E٤-۰٦-۰۲-۰٦.pdf

[۱۹]https://gardeningknowhow.com/ornamental/trees/how-do-trees-drink.htm

[۲۰]https://eco-intelligent.com/۲۰۲۰/۰٥/۲۳/why-is-it-cooler-around-trees

[۲۱] به عبارتی برای تبخیر ۱ گرم آب ۵۹۰ کالری انرژی لازم است و برای یک کیلو گرم به ۵۹۰۰۰۰کالری (۵۹۰ کیلو کالری) نیازمندیم. یک درخت صمغ بزرگ که در طول تابستان در سیدنی رشد می‌کند، روزانه تا ۲۰۰ لیتر بخار ترشح می کند. انرژی مورد نیاز برای تبخیر ۲۰۰ لیتر ۱۱۸۰۰۰ کالری است. درختان بسته به اندازه تاج پوشش و مساحت برگ هایشان می۰ لیتر آب در روز از دست بدهند. به عنوان مثال، بید نقره ای (Salix nigra) یا صنوبر سفید (Populus alba) با اندازه سایبان ۹۰۰ فوت مربع (۸۳.۶ متر مربع) می تواند تا ۸۲ لیتر آب در روز را از طریق تعرق از دست بدهد:

https://transpirationbyted.wordpress.com/۲۰۱۱/۰٥/۱۳/cool-trees

[۲۲]https://gardeningknowhow.com/ornamental/trees/how-do-trees-drink.htm

[۲۳]https://treehugger.com/process-of-using-water-by-trees-۱۳٤۳٥۰٥

[۲٤]https://ecotree.green/en/how-much-co۲-does-a-tree-absorb#:~:text=A%۲۰tree%۲۰absorbs%۲۰approximately%۲۰۲٥kg%۲۰of%۲۰CO۲%۲۰per%۲۰year&text=It's%۲۰based%۲۰on%۲۰the%۲۰estimate,a%۲۰whole%۲۰host%۲۰of%۲۰factors

[۲۵] شاخص شدت خشکسالی پالمر، که معیاری برای سنجش رطوبت خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های بارندگی و تخمین‌های تقریبی تغییرات تبخیر است، نشان داده است که از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۲، منطقه ساحل آفریقا شرایط خشکسالی سخت‌تری را تجربه کرده است. همین شاخص همچنین نشان دهنده روند معکوس در جنوب آمریکای جنوبی و جنوب مرکزی ایالات متحده است:

https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water/page۳.php

[۲۶]https://climaterealityproject.org/blog/climate-change-impacting-water-cycle

[۲۷]https://unfccc.int/most-requested/key-aspects-of-the-paris-agreement

[۲۸] روزنامه گاردین:

https://theguardian.com/environment/۲۰۱۹/jul/۰٤/planting-billions-trees-best-tackle-climate-crisis-scientists-canopy-emissions

خبرگزاری CNN:

https://edition.cnn.com/۲۰۱۹/۰٤/۱۷/world/trillion-trees-climate-change-intl-scn/index.htm

[۲۹]https://researchgate.net/publication/۳۲۷۳۱۷٤۲۱_Comparative_Study_of_Transpiration_in_Cooling_Effect_of_Tree_Species_in_the_Atmosphere

[۳۰]https://epa.gov/heatislands/using-trees-and-vegetation-reduce-heat-island

[۳۱] همان‌طور که گفتم توافق‌نامهٔ جهانیِ پاریس به دنبال کاهش دما تا ۲ درجهٔ سانتی‌گراد بود!

[۳۲] Huang, J., H. Akbari, and H. Taha. ۱۹۹۰. The Wind-Shielding and Shading Effects of Trees on Residential Heating and Cooling Requirements. ASHRAE Winter Meeting, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, Georgia.

[۳۳]https://energy.gov/energysaver/landscaping-shade

[۳٤]https://blog.davey.com/why-are-shade-trees-important-the-benefits/

[۳۵]https://journals.ashs.org/configurable/content/journals$۰۰۲fhortsci$۰۰۲f٤۵$۰۰۲f۱$۰۰۲farticle-p۸۳.xml?t:ac=journals%۲٤۰۰۲fhortsci%۲٤۰۰۲f٤۵%۲٤۰۰۲f۱%۲٤۰۰۲farticle-p۸۳.xml&t:ac=journals%۲٤۰۰۲fhortsci%۲٤۰۰۲f٤۵%۲٤۰۰۲f۱%۲٤۰۰۲farticle-p۸۳.xml

[۳۶]https://researchgate.net/publication/۳۰۳۹۲٤۵۰۲_Effect_of_Plant_Shading_and_Water_Consumption_on_Heat_Reduction_of_Ambient_Air

[۳۷]https://education.nationalgeographic.org/resource/evaporation

[۳۸]https://acp.copernicus.org/articles/۲۰۱۳/۱۰۳۹/۱۳/

[۳۹]https://forestsnews.cifor.org/٤۹۰۱۰/linking-trees-and-water?fnl=

[۴۰] هوا دائماً از جایی که فشار بیشتر است به جایی که فشار کمتر است جریان می‌یابد.

[٤۱]https://forestsnews.cifor.org/٤۹۰۱۰/linking-trees-and-water?fnl=

[٤۲]Cindy E.Morris ,Franz Conen , J.Alex Huffman , Vaughan Phillips , Ulrich Pöschl , David C. Sands - Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere - Global Change Biology - Volume ۲۰, Issue ۲ p. ۳٤۱-۳۵۱

https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/۱۰.۱۱۱۱/gcb.۱۲٤٤۷

[٤۳]https://education.seattlepi.com/causes-evaporation-condensation-٤٦٤۵.html

[٤٤]https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/۱۰.۱۰۰۲/۲۰۱۳WR۰۱۳۹۵۲

[٤۵]https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/۱۰.۱۰۲۹/۲۰۱۹JG۰۰۵٤۳

[٤٦]M.R. Hipsey, M. Sivapalan, T.P. Clement, J. Environ. Fluid Mech ٤, ۷۹–۱۰٦ (۲۰۰٤) https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۲WR۰۰۱۷۸٤

[۴۷] در مقدمات توضیح داده شد.

[٤۸]https://fao.org/۳/y٤٦۹۰e/y٤٦۹۰e۰۹.htm

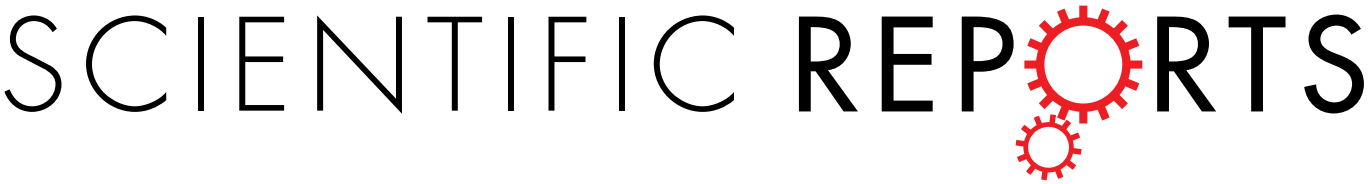
[٤۹]https://nationalforests.org/blog/earth-month-watersheds

[۵۰]https://fao.org/۳/y٤٦۹۰e/y٤٦۹۰e۰۷.htm#bm۰۷.٤.۳

[۵۱]https://cmtrees.com/water-important-plants/

پیوست دوم

درختان شارژ آب‌های زیرزمینی را به حداکثر رساندند



OPEN

Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics

Received: 23 February 2015
Accepted: 03 February 2016
Published: 24 February 2016

U. Ilstedt[1,*], A. Bargués Tobella[1,*], H. R. Bazié[2,3], J. Bayala[4], E. Verbeeten[5], G. Nyberg[1,11], J. Sanou[2], L. Benegas[1,6], D. Murdiyarso[7,8], H. Laudon[1], D. Sheil[8,9,10] & A. Malmer[1]

Water scarcity contributes to the poverty of around one-third of the world's people. Despite many benefits, tree planting in dry regions is often discouraged by concerns that trees reduce water availability. Yet relevant studies from the tropics are scarce, and the impacts of intermediate tree cover remain unexplored. We developed and tested an *optimum tree cover theory* in which groundwater recharge is maximized at an intermediate tree density. Below this optimal tree density the benefits from any additional trees on water percolation exceed their extra water use, leading to increased groundwater recharge, while above the optimum the opposite occurs. Our results, based on groundwater budgets calibrated with measurements of drainage and transpiration in a cultivated woodland in West Africa, demonstrate that groundwater recharge was maximised at intermediate tree densities. In contrast to the prevailing view, we therefore find that moderate tree cover can increase groundwater recharge, and that tree planting and various tree management options can improve groundwater resources. We evaluate the necessary conditions for these results to hold and suggest that they are likely to be common in the seasonally dry tropics, offering potential for widespread tree establishment and increased benefits for hundreds of millions of people.

Two-thirds of the world's population may live in water-limited regions by 2025[1]. In Africa about 340 million people already lack access to adequate and hygienic sources of water, such as groundwater[2]. Limited water constrains food production, nutrition, and health as well as impacting opportunities for education, work, and improved livelihoods. Reliable access to clean water is essential for achieving the UN Sustainable Development Goals.

Forests have often been described as 'sponges' storing rain water and slowly releasing it to maintain groundwater and streams during dry periods[3–5]. Formerly, this *sponge theory* and related ideas motivated policies aimed at conserving and restoring forests[5–7]. In recent decades, however, these ideas have lost credibility as studies show that forest clearance generally leads to increased and afforestation to reduced water yields[3,8,9]. Therefore a contrasting *trade-off theory*–in which more trees means less water–has become the dominant paradigm. This *trade-off theory* predicts that as tree densities increase, water losses from transpiration and interception dominate their hydrological effects[6,8,10].

In the tropics the *trade-off theory* rests on limited evidence. The few available studies compare extremes: open land versus closed forest, or grasslands versus dense plantations[11]. Despite the recognition that trees can improve

[1]Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Department of Forest Ecology and Management, SE90183 Umeå, Sweden. [2]Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Département Productions Forestières, 03 BP 7047 Ouagadougou 03, Burkina Faso. [3]Université de Ouagadougou, Unité de Formation et Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre–03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso. [4]World Agroforestry Centre (ICRAF), West and Central Africa Regional Office, Sahel Node, BP E5118, Bamako, Mali. [5]Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics (IBED), University of Amsterdam, P.O. Box 94240, 1090 GE Amsterdam, The Netherlands. [6]Tropical Agricultural Research and Higher Education Center (CATIE). Headquarters 7170, Cartago, Turrialba 30501, Costa Rica. [7]Department of Geophysics and Meteorology, Bogor Agricultural University, Jl. Meranti, Kampus Darmaga, Bogor, 16115, Indonesia. [8]Center for International Forestry Research, Jl. CIFOR, Situgede, Bogor 16115, Indonesia. [9]Department of Ecology and Natural Resource Management (INA), Norwegian University of Life Sciences (NMBU), Box 5003, 1432 Ås, Norway. [10]School of Environmental Science and Management, Southern Cross University, P.O. Box 157 Lismore, NSW 2480, Australia. [11]Department of Business Administration, Technology and Social Sciences Luleå University of Technology, SE-97187, Luleå, Sweden. *These authors contributed equally to this work. Correspondence and requests for materials should be addressed to U.I. (email: ulrik.ilstedt@slu.se)

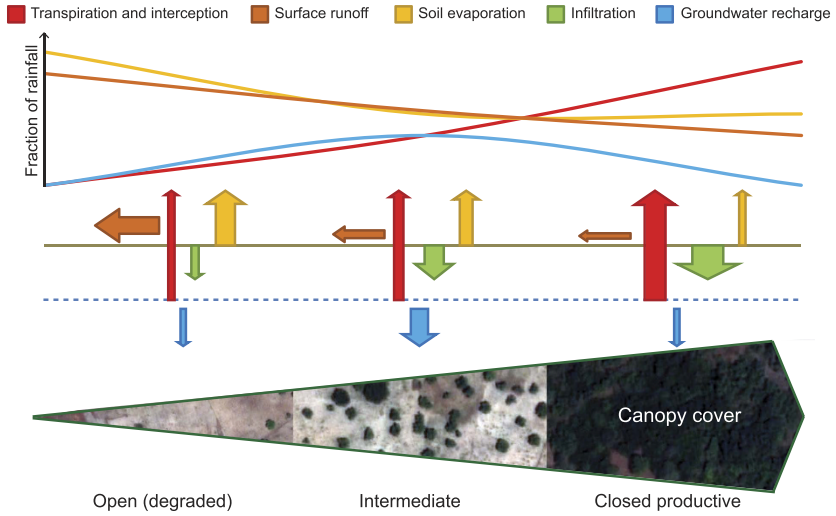


Figure 1. Conceptual water budget of the *optimum tree cover theory*. Optimum groundwater recharge occurs at intermediate tree cover in seasonally dry tropical areas. Without trees, surface runoff and soil evaporation are high, leading to low groundwater recharge despite low transpiration. In closed productive forests, despite low surface runoff and soil evaporation, total transpiration and interception are high, again leading to low groundwater recharge. At an intermediate canopy cover, low surface runoff and evaporation as well as intermediate transpiration optimize groundwater recharge. The pan-sharpened satellite images were created from a WorldView-2 image from 21 October 2012 using ERDAS Imagine 2013 software (http://www.hexagongeospatial.com/products/producer-suite/erdas-imagine).

soil hydraulic conductivity and reduce overland water flow[4,12,13], and other findings that question the generality of the *trade-off theory*[14–16], we find no available data on the relationship between tree cover and water yields at intermediate tree densities, and few data concerning the specific mechanisms that determine groundwater reserves and dry season stream flows[11,12,17]. The neglect of intermediate tree cover is a striking omission given the importance of such open vegetation in terms of extent and biodiversity[18], and the fact that it supports many of the world's poorest people. In Africa, there are 350 Mha of open and fragmented forests and 514 Mha of other wooded lands (including savannah, agroforests etc.)[19]–more than the area under closed forest and plantations (277 and 8 Mha, respectively). Such open vegetation also plays a major role in the global carbon balance; regions with 10 to 30% tree canopy cover are estimated to store 23% of the total forest biomass carbon stock (above- and belowground) in sub Saharan Africa and 15% of the total forest carbon stocks for the global tropics[20]. Tree planting is, or would be, a major element in many climate mitigation projects, in efforts to combat desertification, and in livelihood focused development proposals seeking to improve access to firewood and other products. But the *trade-off theory* has reduced the application of such planting projects due to concerns that these efforts would jeopardize scarce water resources[6,8–10,21,22].

Here we present and test an *optimum tree cover theory* for groundwater recharge that can reconcile the available scientific evidence and contrasting perceptions about forests and groundwater in the seasonally dry tropics (Fig. 1). We hypothesized that under conditions typical of the seasonally dry tropics an intermediate tree cover maximizes groundwater recharge. Below this optimum cover, the hydrological benefits gained from more trees outweigh their extra water use, while at higher values of tree cover the water use from additional trees exceeds any positive effect they might have on groundwater recharge (Fig. 1). We recognize that the tree cover value where this optimum occurs depends on various factors including tree species, local soil and climatic conditions. But before considering these influences we needed to evaluate our theory. We chose a common African semi-arid landscape known as "agroforestry parkland" where water shortage is a recognised livelihood constraint[23]. Parklands, in which annual crops are grown under scattered trees, constitute the most extensive farming system in semi-arid West Africa[23]. Indeed, about 1.9 million km^2 (47%) of the total agricultural land in Sub-Saharan Africa has a tree cover above 10%[24]. We want to know how such intermediate tree cover influences groundwater recharge.

Results

Our results confirm that groundwater recharge can be maximized at a specific, non-zero, tree cover. We used field measurements of subsurface drainage and tree transpiration to model groundwater recharge in a water budget model related to tree cover and its spatial distribution (see Methods section). Field data from wick lysimeters revealed that the percentage of the yearly rainfall percolating to 1.5 m soil depth reached its maximum of 16% of the annual rainfall around the edge of the tree canopy, 4.4 m from the nearest tree stem, and decreased to 1.3% in open areas, 37 m away from the nearest tree (Fig. 2). This decrease in drainage with increasing distance from the canopy edge followed a linear relationship ($y = 18.1 - 0.46x$(SE 0.12); where y is the drainage at 1.5 m soil depth and x the distance to the nearest tree stem; $r^2_{adj} = 0.69$; $p = 0.013$). For distances beyond 37 m we assumed that the drainage was 1.3%, which corresponds to the lowest observed value. Therefore, less water is available for

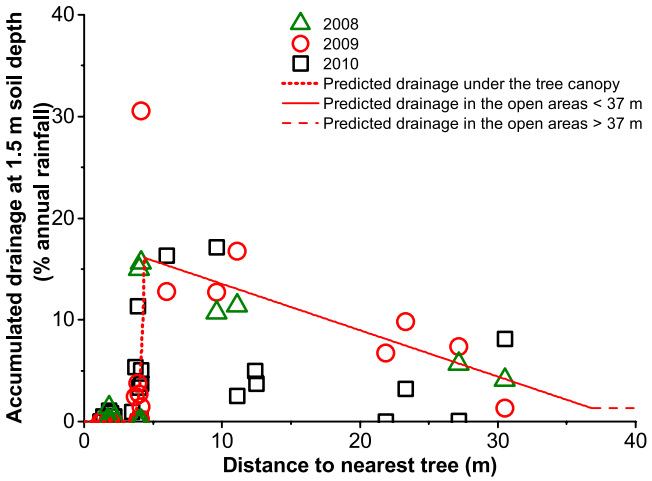


Figure 2. Relationship between accumulated water drainage at 1.5 m soil depth and distance to nearest tree. Accumulated drainage in open areas decreases with the distance from canopy edges in an agroforestry parkland, Burkina Faso. The lines show the relationship used for spatial simulations which was fitted by least squares regression to the 2009 data (see Methods section for details). The red solid line depicts the linear relationship found in the open areas ($y = 18.1 - 0.46x$; $r^2_{adj} = 0.69$, $p = 0.013$), while the red dotted line depicts the exponential relationship found under the tree canopy ($y = 4.3\ 10^{-8}\ e^{4.5x}$; Lack of Fit test indicated a suitable model; $p = 0.983$). The dashed line is the constant value for the accumulated drainage corresponding to 1.3% of the annual rainfall assumed for the distance range above 37 m. The number of observations was 18, 22 and 25 in 2008, 2009 and 2010, respectively. In 2008, 2009 and 2010 the rainfall during the sampling period represented 85, 99 and 60% of the annual rainfall, respectively.

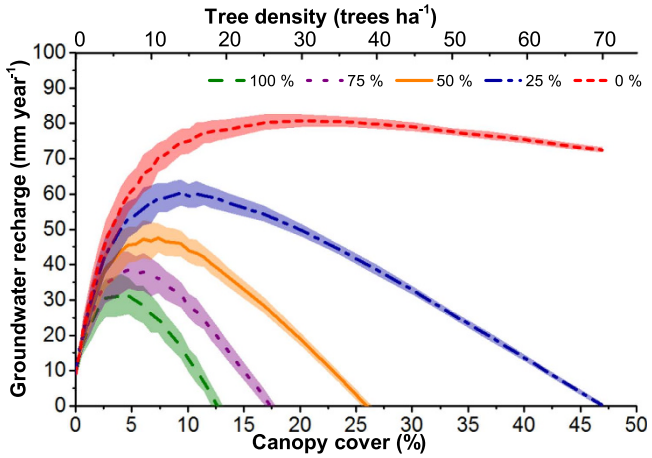


Figure 3. Spatial simulations of groundwater recharge in relation to tree density and canopy cover. The simulations are based on sap flow measurements and on the observed relationship between drainage below 1.5 m soil depth in 2009 and distance to the nearest tree in an agroforestry parkland, Burkina Faso. For each tree density the averages and standard deviations resulting from 100 simulations with random locations of trees on a 1 ha area are shown. The effect of the proportion (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) of tree water uptake below 1.5 m is demonstrated by the different colored lines. Average tree size (67 m^2 canopy area) is assumed for all the simulations.

groundwater recharge in locations further from any tree and resulting in negligible groundwater recharge when trees are absent.

We remain uncertain concerning the depth from which trees access soil water, and how such water use patterns vary in space when there are multiple trees present: to address these unknowns we modelled groundwater recharge using different scenarios. The results show that in the scenario where 50% of tree water use occurs deeper than 1.5 m in the soil, recharge increases from 9 to 20 mm $year^{-1}$ when tree density increases from zero to just one tree ha^{-1} and reaches 47 mm $year^{-1}$ at 10 trees ha^{-1} (Fig. 3). Even if all transpired water was drawn from deeper than 1.5 m an optimum recharge of 30 mm $year^{-1}$, a value three-times the treeless scenario, occurs at 5–10 trees ha^{-1} density. Beyond the optimum tree cover, recharge decreased but remained higher than in scenarios without trees by up to 10 and 20% canopy cover in the 100% and 50% uptake scenarios, respectively. While the

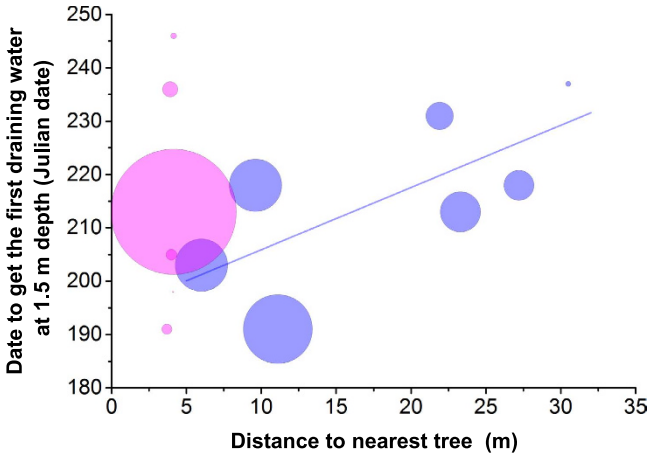


Figure 4. Scatter plot of the date when the first water was collected at each lysimeter versus the distance to the nearest tree (for 2009). The pink and blue circles show lysimeters located under tree canopies and in open areas respectively. The size of the circles is proportional to the yearly accumulated water drainage at 1.5 m soil depth. The solid line shows the linear relationship found in the open areas ($y = 194.2 + 1.2x$, $r^2_{adj} = 0.40$, $p = 0.075$).

choice of scenarios influenced the values of the optimum tree cover, none questioned the more general conclusion that such an optimum cover existed (more than 0% and less than 100%).

Our measurements show that in the open areas, there was a significant relationship between the yearly accumulated drainage at 1.5 m soil depth and the date in which the lysimeters recorded the first water following the beginning of the rainy season ($y = 73.5 - 0.3x$(SE 0.06); where y is the drainage at 1.5 m soil depth and x the date to get the first draining water; $r^2_{adj} = 0.81$; $p = 0.004$), while under trees there was no trend. Moreover, in the open areas, the date at which the first draining water was recorded was positively related to the distance to the nearest tree ($y = 194.2 + 1.2x$(SE 0.52); where y is the date to get the first draining water at 1.5 m soil depth and x is the distance to the nearest tree stem; $r^2_{adj} = 0.40$; $p = 0.075$), with open areas closest to trees receiving the first draining water about 30 days earlier on average than those located furthest away from trees (Fig. 4). In summary, open areas close to trees not only had a higher yearly accumulated drainage at 1.5 m soil depth compared to those further away from trees, but they received the first wet season water earlier.

Discussion

How can we explain these results? Soil infiltration is improved by trees through litter inputs and roots, promoting higher activity of soil animals. This results in increased soil hydraulic conductivity due to enhanced organic matter content, topsoil aggregation and macro porosity[25,26]. The likely cause for the observed difference in amounts and time of water to reach deep soils, as indicated by a previous study in the same area, is that there is not only less water infiltrating in areas far from canopy edges, but water also percolates through the soil more slowly because of fewer macro pores[27]. Open areas are also more exposed to sunshine and heat and thus to losses from evaporation. For example, $\delta^{18}O$ values in topsoil water in a *Faidherbia albida* parkland in Burkina Faso have been shown to be greater in open areas rather than closer to trees, indicating that evaporation is reduced near to tree cover[28]. The net effect is that rain water falling near to any tree is more likely to percolate to the subsoil than is rain falling further away, which is more likely to evaporate. In our study area, the depth of the water table is well below 2 m during most of the year including the rainy season. Therefore, capillary rise was not considered. If, in other sites where the water table was closer to the ground surface, capillary rise did occur, the resulting rate of loss to evaporation would be lower closer to trees, where there is more macroporosity and less evaporation than in more open areas. Thus, our conclusions about the benefits of tree cover are likely to apply to such cases too. While tree cover improves drainage in the zone outside the canopy, no percolation was detected under the canopy–presumably due to interception and transpiration. Tree canopies may also redistribute rainfall through canopy drip at the outer edge of the canopy, which would also explain the increase in water drainage in the area beneath the canopy edge. The influence of this on the overall drainage patters observed beyond the canopy edge is likely to be relatively minor because, if soil infiltration properties were homogeneous, any such larger scale influence would be symmetrical.

Given the importance of improved water reserves and the various livelihood and environmental benefits that may be gained from greater tree cover, it will be crucial to replicate our results and characterise their applicability to other sites and regions. We are optimistic that optimal recharge will occur at intermediate tree densities over large areas. This optimism is based on consideration of a requirement of our model. The gains from improved infiltration and reduced soil evaporation due to an individual tree must surpass the water used by that tree. When rain intensity exceeds soil infiltrability overland flow occurs and improved infiltrability can increase groundwater recharge. Rain in the seasonally dry tropics is often intense–in the Sahel half of the total annual rainfall amount falls at intensities above 20 to 50 mm h^{-1} [29,30]– while soil infiltrability without trees is typically lower[31–33]. The result is that overland flow is common in much of the seasonally dry tropics[32]. The soil in our study site is an Alfisol: these soils are characterized by unstable aggregation, sensitivity to crusting and low infiltrability–characteristics

which encourage overland flow[32]. Alfisols comprise some seven million km^2 in the semi-arid tropics[34], while related soil types with similar physical constraints cover another eight million km^2 [34,35]. Combining these figures suggests that without trees overland flows would be commonplace over at least 71% of the semi-arid tropics.

We know less about the net hydraulic benefits due to individual trees. In our study area median infiltrability values increased from below 10 mm h^{-1} to 40 mm h^{-1} in open areas among trees and under trees respectively[27]. Under a natural forest about 130 km from our study area and within the same climatic zone, infiltrability values are generally higher than those under trees in our more modified parkland system[36]. A recent meta-analysis of soil infiltrability changes due to tree planting in afforestation and agroforestry experiments found 15 relevant cases involving a total of 10 different species (with age from 1 to 12 years). Of these 11 involved Alfisols and 4 Ultisols. All plantings resulted in increased infiltration ranging from 1.6 to 9 times improvement (with the lowest values for the youngest plantings)[33]. We know that the positive effects of trees on soil infiltrabilty occur across a wide range of conditions, such as with and without tillage[27,33].

We note that the tree species in our study have comparably high water consumption. This suggests that, as long as gains in soil hydraulic properties are similar among species water use versus gains in soil hydraulic properties will be conservative compared to many other tree species in the seasonally dry tropics (see Supplementary Fig. S1 for a comparison of daily water use with other semi-arid trees).

Naturally patterned (i.e. clumped and banded) tree cover is widespread across arid and semi-arid regions of the tropics[37]. Ecologists have sought an explanation for the formation of such patterns. Our study, like various others, indicates that trees exert spatially distinct positive and negative influences on soil water availability and hydraulic properties (see also[38,39]). The main positive influence of trees on the soil water budget is via soil infiltrability. Local differences in infiltrabilty can lead to the redistribution of surface runoff to areas under trees, as observed in other dryland vegetation systems[39]. Runoff and runon processes can in turn increase net water stored in the soil close to trees, reinforcing vegetation growth and establishment[39]. The different scales of the positive and negative feedbacks between plant density, soil infiltrability and water use has been suggested as a mechanism explaining banded and clumped vegetation patterns in many semi-arid areas[40,41]. We speculate that the distinct positive and negative spatial factors determine the tree patterns found in many natural savannas[37,38]– while such patterns require further evaluation they also suggest that the necessary hydrological influences including the improved groundwater recharge near to trees are widespread phenomena.

We acknowledge that in specific circumstances benefits from trees may be reduced or absent. In some regions rain intensities may remain too low or soils too porous for overland flow to occur. In these cases, the overall effect of increased tree cover on groundwater recharge will primarily be determined by the balance between their increased water use and their effect on reducing soil evaporation, and therefore the resulting impact will likely be small or negative. For example, 1% of the semi-arid regions occur over porous soils on volcanic bedrock that have such high inherent infiltration capacities that rates exceed typical rain intensities so that run-off is negligible[42]: in such contexts even scattered trees are unlikely to improve groundwater recharge. Also, there may be circumstances when rainfall amount or intensity is too low for trees to make much difference. Trees may not improve groundwater recharge where removal of litter, grazing and fuelwood harvesting prevent the inputs of organic material required to improve soil infiltration[43].

Our conceptual model implies that the optimum tree cover for groundwater recharge will be influenced by many factors including several under management control. Tree spatial distribution, for example, can have an important impact as shown by the results from our model for a regular spaced distribution (Supplementary Fig. S2). At the optimum canopy cover the simulations with the largest tree to tree distance achieved 35% higher groundwater recharge than the average random distribution. Therefore, a relatively regular well-spaced tree distribution may be preferable to a random or aggregated one. Tree size, age and species that affect transpiration will also have an influence. We explored the effect of tree size based on tree size transpiration relationship. The groundwater recharge at optimum tree cover increased from 36 to 55 mm when average canopy area for an individual tree was reduced from 130 to 40 m^2 (Supplementary Fig. S3). Though larger trees yielded a lower optimum than smaller trees, it was less sharply peaked leading to a greater beneficial influence of trees at higher total canopy cover. In our study area the dominant tree species was capable of maintaining high transpiration levels through the dry season. Trees with different water-use strategies–for example deciduous species, which shed their leaves during the dry season–may provide further enhancement in groundwater recharge. Many other plant characteristics including those related to root architecture, shade and litter are also likely to be influential. Further study is required to clarify improvements through the selection of tree species and varieties. We also see opportunities for assessing and defining the influence of tree densities and configurations, and of tree thinning and pruning. In our study area, and elsewhere in Africa, crown pruning is common and is estimated to decrease water losses from transpiration by over 75%[44]. A rough estimate suggests that such pruning could mean that tree cover remains positive for groundwater recharge up to as many as 60 trees ha^{-1} instead of 16 trees ha^{-1} (40 and 11% canopy cover before pruning) even under the conservative assumption that all water used by trees comes from below 1.5 m. Benefits in groundwater recharge may also be achieved through management of livestock grazing. While high stocking rates will typically lead to reduced soil infiltrability as a result of soil compaction, reduced vegetation cover and reduced topsoil organic matter, there may be cases where some grazing can improve soil infiltrability due to manure inputs and soil crust fragmentation[36,45,46]. In addition to the different management scenarios, we also considered various other assumptions and potential sources of error (see Supplementary Discussion for details). None undermine our main conclusion, i.e., that optimal groundwater recharge will often result from intermediate tree cover.

In our site in Burkina Faso, with annual rainfall ranging from 570 to 1180 mm, the differences in groundwater recharge indicated by our simulations (30–80 mm year^{-1}) are substantial being 2–14% of the total gross water input. Further improvements are possible through management choices. Differences of these magnitudes can translate into improved water availability and agriculture production for millions of people in water limited

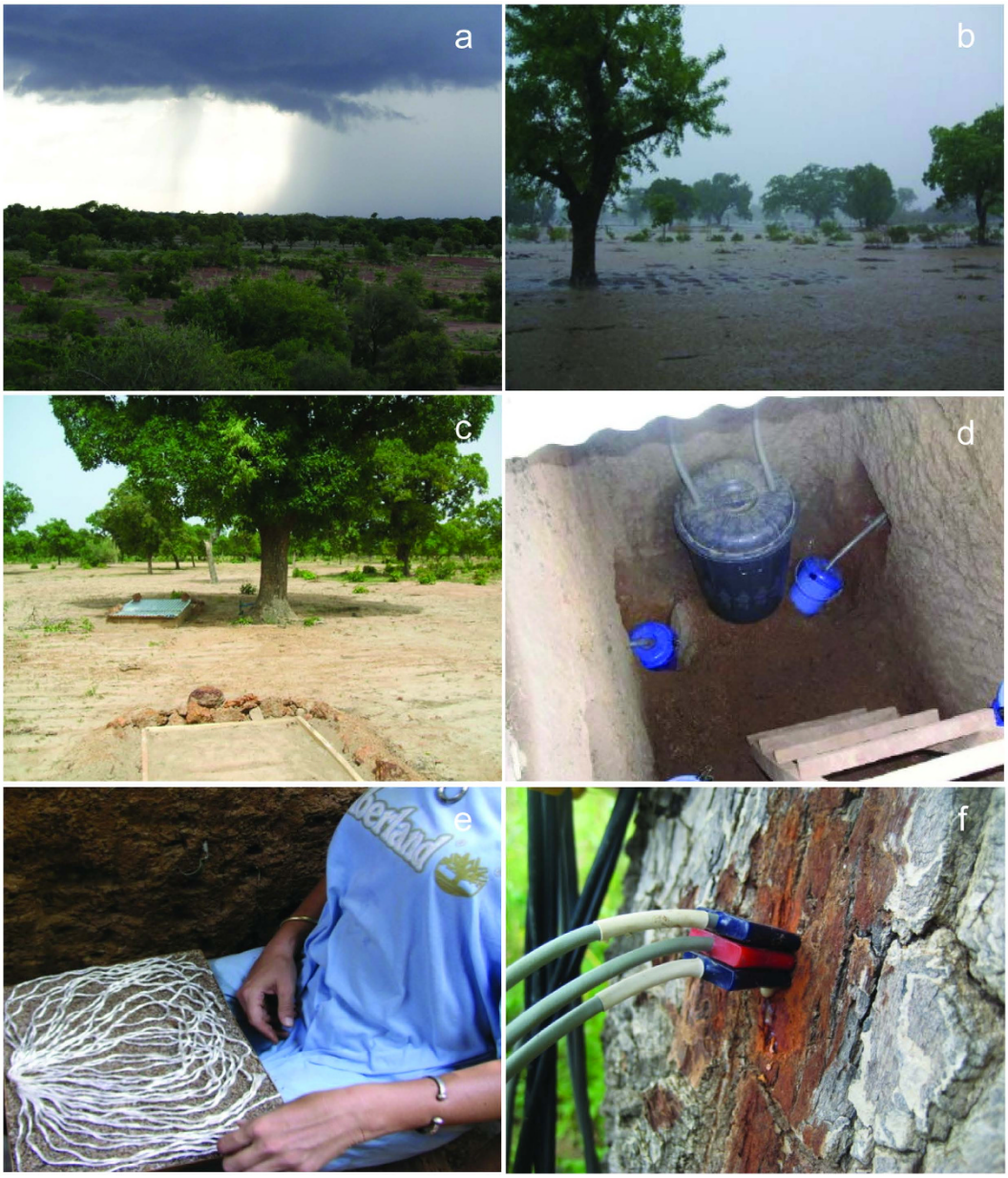


Figure 5. Saponé study area, Burkina Faso, and installations. (a) Overview of the landscape from an elevated position. **(b)** Overland water flow during rainfall among the Shea trees (*Vitellaria paradoxa*) in the cultivated landscape. **(c)** Soil pits (see rectangular structures) under the canopy of a Shea tree (behind) and in the centre of an open area (front). **(d)** Lysimeter instalations on opposite sides of a soil pit at 1.5 m soil depth. One lysimeter was located towards the tree 1 to 2 m from the trunk; the second on the far side at 4 to 5 m from the trunk. **(e)** Passive capillary fiberglass wick lysimeter prior to installation. **(f)** HRM30 heat ratio probe for sap flow measurements attached to the stem of a Shea tree.

regions. We hope that our results will stimulate research on the hydrological impact of tree cover in a wider range of systems including agroforests, selectively harvested and old growth forests, savannah woodlands and pastoral systems. We envisage significant opportunities to improve land-use policies, practices and management interventions. One recent summary suggests that close to 1.5 billion ha of land in the tropics offer opportunities for the restoration of, or increase in, tree cover[47] offering multiple goods and services to local people and a number of global benefits such as improved carbon sequestration[20] and biodiversity conservation[18]. Our results suggest that intermediate tree cover might–if managed judiciously–improve water availability over vast areas benefitting hundreds of millions of people.

Methods

Site description. The study was conducted in an open woodland managed for crops, grazing, fuel wood and non-timber forest products in Saponé (Fig. 5a,b), a village located 30 km south of Ouagadougou, Burkina

Faso, West Africa (12°04′48″N, 1°34′00″W, Fig. 6). These systems are regionally referred to as "agroforestry parklands"[48]: they are the dominant farming system in semi-arid West Africa and resemble tree based systems common in other parts of the world[23]. Parklands originate from the clearing of natural woodlands for cropping and farmer selection and protection of given tree species[23]. Tree density usually ranges from 5 to 100 trees ha^{-1} [23].

The study site is located on a peneplain at 310 to 325 m above sea level. Mean annual temperature (1952–2008) at Ouagadougou (the nearest meteorological station) is 28 °C with a mean annual precipitation of 787 mm $year^{-1}$ (1952–2010), ranging between 570 and 1180 mm $year^{-1}$ (Direction de la Météorologie du Burkina Faso). The single rainy season generally starts around April and ends in October. About 80% of the average annual precipitation falls between June and September (Supplementary Fig. S4). Mean annual potential evapotranspiration (PET) is 1900 mm $year^{-1}$ (1974–2003), ranging between 1200 and 2100 mm $year^{-1}$. The soils of the area have been classified as *sols ferrugineux tropicaux lessivés*[49], corresponding to Ferric Lixisols[50]. They possess sandy clay textures and low nutrient content (N = 0.03%, Olsen extractable P = 1.05 ppm and exchangeable bases <2.5 cMolc kg^{-1})[51].

The dominant tree species of the agroforestry parklands in and around Saponé is *Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn. *Sapotaceae* (*Karité* in French and *Shea* in English), which is considered the predominant parkland tree species in semi-arid West Africa[52]. Other tree species present in the parkland are *Parkia biglobosa* (Jacq.) G.Don, *Azadirachta indica* A.Juss., *Diospyros mespiliformis* Hochst. ex A.DC., *Adansonia digitata* L., *Acacia nilotica* (L.) Delile, *Ficus gnaphalocarpa* (Miq.) Steud. ex Miq., *Khaya senegalensis* (Desv.) A. Juss., *Lannea microcarpa* Engl. & K. Krause, *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst., *Tamarindus indica* L. and *Terminalia laxiflora* Engl. The tree density in the study area, which comprises ca. 100 ha, averages 21.3 trees ha^{-1} (SD = 16.3; n = 20) but ranges between 4 and 62 trees ha^{-1}, while canopy cover ranges between 3 and 21% (SD = 5; n = 20) (estimated on 20 100×50 m plots on satellite images from year 2002 (source: Google Earth 2012; Digital Globe 2012). In the study area Shea trees have an average DBH (diameter at 1.3 m height) of 45 cm (SD = 17; n = 67) and an average ground projected canopy area, estimated from canopy diameter, of 67 m^2 (SD = 39; n = 67). The average canopy area in our study area (67 m^2) is close to the average for *Vitellaria paradoxa* based on data from Mali, Burkina Faso and Cameroon (54 m^2)[52]. The trees are scattered forming an open woodland which is often associated with diverse cultivated plots of annual crops such as millet, sorghum, cowpea and beans[41]. These plots are regularly fallowed for 3–5 years. Trees are kept in the agricultural fields for multiple reasons - including fruits, shading and fodder for animals. Livestock is present in the area, mainly moving on tracks and in the fallows, but is kept out of the agricultural fields during the cropping season and allowed to graze crop residues after harvest.

Shea trees are generally considered deciduous but in the study area the trees are rarely leafless because they replace their leaves progressively[53]. Its lateral roots mostly follow the ground surface and can extend 20 m from the tree and reach a depth of 0.4 m[54,55].

Sampling design. The sampling was designed to estimate changes in groundwater recharge as a function of tree proximity and density. Two classes of areas were selected to span a range of tree densities: large open areas (large canopy free areas, having a radius between 22 and 30 m) and small open areas (radius between 6 and 13 m). The sampling locations were selected according to the following criteria: 1) The radius of the open area had to be either below 15 m or above 20 m. Open areas with intermediate sizes were not considered; 2) All trees bordering the open area had to be Shea trees; and 3) Sampling locations had to be present both North and South of a settlement located at the center of the study area. Each sampling location contained three measurement points where soil water drainage was collected at 1.5 m soil depth (Fig. 6). For information about replicates see Table 1. One measurement point was located in a soil pit in the centre of each open area selected. The other two were located in opposite sides of a second pit close to a Shea tree (Figs 5c and 6) with one of the measurement points at a distance between 1 and 2 meters from the stem and the other in the opposite side of the pit towards the canopy edge, 4–5 meters from the stem. The soil pits were orientated with the long side, where the lysimeters are located, in the slope direction to minimize disturbance by lateral water flow (Fig. 6).

Soil water drainage was collected at 1.5 m soil depth daily during the rainy season in 2008, 2009 and 2010 in 6, 8 and 9 sampling locations respectively (Table 1), corresponding to 18, 22 and 25 measurement points. At the end of the rainy season in 2008 one pit next to a tree was destroyed due to heavy rains. These two measurement points could not be included in the following years. Twenty-seven healthy and not recently pruned Shea trees were selected for sap flow measurements. This involved three trees per sampling location over the 2008–2010 period. In each sampling location the tree adjacent to the soil pit and the two closest trees to this tree were selected (Fig. 6).

Rainfall measurements. Rainfall was measured in gauges located near the centre of each open area. The rain gauges had a surface of 137 cm^2, a capacity of 2-L, and were mounted at a height of 1.5 m. Rain was collected daily during the rainy season in 2008, 2009 and 2010.

Rainfall data was missing at the beginning of the rainy season (March-June 2008 and 2010), as the equipment was not yet installed. Simple linear regression was performed between 15 months of available data from Saponé and data from Ouagadougou meteorological station, the closest to the study area, for the same period. The regression model obtained ($y = 11.3 + 1.1x$; $r^2_{adj} = 0.8$, $p < 0.0001$) was used to predict the mean monthly rainfall for the months with missing data.

Soil water drainage measurements. Soil water drainage, the vertical flux of water within the vadose zone which can eventually become actual groundwater recharge when reaching the water table, was collected using passive capillary fiberglass wick lysimeters (adapted from those presented by Zhu *et al.*[56]). These passive capillary fiberglass wick lysimeters have a larger drainage collection efficiency than normal zero-tension pan lysimeters, which can approach 100%[56].

Our lysimeters consisted of a 30×40 cm^2 fiberglass plate with a slight slope which drained all collected water towards a hose connected to a 7-litre tank. The wick was an 8 mm diameter Thermo- E glass fiber twisted rope

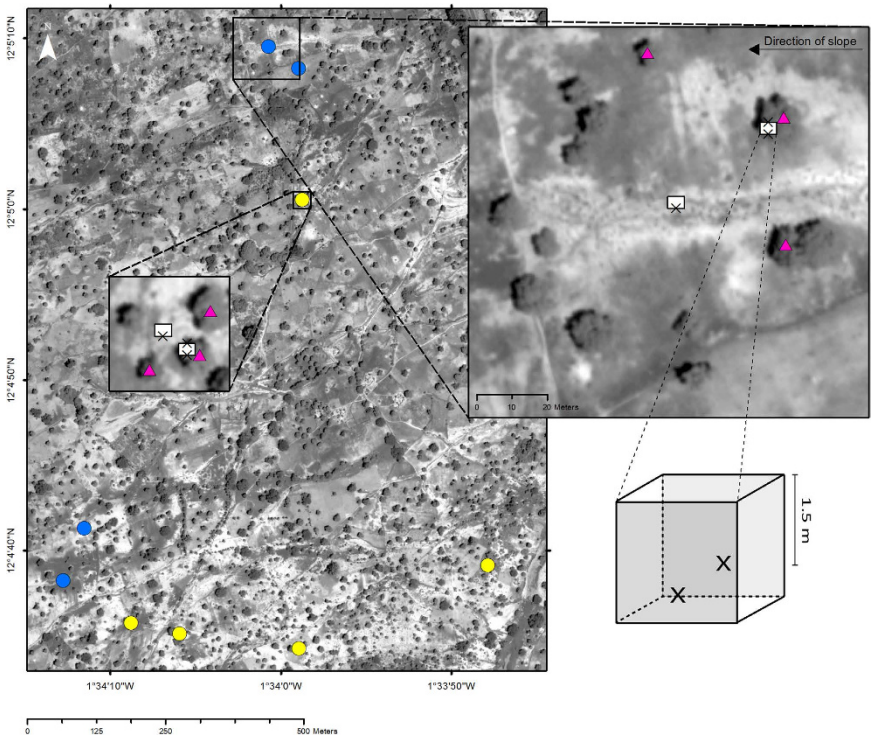


Figure 6. Overview of the study area and sampling design. Satellite image (Panchromatic WorldView-2 image from 18 July 2012) of the study area showing the 9 sampling locations, 4 corresponding to large open areas (blue dots) and 5 corresponding to small open areas (yellow dots). Enlargements of a large and a small open area are also shown. The soil pits were located in each sampling location both at the centre of the open area and under a tree (white boxes). Soil water drainage was collected with lysimeters located at 1.5 m soil depth at three points in each sampling location (X). Sap flow was measured in three trees per sampling location (pink triangles).

Year	Sampling location		
	Total	Large open areas	Small open areas
2008	6	3	3
2009	8	4	4
2010	9	4	5

Table 1. Number of sampling locations (total, large open areas and smaller open areas) for each year.

(*HKO Heat Protection* Group, Germany). The wicks were heated at 400 °C for 4 hours in order to remove any organic residues[57]. Two fiberglass ropes were inserted through the hose, leaving a piece of free rope on top of the plate. The lysimeters were filled to the top with 2 mm diameter sand. The remaining piece of fiberglass rope was separated into individual strands which were evenly arranged over the sand surface (Fig. 5e). This surface was then placed against the ceiling of a cavity dug in the wall of the soil pit (1.5 m beneath the soil surface and 50 cm from the pit wall) (Fig. 5d). Prior to the lysimeter installation the cavity ceiling was leveled to ensure contact between the lysimeter water collection surface and the lower surface of the undisturbed soil. A lysimeter of this type produces a hanging water column that exerts a negative pressure to the soil above the lysimeter[56]. The difference in elevation between the collection surface and the end of the wick was about 50 cm, which thus generated up to 50 cm of water tension on the soil[58]. Soil pits were covered with an unpainted galvanized iron sheet to reduce evaporation and avoid direct precipitation.

Water from the lysimeters was collected daily, in the early morning, during the rainy season in 2008, 2009 and 2010. Yearly soil draining water volumes were calculated by accumulating the daily collected draining soil water. Given the depth of the lysimeters installations we judged it a prerequisite that for meaningful readings the local groundwater must remain lower than 2 m depth. Therefore we only used data from days where the groundwater table was lower than 2 m depth in all the pits, which represented 85, 99 and 60% of the total annual rainfall for 2008, 2009 and 2010 respectively (Supplementary Table S1). The accumulated soil draining water volume for each year was scaled according to the total rainfall collected during the sampling period.

Three lysimeters malfunctioned during use, two in 2008 and one in 2009. These failures resulted from poor contact with the soil due to either flawed installation, erosion or disturbance by animals (the most likely being rodents or termites). Readings from these lysimeters have been removed from the data set.

Sap flow measurements. Sap flow was measured using the heat ratio method (HRM)[59], this is a modification of the Heat Pulse Velocity method[60]. Estimates of each Shea tree's daily transpiration were obtained from accumulation of 24 hourly sap flow measurements from HRM30 heat ratio probes (ICT International, Armidale, Australia) (Fig. 5f), generated as in ref. 59. On each tree, four HRM30 sensors were installed at 1.30 m height along the compass directions East, West, North and South in order to account for circumferential variability. Each sensor was 35 mm long and contained three probes (a heater probe and two temperature probes, installed equidistantly upstream and downstream from the heater probe). Each temperature probe contained two thermocouples located at 7.5 and 22.5 mm. A heat pulse of 20 joules was automatically sent to the sensors every 10 minutes. The speed of propagation of the heat (*Vh*) was calculated according to ref. 60 every 10 minutes, and an average hourly value was automatically stored by an SL5 Smart Logger recorder (ICT International). Heat pulse velocity values were corrected for errors arising from probe misalignment and wounding following ref. 59. The corrected *Vh* values were then converted into sap velocity (V_s) according to ref. 61. At the end of the measurement period, a wood core was extracted from each monitored tree using a Pressler increment borer in a random compass direction, and sapwood thickness was determined from this sample. We chose to sample sapwood thickness at a random compass direction to avoid any systematic errors due to potential patterns in sapwood depth around the tree. The cross-sectional sapwood area, estimated from the sapwood thickness assuming radial symmetry, was then divided into two concentric annuli delimited by the midpoint between the two measurement depths (7.5 mm and 22.5 mm). The sap flow corresponding to each annulus was estimated by multiplying the area of the annulus by *Vs* at the specific depth. The sap flow for the entire sap wood area was obtained by adding the values from the two concentric annuli. Finally, the tree transpiration rate was calculated by averaging the sap flow values from the four sensors installed in each tree.

Sap flow was measured simultaneously on three Shea trees per sampling location for a period of 10 to 50 days, after which the instruments were moved to another sampling location (see Supplementary Table S2 for details on the sampling periods at each location). In total 27 trees, corresponding to 9 sampling locations, were measured in both the rainy season and the dry season over the period July 2008–December 2010. The diameter at 1.3 m height (DBH) of the measured trees ranged from 19 to 90 cm, with a mean value of 55 cm, while their ground projected canopy area ranged from 28 to 190 m^2, with a mean value of 93 m^2. Wrong data, indicated by an error code, were removed. When hourly data were lacking, either due to wrong data or other technical problems, the gaps with missing data were replaced by the hourly average of the day if there were less than 5 gaps within that day. Otherwise, the data from that day was not used.

Sap velocity typically varies radially across the sapwood, with a peak generally occurring within the outermost portion of the sapwood depth, and from there decreasing towards the heartwood[62–65]. Failure to account for this radial variation in sap velocity can introduce significant errors when scaling up sap flow measurements from tree to stand[66,67]. When radial variation is not considered, single-point measurements at the outer sapwood can result in overestimation errors as large 300%[65], or 154%[62]. Measuring sap velocity at two close sample points, similarly to what we did in this study, has been shown to systematically overestimate tree water use, with errors ranging between 14 and 81%[62]. To evaluate the effects of a potential overestimation of tree water use on groundwater recharge, we performed a sensitivity analysis assuming an overestimation error of 100%. We discuss the implications of this in more detail in the discussion section.

Spatial model. We modelled annual groundwater recharge in Simile v5.9 software (Simulistics Ltd). The model consisted of a spatial grid of 1 ha (100 × 100 m), with cell size of 1 m^2, and an overlying layer of the same extent which stored the X and Y coordinates of individual trees. Tree locations were randomly generated for each of the 100 simulations per input tree density (ranging from 1 to 70 trees ha^{-1}). Soil water drainage at 1.5 m soil depth as percentage of annual rainfall was modelled in each of the grid cells as a function of the distance from its centre to the nearest tree stem according to the fitted relationship (Supplementary Fig. S5a, Fig.2). This relationship was determined from our 2009 data for two reasons: firstly the rainfall in this year (720 mm $year^{-1}$) was very close to the long-term average (787 mm $year^{-1}$); and secondly the sampling period included the least interrupted time series with 99% successful sampling of the annual rainfall (Supplementary Table S1). While in 2009 the lysimeters where installed and functioning during three months, in 2008 and 2010 the sampling period was reduced to two months and a half and one month and a half respectively. When comparing with the amount of time needed for water to reach the lysimeters furthest from trees (Fig. 4) it is evident that in the specific case of 2010, this meant that in these lysimeters much of the water did not have time to drain down to the lysimeters within this month and a half. Therefore, lysimeters located furthest from trees underestimated the accumulated drainage relative to the total rainfall during the sampling period as compared to data from 2008 and 2009. However, close to trees where percolation rates are faster, drainage was similar in all years–thus supporting that drainage is highest just beyond the tree crowns. To determine the effect of distance to tree on drainage, non-linear exponential regression was used for the interval of distances corresponding to sample points under the tree canopy and linear regression beyond the canopy edge (both performed using Minitab 16). Ordinary bootstrapping regression was also tested in the open areas using the *boot* function from the package *boot*[68] in R[69], using 1000 replicates. The obtained average regression coefficients were very similar to the ones obtained by ordinary least squares method, and therefore we only show these latter in the results. As a conservative choice, the linear relationship found was not extrapolated beyond our data but instead the value recorded in the largest open area (1.3% of annual rainfall, Fig. 2) was used as the minimum drainage beyond 36.8 m. Thus, depending on the distance to

the nearest tree stem, the accumulated drainage at 1.5 m soil depth (% annual rainfall) was estimated according to the following three expressions:

$$y = \begin{cases} 4.3\ 10^{-8} e^{4.5x} & if\ x \leq 4.36 \\ 18.1 - 0.46x & if\ 4.36 < x \leq 36.8 \\ 1.3 & if\ x > 36.8 \end{cases} \quad (1)$$

where y is the annual accumulated drainage at 1.5 m below the ground surface (% annual rainfall) and x is the distance to the nearest tree stem (m).

To calculate the groundwater recharge scenarios tree transpiration was subtracted from the drainage. Sap flow was derived from a per tree basis using a log-log regression (Minitab 16) between the natural log (Ln) of average daily sap flow from the 27 monitored trees and the Ln of their canopy area ($y = 1.43 + 0.78x$(SE 0.14); where y is Ln [sap flow] and x Ln [canopy area]; $r^2_{adj} = 0.53$, $p < 0.001$). Subsequent conversion to express this relationship in natural units provides an exponential function (Supplementary Fig. S6).

We explored the influence of tree size with three simulated scenarios involving: small (40 m^2 canopy area), average (67 m^2) and large trees (130 m^2). The predicted daily sap flow for each scenario, i.e. 76, 113, and 190 L $tree^{-1}day^{-1}$ respectively (Supplementary Fig. S6), was multiplied by tree density and by 365 to estimate annual transpiration losses.

The depth from which the transpired water was drawn by the trees in the study remains uncertain. The vertical profile of this extraction process is hard to assess and remains undetermined. To address this uncertainty we modelled annual groundwater recharge under 5 different model scenarios covering the full range of possibilities. In the first model we considered that trees extract 100% of transpired water from below 1.5 m soil depth. The remaining models assumed 75%, 50%, 25% and 0%. Annual groundwater recharge was subsequently obtained for each model by extracting the adjusted volume of transpired water from the annual accumulated drainage at 1.5 m soil depth. Each drainage model was run 100 times for each of the 30 different tree densities ranging from 1 tree ha^{-1} to 70 trees ha^{-1}. All trees positions were randomized for each of the 3000 simulations.

Furthermore, in order to evaluate the influence of how trees are distributed in space we ran seven simulations (1, 4, 9, 16, 25, 36 and 49 trees ha^{-1}) with a regularly spaced "square" distribution of trees. We considered average tree size (67 m^2 canopy area) and 100%, 75%, 50%, 25% and 0% assumptions for extraction of transpired water.

Our original model assumed that drainage at 1.5 m soil depth and groundwater recharge are influenced only by the distance to the nearest tree stem. To explore the influence of any possible additive effect in which groundwater recharge is influenced by multiple neighboring trees we modified our initial *nearest-neighbour* model. In our *additive* model, we assumed that drainage at 1.5 m was highest at the canopy edge, 4.36 m from the tree, and then decreased linearly down to 1.3% of annual rainfall at 36.8 m from the tree. We assumed drainage was zero under tree canopies, and 1.3% beyond 36.8 m away from any tree. The effect of trees on drainage was then summed when the ranges between 4.36 and 36.8 m around any trees were overlapping. We assumed that the per-hectare mean drainage value from our original model was valid for a tree density of 20 trees ha^{-1}, since this is the average tree density in our study area. We calibrated the effect of the individual trees in our *additive* model so that the original and *additive* models gave equal results at a tree density of 20 trees ha^{-1}. The drainage effect from each tree in these circumstances was $y = 3.5 - 0.06x$ (where x is the distance to the tree in m) between 4.36 and 36.8 m. The model was run 100 times for each of the 30 input tree densities ranging from 1 tree ha^{-1} to 70 trees ha^{-1} assuming random distribution of trees, average tree size (67 m^2 canopy area), and 50% water uptake below 1.5 m soil depth (for example outputs see Supplementary Fig. S5b).

References

1. Kuylenstierna, J. L., Björklund, G. & Najlis, P. The Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World-Policy Options for an Integrated Sustainable Water Future. *Water Int.* **23,** 17–20 (1998).
2. World Water Assessment Programme. *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World* (UNESCO/Earthscan, Paris/London, 2009).
3. Hamilton, L. S. & King, P. N. *Tropical Forested Watersheds. Hydrologic and Soils Response to Major Uses or Conversions*. (Westview Press, Colorado, 1983).
4. Sandström, K. Can forests "provide" water: widespread myth or scientific reality? *Ambio* **27,** 132–138 (1998).
5. Calder, I. R. *et al.* Forest and water policies–The need to reconcile public and science perceptions. *Geol. Acta* **2,** 157–166 (2004).
6. Calder, I. R. Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs. *For. Ecol. Manage.* **251,** 110–120 (2007).
7. Kaimowitz, D. Forests and water: a policy perspective. *J. For. Res.* **9,** 289–291 (2004).
8. Jackson, R. B. *et al.* Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* **310,** 1944–1947 (2005).
9. Farley, K. A., Jobbagy, E. G. & Jackson, R. B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biol.* **11,** 1565–1576 (2005).
10. Hayward, B. *From the mountain to the tap: how land use and water management can work for the poor*. (FRP-DFID, Hayle, 2005).
11. Malmer, A., Murdiyarso, D., Bruijnzeel, L. A. & Ilstedt, U. Carbon sequestration in tropical forests and water: a critical look at the basis for commonly used generalisations. *Global Change Biol.* **16,** 599–604 (2010).
12. Bruijnzeel, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agric. Ecosyst. Environ*. **104,** 185–228 (2004).
13. van Dijk, A. I. J. M. & Keenan, R. J. Planted forests and water in perspective. *For. Ecol. Manage.* **251,** 1–9 (2007).
14. Beck, H. E. *et al.* The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* **17,** 2613–2635 (2013).
15. Krishnaswamy, J. *et al.* The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the "infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis". *J. Hydrol.* **498,** 191–209 (2013).
16. Ogden, F. L., Crouch, T. D., Stallard, R. F. & Hall, J. S. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. *Water Resour. Res.* **49,** 8443–8462 (2013).
17. Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W. & Vertessy, R. A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *J. Hydrol.* **310,** 28–61 (2005).

18. Manning, A. D., Gibbons, P. & Lindenmayer, D. B. Scattered trees: A complementary strategy for facilitating adaptive responses to climate change in modified landscapes? *J. Appl. Ecol.* **46,** 915–919 (2009).
19. Shvidenko, A. *et al.* In *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*, Vol. 1 (eds Hassan, R., Scholes, R. & Ash, N.) Ch. 21, 585–621 (Island Press, Washington DC, 2005).
20. Saatchi, S. S. *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *P. Natl. Acad. Sci. USA* **108,** 9899–9904 (2011).
21. Jindal, R., Swallow, B. & Kerr, J. Forestry-based carbon sequestration projects in Africa: Potential benefits and challenges. *Nat. Resour. Forum* **32,** 116–130 (2008).
22. Rockström, J., Falkenmark, M., Lannerstad, M. & Karlberg, L. The planetary water drama: Dual task of feeding humanity and curbing climate change. *Geophys. Res. Lett.* **39,** L15401 (2012).
23. Boffa, J. M. *Agroforestry parklands in sub-Saharan Africa.* (FAO, Rome, 1999).
24. Zomer, R. J., Trabucco, A., Coe, R. & Place, F. *Trees on farm: analysis of global extent and geographical patterns of agroforestry. ICRAF Working Paper no. 89*. (World Agroforestry Centre, Nairobi, 2009).
25. Konaté, S., Le Roux, X., Tessier, D. & Lepage, M. Influence of large termitaria on soil characteristics, soil water regime, and tree leaf shedding pattern in a West African savanna. *Plant Soil* **206,** 47–60 (1999).
26. Beven, K. & Germann, P. Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.* **18,** 1311–1325 (1982).
27. Bargués Tobella, A. *et al.* The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso. *Water Resour. Res.* **50,** 3342–3354 (2014).
28. Roupsard, O. *et al.* Reverse phenology and dry-season water uptake by Faidherbia albida (Del.) A. Chev. in an agroforestry parkland of Sudanese west Africa. *Funct. Ecol.* **13,** 460–472 (1999).
29. Lebel, T., Taupin, J. D. & Damato, N. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel .1. General rainfall conditions and climatology. *J. Hydrol.* **189,** 74–96 (1997).
30. Hoogmoed, W. B. *Development of criteria and methods for improving the efficiency of soil management and tillage operations, with special reference to arid and semiarid regions. Report on the analysis of rainfall in some locations in West Africa and India. The effect of rainfall on runoff, infiltration and soil water movement*. (Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 1981).
31. Lal, R. Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical Alfisol in western Nigeria .1. Crop yield and soil physical properties. *Soil Till. Res.* **42,** 145–160 (1997).
32. ICRISAT. Alfisols in the semi-arid tropics. Proceedings of the consultant's workshop on the state of the art and management alternatives for optimizing the productivity of SAT Alfisols and related soils, 1-3 Dec 1983, ICRISAT Center, India. (India, 1987).
33. Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E. & Murdiyarso, D. The effect of afforestation on water infiltration in the Tropics: A systematic review and meta-analysis. *For. Ecol. Manage.* **251,** 45–51 (2007).
34. Kampen, J. & Burford, J. In *Priorities for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics* (eds Metz, J. F. & Brady, N. C.) 141–165 (International Rice Research Institute; New York State College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, 1980).
35. El-Swaify, S. A., Walker, T. S. & Virmani, S. M. *Dryland management alternatives and research needs for Alfisols in the semi-arid tropics: an interpretative summary of the consultant's workshop on the state of the art and management alternatives for optimizing the productivity of SAT Alfisols and related soils, ICRISAT Center, 1-3 December 1983*. (ICRISAT, India, 1984).
36. Savadogo, P., Sawadogo, L. & Tiveau, D. Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. *Agric. Ecosyst. Environ.* **118,** 80–92 (2007).
37. Deblauwe, V., Barbier, N., Couteron, P., Lejeune, O. & Bogaert, J. The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. *Global Ecol. Biogeogr.* **17,** 715–723 (2008).
38. Barbier, N., Couteron, P., Lefever, R., Deblauwe, V. & Lejeune, O. Spatial decoupling of facilitation and competition at the origin of gapped vegetation patterns. *Ecology* **89,** 1521–1531 (2008).
39. Ludwig, J. A., Wilcox, B. P., Breshears, D. D., Tongway, D. J. & Imeson, A. C. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology* **86,** 288–297 (2005).
40. HilleRisLambers, R., Rietkerk, M., van den Bosch, F., Prins, H. H. & de Kroon, H. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems. *Ecology* **82,** 50–61 (2001).
41. Rietkerk, M. *et al.* Self-Organization of Vegetation in Arid Ecosystems. *Amer. Nat.* **160,** 524–530 (2002).
42. Cannavo, P. *et al.* Agroforestry associating coffee and Inga densiflora results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* **140,** 1–13 (2011).
43. Ghimire, C. P., Bonell, M., Bruijnzeel, L. A., Coles, N. A. & Lubczynski, M. W. Reforesting severely degraded grassland in the Lesser Himalaya of Nepal: Effects on soil hydraulic conductivity and overland flow production. *J. Geophys. Res.* **118,** 2528–2545 (2013).
44. Bayala, J., Teklehaimanot, Z. & Ouedraogo, S. J. Millet production under pruned tree crowns in a parkland system in Burkina Faso. *Agroforest. Syst.* **54,** 203–214 (2002).
45. Mohamed Saleem, M. A. Nutrient balance patterns in African livestock systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* **71,** 241–254 (1998).
46. Hiernaux, P., Bielders, C. L., Valentin, C., Bationo, A. & Fernández-Rivera, S. Effects of livestock grazing on physical and chemical properties of sandy soils in Sahelian rangelands. *J. Arid Environ.* **41,** 231–245 (1999).
47. Minnemeyer, S., Laestadius, L., Sizler, N., Saint-Laurent, C. & Potapov, P. *A world of opportunity*. (2011) Available at: http://pdf.wri.org/world_of_opportunity_brochure_2011-09.pdf. (Accessed: 15th January 2016).
48. Bonkoungou, E. *et al.* Agroforestry Parklands of the West African Semi-arid Lands. Conclusions and Recommendations of an International Symposium. Ouagadougou, 25–27 October, 1993. (ICRAF/SALWA, Nairobi, 1994).
49. CPCS. *Classification des Sols*. (Grignon, 1967).
50. FAO-ISRIC-ISSS. In *World Soil Resources Reports* Vol. 84 (Rome, 1998).
51. Jonsson, K., Ong, C. K. & Odongo, J. C. W. Influence of scattered nere and karite trees on microclimate, soil fertility and millet yield in Burkina Faso. *Exp. Agric.* **35,** 39–53 (1999).
52. Breman, H. & Kessler, J. J. *Woody Plants in Agro-ecosystems of Semi-arid Regions: With an Emphasis on the Sahelian Countries*. (Springer Verlag, 1995).
53. Bayala, J. *Tree Crown Pruning as a Management Tool to Enhance the Productivity of Parklands in West Africa, PhD Thesis*, University of Wales, Bangor, UK (2002).
54. Delolme, A. Etude du karite a la station agricole de Ferkessedougou. *Oléagineux* **4,** 186–200 (1947).
55. Bonkoungou, E. G. *Monographie du Karité, Butyrospermum Paradoxum (Gaertn. f.) Hepper, Espèce Agroforestière à Usages Multiples*. (Institute de la Researche en Biologie et Ecologie Tropicale, Centre National de la Researche Scientifique et Technologique, Ougadougou, 1987).
56. Zhu, Y., Fox, R. H. & Toth, J. D. Leachate collection efficiency of zero-tension pan and passive capillary fiberglass wick lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **66,** 37–43 (2002).
57. Knutson, J. H., Lee, S. B., Zhang, W. Q. & Selker, J. S. Fiberglass wick preparation for use in passive capillary wick soil pore-water samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57,** 1474–1476 (1993).
58. Holder, M., Brown, K. W., Thomas, J. C., Zabcik, D. & Murray, H. E. Capillary-wick unsaturated zone soil pore water sampler. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55,** 1195–1202 (1991).
59. Burgess, S. S. O. *et al.* An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiol.* **21,** 589–598 (2001).
60. Marshall, D. C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiol.* **33,** 385–396 (1958).

61. Barrett, D., Hatton, T., Ash, J. & Ball, M. Evaluation of the heat pulse velocity technique for measurement of sap flow in rainforest and eucalypt forest species of south-eastern Australia. *Plant, Cell & Environ.* **18,** 463–469 (1995).
62. Ford, C. R., McGuire, M. A., Mitchell, R. J. & Teskey, R. O. Assessing variation in the radial profile of sap flux density in Pinus species and its effect on daily water use. *Tree Physiol.* **24,** 241–249 (2004).
63. James, S. *et al.* Axial and radial water transport and internal water storage in tropical forest canopy trees. *Oecologia* **134,** 37–45 (2003).
64. Alvarado-Barrientos, M. S., Hernández-Santana, V. & Asbjornsen, H. Variability of the radial profile of sap velocity in Pinus patula from contrasting stands within the seasonal cloud forest zone of Veracruz, Mexico. *Agric. Forest Meteorol.* **168,** 108–119 (2013).
65. Nadezhdina, N., Čermák, J. & Ceulemans, R. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree Physiol.* **22,** 907–918 (2002).
66. Ford, C. R., Hubbard, R. M., Kloeppel, B. D. & Vose, J. M. A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance. *Agric. Forest Meteorol.* **145,** 176–185 (2007).
67. Kume, T. *et al.* Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees: its impact on stand-scale transpiration estimates. *Hydrol. Process.* **26,** 1161–1168 (2012).
68. boot: Bootstrap R (S-Plus) Functions. R package version 1.3–15 (2015).
69. R: A language and environment for statistical computing (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2015).

Acknowledgements

The project was funded by The Swedish International Development Cooperation Agency (Sida). Villagers and landowners in the village of Saponé are acknowledged for their permissions and assistance essential for carrying out the field work. We are thankful to Julien Belem and Léonard Ouedraogo for daily data collection. Help in starting spatial modeling with Simile was kindly provided by Jonathan Massheder and Robert Muetzelfeldt.

Author Contributions

U.I., J.B. and E.V. outlined the experiment based on an idea by U.I. All authors, U.I., A.B.T., H.R.B., J.B., E.V., G.N., J.S., L.B., D.M., H.L., D.S. and A.M. participated in the discussions leading to the present paper. A.B.T. and U.I. performed statistical and modeling analyses. H.R.B. and E.V. laid out the field experiment, in which A.B.T participated from 2010. U.I. drafted the main article, while A.B.T. drafted the methods section. All authors subsequently contributed to the present version of the paper.

Additional Information

Supplementary information accompanies this paper at http://www.nature.com/srep

Competing financial interests: The authors declare no competing financial interests.

How to cite this article: Ilstedt, U. *et al.* Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Sci. Rep.* **6**, 21930; doi: 10.1038/srep21930 (2016).

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



پیوست سوم

پمپ بیوتیک

Atmos. Chem. Phys., 13, 1039–1056, 2013
www.atmos-chem-phys.net/13/1039/2013/
doi:10.5194/acp-13-1039-2013
© Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.



Atmospheric Chemistry and Physics

Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics

A. M. Makarieva[1,2], V. G. Gorshkov[1,2], D. Sheil[3,4,5], A. D. Nobre[6,7], and B.-L. Li[2]

[1]Theoretical Physics Division, Petersburg Nuclear Physics Institute, 188300, Gatchina, St. Petersburg, Russia
[2]XIEG-UCR International Center for Arid Land Ecology, University of California, Riverside, CA 92521, USA
[3]School of Environment, Science and Engineering, Southern Cross University, P.O. Box 157, Lismore, NSW 2480, Australia
[4]Institute of Tropical Forest Conservation, Mbarara University of Science and Technology, Kabale, Uganda
[5]Center for International Forestry Research, P.O. Box 0113 BOCBD, Bogor 16000, Indonesia
[6]Centro de Ciência do Sistema Terrestre INPE, São José dos Campos SP 12227-010, Brazil
[7]Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus AM 69060-001, Brazil

Correspondence to: A. M. Makarieva (ammakarieva@gmail.com) and D. Sheil (douglassheil@itfc.org)

Received: 5 August 2010 – Published in Atmos. Chem. Phys. Discuss.: 15 October 2010
Revised: 29 April 2011 – Accepted: 3 December 2012 – Published: 25 January 2013

Abstract. Phase transitions of atmospheric water play a ubiquitous role in the Earth's climate system, but their direct impact on atmospheric dynamics has escaped wide attention. Here we examine and advance a theory as to how condensation influences atmospheric pressure through the mass removal of water from the gas phase with a simultaneous account of the latent heat release. Building from fundamental physical principles we show that condensation is associated with a decline in air pressure in the lower atmosphere. This decline occurs up to a certain height, which ranges from 3 to 4 km for surface temperatures from 10 to 30 °C. We then estimate the horizontal pressure differences associated with water vapor condensation and find that these are comparable in magnitude with the pressure differences driving observed circulation patterns. The water vapor delivered to the atmosphere via evaporation represents a store of potential energy available to accelerate air and thus drive winds. Our estimates suggest that the global mean power at which this potential energy is released by condensation is around one per cent of the global solar power – this is similar to the known stationary dissipative power of general atmospheric circulation. We conclude that condensation and evaporation merit attention as major, if previously overlooked, factors in driving atmospheric dynamics.

1 Introduction

Phase transitions of water are among the major physical processes that shape the Earth's climate. But such processes have not been well characterized. This shortfall is recognized both as a challenge and a prospect for advancing our understanding of atmospheric circulation (e.g., Lorenz, 1983; Schneider, 2006). In *A History of Prevailing Ideas about the General Circulation of the Atmosphere* Lorenz (1983) wrote:

> "We may therefore pause and ask ourselves whether this step will be completed in the manner of the last three. Will the next decade see new observational data that will disprove our present ideas? It would be difficult to show that this cannot happen.
>
> Our current knowledge of the role of the various phases of water in the atmosphere is somewhat incomplete: eventually it must encompass both thermodynamic and radiational effects. We do not fully understand the interconnections between the tropics, which contain the bulk of water, and the remaining latitudes … Perhaps near the end of the 20th century we shall suddenly discover that we are beginning the fifth step."

Deluc (1812, p. 176) mentioned that conversion of water vapor to rain creates a kind of "airfree" space that may cause

wind gusts. Lorenz (1967, Eq. 86), as well as several other authors after him (Trenberth et al., 1987; Trenberth, 1991; Gu and Qian, 1991; Ooyama, 2001; Schubert et al., 2001; Wacker and Herbert, 2003; Wacker et al., 2006), recognized that local pressure is reduced by precipitation and increased by evaporation. Qiu et al. (1993) noted that "the mass depletion due to precipitation tends to reduce surface pressure, which may in turn enhance the low-level moisture convergence and give a positive feedback to precipitation". Van den Dool and Saha (1993) labeled the effect as a physically distinct "water vapor forcing". Lackmann and Yablonsky (2004) investigated the precipitation mass sink for the case of Hurricane Lili (2002) and made an important observation that "the amount of atmospheric mass removed via precipitation exceeded that needed to explain the model sea level pressure decrease".

Although the pressure changes associated with evaporation and condensation have received some attention, the investigations have been limited: the effects remain poorly characterized in both theory and observations. Previous investigations focused on temporal pressure changes not spatial gradients. Even some very basic relationships remain subject to confusion. For example, there is doubt as to whether condensation leads to reduced or to *increased* atmospheric pressure (Pöschl, 2009, p. S12436). Opining that the status of the issue in the meteorological literature is unclear, Haynes (2009) suggested that to justify the claim of pressure reduction one would need to show that "the standard approaches (e.g., set out in textbooks such as "Thermodynamics of Atmospheres and Oceans" by Curry and Webster, 1999) imply a drop in pressure associated with condensation".

Here we aim to clarify and describe, building from basic and established physical principles, the pressure changes associated with condensation. We will argue that atmospheric water vapor represents a store of potential energy that becomes available to accelerate air as the vapor condenses. Evaporation, driven by the sun, continuously replenishes the store of this energy in the atmosphere.

The paper is structured as follows. In Sect. 2 we analyze the process of adiabatic condensation to show that it is always accompanied by a local decrease of air pressure. In Sect. 3 we evaluate the effects of water mass removal and lapse rate change upon condensation in a vertical air column in approximate hydrostatic equilibrium. In Sect. 4 we estimate the horizontal pressure gradients induced by water vapor condensation to show that these are sufficient enough to drive the major circulation patterns on Earth (Sect. 4.1). We examine why the key relationships have remained unknown until recently (Sects. 4.2 and 4.3). We evaluate the mean global power available from condensation to drive the general atmospheric circulation (Sect. 4.4). Finally, we discuss the interplay between evaporation and condensation and the essentially different implications of their physics for atmospheric dynamics (Sect. 4.5). In the concluding section we discuss the importance of condensation as compared to differential heating as the major driver of atmospheric circulation. Our theoretical investigations strongly suggest that the phase transitions of water vapor play a far greater role in driving atmospheric dynamics than is currently recognized.

2 Condensation in a local air volume

2.1 Adiabatic condensation

We will first show that adiabatic condensation is always accompanied by a decrease of air pressure in the local volume where it occurs. The first law of thermodynamics for moist air saturated with water vapor reads (e.g., Gill, 1982)

$$\mathrm{d}Q = c_\mathrm{V}\mathrm{d}T + p\mathrm{d}V + L\mathrm{d}\gamma, \tag{1}$$

$$\gamma \equiv \frac{p_\mathrm{v}}{p} \ll 1, \;\; \frac{\mathrm{d}\gamma}{\gamma} = \frac{\mathrm{d}p_\mathrm{v}}{p_\mathrm{v}} - \frac{\mathrm{d}p}{p}. \tag{2}$$

Here p_v is partial pressure of saturated water vapor, p is air pressure, T is absolute temperature, Q ($\mathrm{J\,mol^{-1}}$) is molar heat, V ($\mathrm{m^3\,mol^{-1}}$) is molar volume, $L \approx 45\,\mathrm{kJ\,mol^{-1}}$ is the molar heat of vaporization, $c_\mathrm{V} = \frac{5}{2}R$ is molar heat capacity of air at constant volume ($\mathrm{J\,mol^{-1}\,K^{-1}}$), $R = 8.3\,\mathrm{J\,mol^{-1}\,K^{-1}}$ is the universal gas constant. The small value of $\gamma < 0.1$ under terrestrial conditions allows us to neglect the influence made by the heat capacity of liquid water in Eq. (1).

The partial pressure of saturated water vapor obeys the Clausius-Clapeyron equation:

$$\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{v}}{p_\mathrm{v}} = \xi\frac{\mathrm{d}T}{T}, \;\; \xi \equiv \frac{L}{RT}, \tag{3}$$

$$p_\mathrm{v}(T) = p_{\mathrm{v}0}\exp(\xi_0 - \xi), \tag{4}$$

where $p_{\mathrm{v}0}$ and ξ_0 correspond to some reference temperature T_0. Below we use $T_0 = 303\,\mathrm{K}$ and $p_{\mathrm{v}0} = 42\,\mathrm{hPa}$ (Bolton, 1980) and neglect the dependence of L on temperature.

We will also use the ideal gas law as the equation of state for atmospheric air:

$$pV = RT, \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}p}{p} + \frac{\mathrm{d}V}{V} = \frac{\mathrm{d}T}{T}. \tag{6}$$

Using Eq. (6) the first two terms in Eq. (1) can be written in the following form

$$\begin{aligned} &c_\mathrm{V}\mathrm{d}T + p\mathrm{d}V = \frac{RT}{\mu}\left(\frac{\mathrm{d}T}{T} - \mu\frac{\mathrm{d}p}{p}\right), \\ &\mu \equiv \frac{R}{c_p} = \frac{2}{7} = 0.29, \;\; c_p = c_\mathrm{V} + R. \end{aligned} \tag{7}$$

Writing $\mathrm{d}\gamma$ in Eq. (1) with use of Eqs. (2) and (3) as

$$\frac{\mathrm{d}\gamma}{\gamma} = \xi\frac{\mathrm{d}T}{T} - \frac{\mathrm{d}p}{p} \tag{8}$$

and using the definition of ξ (Eq. 3) we arrive at the following form for the first law of thermodynamics (Eq. 1):

$$\mathrm{d}Q = \frac{RT}{\mu}\left\{\frac{\mathrm{d}T}{T}(1+\mu\gamma\xi^2) - \mu\frac{\mathrm{d}p}{p}(1+\gamma\xi)\right\}. \tag{9}$$

In adiabatic processes $\mathrm{d}Q = 0$, and the expression in braces in Eq. (9) turns to zero, which implies:

$$\frac{\mathrm{d}T}{T} = \frac{\mathrm{d}p}{p}\varphi(\gamma,\xi),\ \varphi(\gamma,\xi) \equiv \mu\frac{1+\gamma\xi}{1+\mu\gamma\xi^2} \equiv \varphi. \tag{10}$$

Note that μ, γ and ξ are all dimensionless; γ and ξ are variables and μ is a constant, $\varphi(0,0) = \mu$. This is a general dependence of temperature on pressure in an adiabatic atmospheric process that involves phase transitions of water vapor (evaporation or condensation), i.e. change of γ. At the same time γ itself is a function of temperature as determined by Eq. (8):

$$\frac{\mathrm{d}\gamma}{\gamma} = \xi\frac{\mathrm{d}T}{T} - \frac{\mathrm{d}p}{p} = \frac{\mathrm{d}T}{T}\frac{\xi\varphi-1}{\varphi} = (\xi\varphi-1)\frac{\mathrm{d}p}{p}. \tag{11}$$

One can see from Eqs. (10) and (11) that the adiabatic phase transitions of water vapor are fully described by the relative change of either pressure $\mathrm{d}p/p$ or temperature $\mathrm{d}T/T$. For the temperature range relevant for Earth we have $\xi \equiv L/RT \approx 18$ so that

$$\xi\mu - 1 \approx 4.3. \tag{12}$$

Noting that μ, γ, ξ are all positive, from Eqs. (10), (11) and (12) we obtain

$$\xi\varphi - 1 = \xi\mu\frac{1+\gamma\xi}{1+\mu\gamma\xi^2} - 1 = \frac{\xi\mu-1}{1+\mu\gamma\xi^2} > 0. \tag{13}$$

Condensation of water vapor corresponds to a decrease of γ, $\mathrm{d}\gamma < 0$. It follows unambiguously from Eqs. (11) and (13) that if $\mathrm{d}\gamma$ is negative, then $\mathrm{d}p$ and $\mathrm{d}T$ are negative too. This proves that water vapor condensation in any adiabatic process is necessarily accompanied by reduced air pressure.

2.2 Adiabatic condensation cannot occur at constant volume

Our previous result refutes the proposition that adiabatic condensation can lead to a pressure rise due to the release of latent heat (Pöschl, 2009, p. S12436). Next, we show that while such a pressure rise was implied by calculations assuming *adiabatic condensation at constant volume*, in fact such a process is prohibited by the laws of thermodynamics and thus cannot occur.

Using Eqs. (6), (10) and (8) we can express the relative change of molar volume $\mathrm{d}V/V$ in terms of $\mathrm{d}\gamma/\gamma$:

$$\frac{\mathrm{d}V}{V} = -\frac{1-\varphi}{\varphi\xi-1}\frac{\mathrm{d}\gamma}{\gamma}. \tag{14}$$

Putting $\mathrm{d}V = 0$ in Eq. (14) we obtain

$$\frac{(1-\varphi)\mathrm{d}\gamma}{(\xi\varphi-1)\gamma} = 0. \tag{15}$$

The denominator in Eq. (15) is greater than zero, see Eqs. (12) and (13). In the numerator we note from the definition of φ (Eq. 10) that $1-\varphi = \frac{2\gamma}{7+2\gamma\xi^2}\left[\frac{5}{2\gamma}+\xi(\xi-1)\right]$. The expression in square brackets lacks real roots:

$$\frac{5}{2\gamma} + \xi^2 - \xi = 0,\ \xi = \frac{1}{2}\left(1 \pm i\sqrt{\frac{10-\gamma}{\gamma}}\right),\ \gamma \le 1. \tag{16}$$

In consequence, Eq. (15) has a single solution $\mathrm{d}\gamma = 0$. This proves that condensation cannot occur adiabatically at constant volume.

2.3 Non-adiabatic condensation

To conclude this section, we show that for any process where entropy increases, $\mathrm{d}S = \mathrm{d}Q/T > 0$, water vapor condensation ($\mathrm{d}\gamma < 0$) is accompanied by drop of air pressure (i.e., $\mathrm{d}p < 0$). We write the first law of thermodynamics Eqs. (9) and (11) as

$$\frac{\mathrm{d}S}{R}\frac{\mu}{1+\mu\gamma\xi^2} = \frac{\mathrm{d}T}{T} - \varphi\frac{\mathrm{d}p}{p},\ \frac{\mathrm{d}T}{T} = \frac{1}{\xi}\left(\frac{\mathrm{d}\gamma}{\gamma} + \frac{\mathrm{d}p}{p}\right). \tag{17}$$

Excluding $\mathrm{d}T/T$ from Eq. (17) we obtain

$$\frac{\mathrm{d}p}{p}(\xi\varphi-1) = \frac{\mathrm{d}\gamma}{\gamma} - \xi\frac{\mu}{1+\mu\gamma\xi}\frac{\mathrm{d}S}{R}. \tag{18}$$

The term in round brackets in Eq. (18) is positive, see Eq. (13), the multiplier at $\mathrm{d}S$ is also positive. Therefore, when condensation occurs, i.e., when $\mathrm{d}\gamma/\gamma < 0$, and $\mathrm{d}S > 0$, the left-hand side of Eq. (18) is negative. This means that $\mathrm{d}p/p < 0$, i.e., air pressure decreases.

Condensation can be accompanied by a pressure increase only if $\mathrm{d}S < 0$. This requires that work is performed on the gas such as occurs if it is isothermally compressed. (We note too, that if pure saturated water vapor is isothermally compressed condensation occurs, but the Clausius-Clapeyron equation (Eq. 3) shows that the vapor pressure remains unchanged being purely a function of temperature.)

3 Adiabatic condensation in the gravitational field

3.1 Difference in the effects of mass removal and temperature change on gas pressure in hydrostatic equilibrium

We have shown that adiabatic condensation in any local volume is always accompanied by a drop of air pressure. We

will now explore the consequences of condensation for the vertical air column.

Most circulation patterns on Earth are much wider than they are high, with the ratio height/length being in the order of 10^{-2} for hurricanes and down to 10^{-3} and below in larger regional circulations. As a consequence of mass balance, vertical velocity is smaller than horizontal velocities by a similar ratio. Accordingly, the local pressure imbalances and resulting atmospheric accelerations are much smaller in the vertical orientation than in the horizontal plane, the result being an atmosphere in approximate hydrostatic equilibrium (Gill, 1982). Air pressure then conforms to the equation

$$-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} = \rho g, \;\; p(0) \equiv p_\mathrm{s} = g\int\limits_0^\infty \rho(z)\mathrm{d}z. \tag{19}$$

Applying the ideal gas equation of state (Eq. 5) we have from Eq. (19)

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} = -\frac{p}{h}, \;\; h \equiv \frac{RT}{Mg}. \tag{20}$$

This solves as

$$p(z) = p_\mathrm{s}\exp\left\{-\int\limits_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{h(z')}\right\}. \tag{21}$$

Here M is air molar mass (kg mol^{-1}), which, as well as temperature $T(z)$, in the general case also depends on z.

The value of p_s (Eq. 19), air pressure at the surface, appears as the constant of integration after Eq. (19) is integrated over z. It is equal to the weight of air molecules in the atmospheric column. It is important to bear in mind that p_s does not depend on temperature, but only on the amount of gas molecules in the column. It follows from this observation that any reduction of gas content in the column reduces surface pressure.

Latent heat released when water condenses means that more energy has to be removed from a given volume of saturated air for a similar decline in temperature when compared to dry air. This is why the moist adiabatic lapse rate is smaller than the dry adiabatic lapse rate. Accordingly, given one and the same surface temperature T_s in a column with rising air, the temperature at some distance above the surface will be on average higher in a column of moist saturated air than in a dry one.

However, this does not mean that at a given height air pressure in the warmer column is greater than air pressure in the colder column (cf. Meesters et al., 2009; Makarieva and Gorshkov, 2009c), because air pressure $p(z)$ (Eq. 21) depends on two parameters, temperature $T(z)$ and surface air pressure (i.e., the total amount of air in the column). If the total amount of air in the warmer column is smaller than in the colder column, air pressure in the surface layer will be lower in the warmer column despite its higher temperature.

In the following we estimate the cumulative effect of gas content and lapse rate changes upon condensation.

3.2 Moist adiabatic temperature profile

Relative water vapor content (Eq. 2) and temperature T depend on height z. From Eqs. (10), (11) and (20) we have

$$-\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z} \equiv \Gamma = \varphi\frac{T}{h}, \qquad \varphi \equiv \mu\frac{1+\gamma\xi}{1+\gamma\mu\xi^2}, \tag{22}$$

$$-\frac{1}{\gamma}\frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}z} = \frac{\xi\varphi - 1}{h} \equiv \frac{\xi\mu - 1}{1+\mu\gamma\xi^2}\frac{1}{h}. \tag{23}$$

Equation (22) represents the well-known formula for a moist adiabatic gradient as given in Glickman (2000) for small $\gamma < 0.1$. At $\gamma = 0$ we have $\varphi(\gamma,\xi) = \mu$ and $\Gamma_\mathrm{d} = M_\mathrm{d}g/c_p = 9.8\,\mathrm{K\,km^{-1}}$, which is the dry adiabatic lapse rate that is independent of height z, $M_\mathrm{d} = 29\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$. For moist saturated air the change of temperature T and relative partial pressure γ of water vapor with height is determined by the system of differential equations (Eqs. 22, 23).

Differentiating both parts of the Clapeyron-Clausius equation (Eq. 3) over z we have, see Eq. (22):

$$\begin{aligned} &\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{v}}{\mathrm{d}z} = -\frac{p_\mathrm{v}}{h_\mathrm{v}}, \;\; h_\mathrm{v} \equiv \frac{RT^2}{L\Gamma} = \frac{T}{\xi\Gamma} = \frac{h}{\xi\varphi}, \\ &p_\mathrm{v}(z) = p_\mathrm{vs}\exp\left\{-\int\limits_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{h_\mathrm{v}}\right\}, \;\; p_\mathrm{vs} \equiv p_\mathrm{v}(0). \end{aligned} \tag{24}$$

The value of h_v represents a fundamental scale height for the vertical distribution of saturated water vapor. At $T_\mathrm{s} = 300\,\mathrm{K}$ this height h_v is approximately 4.5 km.

Differentiating both parts of Eq. (2) over z with use of Eqs. (20) and (24) and noticing that $h_\mathrm{v}{=}h/(\xi\varphi)$ we have

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\gamma}\frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}z} &= \frac{1}{p_\mathrm{v}}\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{v}}{\mathrm{d}z} - \frac{1}{p}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} = \frac{1}{h_\mathrm{v}} - \frac{1}{h} \equiv \frac{1}{h_\gamma}, \\ h_\gamma &\equiv \frac{h_\mathrm{v}h}{h - h_\mathrm{v}}. \end{aligned} \tag{25}$$

This equation is equivalent to Eq. (23) when Eqs. (22) and (24) are taken into account. Height h_γ represents the vertical scale of the condensation process. Height scales h_v (Eq. 24) and h_γ (Eq. 25) depend on $\varphi(\gamma,\xi)$ (Eq. 22) and, consequently, on γ. At $T_\mathrm{s} = 300\,\mathrm{K}$ height $h_\gamma \approx 9\,\mathrm{km}$, in close proximity to the water vapor scale height described by Mapes (2001).

3.3 Pressure profiles in moist versus dry air columns

We start by considering two static vertically isothermal atmospheric columns of unit area, A and B, with temperature $T(z) = T_\mathrm{s}$ independent of height. Column A contains moist air with water vapor saturated at the surface, column B contains dry air only. Surface temperatures and surface pressures

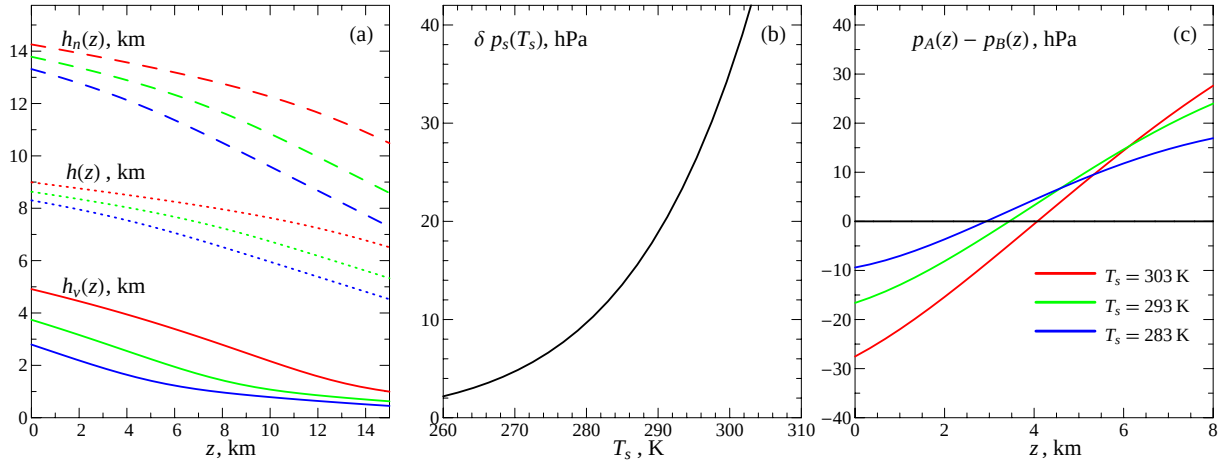


Fig. 1. (a) Scale height of saturated water vapor $h_v(z)$ (Eq. 24), hydrostatic scale height of water vapor $h_n(z)$ (Eq. 26), and scale height of moist air $h(z)$ (Eq. 20) in the column with moist adiabatic lapse rate (Eq. 22) for three values of surface temperature T_s; **(b)** condensation-induced drop of air pressure at the surface (Eq. 27) as dependent on surface temperature T_s; **(c)** pressure difference versus altitude z between atmospheric columns A and B with moist and dry adiabatic lapse rates, Eqs. (30) and (31), respectively, for three values of surface temperature T_s. Height z_c at which $p_A(z_c) - p_B(z_c) = 0$ is 2.9, 3.4 and 4.1 km for 283, 293 and 303 K, respectively. Due to condensation, at altitudes below z_c the air pressure is lower in column A despite it being warmer than column B.

in the two columns are equal. In static air Eq. (19) is exact and applies to each component of the gas mixture as well as to the mixture as a whole. At equal surface pressures, the total air mass and air weight are therefore the same in both columns. Water vapor in column A is saturated at the surface (i.e., at $z = 0$) but non-saturated above it (at $z > 0$). The saturated partial pressure of water vapor at the surface $p_v(T_s)$ (Eq. 4) is determined by surface temperature and, as it is in hydrostatic equilibrium, equals the weight of water vapor in the static column.

We now introduce a non-zero lapse rate to both columns: the moist adiabatic Γ (Eq. 22) to column A and the dry adiabatic Γ_d in column B. (Now the columns cannot be static: the adiabatic lapse rates are maintained by the adiabatically ascending air.) Due to the decrease of temperature with height, some water vapor in column A undergoes condensation. Water vapor becomes saturated everywhere in the column (i.e., at $z \geq 0$), with pressure $p_v(z)$ following Eq. (24) and density $\rho_v = p_v M_v/(RT) \equiv p_v/(g h_n)$ following

$$\rho_v(z) = \rho_v(T_s)\frac{h_{ns}}{h_n(z)}\exp\left\{-\int_0^z \frac{dz'}{h_v(z')}\right\},$$
$$\rho_v(T_s) \equiv \frac{p_v(T_s)}{g h_n(T_s)},\ h_n \equiv \frac{RT(z)}{M_v g},\ T(z) = T_s - \Gamma z. \qquad (26)$$

Here $h_n(z)$ is the scale height of the hydrostatic distribution of water vapor in the isothermal atmosphere with $T(z) = T_s$.

The change in pressure δp_s in column A due to water vapor condensation is equal to the difference between the initial weight of water vapor $p_v(T_s)$ and the weight of saturated water vapor:

$$\delta p_s = p_v(T_s) - g\int_0^\infty \rho_v(z)dz \leq p_v(T_s) - \rho_v(T_s) g h_v(T_s)$$
$$= p_v(T_s)\left(1 - \frac{h_{vs}}{h_{ns}}\right) = p_v(T_s)\left(1 - \frac{M_v g T_s}{L\Gamma_s}\right). \qquad (27)$$

The inequality in Eq. (27) represents a conservative estimate of δp_s due to the approximation $h_v(z) = h_v(T_s)$ made while integrating $\rho_v(z)$ (26). As far as $h_v(z)$ declines with height more rapidly than $h_n(z)$, Fig. 1a, the exact magnitude of this integral is smaller, while the value of δp_s is larger. The physical meaning of estimate (Eq. 27) consists in the fact that the drop of temperature with height compresses the water vapor distribution h_{ns}/h_{vs}-fold compared to the hydrostatic distribution (Makarieva and Gorshkov, 2007, 2009a; Gorshkov et al., 2012).

The value of δp_s (Eq. 27) was calculated as the difference between the weight per unit surface area of vapor in the isothermal hydrostatic column and the weight of water vapor that condensed when a moist adiabatic lapse rate was applied. This derivation can also be understood in terms of the variable conventionally called the *adiabatic liquid water content* (e.g., Curry and Webster, 1999, Eq. 6.41). We can represent the total mixing ratio of moisture (by mass) as $q_t \equiv q_v + q_l = (\rho_v + \rho_l)/\rho$, where ρ_v is the mass of vapor and ρ_l is the mass of liquid water per unit air volume; $q_t \ll 1$. The total adiabatic liquid water content in the column equals the integral of $q_l\rho$ over z at constant q_t, $q_l\rho = q_t\rho - q_v\rho = q_t\rho - \rho_v$. The value of δp_s (Eq. 27) is equal to this integral (mass per unit area) multiplied by the gravitational acceleration (giving weight per unit area):

$$\delta p_s = g\int_0^\infty q_l \rho \mathrm{d}z = g\left(\int_0^\infty q_t \rho \mathrm{d}z - \int_0^\infty \rho_v \mathrm{d}z\right). \quad (28)$$

The first integral in braces gives the mass of vapor in the considered atmospheric column if water vapor were a non-condensable gas, q_v=q_t=const. This term is analagous to the first term, $p_v(T_s)$, in the right-hand side of Eq. (27), where a static isothermal column was considered. The second term is identical to the second term, $g\int_0^\infty \rho_v \mathrm{d}z$, in Eq. (27).

Using the definition of $h_v(T_s)$ (Eq. 24), $h_n(T_s)$ (Eq. 26) and recalling that M_v/M_d=0.62 and $p_v(T_s)$=$\gamma_s p_s$, see Eq. (4), we obtain the following expression for the δp_s estimate (Eq. 27), Fig. 1b:

$$\frac{\delta p_s}{p_s} \approx \gamma_s\left(1 - 0.62\frac{1+\gamma_s\mu\xi_s^2}{\mu\xi_s+\gamma_s\mu\xi_s^2}\right). \quad (29)$$

Note that $\delta p_s/p_s$ is proportional to γ_s and increases exponentially with the rise of temperature.

After an approximate hydrostatic equilibrium is established, the vertical pressure profiles for columns A and B become, cf. Eq. (21):

$$p_A(z)=p_s\left(1-\frac{\delta p_s}{p_s}\right)\exp\left\{-\int_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{h_A(z')}\right\},\ h_A \equiv \frac{RT}{Mg}; \quad (30)$$

$$p_B(z) = p_s \exp\left\{-\int_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{h_B(z')}\right\},\ h_B \equiv \frac{RT_d}{M_d g}. \quad (31)$$

Here $M(z)$=$M_d(1-\gamma)+M_v\gamma$; $\gamma \equiv p_v(z)/p_A(z)$ and $T(z)$ obey Eqs. (22) and (23), $T_d(z)\equiv T_s-\Gamma_d z$.

In Fig. 1c the difference $p_A(z)-p_B(z)$ is plotted for three surface temperatures, T_s=10 °C, 20 °C and 30 °C. In all three cases condensation has resulted in a lower air pressure in column A compared to column B everywhere below z_c≈2.9, 3.4 and 4.1 km, respectively. It is only above that height that the difference in lapse rates makes pressure in the moist column higher than in the dry column.

3.4 Comparing forces due to condensation and buoyancy

Fig. 1c describes the relative contributions of latent heat release and the condensation vapor sink to the *horizontal* pressure differences. This result can also be illustrated by comparing the *vertical* forces associated with phase transitions of water vapor.

The buoyant force acting per unit moist air volume can be written as

$$f_B = \rho_p g\left(\frac{\rho}{\rho_p}-1\right) = \rho_p g\left(\frac{T(z)}{T_d(z)}\frac{1}{1-(M_v/M_d)\gamma(z)}-1\right).$$

Here ρ_p is the density of the air moist air parcel that ascends in the environment with density ρ. (When f_B is taken per unit mass by dividing by density ρ_p and integrated over z, one obtains the *convective available potential energy* (CAPE) (Glickman, 2000), which represents work performed by the buoyant force on the *rising* air parcel. As work of the buoyant force on the air parcel that is *descending* dry adiabatically is usually negative, total energy available for a buoyancy-induced circulation can be close to zero even at large positive CAPE (Gorshkov et al., 2012).)

Figure 2a shows the buoyant force acting on an air volume from column A that rises moist adiabatically in the dry adiabatic environment of column B: $\rho_p = p_B(z)M/RT$, $\rho = p_B(z)M_d/RT_d$. Here p_B is given by Eq. (31), T_d follows the dry adiabatic profile $T_d(z) = T_s - \Gamma_d z$, where Γ_d = 9.8 K km^{-1}, while temperature $T(z)$ and molar mass $M(z)$ = $M_d[1-(M_v/M_d)\gamma(z)]$ of the rising air satisfy Eqs. (22)–(23). The positive value of the buoyant force at the surface is due to the lower molar density of the moist versus dry air.

The same figure shows the condensation pressure gradient force that acts in the column where moist saturated air ascends adiabatically:

$$f_C = \frac{p_v}{p}\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial p_v}{\partial z} = -p\frac{\partial \gamma}{\partial z}.$$

Here p and γ conform to Eqs. (22)–(23).

As Fig. 2a shows, the two forces have different spatial localization. The condensation force has a maximum in the lower atmosphere where the amount of vapor is maximized. The buoyant force grows with height following the accumulating difference between the moist adiabatic and dry adiabatic temperatures. At T_s = 300 km at z = 8 km the difference theoretically amounts to over 50 K.

The buoyant force estimated in Fig. 2 represents a theoretical upper limit that assumes no heat transfer between the ascending air and its environment. Maximum temperature differences observed in the horizontal direction in real weather systems are typically much smaller than 50 K at any height. Indeed, even in the warm-core tropical storms – i.e., in intense precipitation events – the horizontal temperature difference between the core and the external environment rarely exceeds a few degrees Kelvin (e.g., Knaff et al., 2000). In Fig. 2b the same forces are plotted, but for the buoyant force estimated for an environment having a mean tropospheric lapse rate of 6.5 K km^{-1} (rather than the dry adiabatic lapse rate 9.8 K km^{-1}). As Fig. 2b shows, the magnitude of the buoyant force drops rapidly with diminishing differences in temperature. Convective available potential energy associated with the buoyant force shown in Fig. 2a is $\int_0^{8\,\mathrm{km}}(f_B/\rho_p)\mathrm{d}z = 8.5\times10^3$ J kg^{-1}. This figure is several times higher than the typical values calculated from the lapse rate soundings of the atmospheric column below 12 km height in the most intense convection events like thunderstorms and tornadoes (e.g., Thompson et al., 2003; Kis and Straka, 2010). Furthermore, in a recent comparison

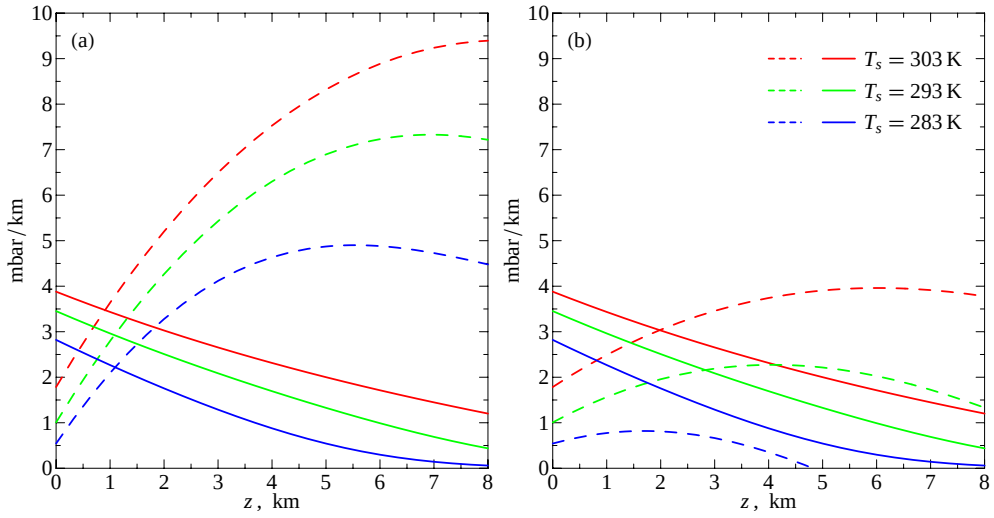


Fig. 2. Condensation force f_C (solid curves) and buoyant force f_B (dashed) acting at height z on a moist air volume ascending in an environment with dry adiabatic lapse rate 9.8 K km^{-1} **(a)** and mean tropospheric lapse rate 6.5 K km^{-1} **(b)** for different values of surface temperature T_S.

of nocturnal and diurnal tornadoes (Kis and Straka, 2010) it was found that significant tornadoes can form at both large and very small CAPE values, pointing to the importance of different mechanisms for the generation of intense circulation systems.

The key message from Fig. 2 is that the condensation force remains comparable in magnitude to the buoyant force even when the latter is allowed (for the sake of argument) to take unrealistically high values. Furthermore the condensation force dominates in the lower atmosphere with the buoyant force more pronounced only in the upper atmosphere. We note that both the buoyant and condensation forces are vertically directed. But we emphasise that their action in the atmosphere is manifested in the formation of horizontal pressure gradients. This follows from the independent stipulation that the atmosphere is vertically in approximate hydrostatic equilibrium. In Sect. 4 we derive the horizontal pressure gradients associated with the condensation force.

4 Relevance of the condensation-induced pressure changes for atmospheric processes

4.1 Horizontal pressure gradients associated with vapor condensation

We have shown that condensation of water vapor produces a drop of air pressure in the lower atmosphere up to an altitude of a few kilometers, Fig. 1c, in a moist saturated hydrostatically adjusted column. In the dynamic atmospheric context the vapor condenses and latent heat is released during the ascent of moist air. The vertical displacement of air is inevitably accompanied by its horizontal displacement. This translates much of the condensation-induced pressure difference to a horizontal pressure gradient. Indeed, as the upwelling air loses its water vapor, the surface pressure diminishes via hydrostatic adjustment producing a surface gradient of total air pressure between the areas of ascent and descent. The resulting horizontal pressure gradient is proportional to the the ratio of vertical to horizontal velocity w/u (Makarieva and Gorshkov, 2009b).

We will illustrate this point regarding the magnitude of the resulting atmospheric pressure gradient for the case of a stationary flow where the air moves horizontally along the x-axis and vertically along the z-axis; there is no dependence of the flow on the y coordinate. The stationary continuity equation for the mixture of condensable (vapor) and non-condensable (dry air) gases can be written as

$$\frac{\partial(N_d u)}{\partial x} + \frac{\partial(N_d w)}{\partial z} = 0; \tag{32}$$

$$\frac{\partial(N_v u)}{\partial x} + \frac{\partial(N_v w)}{\partial z} = S; \tag{33}$$

$$S \equiv w\left(\frac{\partial N_v}{\partial z} - \frac{N_v}{N}\frac{\partial N}{\partial z}\right) = wN\frac{\partial \gamma}{\partial z}, \quad N = N_v + N_d. \tag{34}$$

Here N_d and N_v are molar densities of dry air and saturated water vapor, respectively; $\gamma \equiv N_v/N$, see Eq. (2), S (Eq. 34) is the sink term describing the non-conservation of the condensable component (water vapor). Saturated pressure of water vapor depends on temperature alone. Assuming that vapor is saturated at the isothermal surface we have $\partial N_v/\partial x = 0$, so N_v only depends on z. (This condition necessitates either that there is an influx of water vapor via evaporation from the surface (if the circulation pattern is

immobile), or that the pressure field moves as vapor is locally depleted. The second case occurs in compact circulation patterns like hurricanes and tornadoes (Makarieva and Gorshkov, 2011; Makarieva et al., 2011).) As the air ascends with vertical velocity w, vapor molar density decreases due to condensation and due to the expansion of the gas along the vertical gradient of decreasing pressure. The latter effect equally influences all gases, both condensable and non-condensable. Therefore, the volume-specific rate $S(x,z)$ at which vapor molecules are locally removed from the gaseous phase is equal to $w[\partial N_\mathrm{v}/\partial z - (N_\mathrm{v}/N)\partial N/\partial z]$, see Eqs. (1) and (2). The second term describes the expansion of vapor at a constant mixing ratio which would have occurred if vapor were non-condensable as the other gases. (If vapor did not condense, its density would decrease with height as a constant proportion of the total molar density of moist air as with any other atmospheric gas.) Further clarification of the meaning of (Eq. 34) is provided in Sect. 4.2 below, and in Appendix A which offers additional interpretation, see also (Gorshkov et al., 2012).

The mass of dry air is conserved, Eq. (32). Using this fact, Eq. (34) and $\partial N_\mathrm{v}/\partial x = 0$ in Eq. (33) one can see that

$$N\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)+w\frac{\partial N}{\partial z}=0. \tag{35}$$

Now expressing $\partial N/\partial x = \partial N_\mathrm{d}/\partial x + \partial N_\mathrm{v}/\partial x$ from Eqs. (32) and (33) with use of Eq. (35) we obtain

$$\frac{\partial N}{\partial x}=\frac{w}{u}\left(\frac{\partial N_\mathrm{v}}{\partial z}-\frac{N_\mathrm{v}}{N}\frac{\partial N}{\partial z}\right). \tag{36}$$

Using the equation of state for moist air $p = NRT$ and water vapor $p_\mathrm{v} = N_\mathrm{v}RT$ we obtain from Eqs. (36) and (25):

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\left(\frac{\partial p_\mathrm{v}}{\partial z}-\frac{p_\mathrm{v}}{p}\frac{\partial p}{\partial z}\right)\frac{w}{u}=-\frac{\gamma p}{h_\gamma}\frac{w}{u}. \tag{37}$$

Here velocities w and u represent vertical and horizontal (along x-axis) velocities of the ascending air flow, respectively. Scale height h_γ is defined in Eq. (25). A closely related formula for horizontal pressure gradient can be applied to an axis-symmetric stationary flow with $\partial p/\partial x$ replaced by radial gradient $\partial p/\partial r$ (Makarieva and Gorshkov, 2009b).

Equation (37) shows that the difference between the scale heights h_v and h (Eq. 25) of the *vertical* pressure distributions for water vapor and moist air leads to the appearance of a *horizontal* pressure gradient of moist air as a whole (Makarieva and Gorshkov, 2007; Gorshkov et al., 2012). This equation contains the ratio of vertical to horizontal velocity. Estimating this ratio it is possible to evaluate, for a given circulation, what sorts of horizontal pressure gradients are produced by condensation and whether these gradients are large enough to maintain the observed velocities via the positive physical feedback described by Eq. (37).

For example, for Hadley cells at $h_\gamma = 9$ km, $\gamma = 0.03$ and a typical ratio of $w/u \sim 2\times10^{-3}$ (Rex, 1958) we obtain from Eq. (37) a pressure gradient of $0.7\,\mathrm{Pa\,km^{-1}}$. On a distance of 1500 km such a gradient would correspond to a pressure difference of around 10 hPa, which is close to the upper range of the actually observed pressure differences in the region (e.g., Murphree and Van den Dool, 1988, Fig. 1). Similar pressure differences and gradients, also comparable in magnitude to δp_s (Eq. 27) and $\partial p/\partial r$ are observed within cyclones, both tropical and extratropical, and persistent atmospheric patterns in the low latitudes (Holland, 1980; Zhou and Lau, 1998; Brümmer et al., 2000; Nicholson, 2000; Simmonds et al., 2008). For example, the mean depth of Arctic cyclones, 5 hPa (Simmonds et al., 2008), is about ten times smaller than the mean depth of a typical tropical cyclone (Holland, 1980). This pattern agrees well with the Clausius-Clapeyron dependence of δp_s, Fig. 1b, which would predict an 8 to 16-fold decrease with mean oceanic temperature dropping by 30–40 °C. The exact magnitude of the pressure gradient and air velocities will depend on the horizontal size of the circulation pattern, the magnitude of friction and degree of the radial symmetry (Makarieva and Gorshkov, 2009a,b, 2011; Makarieva et al., 2011).

Our estimate of the horizontal pressure gradient in a Hadley cell illustrates that our approach when coupled to fundamental atmospheric parameters, yields horizontal pressure gradients of magnitudes similar to those actually observed in large-scale circulation patterns. If we had obtained a much smaller magnitude from Eq. (34) we could conclude that the impact of the vapor sink is negligible and cannot explain the observations. This did not happen. Rather the result adds credibility to our proposal that the vapor sink is a major cause of atmospheric pressure gradients.

Difficulties in the understanding of atmospheric circulation relate to circumstances where uncertainty over the dynamics of water vapor play a role – even if the nature of that role remains debatable. For example, modern global circulation models do not satisfactorily account for the water cycle of the Amazon River Basin, with the estimated moisture convergence being half the actual amounts estimated from the observed runoff values (Marengo, 2006). We note that climate science offers no quantitative theory of Hadley circulation based on current theories and the effects of differential heating alone (Held and Hou, 1980; Fang and Tung, 1999; Schneider, 2006). Efforts to address this challenge are ongoing but progress is limited (e.g., Lindzen and Hou, 1988; Robinson, 2006; Walker and Schneider, 2005, 2006). In one recent review concerning theories of general circulation the understanding of atmospheric moisture and its influences, particularly, *lack of relevant theoretical concepts*, were identified as a persistent challenge (Schneider, 2006).

Furthermore, many climate researchers readily acknowledge that the current incomplete understanding of the general circulation precludes a theory-based analysis, from fundamental physical principles, of the role of latitudinal atmospheric mixing in stabilizing the Earth's thermal regime important – this is not a minor and thus neglected detail

but is central in debates concerning climate sensitivity (e.g., Lindzen and Choi, 2009; Trenberth et al., 2010). It would seem to many that new ideas are needed. If these ideas were obvious, and followed directly from current paradigms, they would have already been identified and accepted – thus we should not be surprised that the new ideas we all seek may challenge conventional perspectives. We conclude that our approaches are a promising new avenue for further examination.

4.2 Condensation rate and hydrostatic equilibrium

Let us dwell in greater detail on the physical meaning of Eq. (34) that specifies condensation rate in a unit volume. The second term in brackets, $(N_v/N)\partial N/\partial z$, describes how the molar density of vapor would change during adiabatic ascent if the water vapor were non-condensable and there would be no condensation in the column. This reference term is needed to discriminate the density change caused by condensation from the density change due to gravitational expansion. As we presume that moist air *as a whole* is in hydrostatic equilibrium, see Eq. (20), it is *total* molar density N that must be used as such a reference. Indeed, total molar density remains in hydrostatic equilibrium in the absence of condensation as well as in its presence. In the limit $N_v \to N$ Eq. (34) gives a physically meaningful result, $S{=}0$. Indeed, when atmosphere consists of water vapor only *and* is in hydrostatic equilibrium, no condensation takes place. Condensation occurs only when water vapor distribution is non-equilibrium.

When condensation is absent, dry air is in hydrostatic equilibrium. But when water vapor condenses and its distribution is compressed several-fold compared to the hydrostatic distribution, the dry air must be *"stretched"* compared to its hydrostatic distribution. Only in this case, when the non-equilibrium deficit of vapor in the upper atmosphere is compensated by the non-equilibrium excess of dry air, the moist air as a whole will remain in equilibrium. The distribution of N_d is non-equilibrium and cannot be used instead of N in the reference term in Eq. (34).

The horizontal pressure gradient produced by condensation is therefore a direct consequence of hydrostatic adjustment. The air expands upwards to compensate for vapor deficit, thus its pressure at the surface diminishes in the region of ascent. If no hydrostatic adjustment took place, the dry air would remain in hydrostatic equilibrium (while moist air as a whole would not). In this case dry air molar density N_d could be used in the reference term in Eq. (34). Putting N_d instead of N in Eq. (34), i.e., replacing S by $S_d{\equiv}\partial N_v/\partial z{-}(N_v/N_d)\partial N_d/\partial z$ in Eq. (33), and performing all the derivations in Sect. 4.1, one obtains $\partial p/\partial x{=}0$. This result is obvious: in the absence of hydrostatic adjustment, the dry air distribution is not affected by condensation and remains in equilibrium both in horizontal and vertical dimensions. The non-equilibrium gradient of total air pressure remains located in the vertical dimension and is not translated onto horizontal dimension. Such a situation could take place in an atmosphere that would be much higher than it is wide. In the real atmosphere which is effectively very thin, most part of the non-equilibrium pressure gradient is transferred to the horizontal plane via rapid hydrostatic adjustment. Note that $S_d{\equiv}S/(1{-}\gamma)$ and $S{\equiv}S_d/(1{+}\gamma_d)$, $\gamma_d{\equiv}N_v/N_d$. The expressions for condensation rates in situations with or without hydrostatic adjustment differ, respectively, by the absence or presence of the multiplier $1/(1-\gamma)$ in Eq. (34).

We emphasize that whether the hydrostatic adjustment takes place or not, the disequilibrium gradient of total air pressure persists, being located, respectively, either in the horizontal or in the vertical dimension. Note that if $S = S_d$ then $S \equiv S_d \equiv 0$, condensation is absent and atmospheric pressure is in equilibrium in all directions (see Appendix A).

When asking for feedback on earlier versions of this text several readers assumed that Eq. (34) for condensation rate is *an approximate form of the exact expression* (Eq. 33). Here we address this misunderstanding, see also Appendix A for more details. Equation (33) represents a general continuity (mass balance) equation for water vapor. It does not contain any information about condensation – indeed, it is equally valid for condensation $S{<}0$, evaporation $S{>}0$ or absence of phase transitions altogether, $S{=}0$. Also, it is equally valid for any dependence of S on spatial coordinates, velocities, temperature, pressure or any other variables. In other words, the continuity equation universally applies to all circulation events. In the meantime, our task here is to study only those circulation patterns that are induced by condensation associated with adiabatic ascent. To do so, we need to specify term S in Eq. (33) so we can use this equation for the determination of condensation-induced pressure gradients. This is done by means of Eq. (34), which says that: (1) in the considered volume the only source of phase transitions is condensation; (2) this condensation is caused by the adiabatic ascent of moist saturated air (no condensation occurs if the air moves horizontally because of isothermal surface) and (3) that the moist saturated air is in hydrostatic equilibrium. We stress that none of these specific assumptions are contained in the universal continuity equation (Eq. 33). (In contrast to the generally applicable Eq. (33), Eq. (34) would not be valid, for example, for the case of adiabatic *descent*, or for a horizontal motion along a non-isothermal surface.) We emphasize that S (Eq. 34) is based on specific physical considerations, not on formal mathematical analogies.

4.3 Regarding previous oversight of the effect

For many readers a major barrier to acceptance of our propositions may be to understand how such a fundamental physical mechanism has been overlooked until now. Why has this theory come to light only now in what is widely regarded as a mature field? We can offer a few thoughts based on our readings and discussions with colleagues.

The condensation-induced pressure gradients that we have been examining are associated with density gradients that have been conventionally considered as minor and thus ignored in the continuity equation (e.g., Sabato, 2008). For example, a typical Δp=50 hPa pressure difference observed along the horizontally isothermal surface between the outer environment and the hurricane center (e.g., Holland, 1980) is associated with a density difference of only around 5 %. This density difference can be safely neglected when estimating the resulting air velocity u from the known pressure differences Δp. Here the basic scale relation is given by Bernoulli's equation, $\rho u^2/2=\Delta p$. The point is that a 5 % change in ρ does not significantly impact the magnitude of the estimated air velocity *at a given* Δp. But, as we have shown in the previous section, for the determination of the pressure gradient (Eq. 37) the density difference and gradient (Eq. 36) are key.

Considering the equation of state (Eq. 5) for the horizontally isothermal surface we have $p=C\rho$, where $C\equiv RT/M$=const. Irrespective of why the considered pressure difference arises, from Bernoulli's equation we know that $u^2=2\Delta p/\rho=2C\Delta\rho/\rho$, $\Delta\rho=\rho_0-\rho$. Thus, if one puts $\Delta\rho/\rho=\Delta p/p$ equal to zero, no velocity forms and there is no circulation. Indeed, we have $u^2=2\Delta p/\rho=2C\Delta\rho/\rho=2C(\Delta\rho/\rho_0)(1+\Delta\rho/\rho_0+\ldots)$. As one can see, discarding $\Delta\rho$ compared to ρ does indeed correspond to discarding the higher order term of the smallness parameter $\Delta\rho/\rho$. But with respect to the pressure gradient, the main effect is proportional to the smallness parameter $\Delta\rho/\rho_0$ itself. If the latter is assumed to be zero, the effect is overlooked. We suggest that this dual aspect of the magnitude of condensation-related density changes has not been recognized and this has contributed to the neglect of condensation-associated pressure gradients in the Earth's atmosphere.

Furthermore, the consideration of air flows associated with phase transitions of water vapor has been conventionally reduced to the consideration of the net fluxes of matter *ignoring the associated pressure gradients*. Suppose we have a linear circulation pattern divided into the ascending and descending parts, with similar evaporation rates E (kg H_2O m^{-2} s^{-1}) in both regions. In the region of ascent the water vapor precipitates at a rate P. This creates a mass sink $E-P$, which has to be balanced by water vapor import from the region of descent. Approximating the two regions as boxes of height h, length l and width d, the horizontal velocity u_t associated with this mass transport can be estimated from the mass balance equation

$$ld(P-E)=u_t\rho hd,\ u_t=\frac{(P-E)}{\rho}\frac{l}{h}. \quad (38)$$

Equation (38) says that the depletion of air mass in the region of ascent at a total rate of $ld(P-E)$ is compensated for by the horizontal air influx from the region of descent that goes with velocity u_t via vertical cross-section of area hd. For typical values in the tropics with $P-E\sim$5 mm d^{-1}=5.8×10^{-5} kg H_2O m^{-2} s^{-1} and $l/h\sim2\times10^3$ we obtain $u_t\sim$1 cm s^{-1}. For regions where precipitation and evaporation are smaller, the value of u_t will be smaller too. For example, Lorenz (1967) estimated u_t to be $\sim$0.3 cm s^{-1} for the air flow across latitude 40° S.

With $\rho\approx\rho_d$ the value of u_t can be understood as the mass-weighted horizontal velocity of the dry air+water vapor mixture, which is the so-called barycentric velocity, see, e.g., (Wacker and Herbert, 2003; Wacker et al., 2006). There is no net flux of dry air between the regions of ascent and descent, but there is a net flux of water vapor from the region of descent to the region of ascent. This leads to the appearance of a non-zero horizontal velocity u_t directed towards the region of ascent. Similarly, vertical barycentric velocity at the surface is $w_t\approx(E-P)/\rho$ (Wacker and Herbert, 2003), which reflects the fact that there is no net flux of dry air via the Earth's surface, while water vapor is added via evaporation or removed through precipitation. The absolute magnitude of vertical barycentric velocity w_t for the calculated tropical means is vanishingly small, $w_t\sim$+0.05 mm s^{-1}.

We speculate that the low magnitude of barycentric velocities has contributed to the judgement that water's phase transitions cannot be a major driver of atmospheric *dynamics*. However, barycentric velocities should not be confused with the actual air velocities (e.g., Meesters et al., 2009). Unlike the former, the latter cannot be estimated *without considering atmospheric pressure gradients* (Makarieva and Gorshkov, 2009c). For example, in the absence of friction, the maximum linear velocity u_c that could be produced by condensation in a linear circulation pattern in the tropics constitutes

$$u_c=\sqrt{2\Delta p/\rho}\sim 40\ \text{m s}^{-1}\gg u_t. \quad (39)$$

Here Δp was taken equal to 10 hPa as estimated from Eq. (37) for Hadley cell in Sect. 4.1. As one can see, u_c (Eq. 39) is much greater than u_t (Eq. 38). As some part of potential energy associated with the condensation-induced pressure gradient is lost to friction (Makarieva and Gorshkov, 2009a), real air velocities observed in large-scale circulation are an order of magnitude smaller than u_c, but still nearly three orders of magnitude greater than u_t.

4.4 The dynamic efficiency of the atmosphere

We will now present another line of evidence for the importance of condensation-induced dynamics: we shall show that it offers an improved understanding of the efficiency with which the Earth's atmosphere can convert solar energy into kinetic energy of air circulation. While the Earth on average absorbs about $I\approx2.4\times0^2$ W m^{-2} of solar radiation (Raval and Ramanathan, 1989), only a minor part $\eta\sim10^{-2}$ of this energy is converted to the kinetic power of atmospheric and oceanic movement. Lorenz (1967, p. 97) notes, "the determination and explanation of efficiency η constitute the fundamental observational and theoretical problems of

atmospheric energetics". Here the condensation-induced dynamics yields a relationship that is quantitative in nature and can be estimated directly from fundamental atmospheric parameters.

A pressure gradient is associated with a store of potential energy. The physical dimension of pressure gradient coincides with the dimension of force per unit air volume, i.e. $1\,\mathrm{Pa\,m^{-1}}=1\,\mathrm{N\,m^{-3}}$. When an air parcel moves along the pressure gradient, the potential energy of the pressure field is converted to the kinetic energy. The dimension of pressure is identical to the dimension of energy density: $1\,\mathrm{Pa}=1\,\mathrm{N\,m^{-2}}=1\,\mathrm{J\,m^{-3}}$. As the moist air in the lower part of the atmospheric column rises to height h_γ where most part of its water vapor condenses, the potential energy released amounts to approximately δp_s (Eq. 27). The potential energy released π_v per unit mass of water vapor condensed, dimension $\mathrm{J\,(kg\,H_2O)^{-1}}$, thus becomes

$$\pi_\mathrm{v}(T_\mathrm{s}) = \frac{\delta p_\mathrm{s}}{\rho_\mathrm{v}} = \frac{RT_\mathrm{s}}{M_\mathrm{v}}\left(1-\frac{M_\mathrm{v}gT_\mathrm{s}}{L\Gamma_\mathrm{s}}\right). \quad (40)$$

The global mean precipitation rate is $P\sim10^3\,\mathrm{kg\,H_2O\,m^{-2}\,yr^{-1}}$ (L'vovitch, 1979), global mean surface temperature is $T_\mathrm{s}=288\,\mathrm{K}$ and the observed mean tropospheric lapse rate $\Gamma_\mathrm{o}=6.5\,\mathrm{K\,km^{-1}}$ (Glickman, 2000). Using these values and putting Γ_o instead of the moist adiabatic lapse rate Γ_s in Eq. (40), we can estimate the global mean rate $\Pi_\mathrm{v}=P\pi_\mathrm{v}$ at which the condensation-related potential energy is available for conversion into kinetic energy. At the same time we also estimate the efficiency $\eta=\Pi_\mathrm{v}/I$ of atmospheric circulation that can be generated by solar energy via the condensation-induced pressure gradients:

$$\Pi_\mathrm{v} = P\pi_\mathrm{v} \sim 3.5\,\mathrm{W\,m^{-2}},\ \eta\sim0.015. \quad (41)$$

Thus, the proposed approach not only clarifies the dynamics of solar energy conversion to the kinetic power of air movement (solar power spent on evaporation → condensation-related release of potential power → kinetic power generation), but it does so in a quantiatively tractable manner, explaining the magnitude of the dissipative power associated with maintaining the kinetic energy of the Earth's atmosphere.

Our estimate of atmospheric efficiency differs fundamentally from a thermodynamic approach based on calculating the entropy budgets under the assumption that the atmosphere works as a heat engine, e.g. Pauluis et al. (2000); Pauluis and Held (2002a,b), see also Makarieva et al. (2010). The principal limitation of the entropy-budget approach is that while the upper bounds on the amount of work that *could* be produced are clarified, there is no indication regarding the degree to which such work *is* actually performed. In other words, the presence of an atmospheric temperature gradient is insufficient to guarantee that mechanical work is produced. In contrast, our estimate (Eq. 41) is based on an explicit calculation of mechanical work derived from a defined atmospheric pressure gradient. It is, to our knowledge, the only available estimate of efficiency η made from the basic physical parameters that characterize the atmosphere.

4.5 Evaporation and condensation

While condensation releases the potential energy of atmospheric water vapor, evaporation, conversely, replenishes it. Here we briefly dwell on some salient differences between evaporation and condensation to complete our picture regarding how the phase transitions of water vapor generate pressure gradients.

Evaporation requires an input of energy to overcome the intermolecular forces of attraction in the liquid water to free the water molecule to the gaseous phase, as well as to compress the air. That is, work is performed against local atmospheric pressure to make space for vapor molecules that are being added to the atmosphere via evaporation. This work, associated with evaporation, is the source of potential energy for the condensation-induced air circulation. Upon condensation, two distinct forms of potential energy arise. One is associated with the potential energy of raised liquid drops – this potential energy dissipates to friction as the drops fall. The second form of potential energy is associated with the formation of a non-equilibrium pressure gradient, as the removal of vapor from the gas phase creates a pressure shortage of moist air aloft. This pressure gradient produces air movement. In the stationary case total frictional dissipation in the resulting circulation is balanced by the fraction of solar power spent on the work associated with evaporation.

Evaporation is, fundamentally, a surface-specific process because it represents a flux of water molecules via the surface of liquid. In contrast, condensation is a volume-specific process that affects vapor molecules distributed in a certain volume. The balance between condensation and evaporation demands that to compensate for the amount of moisture condensed in a certain volume vapor must be transported to that local volume via its borders. Adding more gas to a gas volume where condensation has occurred is associated with compression of the gas in the volume and, hence, with performing work on the gas.

In the stationary case, as long there is a supply of energy and the relative humidity is less than unity, evaporation from the planetary surface is adding water vapor to the atmospheric column without changing its temperature. The rate of evaporation is affected by turbulent mixing and is usually related to the *horizontal* wind speed at the surface. The global mean power of evaporation cannot exceed the power of solar radiation.

The primary cause of condensation is the cooling of air masses as the moist air ascends and its temperature drops. Provided there is enough water vapor in the ascending air, at a local and short-term scale, condensation is not governed by solar power but by stored energy and can occur at an arbitrarily high rate dictated by the *vertical* velocity of the ascending flow, see Eq. (34).

Any circulation pattern includes areas of lower pressure where air ascends, as well as higher pressure areas where it descends. Condensation rates are non-uniform across these areas – being greater in areas of ascent. Importantly, in such areas of ascent condensation involves water vapor that is locally evaporated along with often substantial amounts of additional water vapor transported from elsewhere. Therefore, the mean rate of condensation in the ascending region of any circulation pattern is *always* higher than the local rate of evaporation. This inherent spatial non-uniformity of the condensation process determines horizontal pressure gradients.

Consider a large-scale stationary circulation where the regions of ascent and descent are of comparable size. A relevant example would be the annually averaged circulation between the Amazon River Basin (the area of ascent) and the region of Atlantic ocean where the air returns from the Amazon to descend depleted of moisture. Assuming that the relative humidity at the surface, horizontal wind speed and solar power are approximately the same in the two regions, mean evaporation rates should be roughly similar as well (i.e., coincide at least in the order of magnitude). However, the condensation (and precipitation) rates in the two regions will be consistently different. In accordance with the picture outlined above, the average precipitation rate P_a in the area of ascent should be approximately double the average value of regional evaporation rate E_a. The pressure drop caused by condensation cannot be compensated by local evaporation so as to produce a net zero effect on air pressure. This is because in the region of ascent *both* the local water vapor evaporated from the forest canopy of the Amazon forest at a rate $E_a \sim E_d$ as well as imported water vapor evaporated from the ocean surface at a rate E_d precipitate, $P_a = E_d + E_a$. This is confirmed by observations: precipitation in the Amazon river basin is approximately double the regional evaporation, $P_a \approx 2E_a$ (Marengo, 2004). The difference between regional rates of precipitation and evaporation on land, $R = P_a - E_a \sim E_a$, is equal to regional runoff – aerial or liquid. In the region of descent the runoff thus defined is negative and corresponds to the flux of water vapor that is exported away from the region with the air flow. Where R is positive, it represents the flux of imported atmospheric water vapor and the equal flux of liquid water that leaves the region of ascent to the ocean.

The fact that the climatological means of evaporation and precipitation are seldom observed to be equal has been recognized in the literature (e.g., Wacker and Herbert, 2003), as has the fact that local mean precipitation values are consistently larger than those for evaporation (e.g., Trenberth et al., 2003).

The inherent spatial non-uniformity of the condensation process explains why it is condensation that principally determines the pressure gradients associated with water vapor. So, while evaporation is adding vapor to the atmosphere and thus *increasing* local air pressure, while condensation in contrast *decreases* it, the evaporation process is significantly more even and uniform spatially than is condensation. Roughly speaking, in the considered example evaporation increases pressure near equally in the regions of ascent and descent, while condensation decreases pressure only in the region of ascent. Moreover, as discussed above, the rate at which the air pressure is decreased by condensation in the region of ascent is always higher than the rate at which local evaporation would increase air pressure. The difference between the two rates is particularly marked in heavily precipitating systems like hurricanes, where precipitation rates associated with strong updrafts can exceed local evaporation rates by more than an order of magnitude (e.g., Trenberth and Fasullo, 2007).

We have so far discussed the magnitude of pressure gradients that are produced and maintained by condensation in the regions where the moist air ascends. This analysis is applicable to observed condensation processes that occur on different spatial scales, as we illustrated on the example of Hadley cell. We emphasize that to determine *where* the ascending air flow and condensation predominantly occur is a separate physical problem. For example, why the updrafts are located over the Amazon and the downdrafts are located over the Atlantic ocean and not vice versa. Here regional evaporation patterns play a crucial role. In Sect. 4.1 we have shown that constant relative humidity associated with surface evaporation, which ensures that $\partial N_v/\partial x = 0$, is necessary for the condensation to take place. Using the definition of γ (Eq. 2) Eq. (37) can be re-written as follows:

$$\frac{\partial \ln \gamma}{\partial x} = -\frac{w}{u}\frac{\partial \gamma}{\partial z}. \tag{42}$$

This equation shows that the decrease of γ with height and, hence, condensation is only possible when γ grows in the horizontal direction, $\partial \ln \gamma/\partial x > 0$. Indeed, surface pressure is lower in the region of ascent. As the air moves towards the region of low pressure, it expands. In the absence of evaporation, this expansion would make the water vapor contained in the converging air unsaturated. Condensation at a given height would stop.

Evaporation adds water vapor to the moving air to keep water vapor saturated and sustain condensation. The higher the rate of evaporation, the larger the ratio w/u at a given $\partial\gamma/\partial z$ and, hence, the larger the pressure gradient (Eq. 37) that can be maintained between the regions of ascent and descent. A small, but persistent difference in mean evaporation $\Delta E < E$ between two adjacent regions, determines the predominant direction of the air flow. This explains the role of the high leaf area index of the natural forests in keeping evaporation higher than evaporation from the open water surface of the ocean, for the forests to become the regions of low pressure to draw moist air from the oceans and not vice versa (Makarieva and Gorshkov, 2007, 2010; Makarieva et al., 2013). Where the surface is homogeneous with respect to evaporation (e.g., the oceanic surface), the

spatial and temporal localization of condensation events is likely to fluctuate in a random fashion.

5 Discussion: condensation dynamics versus differential heating in the generation of atmospheric circulation

In Sect. 2 we argued that condensation cannot occur adiabatically at constant volume but is always accompanied by a pressure drop in the local air volume where it occurs. We concluded that the statement that "the pressure drop by adiabatic condensation is overcompensated by latent heat induced pressure rise of the air" (Pöschl, 2009, p. S12437) was not correct. In Sect. 3 we quantified the pressure change produced by condensation as dependent on altitude in a column in hydrostatic balance, to show that in such a column the pressure drops upon condensation everywhere in the lower atmosphere up to several kilometers altitude, Fig. 1c. The estimated pressure drop at the surface increases exponentially with growing temperature and amounts to over 20 hPa at 300 K, Fig. 1b.

In Sect. 4 we discussed the implications of the condensation-induced pressure drop for atmospheric dynamics. We calculated the horizontal pressure gradients produced by condensation and the efficiency of the atmosphere as a dynamic machine driven by condensation. Our aim throughout has been to persuade the reader that these implications are significant in numerical terms and deserve a serious discussion and further analysis. We will conclude by discussing condensation in contrast to differential heating, the latter conventionally considered the major driver dominating atmospheric dynamics.

Atmospheric circulation is only maintained if, in agreement with the energy conservation law, there is a pressure gradient to accelerate the air masses and sustain the existing kinetic energy of air motion against dissipative losses. For centuries, starting from the works of Hadley and his predecessors, the air pressure gradient has been qualitatively associated with the differential heating of the Earth's surface and the Archimedes force (buoyancy) which makes the warm and light air rise, and the cold and heavy air sink (e.g., Gill, 1982, p. 24). This idea can be illustrated by Fig. 1c, where the warmer atmospheric column appears to have higher air pressure at some heights than the colder column. In the conventional paradigm, this is expected to cause air divergence aloft away from the warmer column, which, in its turn, will cause a drop of air pressure at the surface and the resulting surface flow from the cold to the warm areas. Despite the physics of this differential heating effect being straightforward in qualitative terms, the quantitative problem of predicting observed wind velocities from the fundamental physical parameters has posed enduring difficulties. Slightly more than a decade before the first significant efforts in computer climate modelling, Brunt (1944) as cited by Lewis (1998) wrote:

> "It has been pointed out by many writers that it is impossible to derive a theory of the general circulation based on the known value of the solar constant, the constitution of the atmosphere, and the distribution of land and sea … It is only possible to begin by assuming the known temperature distribution, then deriving the corresponding pressure distribution, and finally the corresponding wind circulation".

Brunt's difficulty relates to the realization that pressure differences associated with atmospheric temperature gradients cannot be fully transformed into kinetic energy. Some energy is lost to thermal conductivity without generating mechanical work. This fraction could not be easily estimated by theory in his era – and thus it has remained to the present. The development of computers and appearance of rich satellite observations have facilitated empirical parameterizations to replicate circulation in numerical models. However, while these models provide reasonable replication of the quantitative features of the general circulation they do not constitute a quantitative physical proof that the the observed circulation is driven by pressure gradients associated with differential heating. As Lorenz (1967, p. 48) emphasized, although "it is sometimes possible to evaluate the long-term influence of each process affecting some feature of the circulation by recourse to the observational data", such knowledge "will not by itself constitute an explanation of the circulation, since it will not reveal why each process assumes the value which it does".

In comparison to temperature-associated pressure difference, the pressure difference associated with water vapor removal from the gas phase can develop over a surface of uniform temperature. In addition, this pressure difference is physically anchored to the lower atmosphere. Unlike the temperature-related pressure difference, it does not demand the existence of some downward transport of the pressure gradient from the upper to the lower atmosphere (i.e., the divergence aloft from the warmer to the colder column as discussed above) to explain the appearance of low altitude pressure gradients and the generation of surface winds.

Furthermore, as the condensation-related pressure difference δp_s is not associated with a temperature difference, the potential energy stored in the pressure gradient can be nearly fully converted to the kinetic energy of air masses in the lower atmosphere without losses to heat conductivity. This fundamental difference between the two mechanisms of pressure fall generation can be traced in hurricanes. Within the hurricane there is a marked pressure gradient at the surface. This difference is quantitatively accountable by the condensation process (Makarieva and Gorshkov, 2009b, 2011). In the meantime, the possible temperature difference in the upper atmosphere that might have been caused by the difference in moist versus dry lapse rates between the regions of ascent and descent is cancelled by the strong horizontal

mixing (Montgomery et al., 2006). Above approximately 1.5 km the atmosphere within and outside the hurricane is approximately isothermal in the horizontal direction (Montgomery et al., 2006, Fig. 4), see also Knaff et al. (2000). Therefore, while the temperature-associated pressure difference above height z_c, Fig. 1c, is not realized in the atmosphere, the condensation-associated pressure difference below height z_c apparently is.

Some hints on the relative strengths of the circulation driven by differential heating compared to condensation-induced circulation can be gained from evaluating wind velocities in those real processes that develop in the lower atmosphere without condensation. These are represented by dry (precipitation-free) breezes (such as diurnal wind patterns driven by the differential heating of land versus sea surfaces) and dust devils. While both demand very large temperature gradients (vertical or horizontal) to arise as compared to the global mean values, both circulation types are of comparatively low intensity and have negligible significance to the global circulation. For example, dust devils do not involve precipitation and are typically characterized by wind velocities of several meters per second (Sinclair, 1973). The other type of similarly compact rotating vortexes – tornadoes – that are always accompanied by phase transitions of water – develop wind velocities that are at least an order of magnitude higher (Wurman et al., 1996). More refined analyses of Hadley circulation (Held and Hou, 1980) point towards the same conclusion: theoretically described Hadley cells driven by differential heating appear to be one order of magnitude weaker than the observed circulation (Held and Hou, 1980; Schneider, 2006), see also Caballero et al. (2008). While the theoretical description of the general atmospheric circulation remains unresolved, condensation-induced dynamics offers a possible solution (as shown in Sect. 4.1).

Our approach and theory have other significant implications. Some have been discussed in previous papers, for example with regard to the development of hurricanes (Makarieva and Gorshkov, 2009a,b) and the significance of vegetation and terrestrial evaporation fluxes in determining large scale continental weather patterns (Makarieva et al., 2006, 2009; Makarieva and Gorshkov, 2007; Sheil and Murdiyarso, 2009). Recently accumulated evidence directly documents air flows induced by the phase transitions of water vapor (Chikoore and Jury, 2010). Other implications are likely to be important in predicting the global and local nature of climate change – a subject of considerable concern and debate at the present time (Pielke et al., 2009; Schiermeier, 2010).

In summary, although the formation of air pressure gradients via condensation has not received adequate theoretical attention in climatological and meteorological sciences, here we have argued that this lack of attention has been undeserved. Condensation-induced dynamics emerges as a new field of investigations that can significantly enrich our understanding of atmospheric processes and climate change. We very much hope that our present account will provide a spur for further investigations both theoretical and empirical into these important, but as yet imperfectly characterized, phenomena.

Appendix A

On the physical meaning of Eq. (34) for condensation rate

Equation (34) expresses condensation rate as the difference between (a) the total change of vapor density with height and (b) the density change caused by adiabatic expansion. Here we explore the physical meaning of this expression from a different perspective. We shall show that Eq. (34) follows directly from the condition that the vertical distribution of moist air remains in equilibrium under the assumption that condensation rate S is linear over the amount of vapor (i.e., condensable gas) in the atmosphere.

A1 Linearity of condensation rate over the molar density N_v of water vapor

The linearity assumption is justified by the particular physical nature and stoichiometry of condensation, with gas turning to liquid: condensation is a first-order reaction over saturated molar density N_v of the condensing gas. This can be experimentally tested by considering condensation of water with different isotopic composition (e.g., Fluckiger and Rossi, 2003). (Note, for example, that the reverse process (evaporation) is a zero-order reaction over N_v.)

The rate of first-order reactions is directly proportional to the molar density of the reagent, with the proportionality constant having the dimension of inverse time: $S = C N_v$, where C (dimension s^{-1}) is in the general case independent of N_v. In chemical kinetics C depends on temperature and the molecular properties of the reagent as follows from the law of mass action. Since the saturated concentration N_v of condensable gas depends on temperature as dictated by the Clausius-Clapeyron law, we can ask what the proportionality coefficient C physically means in this case. Different substances have different partial pressures of saturated vapor at any given temperature – this is controlled by the vaporization constant L and the molecular properties of the substance. Note too that for any given substance (like water) the saturated concentration depends on various additional parameters including the curvature of the the liquid surface and availability of condensation nuclei. Therefore, a range of saturated concentrations is possible at any given temperature. This allows one to consider C and N_v as independent variables in the space of all possible combinations of C and N_v.

A2 The equilibrium

The notions of equilibrium and deviation from it are key to determining the rate of any reaction. For example, in the case

of evaporation the deviation from equilibrium is measured by the water vapor deficit: the deviation of relative humidity from the (equilibrium) unity value. Atmospheric condensation is peculiar in being physically associated with air movement in a particular direction – water vapor condenses as the air moves vertically towards a lower temperature.

Here, in the context of this derivation, by invoking the concept of *equilibrium* we mean the vertical distribution that the water vapor would locally take in the absence of condensation, all other conditions being equal. Let us denote the inverse scale height of such an equilibrium distribution for k_E. Condensation rate S is then proportional to the first order deviation k_v of the *observed* vertical distribution of water vapor from the equilibrium:

$$k_\mathrm{v} = -\frac{1}{N_\mathrm{v}}\frac{\partial N_\mathrm{v}}{\partial z} - k_\mathrm{E}. \tag{A1}$$

The physics of Eq. (A1) consists of the fact that the character of the considered equilibrium distribution is not affected by condensation. For example, for the case of *hydrostatic equilibrium* any gas having molar mass M, temperature T and finding itself on a planet with acceleration of gravity g in the presence of a temperature gradient $\partial T/\partial z$ will have a distribution of its molar density following $-\partial N/\partial z = k_\mathrm{E} N$, where $k_\mathrm{E} = Mg/RT + (1/T)\partial T/\partial z$. (But note that Eq. (A1) can also be applied to describe physical equilibria of a different nature. For example, in a vertically isothermal atmosphere in the absence of gravity $k_\mathrm{E} = 0$.)

Such a formulation (proportionality of condensation rate to k_v) presumes that the deviation k_v of the vertical distribution of water vapor from equilibrium is due to condensation alone. (This premise is empirically testable: where condensation is absent, the vertical water vapor distribution should have the same scale height as the non-condensable gases and moist air as a whole.) This removes the need to consider N_v as the saturated vapor concentration. When $k_\mathrm{v} = 0$, the condensation rate is zero independent of whether water vapor is saturated or not. When $k_\mathrm{v} \neq 0$, N_v is saturated water vapor by formulation.

A3 Distribution of vapor, dry air and moist air as a whole

We write the condition that moist air with molar density N is in equilibrium in the vertical dimension as:

$$-\frac{1}{N}\frac{\partial N}{\partial z} \equiv k = k_\mathrm{E},\ N = N_\mathrm{v} + N_\mathrm{d}. \tag{A2}$$

Condensation causes the distribution of vapor N_v to deviate from the equilibrium distribution. The condition that moist air as a whole nevertheless remains in equilibrium causes dry air N_d to also deviate from the equilibrium – but in the opposite direction to the vapor:

$$-\frac{\partial N_\mathrm{v}}{\partial z} = (k + k_\mathrm{v})N_\mathrm{v},\ -\frac{\partial N_\mathrm{d}}{\partial z} = (k + k_\mathrm{d})N_\mathrm{d}, \tag{A3}$$

$$k_\mathrm{v} N_\mathrm{v} + k_\mathrm{d} N_\mathrm{d} = 0, \tag{A4}$$

$$k_\mathrm{v} = -\frac{1}{N_\mathrm{v}}\frac{\partial N_\mathrm{v}}{\partial z} - k,\ k_\mathrm{d} \equiv -\frac{1}{N_\mathrm{d}}\frac{\partial N_\mathrm{d}}{\partial z} - k. \tag{A5}$$

The value of k_v describes the intensity of the mass sink. In the case of water vapor $k_\mathrm{v} > 0$ is caused by a steep vertical temperature gradient that causes vapor to condense (Makarieva and Gorshkov, 2007; Gorshkov et al., 2012, Sect. 3). From consideration of the Clausius-Clapeyron law and hydrostatic equilibrium one can see that

$$k_\mathrm{v} = \frac{L\Gamma}{RT^2} - \frac{Mg}{RT}, \tag{A6}$$

where L is molar vaporization constant, $\Gamma \equiv -\partial T/\partial z$ is temperature lapse rate, and M is molar mass of air.

The value of k_v is controlled by temperature lapse rate Γ – keeping all other variables constant, changing Γ it is possible for k_v to take any value, $-\infty < k_\mathrm{v} < \infty$. This validates our assumption that k_v can be kept independent of N_v when investigating the limit behavior $N_\mathrm{v} \to 0$ in Eq. (A10): for any N_v (e.g., set by ambient temperature) any value of k_v can be prescribed by changing Γ.

A4 The limit behaviour $\partial N_\mathrm{d}/\partial x \to 0$

Using Eqs. (32), (33) and $\partial N_\mathrm{v}/\partial x = 0$ we obtain (see also Gorshkov et al., 2012):

$$u\frac{\partial N_\mathrm{d}}{\partial x} = (S_\mathrm{d} - S)\frac{1}{\gamma_\mathrm{d}}, \tag{A7}$$

where

$$S_\mathrm{d} \equiv w\left(\frac{\partial N_\mathrm{v}}{\partial z} - \gamma_\mathrm{d}\frac{\partial N_\mathrm{d}}{\partial z}\right),\ \gamma_\mathrm{d} \equiv \frac{N_\mathrm{v}}{N_\mathrm{d}}. \tag{A8}$$

The magnitude of condensation rate S in Eq. (A7) remains unknown. Note that under terrestrial conditions $1/\gamma_\mathrm{d} \gg 1$.

Putting Eq. (A3) into Eq. (A7) using Eq. (A4) we obtain:

$$u\frac{\partial N_\mathrm{d}}{\partial x} = -wk_\mathrm{v}N_\mathrm{d}\left(1 + \frac{N_\mathrm{v}}{N_\mathrm{d}} + \frac{S}{wk_\mathrm{v}N_\mathrm{v}}\right). \tag{A9}$$

Now putting $S = CN_\mathrm{v}$ into Eq. (A9) we have

$$\frac{\partial N_\mathrm{d}}{\partial x} = -wk_\mathrm{v}\frac{N_\mathrm{d}}{u}\left(1 + \frac{N_\mathrm{v}}{N_\mathrm{d}} + \frac{C}{wk_\mathrm{v}}\right). \tag{A10}$$

We require that $\partial N_\mathrm{d}/\partial x \to 0$ at $N_\mathrm{v} \to 0$ (no horizontal density gradient in the absence of condensable substance). This condition follows from considering that, aside from condensation, there are no processes in the atmospheric column that would make the air distribution deviate from a static equilibrium. This limit is general and should apply to all conditions,

including cases where all other variables in Eq. (A10) are independent of N_v. From this condition we obtain $C = -wk_v$ and

$$S = -wk_vN_v, \tag{A11}$$

which is Eq. (34). An experiment to test this relationship would be to consider a circulation with given vertical and horizontal velocities w and u, set k_v and N_d and change the saturated molar density N_v by either changing the condensable gas or the amount of condensation nuclei in the atmosphere or temperature (see below) or both. One will observe that as the condensable gas disappears from the atmosphere, the horizontal pressure gradients vanish. (It is interesting to note the following. Given that the spatial distribution of N_v is exponential, $N_v(z) = N_0 \exp(-z/h_N)$, the local condition $N_v \to 0$ corresponds to complete disappearance of the condensable component from the atmosphere and restoration of equilibrium in the horizontal plane. In comparison, the local condition $k_v \to 0$ does not presume that condensation is absent everywhere else in the atmosphere (it is plausible that k_v changes stepwise at the point where condensation commences).)

In Eq. (A11) condensation rate S is a linear function of three independent variables: vertical velocity w, local amount of vapor N_v and deviation k_v of vapor from the equilibrium distribution (k_v can be characterized as the "condensability strength" of atmospheric vapor). Note an interesting relationship: with S given by Eq. (A11) and $\gamma \equiv N_v/N$ we have $S_d - S \equiv S\gamma_d \equiv S_d\gamma$. When $S = S_d$ we have $S \equiv S_d \equiv 0$: condensation is absent.

A5 Appendix summary

Equations (32) and (33), taken together, contain the information that it is water vapor and not dry air that undergoes condensation. Equation (34) contains information about the magnitude of deviation from equilibrium that causes condensation. Jointly considered, these facts are sufficient to determine the horizontal pressure gradient produced by the vapor sink.

Note that in Eq. (A7) any small difference of the order of γ_d between S and S_d is multiplied by a large magnitude $1/\gamma_d \gg 1$ and thus has a profound influence on the magnitude of the horizontal gradient $\partial N_d/\partial z$. We emphasize the point we made in Sect. 4.2: if it were dry air to be in equilibrium, i.e. $k_E = -(1/N_d)\partial N_d/\partial z$, the same consideration of the same equations would give $\partial N_d/\partial x = 0$ instead of $\partial N_d/\partial x = S/u$ as in the case when it is moist air that is in equilibrium. The impact of this physical process on atmospheric dynamics remains unexplored.

Acknowledgements. We thank D. R. Rosenfeld and H. H. G. Savenije for disclosing their names as referees in the ACPD discussion of the work of Makarieva et al. (2008) and D. R. Rosenfeld for providing clarifications regarding the derivation of the estimate of condensation-related pressure change as given by Pöschl (2009, p. S12436). We acknowledge helpful comments of K. E. Trenberth towards a greater clarity of the presentation of our approach. The authors benefited greatly from an exciting discussion of condensation-related dynamics with J. I. Belanger, J. A. Curry, G. M. Lackmann, M. Nicholls, R. A. Pielke, G. A. Schmidt, A. Seimon and R. M. Yablonsky. We thank all people who discussed our work, both in the ACPD discussion and in the blogosphere, in particular, J. Condon, J. A. Curry, L. Liljegren, N. Stokes and A. Watts for hosting the discussions on their blogs. We are grateful to P. Restrepo for his interest and help in finding potential reviewers for our work. AMM acknowledges the essential role of S. McIntyre's blog where she came in contact with J. A. Curry. We sincerely thank our two referees, J. A. Curry and I. Held, for their valuable input. We gratefully acknowledge the commitment and insight of A. Nenes and the entire ACP Executive Committee in handling our contribution. BLL thanks the US National Science Foundation and UC Agricultural Experiment Station for their partial support.

Edited by: A. Nenes

Editor Comment. The authors have presented an entirely new view of what may be driving dynamics in the atmosphere. This new theory has been subject to considerable criticism which any reader can see in the public review and interactive discussion of the manuscript in ACPD (http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/10/24015/2010/acpd-10-24015-2010-discussion.html). Normally, the negative reviewer comments would not lead to final acceptance and publication of a manuscript in ACP. After extensive deliberation however, the editor concluded that the revised manuscript still should be published – despite the strong criticism from the esteemed reviewers – to promote continuation of the scientific dialogue on the controversial theory. This is not an endorsement or confirmation of the theory, but rather a call for further development of the arguments presented in the paper that shall lead to conclusive disproof or validation by the scientific community. In addition to the above manuscript-specific comment from the handling editor, the following lines from the ACP executive committee shall provide a general explanation for the exceptional approach taken in this case and the precedent set for potentially similar future cases: (1) The paper is highly controversial, proposing a fundamentally new view that seems to be in contradiction to common textbook knowledge. (2) The majority of reviewers and experts in the field seem to disagree, whereas some colleagues provide support, and the handling editor (and the executive committee) are not convinced that the new view presented in the controversial paper is wrong. (3) The handling editor (and the executive committee) concluded to allow final publication of the manuscript in ACP, in order to facilitate further development of the presented arguments, which may lead to disproof or validation by the scientific community.

References

Bolton, D.: The computation of equivalent potential temperature, Mon. Weather Rev., 108, 1046–1053, 1980.

Brunt, D.: Physical and Dynamical Meteorology, 2nd Edn., Cambridge University Press, 428 pp., London, UK, 1944.

Brümmer, B., Thiemann, S., and Kirchgäßner, A.: A cyclone statistics for the Arctic based on European centre re-analysis data, Meteorol. Atmos. Phys., 75, 233–250, 2000.

Caballero, R., Pierrehumbert, R. T., and Mitchell, J. L.: Axisymmetric, nearly inviscid circulations in non-condensing radiative-convective atmospheres, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 134, 1269–1285, 2008.

Chikoore, H. and Jury, M. R.: Intraseasonal variability of satellite-derived rainfall and vegetation over Southern Africa, Earth Interact., 14, 1–26, 2010.

Curry, J. A. and Webster, P. J.: Thermodynamics of Atmospheres and Oceans, Academic Press, San Diego, 471 pp., 1999.

Deluc, J. A.: Einige meteorologische Erscheinungen, zu deren genauern Kenntniss die electrische Säule als Luft-Electroscop führen kann, Gilberts Ann. d. Phys., 41, 162–194, 1812.

Gill, A. E.: Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press, New York, 1982.

Fang, M. and Tung, K. K.: Time-dependent nonlinear Hadley circulation, J. Atmos. Sci., 56, 1797–1807, 1999.

Fluckiger, B. and Rossi, M. J.: Common precursor mechanism for the heterogeneous reaction of D_2O, HCl, HBr, and HOBr with water ice in the range 170–230 K: Mass accommodation coefficients on ice, J. Phys. Chem. A, 107, 4103–4115, 2003.

Glickman, T. S. (Ed.): Glossary of Meteorology, 2nd Edn., Amer. Meteor. Soc., Boston, 855 pp., 2000.

Gorshkov, V. G., Makarieva, A. M., and Nefiodov, A. V.: Condensation of water vapor in the gravitational field, J. Exp. Theor. Phys., 115, 723–728, 2012.

Gu, H. and Qian, Z.: A discussion about the role of the water vapor source/sink term in continuity equation of numerical models, Chin. Sci. Bull., 36, 16–21, 1991.

Haynes, P. (Ed.): Interactive comment on "On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine" by A. M. Makarieva et al., Atmos. Chem. Phys. Discuss., 8, S12168–S12178, 2009.

Held, I. M. and Hou, A. Y.: Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere, J. Atmos. Sci., 37, 515–533, 1980.

Holland, G. J.: An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes, Mon. Weather Rev., 108, 1212–1218, 1980.

Kis, A. K. and Straka, J. M.: Nocturnal tornado climatology, Weather Forecast., 25, 545–561, 2010.

Knaff, J. A., Zehr, R. M., Goldberg, M. D., and Kidder, S. Q.: An example of temperature structure differences in two cyclone systems derived from the Advanced Microwave Sounder Unit, Weather Forecast., 15, 476–483, 2000.

L'vovitch, M. I.: World Water Resources and Their Future, American Geological Union, Washington, 1979.

Lackmann, G. M. and Yablonsky, R. M.: The importance of the precipitation mass sink in tropical cyclones and other heavily precipitating systems, J. Atmos. Sci., 61, 1674–1692, 2004.

Lewis, J. M.: Clarifying the dynamics of the general circulation: Phillipss 1956 experiment, B. Am. Meteorol. Soc., 79, 39–60, 1998.

Lindzen, R. S. and Hou, A. Y.: Hadley circulations for zonally averaged heating centered off the equator, J. Atmos. Sci., 45, 2416–2427, 1988.

Lindzen, R. S. and Choi, Y.-S.: On the determination of climate feedbacks from ERBE data, Geophys. Res. Lett., 36, L16705, doi:10.1029/2009GL039628, 2009.

Lorenz, E. N.: The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere, World Meteorological Organization, Geneva, 1967.

Lorenz, E. N.: A history of prevailing ideas about the general circulation of the atmosphere, B. Am. Meteorol. Soc., 64, 730–734, 1983.

Makarieva, A. M. and Gorshkov, V. G.: Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1013–1033, doi:10.5194/hess-11-1013-2007, 2007.

Makarieva, A. M. and Gorshkov, V. G.: Condensation-induced dynamic gas fluxes in a mixture of condensable and non-condensable gases, Phys. Lett. A, 373, 2801–2804, 2009a.

Makarieva, A. M. and Gorshkov, V. G.: Condensation-induced kinematics and dynamics of cyclones, hurricanes and tornadoes, Phys. Lett. A, 373, 4201–4205, 2009b.

Makarieva, A. M. and Gorshkov, V. G.: Reply to A. G. C. A. Meesters et al.'s comment on "Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land", Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 1307–1311, doi:10.5194/hess-13-1307-2009, 2009c.

Makarieva, A. M. and Gorshkov, V. G.: The biotic pump: Condensation, atmospheric dynamics and climate, Inter. Jour. Water, 5, 365–385, 2010.

Makarieva, A. M. and Gorshkov, V. G.: Radial profiles of velocity and pressure for condensation-induced hurricanes, Phys. Lett. A., 375, 1053–1058, 2011.

Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., and Li, B.-L.: Conservation of water cycle on land via restoration of natural closed-canopy forests: implications for regional landscape planning, Ecol. Res., 21, 897–906, 2006.

Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., and Li, B.-L.: On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 8, 17423–17437, doi:10.5194/acpd-8-17423-2008, 2008.

Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., and Li, B.-L.: Precipitation on land versus distance from the ocean: evidence for a forest pump of atmospheric moisture, Ecol. Complex., 6, 302–307, 2009.

Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., Li, B.-L., and Nobre, A. D.: A critique of some modern applications of the Carnot heat engine concept: the dissipative heat engine cannot exist, P. R. Soc. A, 466, 1893–1902, 2010.

Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., and Nefiodov, A. V.: Condensational theory of stationary tornadoes, Phys. Lett. A., 375, 2259–2261, 2011.

Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., and Li, B.-L.: Revisiting forest impact on atmospheric water vapor transport and precipitation, Theor. Appl. Climatol., 111, 79–96, doi:10.1007/s00704-012-0643-9, 2013.

Mapes, B. E.: Water's two height scales: the moist adiabat and the radiative troposphere, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 127, 2253–2266, 2001.

Marengo, J. A.: Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin, Theor. Appl. Climatol., 78, 79–96, 2004.

Marengo, J. A.: On the hydrological cycle of the Amazon basin: A historical review and current state-of-the-art, Rev. Bras. Meteorol., 21, 1–19, 2006.

Meesters, A. G. C. A., Dolman, A. J., and Bruijnzeel, L. A.: Comment on "Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land" by A. M. Makarieva and V. G. Gorshkov, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1013–1033, 2007, Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 1299–1305, doi:10.5194/hess-13-1299-2009, 2009.

Montgomery, M. T., Bell, M. M., Aberson, S. D., and Black, M. L.: Hurricane Isabel (2003): New insights into the physics of intense storms. Part I: Mean vortex structure and maximum intensity estimates, B. Am. Meteorol. Soc., 87, 1225–1347, 2006.

Murphree, T. and Van den Dool, H.: Calculating tropical winds from time mean sea level pressure fields, J. Atmos. Sci., 45, 3269–3282, 1988.

Nicholson, S. E.: The nature of rainfall variability over Africa on time scales of decades to millenia, Global Planet. Change, 26, 137–158, 2000.

Ooyama, K. V.: A dynamic and thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere with parameterized microphysics, J. Atmos. Sci., 58, 2073–2102, 2001.

Pauluis, O. P., Balaji, V., and Held, I. M.: Frictional dissipation in a precipitating atmosphere, J. Atmos. Sci., 57, 989–994, 2000.

Pauluis, O. and Held, I. M.: Entropy budget of an atmosphere in radiative-convective equilibrium. Part I: maximum work and frictional dissipation, J. Atmos. Sci., 59, 125–139, 2002a.

Pauluis, O. and Held, I. M.: Entropy budget of an atmosphere in radiative-convective equilibrium. Part II: latent heat transport and moist processes, J. Atmos. Sci., 59, 125–139, 2002b.

Pielke Sr., R., Beven, K., Brasseur, G., Calvert, J., Chahine, M., Dickerson, R., Entekhabi, D., Foufoula-Georgiou, E., Gupta, H., Gupta, V., Krajewski, W., Krider, E. P., Lau, W. K. M., McDonnell, J., Rossow, W., Schaake, J., Smith, J., Sorooshian, S., and Wood, E.: Climate change: the need to consider human forcings besides greenhouse gases, Eos, 90, p. 413, 2009.

Pöschl, U.: Interactive comment on "On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine" by A. M. Makarieva et al., Atmos. Chem. Phys. Discuss., 8, S12426–S12447, 2009.

Raval, A. and Ramanathan, V.: Observational determination of the greenhouse effect, Nature, 342, 758–761, 1989.

Rex, D. F.: Vertical atmospheric motions in the equatorial Central Pacific, Geophysica, 6, 479–500, 1958.

Qiu, C.-J., Bao, J.-W., and Xu, Q.: Is the mass sink due to precipitation negligible?, Mon. Weather Rev., 121, 853–857, 1993.

Robinson, W. A.: On the self-maintenance of midlatitude jets, J. Atmos. Sci., 63, 2109–2122, 2006.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., O'Dell, C., and Wong, T.: Relationships between tropical sea surface temperature and top-of-atmosphere radiation, Geophys. Res. Lett., 37, L03702, doi:10.1029/2009GL042314, 2010.

Sabato, J. S.: CO_2 condensation in baroclinic eddies on early Mars, J. Atmos. Sci., 65, 1378–1395, 2008.

Schiermeier, Q.: The real holes in climate science, Nature, 463, 284–287, 2010.

Schneider, T.: The general circulation of the atmosphere, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 34, 655–688, 2006.

Schubert, W. H., Hausman, S. A., Garcia, M., Ooyama, K. V., and Kuo, H.-C.: Potential vorticity in a moist atmosphere, J. Atmos. Sci., 58, 3148–3157, 2001.

Sheil, D. and Murdiyarso, D.: How forests attract their rain: an examination of a new hypothesis, Bioscience, 59, 341–347, 2009.

Shusse, Y. and Tsuboki, K.: Dimension characteristics and precipitation efficiency of cumulonimbus clouds in the region far south from the mei-yu front over the eastern Asian continent, Mon. Weather Rev., 134, 1942–1953, 2006.

Simmonds, I., Burke, C., and Keay, K.: Arctic climate change as manifest in cyclone behavior, J. Climate, 21, 5777–5796, 2008.

Sinclair, P. C.: The lower structure of dust devils, J. Atmos. Sci., 30, 1599–1619, 1973.

Snodgrass, E. R., Di Girolamo, L., and Rauber, R. M.: Precipitation characteristics of trade wind clouds during RICO derived from radar, satellite, and aircraft measurements, J. Appl. Meteorol. Clim., 48, 464–483, 2009.

Sui, C.-H., Li, X., and Yang, M.-J.: On the definition of precipitation efficiency, J. Atmos. Sci., 64, 4506–4513, 2007.

Thompson, R. L., Edwards, R., Hart, J. A., Elmore, K. L., and Markowski, P.: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle, Weather Forecast., 18, 1243–1261, 2003.

Trenberth, K. E.: Climate diagnostics from global analyses: conservation of mass in ECMWF analyses, J. Climate, 4, 707–722, 1991.

Trenberth, K. E. and Fasullo, J.: Water and energy budgets of hurricanes and implications for climate change, J. Geophys. Res., 112, D23107, doi:10.1029/2006JD008304, 2007.

Trenberth, K. E., Christy, J. R., and Olson, J. G.: Global atmospheric mass, surface pressure, and water vapor variations, J. Geophys. Res., 92, 14815–14826, 1987.

Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., and Parsons, D. B.: The changing character of precipitation, B. Am. Meteorol. Soc., 84, 1205–1217, 2003.

Van den Dool, H. M. and Saha, S.: Seasonal redistribution and conservation of atmospheric mass in a general circulation model, J. Climate, 6, 22–30, 1993.

Wacker, U. and Herbert, F.: Continuity equations as expressions for local balances of masses in cloudy air, Tellus, 55A, 247–254, 2003.

Wacker, U., Frisius, T., and Herbert, F.: Evaporation and precipitation surface effects in local mass continuity laws of moist air, J. Atmos. Sci., 63, 2642–2652, 2006.

Walker, C. C. and Schneider, T.: Eddy-influences on Hadley circulations: simulations with an idealized GCM, J. Atmos. Sci., 63, 3333–3350, 2005.

Walker, C. C. and Schneider, T.: Response of idealized Hadley circulations to seasonally varying heating, Geophys. Res. Lett., 32, L06813, doi:10.1029/2004GL022304, 2006.

Wurman, J., Straka, J. M., and Rasmussen, E. N.: Fine-scale Doppler radar observations of tornadoes, Science, 272, 1774–1777, 1996.

Zhou, J. and Lau, K.-M.: Does a monsoon climate exist over South America?, J. Climate, 11, 1020–1040, 1998.