

System and Control Volume (1)

Mohsen Soltanpour

Email: soltanpour@kntu.ac.ir

URL: <http://sahand.kntu.ac.ir/~soltanpour/>

قوانین اصلی و فرعی: (Basic and subsidiary laws)

در حیطه کارهای مهندسی برای هر محیط پیوسته چهار قانون اساسی (basic law) زیر وجود دارد:

۱- اصل بقای ماده (معادله پیوستگی) Conservation of matter (continuity equation)

۲- قانون دوم نیوتن (معادله اندازه حرکت) Newton's second law (momentum equation)

۳- اصل بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک)

Conservation of energy (1st law of thermodynamics)

۴- قانون دوم ترمودینامیک 2nd law of thermodynamics

علاوه بر قوانین عمومی فوق تعدادی قوانین فرعی نیز وجود دارد که در مورد انواع ویژه ماده بکار می‌رود و گاهی روابط ساختاری (constitutive equations) نامیده می‌شود. قانون هوک در جامدات الاستیک، معادله حالت در گازهای کامل و قانون لزجت نیوتن در سیالات لزج نیوتنی نمونه‌هایی از قوانین فرعی هستند.

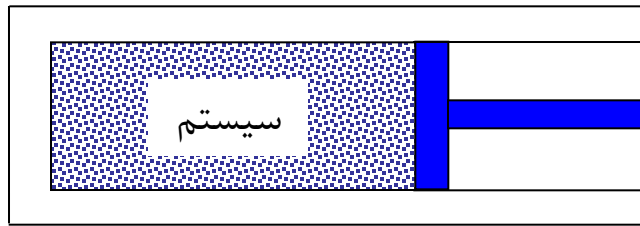
سیستم و حجم کنترل: (System and control volume)

دو حالت زیر در استفاده از قوانین اصلی و فرعی بکار می‌رود:

۱- قوانین فرعی و اصلی برای مقدار معینی جرم برقرار می‌گردد. این مقدار معین ماده مجموعه یا سیستم (system) نامیده می‌شود.

سیستم جرم معینی از ماده است که آن جرم را از سایر مواد دیگر که محیط (surroundings) نامیده می‌شود، متمایز می‌سازد.

سیستم ممکن است تغییر شکل، تغییر مکان یا تغییر دما بدهد ولی همواره حاوی ماده معینی است.



بخار داخل سیلندر یک سیستم است که با حرکت پیستون حجم آن تغییر می کند ولی ماهیت و کمیت جرم داخل آن ثابت است.

قانون بقای جرم ثابت بودن جرم درون یک سیستم را نسبت به زمان (بدون توجه به اثرات نسبیت) نشان می دهد:

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

m جرم کلی \rightarrow

قانون دوم نیوتن نیز برای یک سیستم بصورت زیر بیان می گردد:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} (m\vec{v}) = \frac{d}{dt} \left(\int_m \vec{v} dm \right)$$

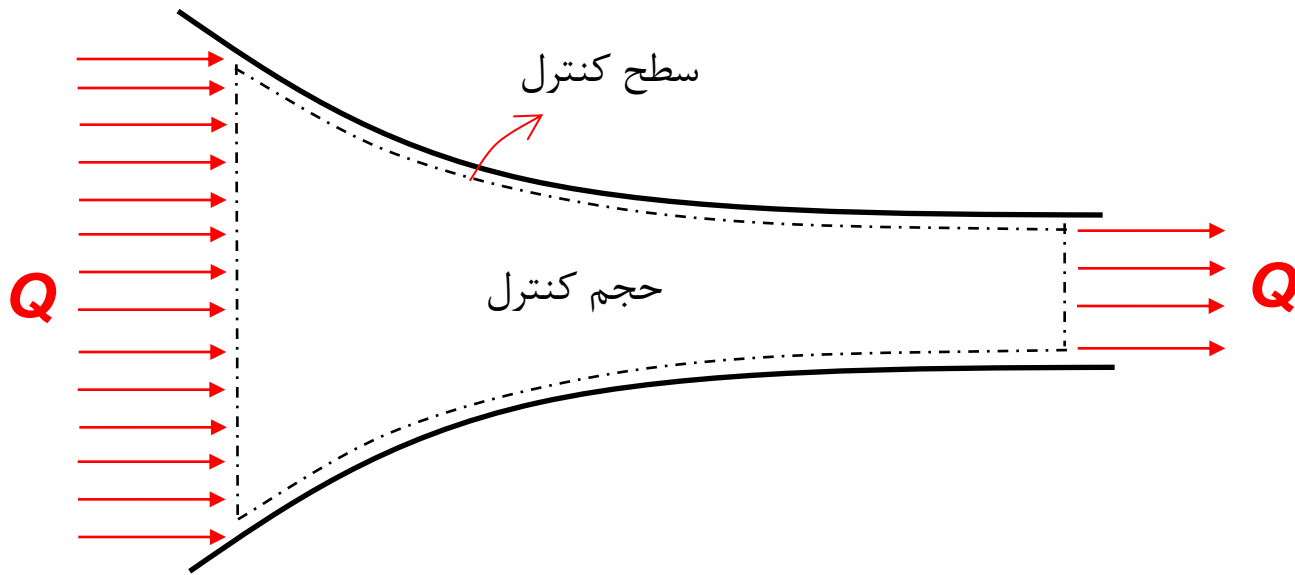
جرم ثابت سیستم \rightarrow

\rightarrow سرعت مرکز جرم سیستم

برآیند تمامی نیروهای خارجی اعمال شده بر سیستم (شامل نیروهای حجمی نظیر وزن)

در حجم کنترل (control volume) قوانین اصلی و فرعی برای حجم معینی از فضا برقرار می‌گردد. حجم کنترل، حجم محدودی از فضا می‌باشد که در تحلیل وضعیتهایی که جریان جرم، اندازه حرکت و انرژی به داخل و خارج یک فضا روی می‌دهد استفاده می‌شود. به حجم کنترل سیستم باز (open system) نیز گفته می‌شود. مرز حجم کنترل، سطح کنترل (control surface) نامیده می‌شود.

در مکانیک جامدات، می‌توان جسم صلب یا بخشهایی از آن را مشخص کرد لذا همواره از روش سیستم (که به آن دیاگرام آزاد – free-body diagram گفته می‌شود) استفاده می‌شود. اما در مکانیک سیالات که با تعداد نامحدودی ذره که حرکات نسبی پیچیده‌ای نسبت به یکدیگر دارند سروکار دارد معمولاً استفاده از حجم کنترل ارجح است.



حجم کنترل حجم محدودی از فضا است که اندازه و شکل آن اختیاری است.

معادله انتقال رینولدز: (Reynolds transport equation)

ترمودینامیک دانش مطالعه گرما و انتقال انرژی است. در ترمودینامیک می توان دو دسته خواص زیر را مشخص نمود:

۱- خواص **گسترده** یا مقداری (extensive properties):
خواصی از ماده است که اندازه آنها به مقدار ماده موجود بستگی دارد. نظیر وزن، اندازه حرکت، حجم و انرژی.

۲- خواص **متمرکز** یا شدتی (intensive properties):
خواصی که اندازه آنها مستقل از مقدار ماده موجود است. نظیر دما و فشار که مستقل از جرم هستند.

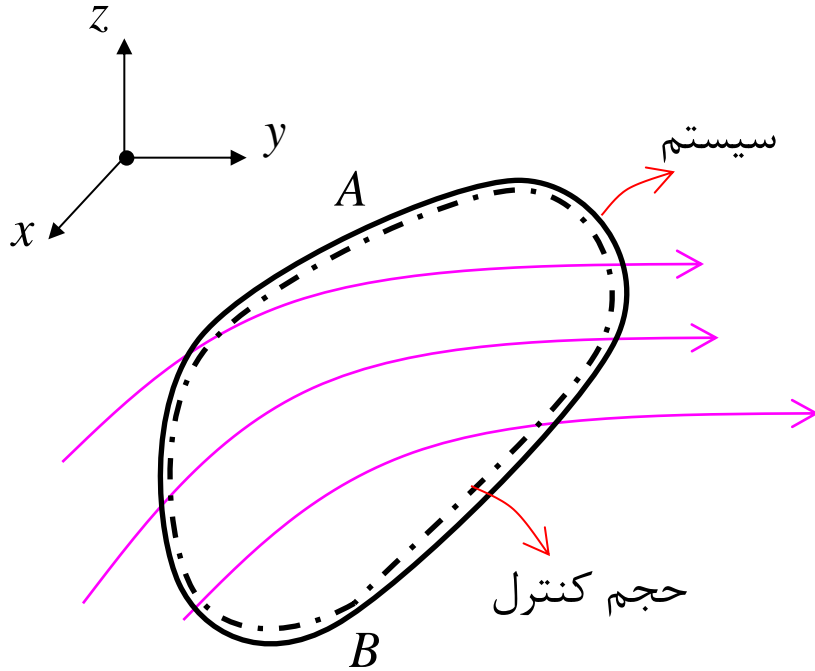
می توان متغیرهای گسترده را در واحد جرم بیان کرده به خواص متمرکز تبدیل نمود. به عنوان نمونه حجم واحد جرم (V)، انرژی بر واحد جرم (e) به مقدار ماده موجود بستگی نداشته کمیات متمرکزی محسوب می شوند. به این کمیتهای ویژه مخصوص (specific) اطلاق میشود:

$$e = \frac{dE}{dm} \quad \text{یا} \quad E = \int_m edm = \iiint_V e\rho dV$$

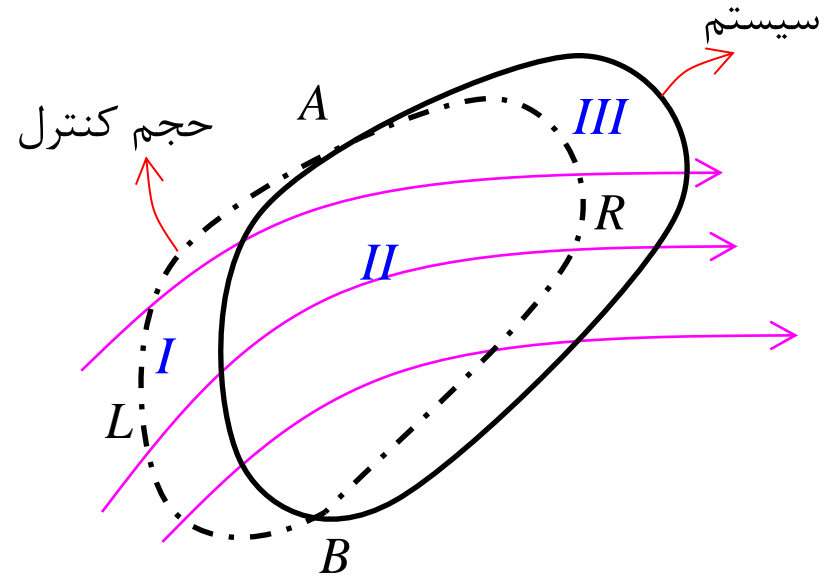
$$v = \frac{dV}{dm} \quad \text{یا} \quad V = \int_m vdm = \iiint_V v\rho dV$$

برای مرتبط کردن خاصیتی از سیال در سیستم و خاصیت نظیر آن در حجم کنترل، خاصیت گسترده دلخواه N از سیال را در نظر می‌گیریم. اگر توزیع N در واحد جرم را با η نشان دهیم:

$$\eta = \frac{dN}{dm} \quad \text{یا} \quad N = \iiint_V \eta \rho dV$$



سیستم و حجم کنترل در لحظه t



سیستم و حجم کنترل در لحظه $t + \Delta t$

محل حجم کنترل در فضا ثابت است اما سیستم دارای حجم $I+II$ در لحظه t و $II+III$ در لحظه $t + \Delta t$ می‌باشد.

میزان تغییر N در فاصله زمانی Δt برابر است با:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{system} = \frac{DN}{Dt}$$

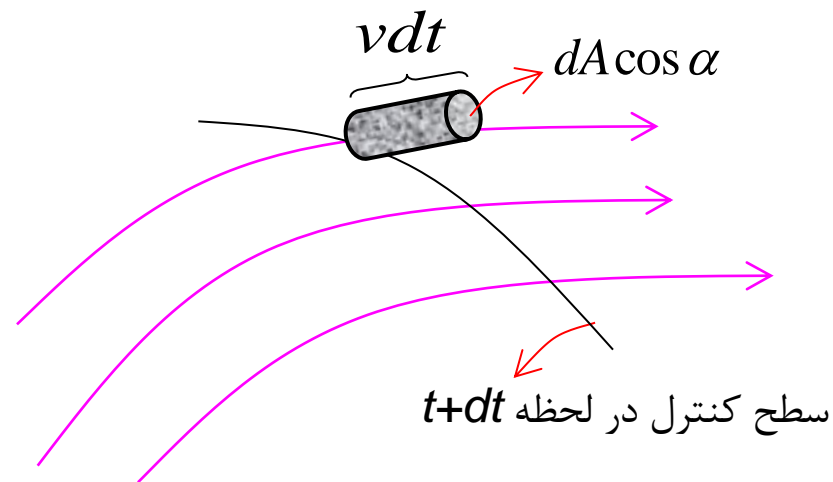
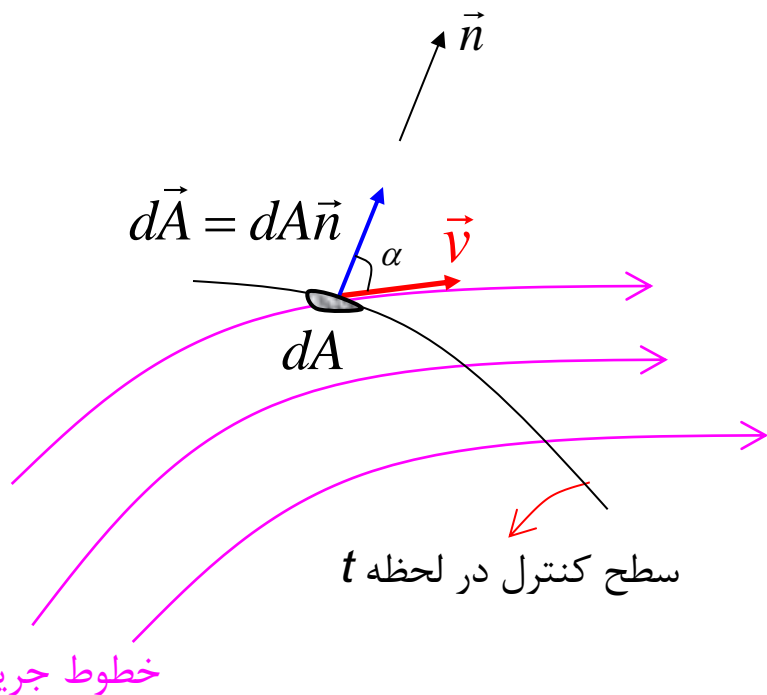
$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{(\iint_{II} \eta \rho dV + \iint_{III} \eta \rho dV)_{t+\Delta t} - (\iint_{I} \eta \rho dV + \iint_{II} \eta \rho dV)_t}{\Delta t} \right]$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{(\iint_{II} \eta \rho dV)_{t+\Delta t} - (\iint_{II} \eta \rho dV)_t}{\Delta t} \right] + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{(\iint_{III} \eta \rho dV)_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right] - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{(\iint_{I} \eta \rho dV)_t}{\Delta t} \right] \quad (I)$$

اولین حد مشتق جزئی حجم کنترل می باشد:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{(\iint_{II} \eta \rho dV)_{t+\Delta t} - (\iint_{II} \eta \rho dV)_t}{\Delta t} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \eta \rho dV$$

حد دوم مقدار متوسط خروج N از بخش ARB سطح کنترل و حد سوم نرخ ورود N از بخش ALB سطح کنترل را نشان می دهد. بنابراین جملات دوم و سوم مجموعاً نرخ خروجی خالص N از حجم کنترل را ارائه می کنند.



$$dV = (v dt) dA \cos \alpha$$

$$= \vec{v} \cdot d\vec{A} dt$$

حجم سیالی که در زمان dt از dA گذر کرده است:

با جای گذاری dV نرخ خروج N از بخش ARB سطح کنترل برابر است با $(\alpha < \pi/2)$:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{(\iiint_{III} \eta \rho dV)_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right] = \iint_{ARB} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \iint_{ARB} \eta \rho v \cos \alpha dA > 0$$

$(\cos \alpha > 0)$

و نرخ ورود N از بخش ALB سطح کنترل $(\alpha > \pi/2)$:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{(\iiint_{I} \eta \rho dV)_t}{\Delta t} \right]^* = - \iint_{ALB} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \iint_{ALB} \eta \rho v \cos \alpha dA > 0$$

$(\cos \alpha < 0)$

بنابراین نرخ خروجی خالص N :

$$\iint_{ARB} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} - \left(- \iint_{ALB} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \right) = \iint_{ARB} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \iint_{ALB} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oiint_{CS} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

با توجه به این که اثرات غیر دائمی دارای مرتبه دوم اهمیت هستند، معادله فوق که در جریان دائمی بدست آمد در جریان غیر دائمی نیز برقرار است. با جایگذاری در معادله (I) اسلاید ۷:

$$\frac{DN}{Dt} = \oiint_{CS} \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \eta \rho dV$$

معادله انتقال رینولدز

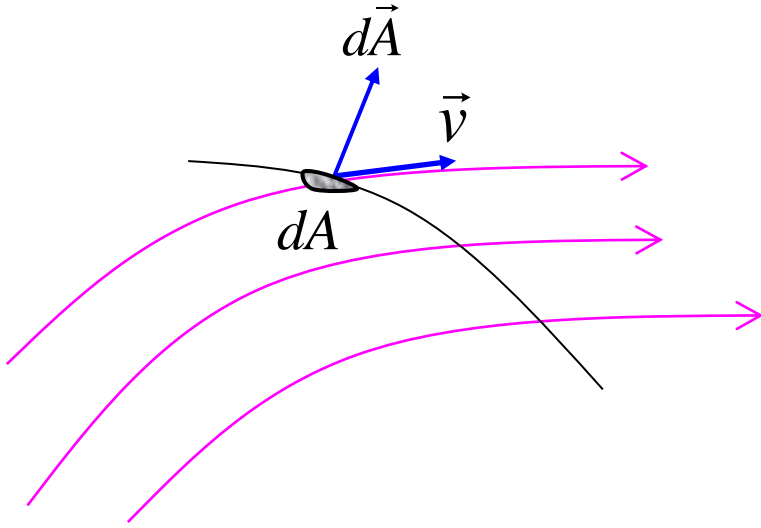
که در آن $N(\vec{x}, t)$ اسکالر، بردار یا تانسوری از هر مرتبه است.

این معادله که امکان ارتباط روش سیستم به حجم کنترل را نشان می‌دهد، معادله انتقال رینولدز (Reynolds transport equation) نامیده می‌شود.* این معادله را می‌توان مستقیماً با استفاده از تئوری لایب نیتز (Leibnitz) که مشتق انتگرال حجمی را به انتگرال سطحی تبدیل می‌کند نیز بدست آورد.

در معادله انتقال رینولدز \vec{V} نسبت به دستگاه xyz (در واقع نسبت به حجم کنترل که در این دستگاه ثابت است سنجیده می‌شود). بنابراین نرخ تغییرات زمانی N (و η) نیز که می‌توانند یک کمیت برداری باشند (مثلاً اندازه حرکت) نسبت به حجم کنترل بیان می‌شوند.

از آنجا که می‌توان دستگاه مختصات متحرک استفاده کرد، پس حجم کنترل نیز می‌تواند هرگونه حرکتی داشته باشد. در این حالت کافی است سرعتها و تمام کمیت‌های وابسته به زمان که مشتق آنها محاسبه می‌شود (نظیر سرعت، اندازه حرکت،...) نسبت به حجم کنترل متحرک بیان شوند.

دبی (Discharge)



دبی (با بعد L^3/T) کمیتی **اسکالر** است که حجم سیال عبوری از هر مقطع در واحد زمان را نشان می دهد:

$$Q = \iint_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

در حالتی که سرعت ذرات عمود بر سطح مقطع عبوری باشد:

$$Q = \iint_A \vec{v} \cdot d\vec{A} = \iint_A v dA$$

در هر مقطع، سرعت متوسط جریان را با تقسیم دبی عبوری بر سطح مقطع می توان بدست آورد:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} = \frac{\iint_A v dA}{A}$$

به همین ترتیب جرم سیال عبوری از هر مقطع در واحد زمان را می توان دبی جرمی (**mass flow rate**) نامید (با بعد M/T):

$$\dot{m} = \iint_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

(Basic laws for finite systems and finite control volumes)

در این بخش تعدادی از معادلات اساسی که مبنای اکثر تحلیل‌های سیالات را تشکیل می‌دهد بررسی می‌شوند.

قانون بقای جرم-معادله پیوستگی: (Conservation of mass-Continuity equation)

در یک سیستم بدلیل ثابت بودن جرم اصل بقای جرم مستقیماً برقرار است. در حجم کنترل با استفاده از معادله انتقال رینولدز داریم:

$$N = m \quad \Longrightarrow \quad \eta = \frac{dN}{dm} = \frac{dm}{dm} = 1$$

$$\frac{Dm}{Dt} = \oiint_{CS} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho dV$$

اما جرم سیستم (طرف چپ معادله ثابت است)، بنابراین:

$$\frac{Dm}{Dt} = 0$$

$$\Longrightarrow \quad \oiint_{CS} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho dV = 0$$

و یا

$$\oiint_{CS} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho dV$$

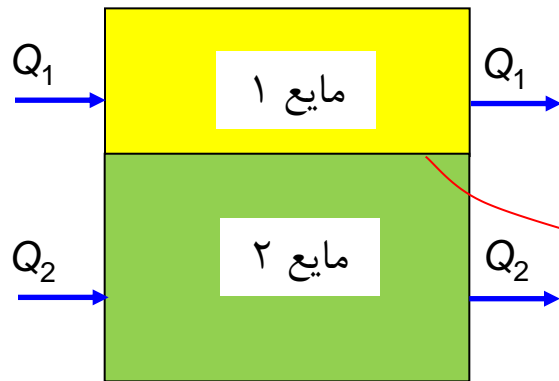
این رابطه در هر لحظه t برای هر حجم کنترل معتبر است. در صورت متحرک بودن حجم کنترل \vec{v} و مشتق زمانی $\frac{\partial}{\partial t}$ باید نسبت به حجم کنترل متحرک محاسبه شوند.

اگر جریان نسبت به دستگاه مختصاتی که به حجم کنترل متصل شده است **دائمی** باشد، با توجه با ثابت بودن تمام خواص سیال نسبت به زمان و نیز شکل حجم کنترل **برای یک یا چند نوع سیال** داریم:

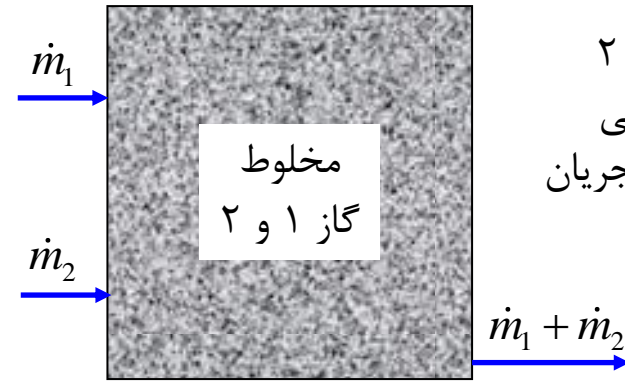
$$\frac{\partial}{\partial t} \underbrace{\iiint_{CV} \rho dV}_{\text{جرم کل داخل حجم کنترل که ثابت است}} = \iiint_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\oiint_{CS} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0}$$

در صورت وجود تنها یک نوع سیال می توان ρ را از این رابطه حذف کرد.

جرم کل داخل حجم کنترل که ثابت است



موقعیت مرز مشترک دو مایع در جریان دائمی ثابت است ($\rho_1 < \rho_2$).



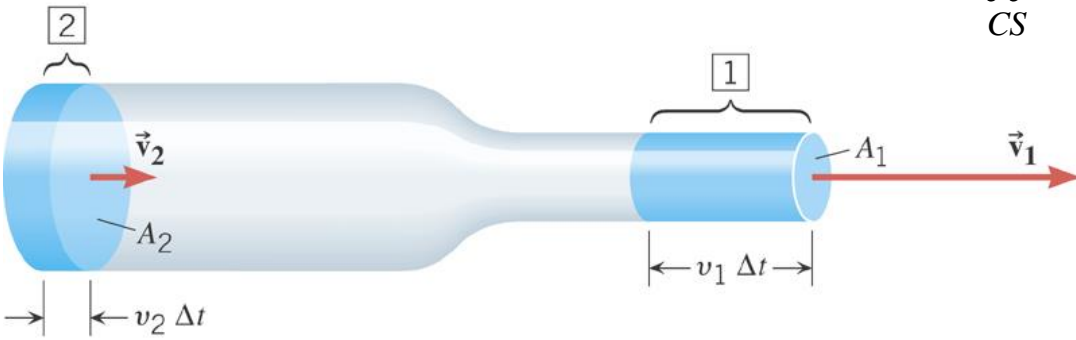
نسبت گازهای ۱ و ۲ داخل ظرف و چگالی مخلوط دو گاز در جریان دائمی ثابت است.

اگر در داخل حجم کنترل، جریان غیر قابل تراکمی از فقط یک نوع سیال وجود داشته باشد، جرم مخصوص سیال حتی در میدان سرعت غیر دائمی همواره و در تمام نقاط حجم کنترل ثابت است. بنابراین:

$$\oiint_{CS} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \rho dV = -\frac{\partial}{\partial t} (\rho \iiint_{CV} dV) = -\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) = -\rho \frac{\partial V}{\partial t} = 0$$

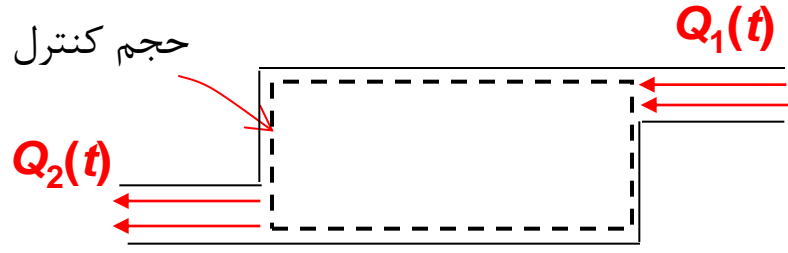
حجم کنترل
(ثابت است)

$$\implies \oiint_{CS} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{و یا} \quad \boxed{\oiint_{CS} \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0}$$

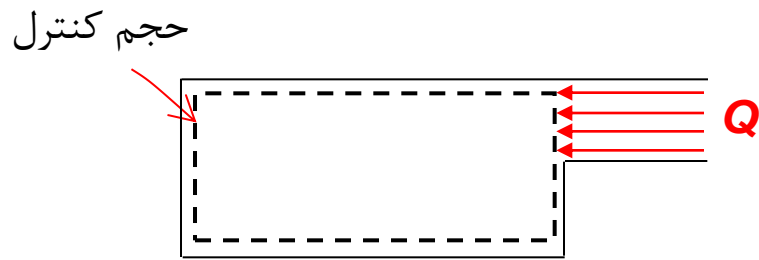


$$\boxed{A_1 v_1 = A_2 v_2}$$

بنابراین در هر جریان تراکم ناپذیر از یک نوع سیال، اصل بقای جرم به اصل بقای حجم (conservation of mass) تبدیل می‌گردد. واضح است که این مطلب در جریان تراکم پذیر غیر دائمی صحیح نیست زیرا جمله مربوط به نرخ تغییر جرم داخل حجم کنترل حذف نمی‌شود. مثلاً ورود هوا به یک محفظه که به افزایش جرم داخل آن منجر می‌شود:

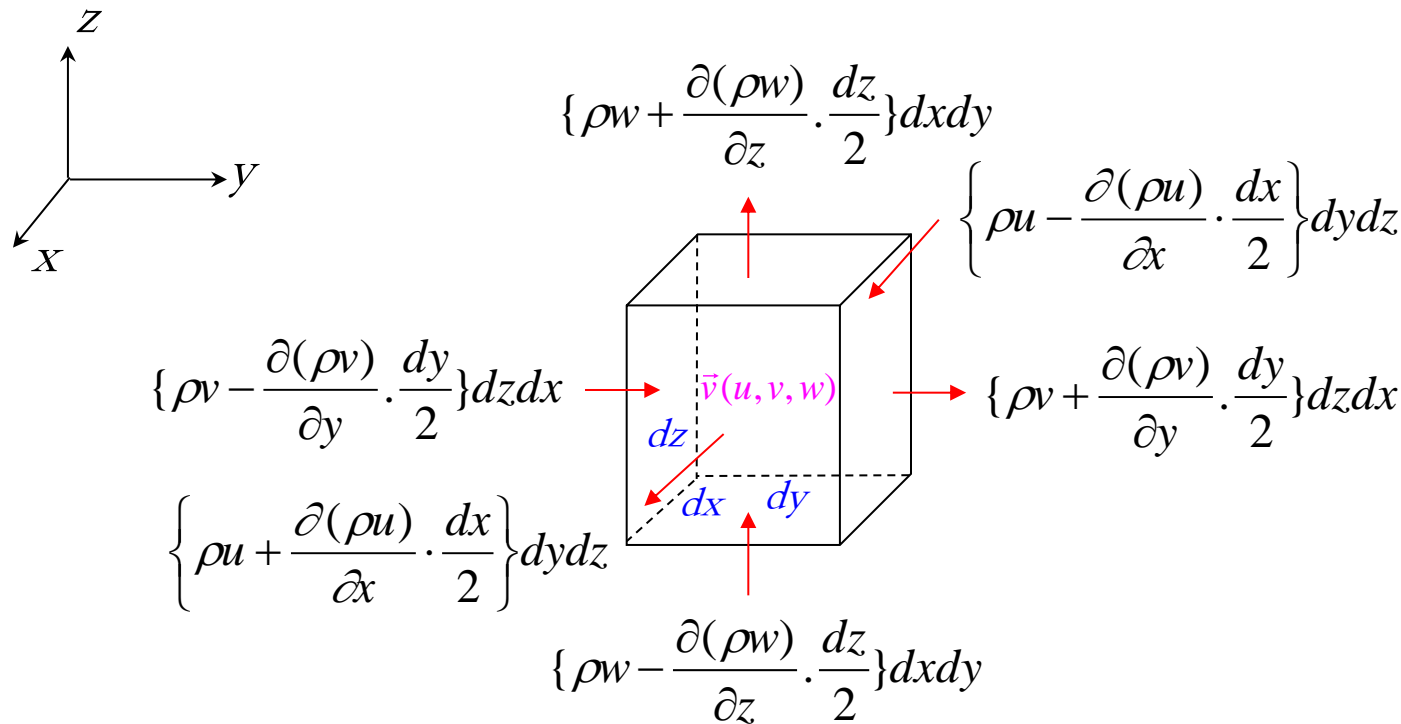


$$Q_1(t) = Q_2(t) \quad \text{جریان غیر قابل تراکم}$$



جریان قابل تراکم

فرم دیفرانسیلی قانون بقای جرم: (Differential form of mass conservation)



با فرض بردار سرعت $\vec{v} = (u, v, w)$ در مرکز المان:

دبی جرمی ورودی - دبی جرمی خروجی = نرخ کاهش جرم داخل جزء حجم

$$-\frac{\partial(\rho dx dy dz)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy dx dz + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz dx dy$$

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy dx dz + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz dx dy$$

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$$

قانون بقای جرم (conservation of matter)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

در جریان دائمی

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

معادله پیوستگی (continuity equation)

در جریان تراکم ناپذیر (دائمی و غیر دائمی)

معادلات مشابهی را در سیستم مختصات استوانه ای و کروی می توان بدست آورد. برای رهایی از سیستم مختصات می توان از عملگر دیورجانس استفاده کرد:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div}(\rho \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

قانون بقای جرم

و در جریان تراکم ناپذیر (معادله پیوستگی):

$$\text{div}(\vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$$

قانون اندازه حرکت خطی: (Linear momentum)

در تحلیل سیستم می توان مستقیماً قانون دوم نیوتن را بکار برد:

$$\vec{F}_R = \frac{d}{dt}_{system} \left(\int_m \vec{v} dm \right) = \frac{d\vec{P}}{dt}_{system}$$

یا

$$\vec{F}_R = \frac{D}{Dt}_{system} \left(\int_m \vec{v} dm \right) = \frac{D\vec{P}}{Dt}_{system} \quad (\text{I})$$

که در آن \vec{P} اندازه حرکت خطی و \vec{F}_R برآیند کلیه نیروهای خارجی وارد بر سیستم بوده و \vec{v} و مشتق زمانی نسبت به یک دستگاه مختصات اینرسیال (inertial reference) بیان می‌شوند. با توجه به اینکه نیروهای وارده به سیستم از دو بخش نیروی سطحی (surface force) $\vec{T}(x, y, z, t)$ و نیروی حجمی (body force) $\vec{B}(x, y, z, t)$ تشکیل می‌شوند:

$$\vec{F}_R = \oint_S \vec{T} dA + \iiint_V \vec{B} \rho dV$$

سطح سیستم

حجم سیستم

$$\text{و (I)} \implies \oint_S \vec{T} dA + \iiint_V \vec{B} \rho dV = \frac{D\vec{P}}{Dt} \quad (\text{II}) \quad \text{قانون نیوتن در یک سیستم محدود}$$

در تحلیل حجم کنترل ثابت در فضای اینرسیال (control volume fixed in inertial space)، اندازه حرکت \vec{P} بعنوان خاصیت گسترده در معادله انتقال رینولدز در نظر گرفته می شود:

$$N = \vec{P} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{d\vec{P}}{dm} = \frac{\vec{v}dm}{dm} = \vec{v}$$

$$\frac{D\vec{P}}{Dt} = \oint_{CS} \vec{v}(\rho\vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \vec{v}(\rho dV)$$

اگر حجم کنترل در فضای اینرسیال ثابت در نظر گرفته شود، $\frac{D\vec{P}}{Dt}$ نیز نسبت به دستگاه اینرسیال بوده و با استفاده از معادله (II) اسلاید قبل*:

$$\oint_{CS} \vec{T}dA + \iiint_{CV} \vec{B}\rho dV = \oint_{CS} \vec{v}(\rho\vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \vec{v}(\rho dV)$$

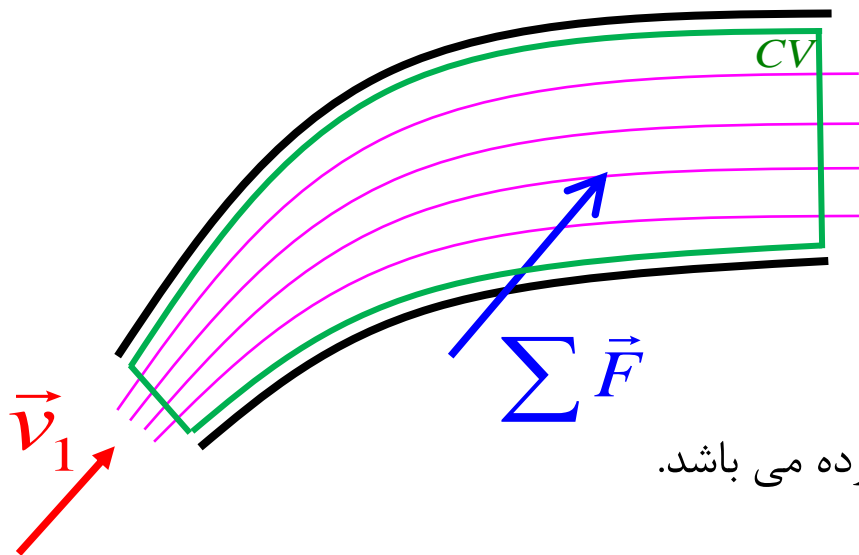
شار اندازه حرکت (اندازه حرکت در واحد زمان) ورودی و خروجی از حجم کنترل
تغییر اندازه حرکت در داخل حجم کنترل

این رابطه بدین معنی است که برآیند نیروهای سطحی و حجمی اعمال شده بر یک حجم کنترل برابر با مجموع خالص شار اندازه حرکت ورودی و خروجی از سطح کنترل و نرخ زمانی افزایش اندازه حرکت خطی درون حجم کنترل می باشد.

با در نظر گرفتن مولفه‌های کمیتهای برداری اندازه حرکت، سرعت، نیروی سطحی و نیروی حجمی در سه راستای متعامد x ، y و z :

$$\left\{ \begin{aligned} \iint_{CS} T_x dA + \iiint_{CV} B_x \rho dV &= \iint_{CS} v_x (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} v_x (\rho dV) \\ \iint_{CS} T_y dA + \iiint_{CV} B_y \rho dV &= \iint_{CS} v_y (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} v_y (\rho dV) \\ \iint_{CS} T_z dA + \iiint_{CV} B_z \rho dV &= \iint_{CS} v_z (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} v_z (\rho dV) \end{aligned} \right.$$

می توان معادله عمومی اندازه حرکت خطی را در **جریان دائمی** با یک ورودی و خروجی با فرض یکنواخت بودن جریان در سطح مقطع (**جریان یک بعدی**) ساده کرد:



$$\iint_{CS} \vec{T} dA + \iiint_{CV} \vec{B} \rho dV = \iint_{CS} \vec{v} (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A})$$

$$\sum \vec{F} = \iint_{CS} \vec{v} (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A})$$

که در آن $\sum \vec{F}$ مجموع برآیند نیروهای سطحی و حجمی وارده می باشد.

با توجه به جهت بردار $d\vec{A}$ که همواره به سمت خارج سطح می باشد، $\vec{v} \cdot d\vec{A}$ در جریان ورودی منفی و در جریان خروجی مثبت است:

$$\sum \vec{F} = \vec{v}_1(-\rho Q) + \vec{v}_2(\rho Q)$$

$$= \rho Q(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

$$\text{یا} \quad = \dot{m}(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

$$\boxed{\sum \vec{F} = \rho Q(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}$$

و یا با در نظر گرفتن مولفه‌های کمیت‌های برداری سرعت، نیرو در سه راستای متعامد x ، y و z :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = \rho Q(v_{2x} - v_{1x}) \\ \sum F_y = \rho Q(v_{2y} - v_{1y}) \\ \sum F_z = \rho Q(v_{2z} - v_{1z}) \end{array} \right.$$

فرم دیفرانسیلی قانون نیوتن، معادله اولر: (Euler's equation)

در المانی به جرم dm ، اندازه حرکت با کمیت برداری $dm\vec{v}$ تعریف می شود. قانون نیوتن در یک سیستم مختصات اینرسیال:

$$\begin{aligned}d\vec{F} &= \frac{D}{Dt}(dm\vec{v}) \\ &= dm \frac{D\vec{v}}{Dt} = dm\vec{a} \\ &= dm \left(v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right)\end{aligned}$$

اگر تنش برشی وجود نداشته و تنها نیروی حجمی نیروی ثقل باشد:*

$$d\vec{F} = df dV = (-\vec{\nabla}P - \gamma\vec{k})dV$$

$$\text{و یا } (-\vec{\nabla}P - \gamma\vec{k})dV = dm \left(v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right)$$

$$\text{و } dm = \rho dV \implies \left(-\frac{\vec{\nabla}P}{\rho} - g\vec{k} \right) = v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{D\vec{v}}{Dt}$$

و یا:

معادله اولر

(Euler's equation)

$$\left(-\frac{\nabla \vec{P}}{\rho} - g \vec{\nabla} z\right) = v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{D\vec{v}}{Dt}$$

که در آن:

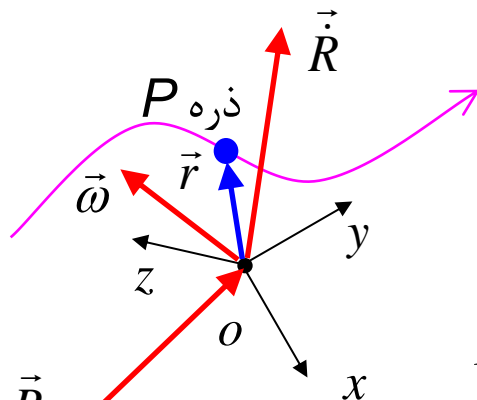
$$\vec{a} = \frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{Dv_x}{Dt} \vec{i} + \frac{Dv_y}{Dt} \vec{j} + \frac{Dv_z}{Dt} \vec{k} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}$$

با توجه به $v_x \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}$ می توان معادله اولر را به فرم زیر نیز نمایش داد:

$$\left(-\frac{\nabla \vec{P}}{\rho} - g \vec{\nabla} z\right) = (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

حجم کنترل غیر اینرسیال (Non-inertial control volume)

معادله اصلی اندازه حرکت خطی که از قانون نیوتن بدست می آید در حالتی صحیح است که شتاب نسبت به یک دستگاه مرجع اینرسیال سنجیده شود.* با توجه به اینکه حرکت سیال نسبت به حجم کنترل سنجیده می شود، معادله اندازه حرکت خطی صرفاً برای حجم کنترلهایی معتبر است که نسبت به یک دستگاه اینرسیال ثابت بوده و یا با سرعت ثابت حرکت کنند.



دستگاه اینرسیال XYZ و دستگاه xyz را که نسبت به آن حرکت اختیاری دارد در نظر می گیریم:

$$\vec{v}_{XYZ} = \dot{\vec{R}} + \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{v}_{xyz}$$

$(\vec{v}_o)_{xyz}$ $(\vec{v}_{P/o})_{xyz}$

$$\vec{a}_{XYZ} = \vec{a}_{xyz} + \ddot{\vec{R}} + \overbrace{2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz}}^{** \text{ شتاب Coriolis}} + \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$$

$(\vec{a}_{P/o})_{xyz}$ \vec{a}_o $(\vec{v}_{P/o})_{xyz}$

$\vec{\omega}, \vec{\omega}$: به ترتیب سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای سیستم دوار xyz در سیستم مختصات ثابت XYZ

قانون نیوتن برای ذره‌ای بسیار کوچک بر حسب حرکت نسبی آن در دستگاه xyz :

$$d\vec{F} = dm\vec{a}_{XYZ}$$

$$= dm[\vec{a}_{xyz} + \ddot{\vec{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})]$$

$$\Rightarrow d\vec{F} - dm[\ddot{\vec{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] = dm\vec{a}_{xyz}$$

$$= \frac{D}{Dt_{xyz}} (dm\vec{v}_{xyz})$$

معرف مشتق زمانی است که از دیدگاه دستگاه xyz انجام می‌شود. این معادله قانون نیوتن را در حالتی که $\frac{D}{Dt_{xyz}}$

جملات سمت چپ به شکل نیروهایی فرضی در نظر گرفته شده‌اند نشان می‌دهد. با انتگرال‌گیری بر روی تمام المانهای داخل سیستم، برای سیستم محدود:

$$\oint_S \vec{T} dA + \iiint_V \vec{B} \rho dV - \iiint_V [\ddot{\vec{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \rho dV$$

$$= \frac{D}{Dt_{xyz}} \left(\iiint_V \vec{v}_{xyz} \rho dV \right) = \frac{D}{Dt_{xyz}} (\vec{P}_{xyz}) \quad (I)$$

با استفاده از معادله انتقال رینولدز:

$$N = \vec{P}_{xyz} \implies \eta = \frac{d\vec{P}_{xyz}}{dm} = \frac{\vec{v}_{xyz} dm}{dm} = \vec{v}_{xyz}$$

$$\frac{D\vec{P}_{xyz}}{Dt_{xyz}} = \oiint_{CS} \vec{v}_{xyz} (\rho \vec{v}_{xyz} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t_{xyz}} \iiint_{CV} \vec{v}_{xyz} (\rho dV) \quad (\text{II})$$

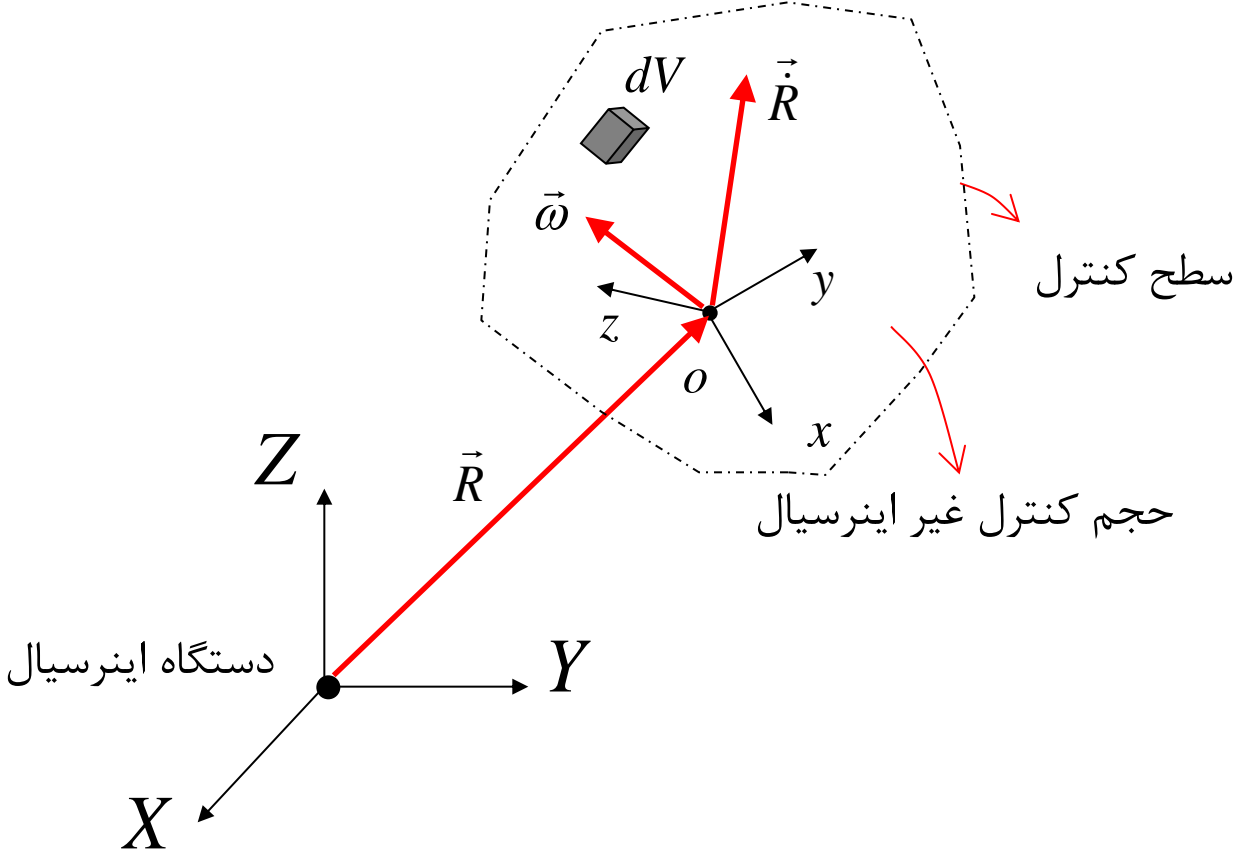
با ترکیب دو معادله (I) و (II):

$$\begin{aligned} & \oiint_{CS} \vec{T} dA + \iiint_{CV} \vec{B} \rho dV - \iiint_{CV} [\vec{R} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \rho dV \\ & = \oiint_{CS} \vec{v}_{xyz} (\rho \vec{v}_{xyz} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t_{xyz}} \iiint_{CV} \vec{v}_{xyz} (\rho dV) \end{aligned}$$

نرخ عبور (ورود/خروج) دبی جرمی (\dot{m}) از سطح
کنترل حجم کنترل غیر اینرسیال

از آنجایی که حجم کنترل در دستگاه xyz ثابت است، معمولاً مناسبتر است که از حجم کنترل بعنوان محل سنجش سرعتها و مشتقات زمانی استفاده شود.

بنابراین قانون اندازه حرکت به این معنی است که کل نیروهای سطحی و حجمی وارده به سیال داخل سطح کنترل منهای کل توزیع نیروهای حجمی فرضی (که ناشی از غیر اینرسیال بودن حجم کنترل اند) برابر است با مجموع گذر اندازه حرکت از سطح کنترل و نرخ تغییر اندازه حرکت داخل حجم کنترل از دید ناظری واقع بر حجم کنترل.



لنگر اندازه حرکت (Moment of momentum)

حجم کنترل اینرسیال: (Inertial control volume)

سیستم محدودی از سیال را مطابق شکل در نظر می‌گیریم.
بر مبنای قانون نیوتن:

$$d\vec{F} = \frac{D}{Dt}(dm\vec{v})$$

با ضرب خارجی طرفین رابطه در بردار مکان \vec{r} :

$$\vec{r} \times d\vec{F} = \vec{r} \times \frac{D}{Dt}(dm\vec{v})$$

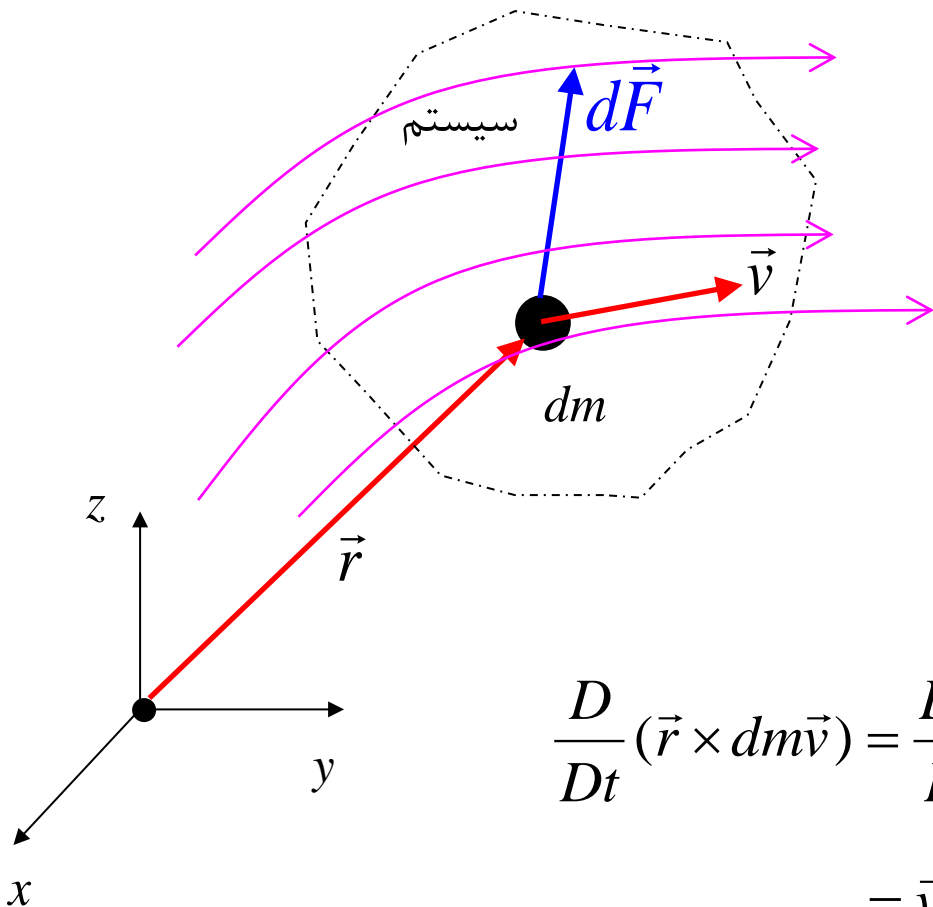
اما

$$\frac{D}{Dt}(\vec{r} \times dm\vec{v}) = \frac{D\vec{r}}{Dt} \times dm\vec{v} + \vec{r} \times \frac{D}{Dt}(dm\vec{v})$$

$$= \vec{v} \times dm\vec{v} + \vec{r} \times \frac{D}{Dt}(dm\vec{v})$$

$$= \vec{r} \times \frac{D}{Dt}(dm\vec{v})$$

$$\longrightarrow \vec{r} \times d\vec{F} = \frac{D}{Dt}(\vec{r} \times dm\vec{v})$$



یعنی لنگر کل نیروهای وارد بر المان dm نسبت به مبدا مختصات اینرسیال با میزان تغییر زمانی لنگر اندازه حرکت که از دستگاه مختصات اینرسیال سنجیده می شود برابر است. با انتگرال گیری روی سیستم:

$$\begin{aligned} \int \vec{r} \times d\vec{F} &= \int_M \frac{D}{Dt} (\vec{r} \times \vec{v}) dm \\ &= \frac{D}{Dt} \int_M (\vec{r} \times \vec{v}) dm \quad \text{با توجه به ثابت بودن جرم سیستم (حدود انتگرال گیری)} \\ &= \frac{D\vec{H}}{Dt} \end{aligned}$$

که در آن \vec{H} (اندازه حرکت زاویه‌ای، **angular momentum**) لنگر اندازه حرکت سیستم در فضای اینرسیال را نشان می‌دهد. لنگر سمت چپ معرف کل لنگر نیروهای خارجی وارده به سیستم نسبت به یک نقطه ثابت است که می‌تواند بر حسب نیروهای سطحی و حجمی نوشته شود:

$$\int \vec{r} \times d\vec{F} = \oint_S \vec{r} \times \vec{T} dA + \iiint_V \vec{r} \times \vec{B} \rho dV \quad \longrightarrow \quad \boxed{\oint_S \vec{r} \times \vec{T} dA + \iiint_V \vec{r} \times \vec{B} \rho dV = \frac{D\vec{H}}{Dt}}$$

که معادله لنگر اندازه حرکت برای یک سیستم را نشان می‌دهد.

اندازه حرکت زاویه ای \vec{H} بعنوان خاصیت گسترده در معادله انتقال رینولدز در نظر گرفته می شود:

$$N = \vec{H} \quad \Longrightarrow \quad \eta = \frac{d\vec{H}}{dm} = \frac{(\vec{r} \times \vec{v})dm}{dm} = \vec{r} \times \vec{v}$$

$$\frac{D\vec{H}}{Dt} = \oint_{CS} (\vec{r} \times \vec{v})(\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} (\vec{r} \times \vec{v})(\rho dV)$$

با توجه به انطباق حجم کنترل و سیستم در لحظه t :

$$\oint_{CS} \vec{r} \times \vec{T} dA + \iiint_{CV} \vec{r} \times \vec{B} \rho dV = \underbrace{\oint_{CS} (\vec{r} \times \vec{v})(\rho \vec{v} \cdot d\vec{A})}_{\text{شار لنگر اندازه حرکت (اندازه حرکت در واحد زمان) ورودی و خروجی از حجم کنترل}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} (\vec{r} \times \vec{v})(\rho dV)}_{\text{تغییر لنگر اندازه حرکت در داخل حجم کنترل}}$$

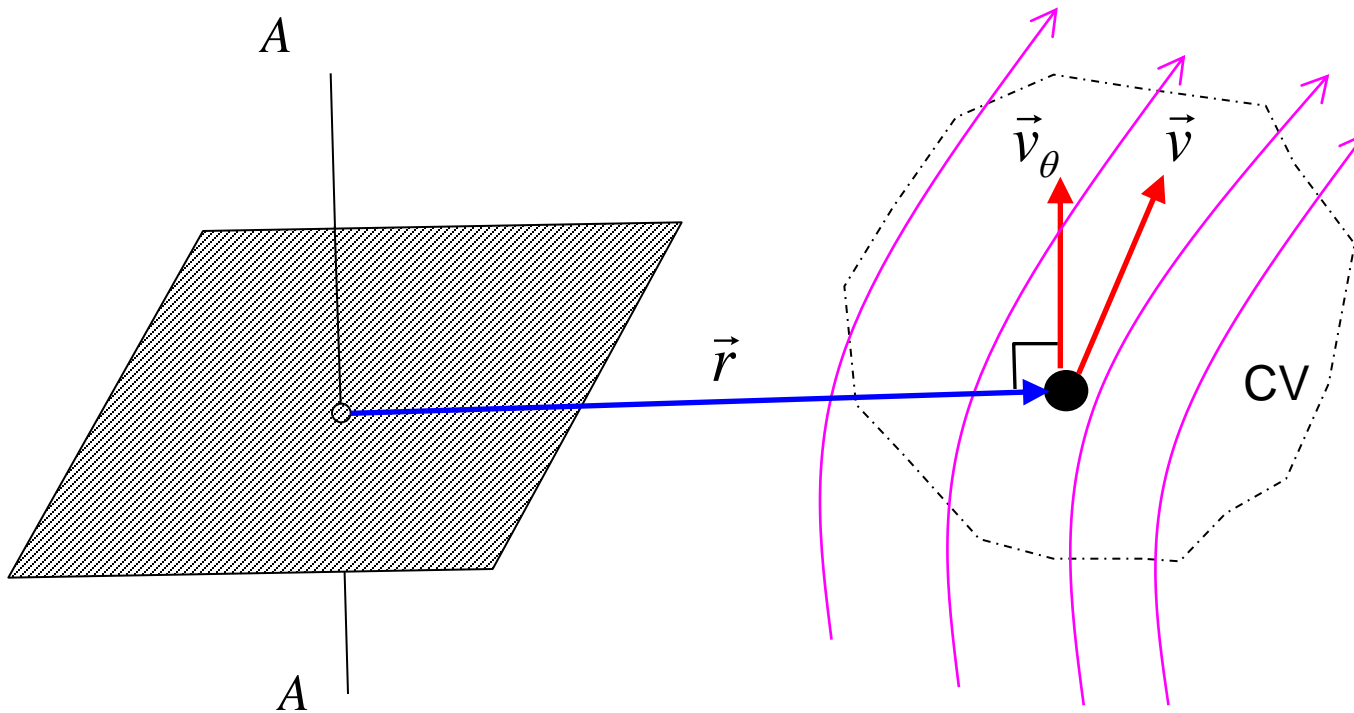
شار لنگر اندازه حرکت (اندازه حرکت در واحد زمان) ورودی و خروجی از حجم کنترل

تغییر لنگر اندازه حرکت در داخل حجم کنترل

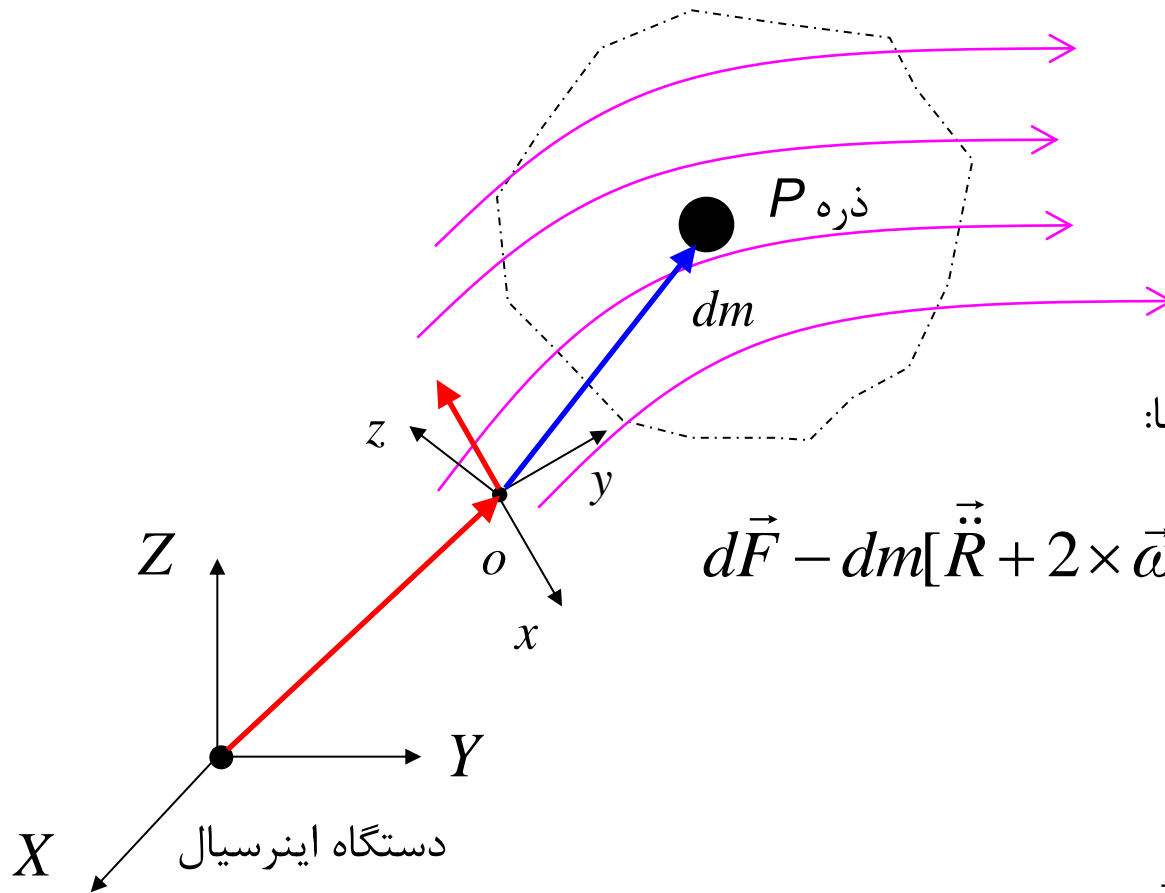
در بسیاری از مسائل عملی با نوشتن لنگر نیروها و اندازه حرکت نسبت به یک محور فقط یک مولفه اسکالر بکار می رود:

$$\oint_{CS} \bar{r} T_{\theta} dA + \iiint_{CV} \bar{r} B_{\theta} \rho dV = \oint_{CS} (\bar{r} v_{\theta}) (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} (\bar{r} v_{\theta}) (\rho dV)$$

که در آن فاصله شعاعی هر ذره تا محور $A-A$ بوده (اندازه بردار \bar{r}) و v_{θ} سرعت ذره در راستای عمود بر شعاع است. ضمناً در استفاده از این رابطه باید دقت کرد که جهت قراردادی v_{θ} ، T_{θ} و B_{θ} یکسان باشد.



حجم کنترل غیر اینرسیال: (Non-inertial control volume)



قانون نیوتن برای جزء جرم dm برابر است با:

$$d\vec{F} = dm[\vec{\ddot{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \vec{\dot{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})]$$

$$= \frac{D}{Dt}_{xyz} (dm\vec{v}_{xyz})$$

با ضرب خارجی طرفین رابطه در بردار مکان \vec{r} :

$$\vec{r} \times d\vec{F} = dm \left\{ \vec{r} \times [\vec{\ddot{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \vec{\dot{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \right\} = \vec{r} \times \frac{D}{Dt}_{xyz} (dm\vec{v}_{xyz})$$

اما $\vec{r} \times \frac{D}{Dt}_{xyz} (dm\vec{v}_{xyz}) = \frac{D}{Dt}_{xyz} (\vec{r} \times dm\vec{v}_{xyz})$ بنابراین:

$$\vec{r} \times d\vec{F} - dm \left\{ \vec{r} \times [\vec{\ddot{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \right\} = \frac{D}{Dt}_{xyz} (\vec{r} \times \vec{v}_{xyz}) dm$$

با انتگرال گیری بر روی سیستم:

لنگر نیروهای حجمی نسبت
به مرکز سیستم اینرسیال

لنگر کل اندازه حرکت سیستم
نسبت به مرکز سیستم غیر اینرسیال

$$\vec{M}_S + \vec{M}_B - \iiint_V \left[\vec{r} \times [\vec{\ddot{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \right] \rho dV = \frac{D\vec{H}_{xyz}}{Dt}_{xyz}$$

لنگر نیروهای سطحی نسبت
به مرکز سیستم اینرسیال

و با در نظر گرفتن خاصیت گسترده \vec{H}_{xyz} در معادله انتقال رینولدز:

$$N = \vec{H}_{xyz} \implies \eta = \frac{d\vec{H}_{xyz}}{dm} = \frac{(\vec{r} \times \vec{v}_{xyz}) dm}{dm} = \vec{r} \times \vec{v}_{xyz}$$

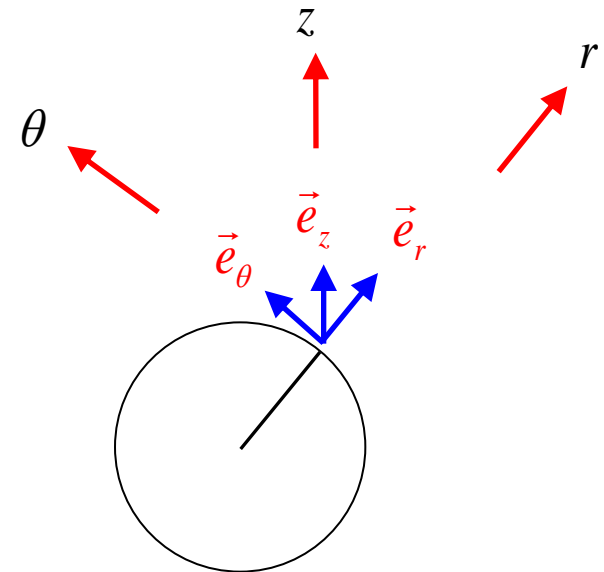
$$\frac{D\vec{H}_{xyz}}{Dt} = \oiint_{CS} (\vec{r} \times \vec{v}_{xyz}) (\rho \vec{v}_{xyz} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t}_{xyz} \iiint_{CV} (\vec{r} \times \vec{v}_{xyz}) (\rho dV)$$

و با توجه به انطباق حجم کنترل و سیستم در لحظه t :

$$\begin{aligned} \vec{M}_S + \vec{M}_B - \iiint_{CV} \left[\vec{r} \times [\ddot{\vec{R}} + 2 \times \vec{\omega} \times \vec{v}_{xyz} + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \right] \rho dV \\ = \oiint_{CS} (\vec{r} \times \vec{v}_{xyz}) (\rho \vec{v}_{xyz} \cdot d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} (\vec{r} \times \vec{v}_{xyz}) (\rho dV) \end{aligned}$$

در این معادله بجز $\vec{\omega}$ ، $\dot{\vec{\omega}}$ و $\ddot{\vec{R}}$ سایر کمیتها و مشتقهای زمانی نسبت به حجم کنترل متحرک سنجیده می شوند. در حالتی که $\vec{\omega}$ و $\dot{\vec{\omega}}$ دارای امتداد ثابتی در فضای اینرسیال هستند، می توان رابطه را با استفاده از مختصات استوانه‌ای ساده کرد:

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{r} &= \bar{r} \vec{e}_{\bar{r}} + z \vec{e}_z \\ \vec{v}_{xyz} &= (v_{\bar{r}})_{xyz} \vec{e}_{\bar{r}} + (v_{\theta})_{xyz} \vec{e}_{\theta} + (v_z)_{xyz} \vec{e}_z \\ \vec{\omega} &= \omega \vec{e}_z \\ \dot{\vec{\omega}} &= \dot{\omega} \vec{e}_z \end{aligned} \right.$$



$$-\iiint_{CV} (\vec{r} \times \ddot{\vec{R}}) \rho dV = \iiint_{CV} (\ddot{\vec{R}} \times \vec{r}) \rho dV = \ddot{\vec{R}} \times \underbrace{\iiint_{CV} \vec{r} dm}_M = \ddot{\vec{R}} \times M \vec{r}_c = \ddot{\vec{R}} \times \vec{M}_r$$

ممان اول جرم حول نقطه O

که در آن \vec{r}_c بردار نظیر مرکز جرم است. در صورت تقارن محوری $\vec{r}_c = \mathbf{0}$ است یعنی توزیع جرم در حجم کنترل نسبت به مرکز سیستم متحرک (نقطه O اسلاید ۲۶) صفر است:

$$\vec{r}_c = \bar{r} \vec{e}_{\bar{r}} + z_c \vec{e}_z \quad \left\{ \begin{array}{l} \bar{r}_c = \frac{\int r dm}{M} \\ z_c = \frac{\int z dm}{M} \end{array} \right.$$

با جایگزین کردن معادلات فوق در معادله اصلی حجم کنترل غیر اینرسیال (اسلاید قبل):

$$\vec{M}_S + \vec{M}_B + \vec{R} \times M\vec{r}_c - \iiint_{CV} (\bar{r}\vec{e}_{\bar{r}} + z\vec{e}_z) \times \{ (2\omega\vec{e}_z) \times [(\bar{v}_{\bar{r}})_{xyz}\vec{e}_{\bar{r}} + (\bar{v}_{\theta})_{xyz}\vec{e}_{\theta} + (\bar{v}_z)_{xyz}\vec{e}_z] + \dot{\omega}\vec{e}_z \times (\bar{r}\vec{e}_{\bar{r}} + z\vec{e}_z) + \omega\vec{e}_z \times [\omega\vec{e}_z \times (\bar{r}\vec{e}_{\bar{r}} + z\vec{e}_z)] \} \rho dV =$$

$$\oiint_{CS} (\bar{r}\vec{e}_{\bar{r}} + z\vec{e}_z) \times [(\bar{v}_{\bar{r}})_{xyz}\vec{e}_{\bar{r}} + (\bar{v}_{\theta})_{xyz}\vec{e}_{\theta} + (\bar{v}_z)_{xyz}\vec{e}_z] \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} [(\bar{r}\vec{e}_{\bar{r}} + z\vec{e}_z) \times [(\bar{v}_{\bar{r}})_{xyz}\vec{e}_{\bar{r}} + (\bar{v}_{\theta})_{xyz}\vec{e}_{\theta} + (\bar{v}_z)_{xyz}\vec{e}_z] \rho dV$$

با توجه به اینکه:

$$\begin{cases} \vec{e}_{\bar{r}} \times \vec{e}_{\theta} = \vec{e}_z \\ \vec{e}_z \times \vec{e}_{\bar{r}} = \vec{e}_{\theta} \\ \vec{e}_{\theta} \times \vec{e}_z = \vec{e}_{\bar{r}} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
\vec{M}_S + \vec{M}_B + \vec{R} \times M\vec{r}_c - \iiint_{CV} [(2\omega z v_{\bar{r}} + \dot{\omega} \bar{r} z) \vec{e}_{\bar{r}} + \\
(2\omega z v_{\theta} + \omega^2 \bar{r} z) \vec{e}_{\theta} + (2\omega \bar{r} v_{\bar{r}} + \dot{\omega} \bar{r}^2) \vec{e}_z] \rho dV = \\
\oiint_{CS} (-z v_{\theta} \vec{e}_{\bar{r}} + (z v_{\bar{r}} - \bar{r} v_z) \vec{e}_{\theta} + r v_{\theta} \vec{e}_z) (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) \\
+ \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} [(-z v_{\theta}) \vec{e}_{\bar{r}} + (z v_{\bar{r}} - \bar{r} v_z) \vec{e}_{\theta} + r v_{\theta} \vec{e}_z] \rho dV
\end{aligned}$$

این معادله را می توان در سه راستای r, z, θ تفکیک کرد.