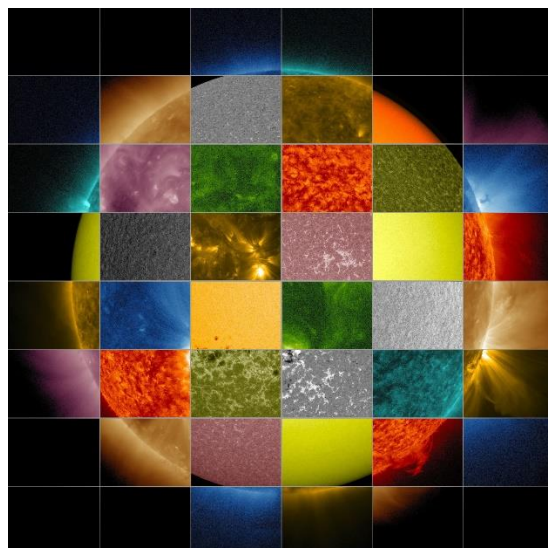


موردهای ۵۱ و ۵۲

ادعا: آبگوشتهایی که در عکس زیر نمایش داده شده‌اند با استفاده از نور خورشید پخته می‌شوند.



ادعا: «خورشید در یک ساعت بیشتر از تمام تولید انرژی بشر در یک سال به زمین انرژی می‌دهد»



رفع مسئولیت!:

بررسی درست مطالبی که در زیر خواهید خواند نیاز به فیزیک نوین و الکترودینامیک دارد. بنابراین آنچه پیش رو است توضیح کامل نیست بلکه هدفش انتقال حسّی نسبت به فیزیک پشت سر وقایع مورد بررسی است.

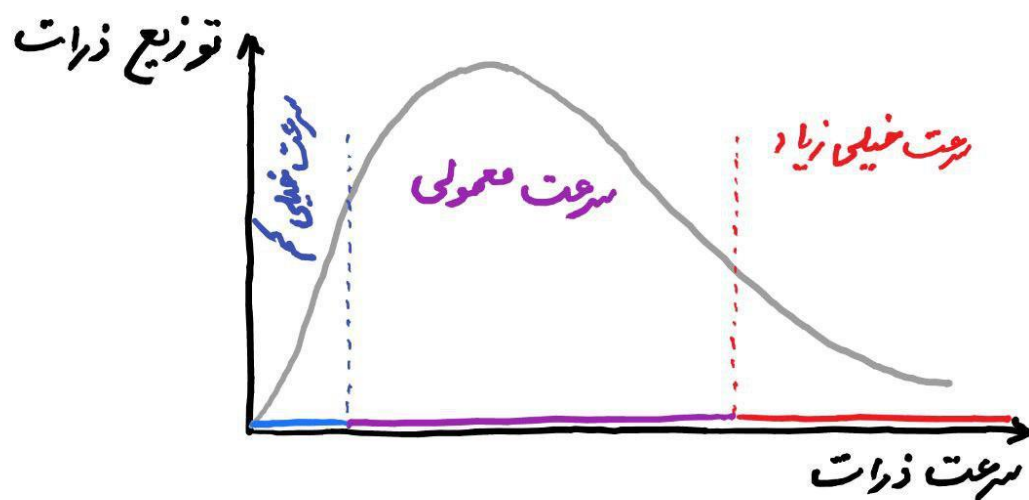
همچنین گاهی واحدها را ننوشته‌ام، به خاطر اینکه باعث شلوغی بیش از حد می‌شدند. هرگاه واحدی نوشته نشده بود، بدانید که از دستگاه واحدهای SI (کیلوگرم، متر، ثانیه، درجه کلوین) همان سانتی‌گراد خودمان که به علاوه ۲۷۳ شده)) استفاده شده است. بنابراین قاعدتاً ابهامی در واحدها نباید وجود داشته باشد.

ادعای اول: آبگوشتهایی که در فیلم نمایش داده شده‌اند با استفاده از نور خورشید پخته می‌شوند.

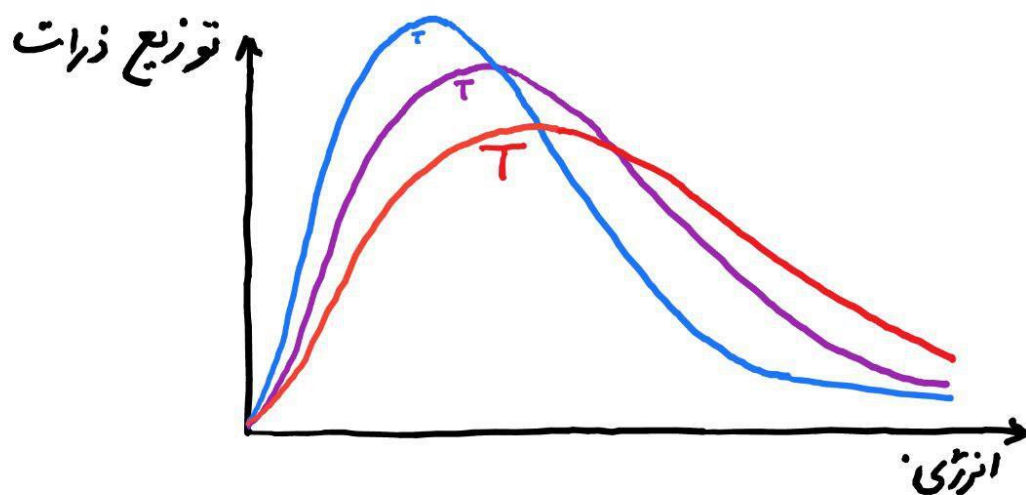
ادعای دوم: «خورشید در یک ساعت بیشتر از تمام تولید انرژی بشر در یک سال به زمین انرژی می‌دهد»

فرض کنید جعبه‌ای داریم که جاهای مختلف دیواره‌هایش به صورت نامنظم دارند می‌لرزند. پس اگر مثلاً انگشتان را روی جایی از دیوار بگذاریم به صورت نامنظم ضرباتی را حس خواهیم کرد. حالا یک توپ خیلی کوچک را داخل این جعبه رها می‌کنیم. اگر سرعت توپ خیلی کم باشد، مثلاً تقریباً ساکن باشد، در برخورد با دیواره‌ها ضربه‌ای دریافت می‌کند و سرعتش زیادتر می‌شود. برعکس اگر سرعت توپ خیلی خیلی زیاد باشد، نقش توپ و دیواره عوض می‌شود و اینبار، توپ لگد محکمی به دیواره می‌زند و لرزش دیواره را بیشتر می‌کند. پس اگر انرژی توپ خیلی کم باشد، احتمالاً انرژی دریافت می‌کند و اگر انرژی توپ خیلی زیاد باشد، احتمالاً انرژی از دست می‌دهد. حالا فرض کنید به جای یک توپ، یک عالمه توپ ریز داشته باشیم. فرض کنید می‌خواهیم با شما سر یک شتر شرط ببندیم (از آنجایی که قیمت‌ها خیلی تغییر می‌کند سر کالا شرط می‌بندیم!) که اگر یکی از توپ‌ها را شانس انتخاب کردیم سرعتش خیلی زیاد خواهد بود یا نه. اگر سرعتش زیاد باشد شما می‌برید و اگر معمولی باشد می‌بازید. آیا این شرط را می‌پذیرید؟ اگر هدفشان آتش زدن به اموالتان نباشد، شرط را نمی‌پذیرید! چرا که احتمال اینکه توپ سرعتش خیلی زیاد باشد، کم است. چون اگر زیاد باشد احتمالاً دیری نمی‌گذرد که سرعتش را (همانطور که توضیح داده شد) از دست خواهد داد.

نتیجه می‌گیریم ذراتی که سرعتشان خیلی زیاد و یا خیلی کم است، اندکند. اکثر ذرات سرعتی معمولی دارند، حول و حوش میانگین.



وقتی توزیع سرعت ذرات این شکلی باشد، توزیع انرژی جنبشی آنها هم تقریباً همین شکلی است. فرض کنید همین شکل بالا توضیح انرژی جنبشی ذرات را نشان می‌دهد. پس از روی نمودار بالا می‌توان فهمید که میانگین انرژی جنبشی کل ذرات چقدر است. اگر تپه نمودار به سمت جلو حرکت کند، یعنی عموم ذرات انرژی جنبشی بیشتری از قبل خواهند داشت و بنابراین میانگین انرژی جنبشی هم بیشتر است. می‌دانیم دما یکجورهایی بیانگر میانگین انرژی جنبشی ذرات است. بنابراین اگر دمای جعبه (و مجموعه ذرات داخل آن) را زیاد کنیم، توزیع باید کمی به سمت جلو تغییر شکل دهد؛ چون اینگونه میانگین انرژی جنبشی زیاد می‌شود.



پس عملاً اگر دمای جعبه را داشته باشیم می‌توانیم بگوییم که توزیع انرژی ذرات داخل جعبه چه شکلی دارد.

حالا می‌خواهیم یک کلک بزنیم! بیایید به جای توپ، جعبه را پر کنیم از فوتون! درست می‌فرمایید، فوتون‌ها که ذرات نور هستند و سرعتشان همیشه یکسان و برابر با یکدیگر است! بله، اما انرژی آنها که می‌تواند با هم فرق کند. انرژی فوتون‌ها را مشابه با انرژی جنبشی ذرات قبلی در نظر می‌گیریم. بنابراین توزیع انرژی فوتون‌های داخل جعبه هم مانند شکل بالا خواهد بود. خورشید خودمان هم پر از فوتون است که به اینطرف و آنطرف می‌روند. اگر بدانیم توزیع فوتون‌هایی که از سطح خورشید بیرون می‌آیند چه شکلی است، آنوقت می‌توانیم بفهمیم که دمای سطح خورشید چقدر است. برای اینکه ببینیم کدام توزیع متعلق به خورشید است، کافی است ببینیم قله توزیع فوتون‌های خورشید کجاست. خوشبختانه می‌دانیم انرژی فوتون‌ها مستقیماً با فرکانس یا همان رنگ آنها متناسب است. خب پس خیلی سریع پاسخ دهید، خورشید کدام رنگها را بیشتر از همه تابش می‌کند؟ بله رنگهای نزدیک به زرد (و سبز)! پس قله توزیع باید همانطرف‌ها باشد.

انرژی فوتون‌ها (ذرات نور) به فرکانس آنها بستگی دارد. مثلاً اشعه ایکس و گاما انرژی‌شان از نورهای مرئی و انرژی آنها هم از مادون قرمز و رادیویی بیشتر. اگر دما نمایانگر میانگین انرژی فوتون‌ها باشد آنوقت درواقع یکجورهایی دما نمایانگر میانگین فرکانس آنها نیز هست! پس اگر فرکانس تابش میانگین را داشتیم، دما را می‌توانیم بدست بیاوریم.

$$T = kf$$

در معادله بالا f فرکانس قله توزیع است که آن را نماینده میانگین در نظر گرفته‌ایم و k هم یک ثابت است که با آزمایش می‌توانیم بدست آوریم و حدوداً برابر است با 0.01 نانوثانیه×کلوین. به قانون بالا که خیلی سرسری آنرا یافتیم، «قانون وین» می‌گویند. (در مورد ۴۶ هم به آن اشاره‌ای کرده بودیم.) فرکانس نور زرد 540 تِراهرتز است. پس دمای سطح خورشید عبارت می‌شود از:

$$0.00000000001 \times 54000000000000 = 5400$$

پس با انتخاب نور زرد دمای سطح را 5400 کلوین بدست آوردیم، اگر همه چیز را دقیقتر انجام دهیم به عدد 5800 کلوین می‌رسیم که خیلی از آنچه بدست آوردیم دور نیست. خیلی جالب است که از روی زمین و با نگاه کوچکی به خورشید می‌توانیم حدس بزنیم که دمای سطحش چقدر است!

(اینکه دمای سطح خورشید چنان است که بیشترین نورهایی که تابش می‌شوند در حوزه نورهای مرئی هستند نیز جالب است، نیست؟! شاید قضیه برعکس است! یعنی ما موجودات روی زمین این نورها را می‌بینیم و این نورها برایمان مرئی است، چون که طی می‌لاردها سال که جانوران در حال تکامل بوده‌اند و چشمشان در حال شکل‌گیری بوده، خورشید بزرگ این نورها را بیشتر از همه تابش می‌کرده است؛ و به نفع همه بوده که چشمهایشان را مناسب دیدن این بازه نوری بسازند.)

پس داستان از این قرار شد که هر چه دمای جسمی بالاتر برود، فرکانس نوری که تابش می‌کند بیشتر می‌شود. برای دماهای حدود دمای اتاق، فرکانس این تابش اینقدر کم است که دیده نمی‌شود (مادون قرمز). ولی اگر دما را بالا ببریم، مثل وقتی فلزی را گداخته می‌کنیم، آرام‌آرام نورها قابل رؤیت می‌شوند. اما فقط فرکانس فوتونها نیست که زیاد می‌شود، بلکه تعداد فوتونهایی که تابش می‌شوند هم با زیاد کردن دما افزایش پیدا می‌کند.

اگر یک سیم گیتار می‌داشتیم و با فرکانس 100 هرتز کوک و شروع به نواختنش می‌کردیم، موجی داخل سیم ایجاد می‌شد که فرکانسش 100 هرتز بود (غیب گفتم!) و قله‌هایی می‌داشت که هی نوسان می‌کردند و بالا و پایین می‌شدند (عجب!). اگر فرکانس

را دوبرابر می‌کردیم مثل این می‌بود که هر قلّه را تبدیل کنیم به دوتا قلّه. بنابراین با دوبرابر کردن فرکانس تعداد قلّه‌ها دوبرابر می‌شد.

حالا می‌خواهیم به جای سیم گیتار یک صفحه بزرگ تَبِل داشته باشیم. اگر فرکانس موجی که در هر ضلع تشکیل می‌شود را دوبرابر کنیم، تعداد قلّه‌ها هم در هر ضلع دوبرابر می‌گردد، در نتیجه در سطح تبِل تعداد قلّه‌ها چهاربرابر می‌شود. اگر همین را برای یک حجم تکرار کنیم با دوبرابر کردن فرکانس تعداد قلّه‌ها ۸ برابر می‌شود. پس تعداد قلّه‌ها در حجم با فرکانس به توان سه رابطه دارد.

همین را اگر برای فوتون‌ها و فرکانس آنها بیان کنیم و خیلی سرسری و بدون دقت علمی، بگوییم هر قلّه معادل یک فوتون است، آنوقت می‌فهمیم که تعداد فوتون‌ها با فرکانس به توان سه رابطه دارد. گفته بودیم که دما هم یکجورایی با فرکانس رابطه مستقیم دارد. بنابراین:

$$^3(\text{دمای فوتونها}) \propto \text{تعداد فوتونها}$$

به صورت میانگین انرژی هر فوتون هم که متناسب بود با دما. پس

$$^4(\text{دمای فوتونها}) \propto \text{تعداد فوتونها} \times \text{انرژی هر فوتون} = \text{انرژی کل فوتونها}$$

یا به شکل ساده‌تر:

$$E = T^4 \times \text{ثابت}$$

حالا فرض کنید جعبه را به اندازه ۱ متر × ۱ متر سوراخ کنیم تا این فوتونها از یک طرف جعبه خارج شوند. اگر دمای داخل جعبه را با روشی ثابت نگه داریم، وقتی این فوتونها بیرون رفتند باید فوتونهای دیگری جایشان را پر کنند وگرنه که جعبه سرد می‌شود و دمایش دیگر ثابت نیست. نتیجه چنین روندی خارج شدن پیوسته فوتونها از جعبه است. پس در هر ثانیه مقدار انرژی زیر از جعبه خارج می‌شود:

$$I = cT^4$$

در آن c یک عدد ثابت است که می‌توان با آزمایش بدست آورد و (در دستگاه واحدهای SI) حدوداً برابر است با:

$$6 \times 10^{-8}$$

اگر سوراخ جعبه بزرگتر بود فوتونها سریعتر خارج می‌شدند. مثلاً اگر دوتا سوراخ به همین اندازه داشتیم، فوتونها با سرعت دوبرابر تخلیه می‌شدند و در نتیجه مقدار انرژی‌ای که در هر ثانیه بیرون می‌آمد دوبرابر می‌شد. پس اگر به جای یک سوراخ ۱ مترمربعی، یک سوراخ x مترمربعی داشته باشیم، باید I را ضربدر x کنیم تا انرژی‌ای که در هر ثانیه خارج می‌شود بدست بیاید.

دمای سطح خورشید ۵۸۰۰ درجه کلوین بود. پس انرژی‌ای که در هر ثانیه از ۱ مترمربع سطح خورشید خارج می‌شود برابر است با:

$$I = 6 \times 10^{-8} \times 5800^4 = 7 \times 10^7$$

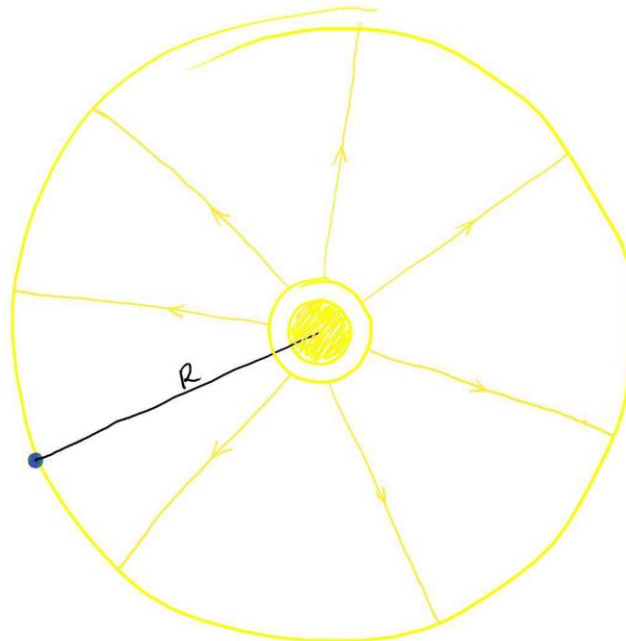
شعاع خورشید ۷۰۰ هزار کیلومتر است. پس مساحتش عبارت است از:

$$\text{مترمربع} = 4\pi r^2 = 4 \times 3.14 \times (700 \times 10^6)^2 = 6 \times 10^{18}$$

پس انرژی تابش شده از خورشید در هر ثانیه برابر می‌شود با:

$$P = 7 \times 10^7 \times 6 \times 10^{18} = 4.2 \times 10^{26} \text{ ژول بر ثانیه}$$

این انرژی از سطح خورشید بیرون می‌آید و تمام مسیر ۱۵۰ میلیون کیلومتری فضای خالی بین زمین و خورشید را طی می‌کند تا بالاخره به کره زمین خودمان برسد. پس تمام این انرژی وقتی به زمین می‌رسد، روی کره‌ای به شعاع ۱۵۰ میلیون کیلومتر پخش شده است.



$$R = 150,000,000 \text{ km} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$$

مساحت این کره بزرگ برابر است با:

$$\text{مترمربع} = 4\pi R^2 = 4 \times 3.14 \times (150 \times 10^9)^2 = 3 \times 10^{23}$$

برای اینکه ببینیم روی هر مترمربع از این کره چقدر انرژی وجود دارد باید کل انرژی را تقسیم بر مساحت کره بکنیم:

$$\frac{4.2 \times 10^{26}}{3 \times 10^{23}} = 1.4 \times 10^3 = 1400 \text{ ژول بر ثانیه}$$

مساحت دیش‌های آینه‌کاری شده‌ای که در فیلم می‌بینیم بیشتر از ۲ مترمربع نیست. پس در هر ثانیه به دیش‌ها ۲۸۰۰ ژول انرژی می‌رسد. ظرفیت گرمایی ویژه آب حدود ۴۲۰۰ ژول بر سانتی‌گراد کیلوگرم است! از واحدهای جلوی عدد زیاد نترسید. معنایش این است که برای داغ کردن یک کیلوگرم آب به اندازه یک درجه سانتی‌گراد، به ۴۲۰۰ ژول انرژی نیاز است. پس برای داغ کردن همان مقدار آب به اندازه ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به ۷۰ برابر انرژی احتیاج داریم؛ ۴۲۰۰ ژول $\times 70 = 294000$ ژول. اگر مقدار آب را دوبار برابر

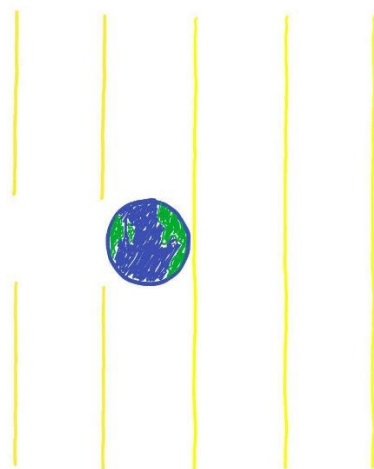
کنیم انرژی مورد نیاز هم دوبرابر می‌شود. پس برای داغ کردن ۲ کیلوگرم آب (یا همان ۲ لیتر آب) به اندازه ۷۰ درجه سانتی‌گراد به حدود ۶۰۰ هزار ژول انرژی نیاز داریم.

می‌دانیم که از خورشید ۱۴۰۰ ژول در هر ثانیه به دیش‌ها می‌رسد. اگر دیش‌ها صد درصد نور را به سمت قابلمه‌ها هدایت کنند و سپس قابلمه‌ها چیزی حدود نصف نور را جذب کنند، آنوقت در هر ثانیه ۷۰۰ ژول به قابلمه‌ها می‌رسد. در این صورت برای تأمین انرژی بالا (۶۰۰ هزار ژول) چقدر باید صبر کنیم؟

$$\frac{600000 \text{ ژول}}{700 \text{ ژول بر ثانیه}} \approx 860 \text{ ثانیه} \approx 14.5 \text{ دقیقه}$$

پس حدود یک ربع طول می‌کشد تا آب ۷۰ درجه گرم شود. اگر دمای اولیه آب را در محیطی که فیلم نشان می‌دهد ۳۰ درجه بگیریم، ظرف ۱۵ دقیقه آب جوش می‌آید و می‌شود با آن آبگوشت پخت! پس این ادعا درست و کاملاً امکان پذیر است.

حالا بیا ببینیم به کل زمین از طرف خورشید چقدر انرژی می‌رسد. به دست آوردیم که در هر ثانیه ۱۴۰۰ ژول می‌رسد به هر مترمربع از آن کره نور بزرگی که فاصله خورشید تا زمین را طی کرده بود. حالا وقتی آن کره از زمین عبور می‌کند، زمین قسمتی از کره را می‌خورد. اندازه آن قسمت به اندازه سایه‌ای است که زمین در نور خورشید از خود به جای می‌گذارد.



بنابراین باید مساحت سایه زمین را حساب کنیم و سپس در آن عدد ۱۴۰۰ مان ضرب کنیم. سایه یک کره می‌شود یک دایره. شعاع زمین ۶۴۰۰ کیلومتر است، پس دایره‌ای داریم به این شعاع. مساحت دایره هم که به صورت زیر حساب می‌شود:

$$\text{مساحت سایه} = \pi a^2 = 3.14 \times (6400000)^2 = 1.3 \times 10^{14}$$

پس انرژی‌ای که از خورشید در هر ثانیه به زمین می‌رسد برابر است با:

$$1.3 \times 10^{14} \times 1400 = 1.8 \times 10^{17} \text{ ژول}$$

این در هر ثانیه است، هر ساعت ۳۶۰۰ ثانیه دارد، پس انرژی رسیده از خورشید در هر ساعت می‌شود:

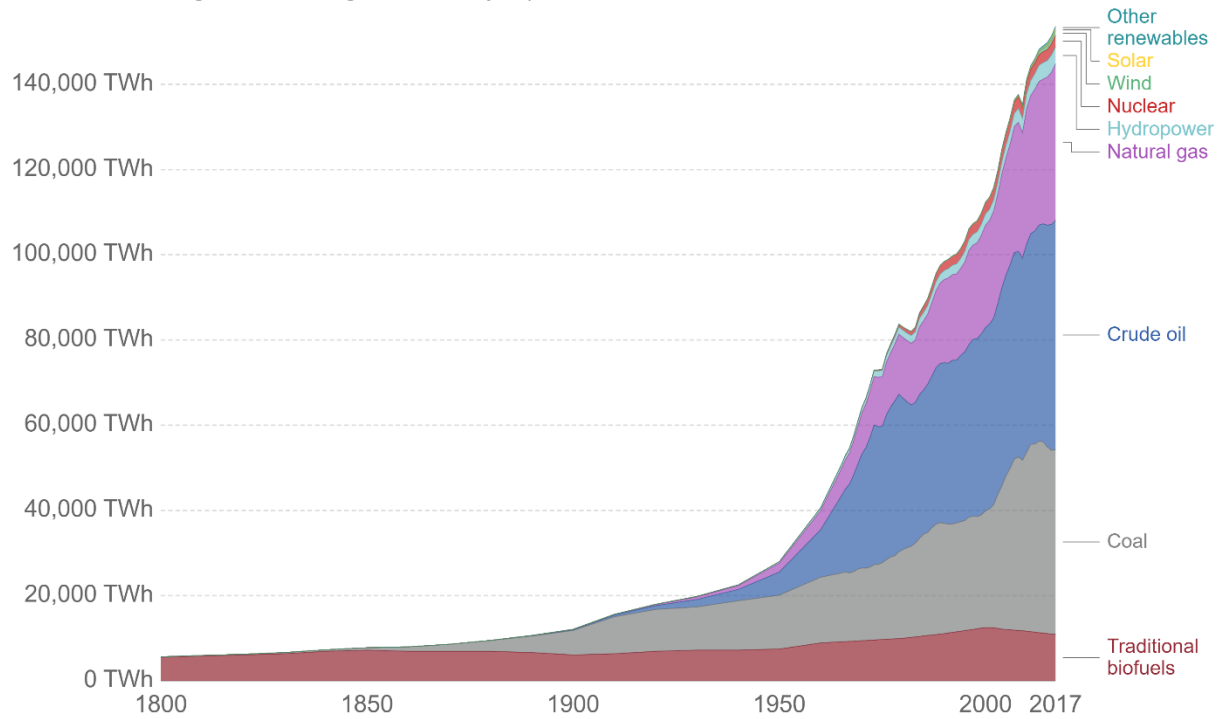
$$1.8 \times 10^{17} \times 3600 = 6.5 \times 10^{20} \text{ ژول}$$

تمام انرژی تولید شده توسط بشر بیشتر از ۵۴۰ هزار-تراژول نیست. یعنی انرژی رسیده از خورشید در یک ساعت بیش از هزار برابر تولید بشر در یک سال است. پس این ادعا هم صحیح است.

Global primary energy consumption

Global primary energy consumption, measured in terawatt-hours (TWh) per year. Here 'other renewables' are renewable technologies not including solar, wind, hydropower and traditional biofuels.

Our World
in Data



Source: Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

CC BY