فصل هفتم

قوانین حرکت و گرفتگی‌ها

۷.۱ سرعت و شتاب

سرعت هر جسم میزانی برای تغییر محل آن جسم است. برای مثال، یک متحرک مسافتی به طول ۵۰۰ متر را در ۵ ثانیه طی می‌کند. سرعت این متحرک برابر است با:

$$\text{سرعت یا } V = \frac{d}{t} = \frac{۵۰۰m}{۵s} = ۱۰۰m/s$$

زمین نیز در امتداد مدارش به دور خورشید مسافت ۳۰۰ کیلومتر را در ۱۰ ثانیه می‌پیماید؛ بنابراین، سرعت مداری آن برابر است با:

$$V = \frac{۳۰۰km}{۱۰s} = ۳۰km/s$$

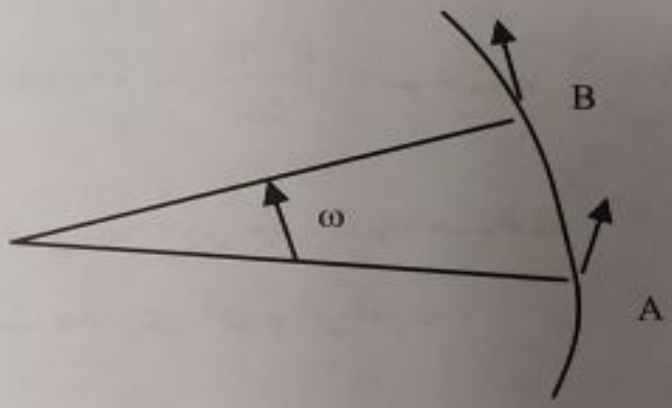
سرعت یک جسم فقط شامل مقدار عددی نیست، بلکه جهت نیز دارد. وقتی که کمیتی دارای بزرگی و جهت باشد بردار نامیده می‌شود. بردار سرعت معمولاً با یک پیکان نشان داده می‌شود. طول آن معرف مقدار سرعت و جهت آن نشان‌دهندهٔ جهت حرکت است. در مورد حرکت زمین، بردار سرعت در هر نقطه تغییر می‌کند؛ زیرا جهت حرکت در روی مسیر منحنی است و، برخلاف مسیر مستقیم‌الخط، به طور دائم در حال تغییر است (استروو و دیگران، ۱۳۷۲).

شتاب نیز به وسیلهٔ میزان تغییرات سرعت اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه

اتومبیلی با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه حرکت کند و، به طور تدریجی، سرعت خود را به ۱۵۰ متر بر ثانیه در مدت زمان ۵ ثانیه افزایش دهد، شتاب آن برابر است با:

$$\text{شتاب} = \frac{\text{تغییر در سرعت}}{\text{زمان}} = \frac{۱۵۰\ \text{m/s} - ۱۰۰\ \text{m/s}}{۵S} = \frac{۵۰\ \text{m/s}}{۵\text{s}} = ۱۰\ \text{m/s}^۲$$

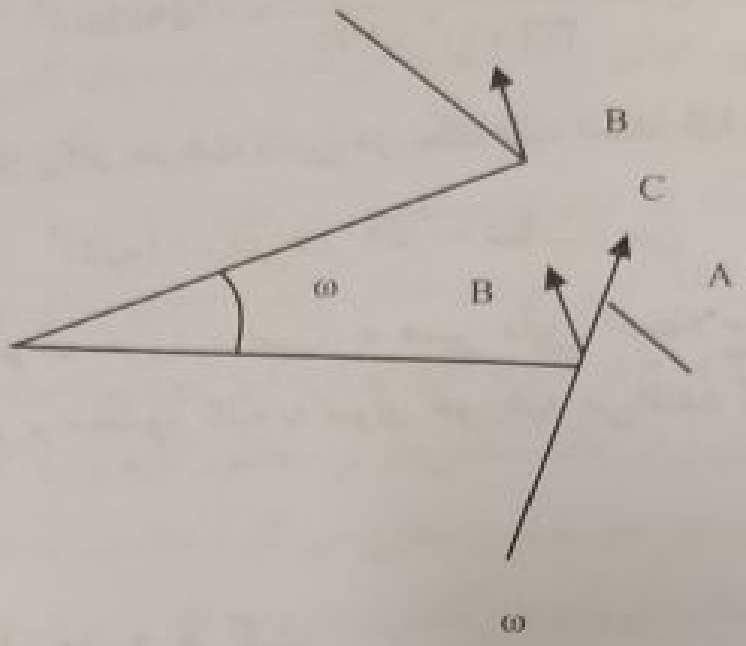
مقدار شتاب زمین، با توجه به میزان تغییر سرعت آن در مدارش به دور خورشید، قابل محاسبه است. فرض کنیم بردار A در (شکل ۱ـ۷) سرعت زمین را در زمان معین نشان دهد.



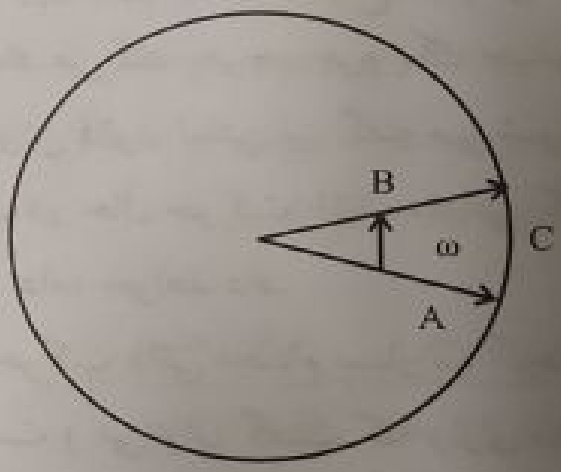
شکل ۱ـ۷ سرعت زاویه‌ای زمین به دور خورشید، زاویه ω برابر زاویهٔ بین دو بردار B و A است.

چون زمین ۳۶۰ درجه را در یک سال می‌پیماید (۱۰۷ × ۳/۲ ثانیه) بنابراین، تغییر موقعیت زمین در یک ثانیه برابر $\frac{۳۶۰}{۳/۲} \times ۱۰^{-۷}$ درجه است. این سرعت زاویه‌ای - که در شکل بسیار بزرگ نشان داده شده است - را با ω نشان می‌دهند. یک ثانیه بعد از اینکه زمین به حرکت خود ادامه داد، سرعت زمین با بردار B نشان داده می‌شود که به همان بزرگی A است، ولی به اندازهٔ زاویه ω چرخیده است. تغییر سرعت در یک ثانیه برابر با اختلاف دو برابر A و B است و در شکل ۲ـ۷ با C نشان داده شده است.

چون ω زاویه کوچکی است می‌توان C را قوسی از دایره به شعاع A یا B در



شکل ۲ـ۷ شتاب زمین در مدار دایره‌ای آن به دور خورشید. اختلاف برداری A–B برابر تغییر بردار سرعت زمین در یک ثانیه است. این اختلاف با C نشان داده شده است و همیشه رو به خورشید است و مقدار عددی آن ۰/۵۹ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.



شکل ۳ـ۷ برابری نسبت زاویهٔ ω به دایرهٔ کامل با نسبت اندازهٔ قوس C به پیرامون دایره

در نظر گرفت (شکل ۳ـ۷). نسبت طول قوس C به محیط دایره برابر نسبت زاویهٔ ω به زاویهٔ کامل دایره یعنی ۳۶۰ درجه است. بنابراین، $\frac{C}{2\pi A} = \frac{\omega}{360^\circ}$ مقدار زاویهٔ ω برابر $\frac{360}{3/2} \times 10^{-7}$ می‌شود و اندازهٔ بردارهای A و B ۳۰ کیلومتر بر ثانیه یا 30×10^5 سانتی‌متر بر ثانیه است. بنابراین:

$$C = \frac{۳۶۰ \times ۲\pi \times ۳۰ \times ۱۰^{۵}}{۳/۲ \times ۱۰^{۷} \times ۳۶۰} = ۰/۵۹ \text{cm/s}^{۲}$$

این مقدار معرف تغییر بردار سرعت زمین در یک ثانیه است. لذا

شتاب زمین = ۰/۵۹ سانتی‌متر / (ثانیه)^{۲}

شتاب زمین همیشه متوجه خورشید است. به همین دلیل، اصطلاح معمولی «زمین با شتاب ۰/۵۹ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه به سوی خورشید می‌افتد» کاربرد دارد (استروو و دیگران، ۱۹۷۲).

۲ـ۷ قوانین نیوتن در مورد حرکت

لختی، مائد یا اینرسی خاصیتی از یک جسم است که با تغییر وضعیت جسم مخالفت می‌کند و یا تمایل جسم است به حفظ وضعیت فعلی، یعنی جسم ساکن تمایل به حفظ سکون دارد و جسم متحرک تمایل به ادامهٔ حرکت بر خط مستقیم، با سرعت ثابت. برای غلبه بر اینرسی نیرو لازم است. درواقع، اینرسی در مقابل تغییر موقعیت حرکتی نوعی مقاومت ایجاد می‌کند. هرچه جرم یک جسم بیشتر باشد، لختی‌اش بیشتر است. به قانون اول نیوتن قانون لختی نیز گفته می‌شود. بر اساس این قانون، هرگاه شیء با سرعت ثابت در حال حرکت باشد، مادامی که نیروی خارجی به آن وارد نشود به حرکت خود ادامه خواهد داد.

اصل رازی دربارهٔ حرکت ذاتی اجسام بسیار به آنچه امروز «اصل اینرسی» خوانده می‌شود نزدیک است و می‌توان گفت که رازی به نوعی از اصل اینرسی دست یافته بود. به هر روی، رازی خاطرنشان می‌کند که ماده نمی‌تواند در فضایی پرشده با ماده حرکت کند، بنابراین باید جایی خالی برای حرکت ماده وجود داشته باشد و وجود فضای تهی برای حرکت ماده ضروری به نظر می‌رسد. با این حساب، رازی با یک اصل ارسطویی دیگر هم در فلسفهٔ طبیعی مخالفت می‌کند، زیرا ارسطو مخالف وجود فضای تهی است و حتی دموکریتوس را برای چنین اعتقادی مورد نقد قرار می‌دهد. این گرایش اشیاء برای حفظ حالت سکون یا حالت حرکت یکنواخت خود را گاهی اصل اینرسی می‌نامند. اینرسی خاصیتی از تمام اشیاء است. می‌توان

گفت که اجسام مادی در ارتباط با حالت حرکت خود نوعی سرسختی نشان می‌دهند؛ این سرسختی خیلی جاها تجربه می‌شود، برای مثال کمربند ایمنی به هنگام توقف سریع اتومبیل مفید است و به همین دلیل اتومبیل در یک جاده یخی سر پیچ نمی‌تواند دور بزند، بلکه در مسیری مستقیم‌تر می‌افتد.

برای توضیح رابطهٔ کمّی نیرو و شتاب باید واحدی برای نیرو تعریف شود. این واحد دین نام دارد و، طبق قانون دوم نیوتن، دین نیرویی است که لازم است تا به جرم یک گرم شتابی برابر یک سانتی‌متر بر مجذور ثانیه وارد کند. بنابراین، اگر بر جسمی نیرو وارد شود، در جهت نیرو شتابی می‌گیرد متناسب با اندازهٔ نیرو و جرم جسم. برای افزایش شتاب نیروی بزرگ‌تری باید به کار برده شود. اگر بخواهیم به جرم یک گرمی شتاب ۳ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه وارد کنیم، می‌توان نشان داد که نیرویی برابر ۳ دین برای این کار لازم است، یعنی $F \sim a$. اگر جرم جسم افزایش یابد، نیروی لازم برای ایجاد شتاب معین نیز افزایش می‌یابد، یعنی $F \sim m$.

قانون دوم نیوتن در مورد حرکت متضمن این دو تناسب است و اغلب به صورت $F = m \times a$ بیان می‌گردد. F، نیرو برحسب دین است که به جسمی با جرم m اعمال می‌شود و a نیز شتاب برحسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است. این رابطه نشان می‌دهد که این ترکیبی از سه واحد اصلی است.

$$\text{دین} = \frac{\text{جرم} \times \text{طول}}{\text{زمان} \times \text{زمان}} = \frac{\text{سانتی‌متر}}{\text{ثانیه} \times \text{ثانیه}}$$

هرجا به جسمی شتاب داده شود، نیرویی اعمال می‌شود. برای مثال، زمین که به دور خورشید می‌گردد به سوی آن شتاب داده می‌شود. بنابراین، باید نیرویی وجود داشته باشد که زمین را به سوی خورشید بکشاند. این نیرو نیروی جاذبه است. خورشید زمین را با نیرویی جذب می‌کند که به زمین شتابی برابر ۰/۵۹ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه وارد می‌کند. از طرف دیگر، زمین نیز به خورشید نیرویی برابر، ولی در جهت مخالف، وارد می‌کند. چون نیروها برابرند، بنابراین، شتاب وارد بر خورشید را

در اثر نیروی جاذبهٔ بین خورشید و زمین و با در نظر گرفتن اینکه جرم خورشید ۲×۱۰^{۳۳} گرم است می‌توان تعیین کرد.

شتاب خورشید برابر است با:

$$F = mxa = a = F/m \qquad a = (۳/۵\times۱۰^{۲۷})۲\times۱۰^{۳۳} \cong ۱۰^{-۶}$$

بنابراین، خورشید به علت بزرگی جرمش کمتر از زمین شتاب داده می‌شود. نیروهای متقابل در قانون سوم نیوتن در مورد حرکت بیان می‌شود و در مورد تمام نیروها کاربرد دارد. قانون سوم عبارت است از: برای هر نیرو، نیرویی برابر وجود دارد که برعکس عمل می‌کند.

۳ـ۷ قانون جاذبه

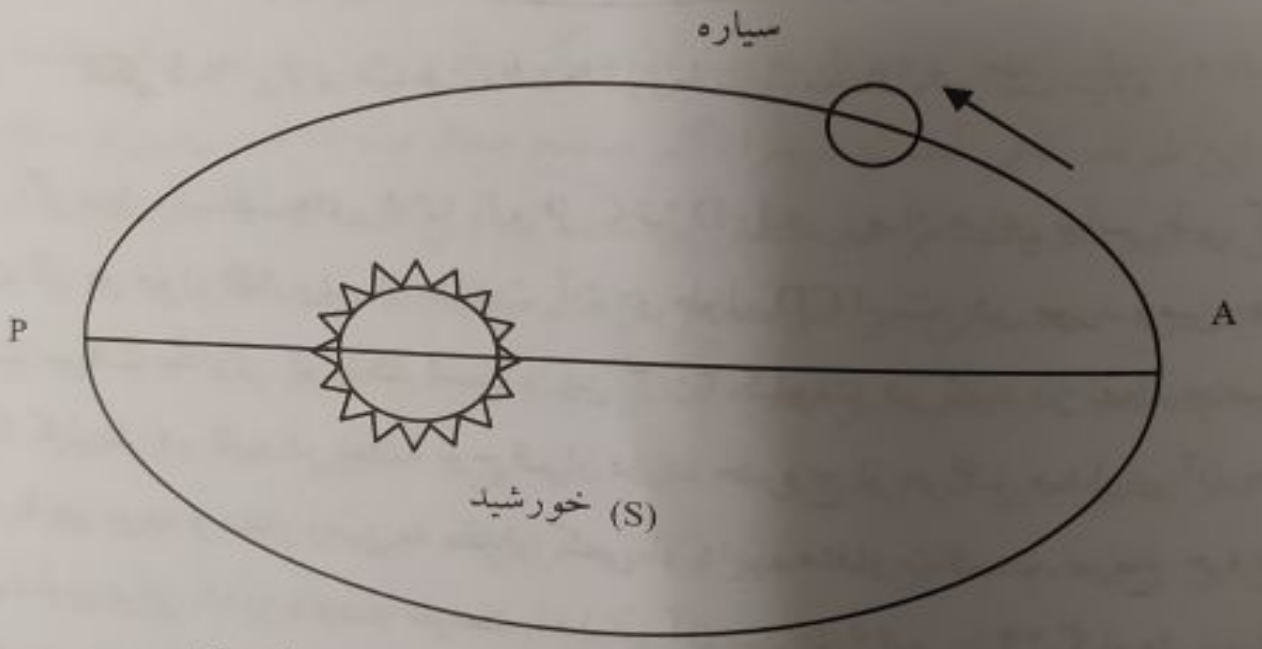
نیروی جاذبه منحصر به اجسام سماوی نبوده، بلکه در مورد تمام اجسام جهان کاربرد دارد. دو جسم کروی A و B را در نظر می‌گیریم که هر کدام یک گرم جرم داشته و به فاصلهٔ یک سانتی‌متری از یکدیگر واقع باشند. این دو جرم یکدیگر را به وسیلهٔ جاذبهٔ متقابل جذب می‌کنند. اگر جرم جسم A به ۳ گرم افزایش یابد، در حالی که جرم جسم B یک گرم باقی بماند، در این صورت نیروی وارده از A به B، سه برابر است. چنانچه هم A و هم B، ۳ گرم جرم داشته باشند، نیروی حاصله ۹ برابر خواهد شد. بنابراین، نیروی جاذبه متناسب با حاصل‌ضرب جرم‌های دو جسم است. اگر جرم‌های یک گرمی اولیه به جای یک سانتی‌متر در فاصلهٔ ۲ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گیرند، نیروی حاصله $\frac{۱}{۴}$ نیروی به دست آمدهٔ حالت اولیه است. برای فاصلهٔ ۳ سانتی‌متری نیرو $\frac{۱}{۹}$ نیروی اولیه خواهد بود. بنابراین، با تغییر فاصله، نیرو به نسبت عکس مربع فاصله تغییر می‌کند. از ترکیب این نتایج و با کاربرد ضریب تناسب مناسبی قانون جاذبهٔ نیوتن به صورت رابطهٔ $F = \frac{MA \times MB}{d۲}$ در می‌آید. G ثابت جاذبه‌ای نیوتن و برابر ۹/۸ متر بر مجذور ثانیه است. d فاصله و m نیز جرم جسم می‌باشد. این قانون در مورد حرکت زمین، سایر سیارات، ماهواره‌ها، و حتی کهکشان‌ها نیز صادق است.

۷ـ۴ قوانین کپلر در خصوص حرکت سیارات

کپلر، دانشمند آلمانی، حرکت انتقالی سیارات را با سه قانون زیر کشف و اثبات کرده است.

۷ـ۴ـ۱ قانون اول کپلر

مدار سیارات به دور خورشید (ستاره مرکزی) بیضی نزدیک به دایره است و ستارهٔ مرکزی در یکی از دو کانون این بیضی قرار دارد (شکل ۷ـ۴). لذا، فاصلهٔ سیارات از خورشید دائماً تغییر می‌کند. نزدیک‌ترین فاصلهٔ سیاره را به خورشید حضیض و دورترین فاصلهٔ آن را اوج سیاره گویند. فاصلهٔ زمین تا خورشید در حضیض و اوج به ترتیب ۱۴۷/۱ میلیون و ۱۵۲/۱ میلیون کیلومتر است.

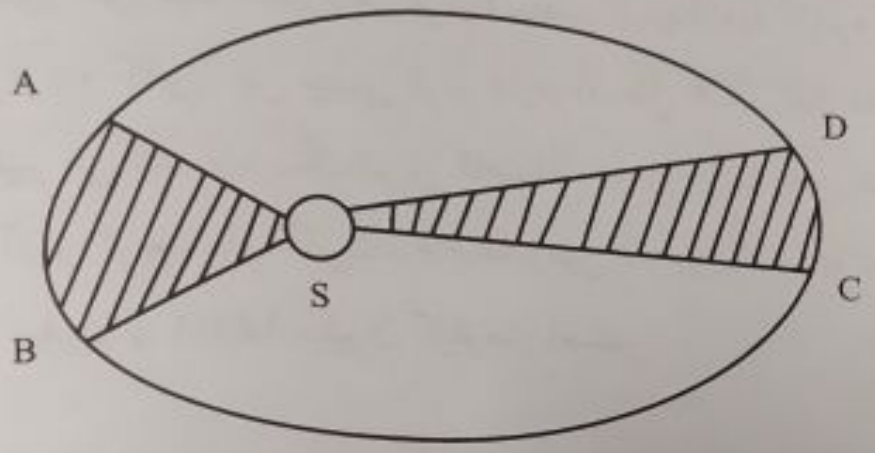


شکل ۷ـ۴ مسیر بیضوی حرکت سیارات به دور خورشید

۷ـ۴ـ۲ قانون دوم کپلر

طبق قانون دوم کپلر، سیاره‌ای که به دور خورشید می‌چرخد، مساحت‌های برابر از بیضی را در زمان‌های برابر طی می‌کند. در نتیجه، سیاره باید در نزدیکی نقطهٔ حضیض مداری سریع‌تر از نقطهٔ اوج مداری حرکت کند. این مطلب در شکل

۷ـ۵ نشان داده شده است. اگر سرعت زمین در اوج و حضیض یکسان بود، یا باید در حضیض مجذوب خورشید می گردید و یا در اوج از مدار خارج می‌شد. بنابراین، برای از بین بردن این اختلاف فاصله، اختلاف سرعت ایجاد گردیده و پیوسته در حرکت انتقالی C بین نیروی گریز از مرکز و نیروی جاذبه تعادل برقرار است.



شکل ۷ـ۵ برابری مساحت مثلث‌ها در زمان‌های مختلف حرکت سیاره

اگر سیاره مسافت‌های A تا B و از C تا D را در زمان‌های برابر طی کند، سرعت آن در طول AB بیش از سرعت آن در طول CD است. در مورد زمین حدود تغییرات سرعت مداری کوچک است و بین ۳۰/۳ کیلومتر در ثانیه در نقطهٔ حضیض و ۲۹/۳ کیلومتر در ثانیه در نقطهٔ اوج قرار دارد. خروج از مرکز مداری آن یعنی ۰/۰۱۷ ناچیز بوده و مدار زمین به مقدار کمی از دایره متفاوت است. مریخ خروج از مرکز مداری برابر ۰/۰۹ دارد و سرعت مداری آن بین ۲۶/۵ و ۲۲/۰ کیلومتر در ثانیه متغیر است.

۷ـ۴ـ۳ قانون سوم کپلر

نسبت مجذور مدت حرکت انتقالی هر سیاره به مکعب فاصلهٔ متوسط آن از آفتاب پیوسته مقداری است ثابت؛ یعنی هرگاه مدت حرکت انتقالی عطارد T و فاصلهٔ متوسط آن از خورشید D و مدت حرکت انتقالی زهره T و فاصلهٔ متوسط آن از

خورشید d و سرانجام مدت حرکت انتقالی زمین t و فاصلهٔ متوسط آن از خورشید d باشد، نسبت‌ها برابر و مقداری ثابت است.

$$\frac{T^2}{D^3}=\frac{T^2}{d^3}=\frac{t^2}{d^3}$$

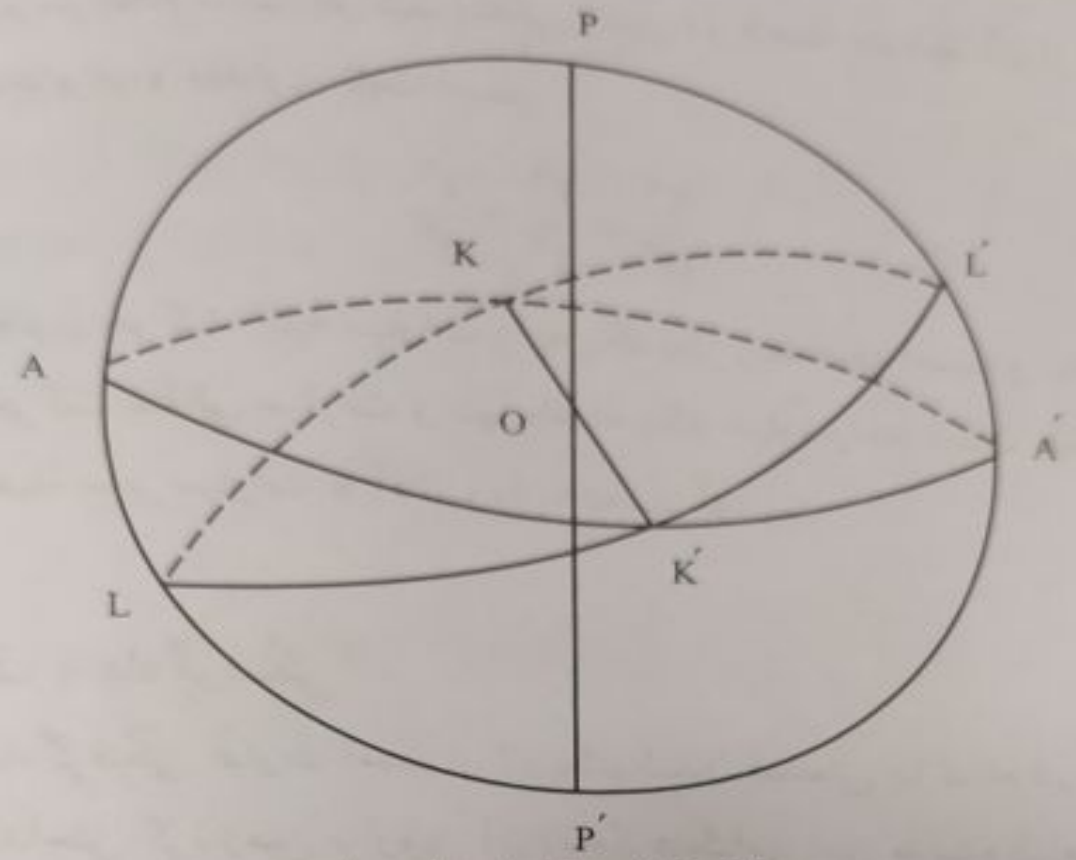
این قانون حرکت کلیهٔ سیارات را به یکدیگر ربط داده است و به وسیلهٔ آن اگر مدت حرکت انتقالی سیارات و تنها فاصلهٔ یک سیاره را در دست داشته باشیم، می‌توانیم فاصلهٔ سایر سیارات تا آفتاب را به دست آوریم.

۷ـ۵ خسوف یا ماه‌گرفتگی[1]

خسوف یا ماه‌گرفتگی عبارت است از تاریک شدن قسمتی یا تمام قرص ماه به علت سایه انداختن کرهٔ زمین بر روی آن (ماه). هنگامی این پدیده ظاهر می‌شود که ماه در حالت بدر بوده یا، به عبارت دیگر، ماه و خورشید در حال مقابله باشند، البته این شرط کافی نیست، زیرا اگر سطح مدار ماه به دور زمین و سطح مدار زمین به دور خورشید بر هم منطبق بودند، لازم می‌آمد که در هر مقابله یک بار خسوف رخ دهد، ولی این دو سطح بر هم منطبق نیستند، بلکه با زاویهٔ ۵ درجه و ۸ دقیقه نسبت به هم مایل‌اند. به همین علت، عرض ماه در یک دور گردش انتقالی به دور زمین بین ۵ درجه و ۸ دقیقه شمالی و جنوبی تغییر می‌کند و تنها در عقدتین یا نقاط اعتدالین ماه صفر بوده، بنابراین موقعی که ماه و خورشید در مقابله باشند و ضمناً ماه در حال عبور از یکی از نقاط اعتدالین ماه باشد، خسوف یا ماه‌گرفتگی صورت می‌پذیرد (حریریان، ۱۳۷۰). عقدتین[2] (گره‌ها) یا نقاط اعتدالین ماه درواقع همان دایرةالبروج و مدار انتقالی ماه به دور زمین هستند (نقاط k′ و k در شکل ۶ـ۷).

اگر در (شکل ۶ـ۷) مدار LL′، مدار انتقالی ماه به دور زمین، و دایرهٔ AA′،

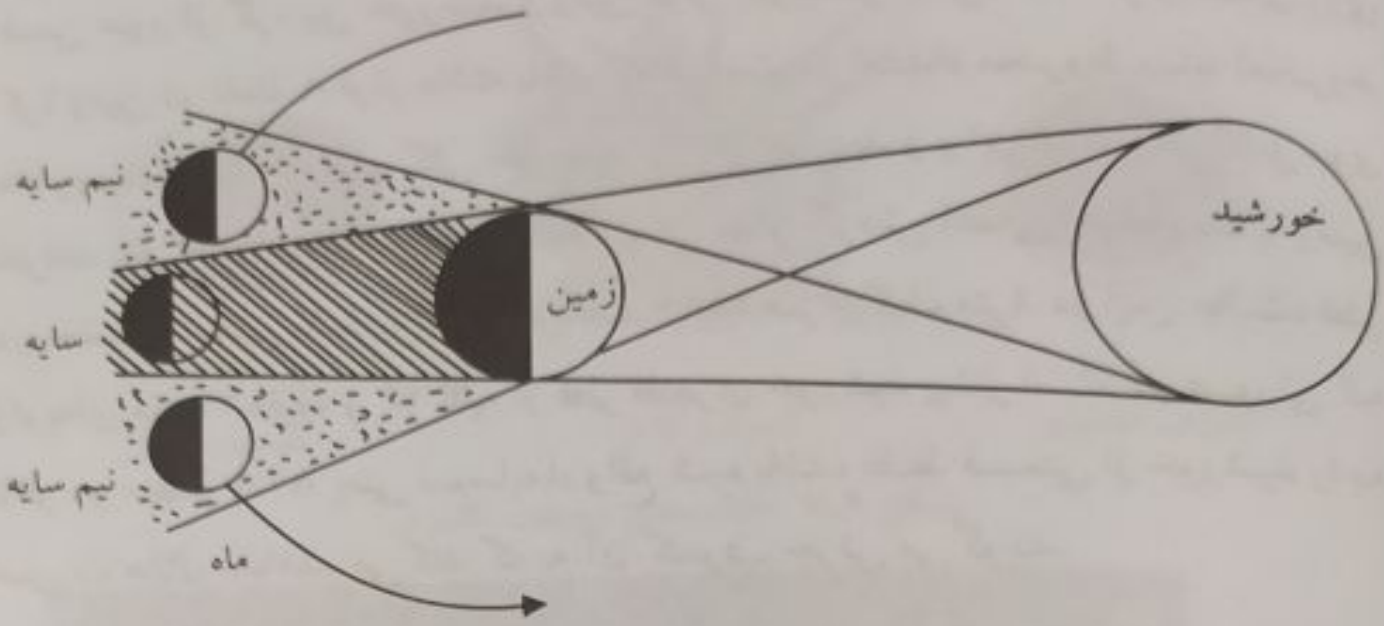
1. Lunar Eclipse
2. Nodes



شکل ۶ـ۷ نقاط اعتدالین ماه

دایرةالبروج باشد، مدار گردش انتقالی ماه با دایرةالبروج منطبق نیست و با آن زاویهٔ ۵ درجه و ۸ دقیقه تشکیل می‌دهد، لذا آن را در ۲ نقطه K′ و K قطع می‌کند. نقطهٔ K′ را، که ماه پس از عبور از آن وارد نیم‌کرهٔ شمالی می‌شود، عقدهٔ (گره) رأس و نقطهٔ K را، که ماه پس از عبور از آن وارد نیم‌کرهٔ جنوبی می‌شود، عقدهٔ ذنب گویند؛ چون این دو نقطه با نقطهٔ اعتدالین مدار گردش زمین به دور خورشید شبیه‌اند، به نام نقاط اعتدالین ماه خوانده می‌شوند.

علت پیدایش خسوف مربوط به مستنیر بودن زمین است که از خورشید کسب نور می‌کند. یعنی هر بار نیمی از کرهٔ زمین، که مقابل خورشید قرار دارد، روشن است (روز) و نیم دیگر آن تاریک (شب). علاوه بر این، از نیمهٔ تاریک کرهٔ زمین مخروط سایه‌ای از مماس‌های مشترک شعاع خارجی خورشید و زمین تشکیل می‌شود که ارتفاعش مربوط به فاصلهٔ خورشید از زمین است؛ در این صورت، اگر ماه در گردش به دور زمین داخل مخروط سایه شود، خسوف اتفاق می‌افتد (شکل ۷ـ۷).



شکل ۷ـ۷ خسوف یا ماه‌گرفتگی

خسوف ممکن است جزئی یا کلی باشد. بنا به آنکه قسمتی از ماه یا تمام قرص ماه تاریک گردد، از آنجا که مقطع عرضی سایهٔ زمین، در مقایسه با ماه، بزرگ‌تر از قرص ماه است (قطر سایهٔ زمین ۹۰۰۰ کیلومتر است، در حالی که قطر ماه ۳۴۰۰ کیلومتر می‌باشد)؛ بنابراین، یک خسوف ممکن است ۲ تا ۳ ساعت طول بکشد.

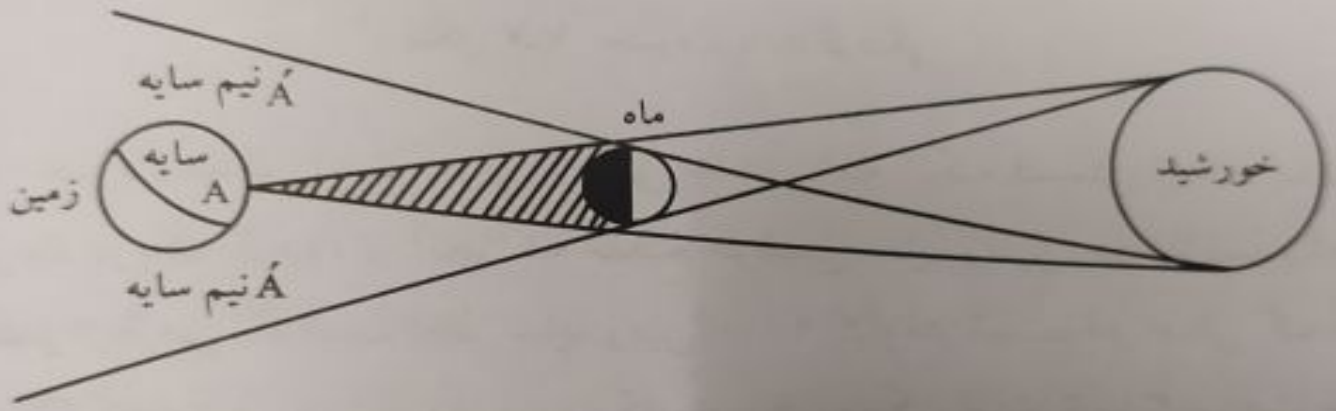
رؤیت خسوف در مکانی ممکن است که ماه و مخروط سایهٔ بالای افقِ مکان و آفتاب در پایین افق همان مکان باشد. به همین دلیل، همیشه خسوف در شب قابل رؤیت است و در روز واقع نمی‌شود. در این صورت، در بخش عمدهٔ کرهٔ زمین می‌توان خسوف را رؤیت نمود.

۷ـ۶ کسوف یا خورشیدگرفتگی[1]

کسوف یا خورشیدگرفتگی زمانی اتفاق می‌افتد که ماه در حال مقارنه و در حال عبور از یک گره از مدار خود باشد (یکی از نقاط اعتدال ماه). به عبارت دیگر، ماه

1. Solar Eclipse

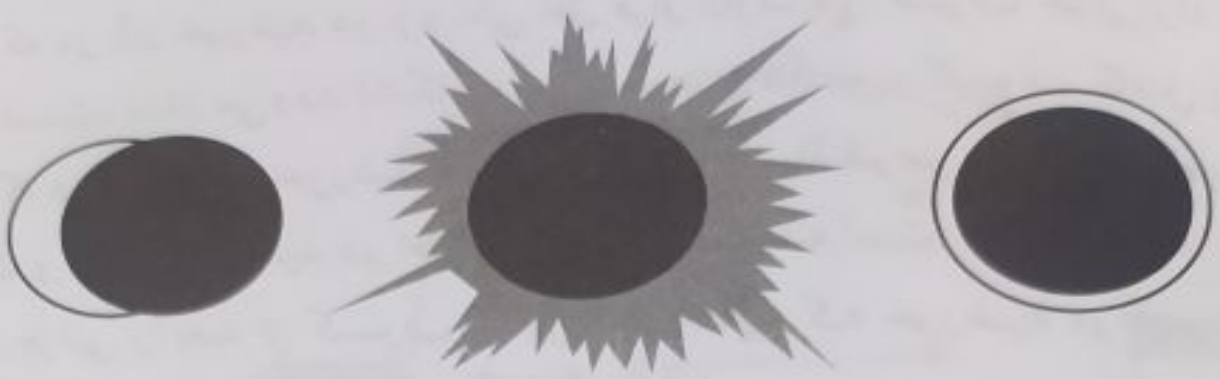
ضمن عبور از گره بین خورشید و زمین قرار گیرد. در شکل ۸-۱۷ اگر راصدی روی کرهٔ زمین در نقطهٔ A قرار داشته باشد که درست در امتداد مخروط سایه (مخروط هاشورزده) باشد، به طور کلی خورشید را نخواهد دید و برای او کسوف کامل روی خواهد داد. این در صورتی است که ماه در مدار گردش انتقالی خود نسبت به زمین در حضیض، یعنی کمترین فاصله، باشد (۳۵۶ هزار کیلومتر). در این حالت، قطر زاویه‌ای ماه ۲۳ دقیقه و ۱۶ ثانیه از قطر ظاهری خورشید بیشتر است. در صورتی که ناظر در منطقهٔ A (A یعنی نیم‌سایه)، واقع شده باشد، فقط قسمتی از خورشید را به صورت هلال مشاهده می کند که به آن کسوف جزئی می گویند.



شکل ۸-۷ کسوف یا خورشیدگرفتگی

در شکل مذکور، در صورتی که ماه بین خورشید و زمین در اوج خود نسبت به زمین واقع شود و همچنین ماه بر روی یک گره یا نقطهٔ اعتدال باشد، در این حالت، به دلیل فاصلهٔ زیاد ماه از زمین (فاصله در اوج از زمین ۴۰۷ هزار کیلومتر)، سایهٔ ماه به اندازهٔ کافی بلند نیست تا به زمین برسد، بنابراین، در این حال، اندازهٔ ظاهری ماه اندکی کوچک‌تر از خورشید به نظر می‌رسد و نمی‌تواند تمام قرص خورشید را بپوشاند، لذا پهنهٔ باریکی از خورشید به صورت حلقه‌ای به دور ماه مشاهده می‌شود که این وضعیت را کسوف حلقوی می گویند (شکل ۹-۷).

ری سوان این مجموعه از عکس‌ها را در میناپولیس گرفته است. اولین



کسوف حلقوی　　کسوف کامل　　کسوف جزئی

شکل ۹ـ۷ حالت‌های مختلف کسوف

شکل ۱۰ـ۷ کسوف خورشید ۳۰ ژوئن ۱۹۵۴

عکس، که در آن خورشید در نزدیکی افق قرار دارد، فاز کسوف جزئی را، که زیاد پیشرفته است، نشان می‌دهد (شکل ۱۰ـ۷). سومین عکس، کسوف کامل را نشان می‌دهد که در آن قرص خورشید به طور کامل به وسیلهٔ قرص تاریک ماه پوشیده شده است و خرمن خورشید در اطراف آن قابل مشاهده است. سایر عکس‌ها فازهای کسوف جزئی را بعد از کسوف کامل، در حالی که خورشید در آسمان اوج می‌گیرد، نشان می‌دهند (استروو و دیگران، ۱۹۷۲).

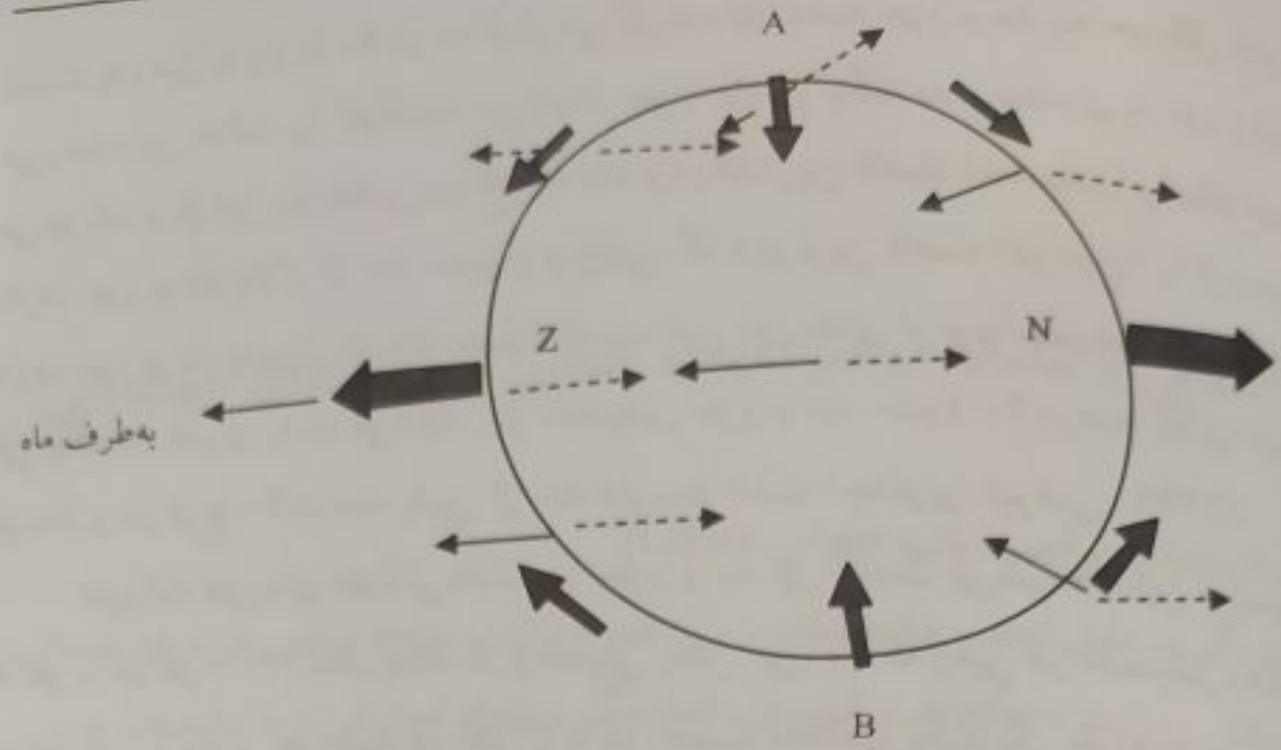
۷ـ۷ کشند یا جزر و مد[1]

جزر و مد یکی از حرکت‌های مهم دوره‌ای آب اقیانوس‌ها و دریاهاست که انسان از زمان‌های دور با آن آشناست. ساکنان قدیمی سواحل اسکاندیناوی، دریا را موجود زنده و پدیدهٔ جزر و مد را نتیجهٔ تنفس آن می‌دانستند. طبق نوشته‌های هردوت، در سال ۳۲۵ قبل از میلاد دانشمند فرانسوی، به نام پی ته آس به ارتباط بین جزر و مد با موقعیت ماه در افق پی برد، ولی تا زمان کشف قوانین جاذبهٔ نیوتن (قرن هفدهم میلادی) علت جزر و مد به طور علمی بیان نشده بود.

جزر و مد معلول نیروی جاذبهٔ ماه و خورشید است. اگرچه جرم خورشید ۳۰ میلیون برابر جرم ماه است، اما خورشید ۳۹۰ برابر دورتر از ماه نسبت به زمین قرار دارد. به همین علت، در تجزیه و تحلیل نهایی، نیروی ماه ۲/۱۷ برابر نیروی خورشید در ایجاد جزر و مد مؤثر خواهد بود. از این رو، می‌توان گفت که ماه جزر و مدها را کنترل می‌کند نه خورشید.

همچنان که زمین به دور خود می‌چرخد، اثر این نیرو در قسمتی که مقابل ماه قرار گرفته است بیشتر است؛ در نتیجه، آب‌ها به طرف ماه کشیده می‌شوند؛ در طرف دیگر، که دورتر از ماه است، این کشش با شدت بیشتری بر قسمت جامد زمین (بستر دریا) اثر می‌کند و گویی آب در پشت سر می‌ماند. بدین علت، در این قسمت نیز آب‌ها کمی برآمده خواهند شد. در حقیقت، نیروی مولد جزر و مد از ترکیب دو نیرو به وجود می‌آید، یکی نیروی کشش ماه و دیگری نیروی گریز از مرکز (شکل ۱۱ـ۷).

1. Tides



شکل ۱۱ـ۷ ارتباط جزر و مد با موقعیت ماه

در شکل ۱۱ـ۷ در دو نقطه N و Z مد و در دو نقطهٔ B و A جزر رخ می‌دهد. چون زمین در هر ۲۴ ساعت یک بار به دور خود می‌چرخد، برای هر نقطه از سطح آن در هر شبانه‌روز دو بار جزر و مد وجود خواهد داشت، ولی شروع جزر و مد در هر نقطه هر بار با ۲۵ دقیقه تأخیر صورت می‌گیرد. این اختلاف ۵۰ دقیقه‌ای در هر شبانه‌روز به این علت است که ماه هر روز با ۵۰ دقیقه تأخیر در افق هر نقطه ظاهر می‌شود.

نیروی کشش خورشید گاهی موجب تقویت و گاهی باعث ضعف نیروی ماه می‌شود. از آنجایی که وضع متقابل ماه و خورشید، به طور مرتب، در تغییر است، دامنهٔ جزر و مد هر روز نسبت به روز دیگر متفاوت است. در شب اول و چهاردهم هر ماه (هلال و بدر)، ماه و خورشید و زمین در امتداد یک خط قرار می‌گیرند؛ در این مواقع نیروی هر دو با هم جمع می‌شود و دامنهٔ جزر و مد به بالاترین درجهٔ خود می‌رسد که آن را مه کشند می‌گویند.

در شب هفتم و بیست‌ویکم هر ماه (تربیع اول و تربیع دوم)، خورشید و ماه

نسبت به زمین با زاویهٔ ۹۰ درجه قرار می گیرند، لذا دامنهٔ جزر و مد به حداقل خود می‌رسد؛ این حالت را کهکشند می‌نامند. چون ماه در یک مدار بیضوی به دور زمین می‌چرخد و از این رو بعضی مواقع که ماه نزدیک‌ترین فاصله (حضیض) را با زمین دارد، جزر و مد بالاتر از حد معمول و وقتی که دورترین فاصله (در اوج) را از زمین دارد، جزر و مد پایین‌تر از حد معمول است. این دوره‌های اوج و حضیض دو بار در طی یک ماه قمری پدید می‌آیند. در حضیض جزر و مد حدود ۲۰ درصد بالای حد متوسط و در اوج ۲۰ درصد پایین از حد متوسط است (جداری عیوضی، ۱۳۶۹).

تغییرات دوره‌ای طولانی‌مدت در جزر و مد نیز حادث می‌شود؛ به این ترتیب که تقریباً در هر ۱۶۰۰ سال یک بار وضعیتی پیش می‌آید که زمین در حضیض، ماه در حضیض و ماه و خورشید در اقتران یا در جهت مخالف یکدیگر خواهند بود و این شرایطی است که در آن نیروی جزر و مد به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد. زمان وقوع این حداکثرهای مطلق محاسبه شده است، به طوری که در سال ۳۵۰۰ قبل از میلاد، ۱۹۰۰ قبل از میلاد، ۲۵۰ قبل از میلاد، چنین حداکثرهایی به وقوع پیوسته‌اند. همچنین طبق محاسبات انجام‌شده، حداکثر مطلق بعدی نیز در سال ۳۳۰۰ میلادی ایجاد می‌شود.