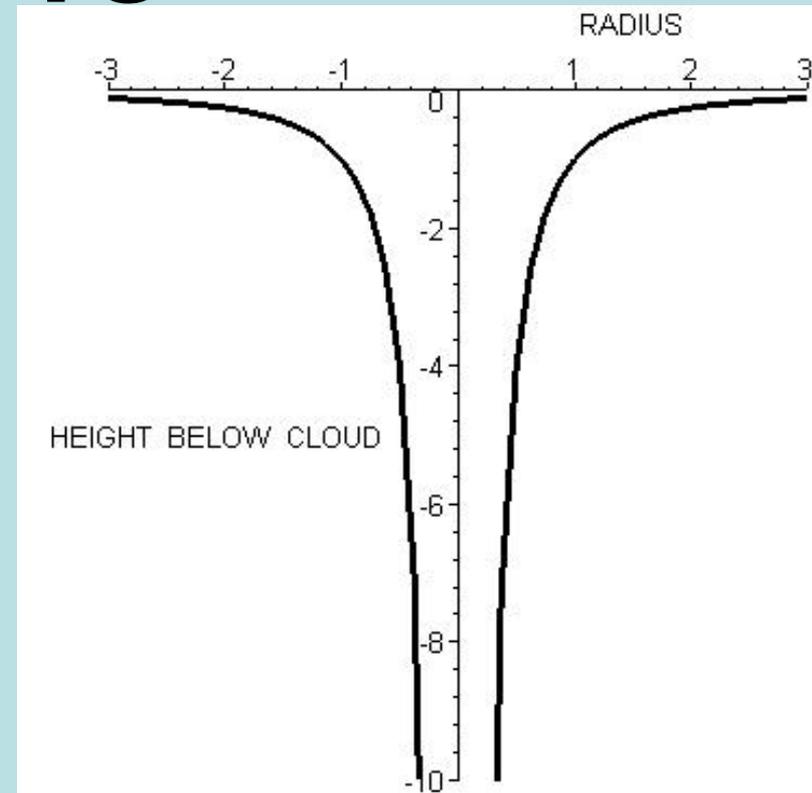


דינמיקה ותרמודינמיקה של טורנדו

נציבי בן-אמוץ
© 2018 נציבי בן-אמוץ



למה חשוב לדעת מה מניע טורנדו?

- טורנדו הרסני וקטלני
- בלושטיין (1999) כתב שלנסות לשנות טורנדו בלתי אפשרי בלי להבין איך הם נוצרים
- גם, לנסות לשנות טורנדו בלי תיאוריה זה כמו לירות בחושך.
- בלושטיין אישר שלא ידוע מה ההבדל בין עננים היוצרים טורנדו ובין אלה שלא (דראפר 2013)
- נוסף שבלי לדעת את ההבדל לא נוכל להגדיל את זמן האזהרה מעבר ל-13 הדקות הנוכחיות

טורנדו הוא סערה סובבת

הבדלים

הוריקן גדול הרבה יותר מטורנדו
אותם הטורוסים כמו בטורנדו קיימים
גם בהוריקן, רק הרבה יותר גדולים
בהוריקן, במקום ענן מלמעלה, יש ים
או אוקיינוס מלמטה

דינמיקה של סיבוב

טורנדו כמו כל דבר

מציית לחוקי הטבע, כולל חוקי הפיסיקה
וחוקי הדינמיקה וחוקי הסיבוב.

לכן טורנדו, שהוא סערה סובבת, לא יכול
להפר את חוק שימור התנע הזוויתי.

התנע הזוויתי L הוא

$$L = m v r \quad (1)$$

שימור התנע הזוויתי אומר L קבוע. נפתור עבור v :

$$v = L/(m r) \quad (2)$$

האנרגיה הקינטית היא

$$E = (m/2) v^2 \quad (3)$$

מציבים את v מתוך (2) ב-(3) ומקבלים עבור E :

$$E = (m/2) [L/(m r)]^2 = (L^2/2m) / r^2 \quad (4)$$

• כדי לשמור על התנע הזוויתי (1) L קבוע,
האנרגיה הקינטית (4) E חייבת לגדול כאשר
הרדיוס r נהיה קטן יותר, ולשם כך יש לספק
אנרגיה.

שימור תנע זוויתי בריקוד בלט

[PRESS HERE for ballet dancer](#)

רקדן הבלט אינו יכול להקטין את הרדיוס שלו\שלה פחות מרדיוס הגוף. אבל למה זה שיא עולמי? למה רקדנים רזים יותר לא יכולים לשבור את השיא העולמי במהירות סיבוב בריקוד בלט? כי רקדנים רזים יותר הם חלשים יותר, ואינם יכולים לספק את האנרגיה הדרושה

$$E = (m/2)v^2 \quad (3)$$

$$E = (L^2/2m) / r^2 \quad (4)$$

עבור רדיוס קטן יותר, כי התנע הזוויתי L נשמר ונשאר קבוע.

האנרגיה עבור $v = \omega r$ היא גם

$$E = L\omega/2 \quad (5)$$

לכן, אם רקדן הבלט הרזה יותר אינו מספיק חזק, מהירות הסיבוב המקסימלית שלו היא גם כן קטנה יותר, ואינה מספיקה לשבור את השיא. לפיכך להיות חזק זה הכרחי כדי להגיע לרדיוס קטן יותר ולשיא עולמי חדש. אם יש בקהל מי שלמדה בלט, היא יודעת זאת בלי משוואות

- עבור אספקת אנרגיה מוגבלת, האוויר החיצוני הסובב יכול להתקרב לציר הסיבוב עד רדיוס גבולי מסוים, אך לא יותר קרוב:

$$r_{\text{LIMIT}} = L / \sqrt{2 m E} \quad (6)$$

- הרדיוס הגבולי שווה, או בטורנדו מסוימים קצת גדול יותר מרדיוס משפך הטורנדו.
- במלים אחרות:
- אוויר מחוץ למשפך הטורנדו אינו יכול להיכנס לתוך המשפך!

למה? פשוט אין לו את "כרטיס הכניסה",
 ז"א האנרגיה שלו אינה מספיק גדולה כדי
 "להיכנס פנימה"

כמו בהוריקן, הסיבוב גורם ללחץ מופחת במשפך של הטורנדו.

לחץ אטמוספרי נמוך עד 0.9 אטמוספירה נמדד במשפכים של טורנדו.

הלחץ המופחת במשפך מנסה למשוך פנימה כל מה שהוא יכול מכל מקום שהוא יכול. מאיפה?

לא מחוץ למשפך – כי זה יפר או את חוק שימור האנרגיה או את חוק שימור התנע הזוויתי.

לא מלמטה – כי שם נמצאת האדמה.

מה נשאר?

כמו בהוריקן, הסיבוב גורם ללחץ מופחת במשפך של הטורנדו.

לחץ אטמוספרי נמוך עד 0.9 אטמוספירה נמדד במשפכים של טורנדו.

הלחץ המופחת במשפך מנסה למשוך פנימה כל מה שהוא יכול מכל מקום שהוא יכול. מאיפה?

לא מחוץ למשפך – כי זה יפר או את חוק שימור האנרגיה או את חוק שימור התנע הזוויתי.

לא מלמטה – כי שם נמצאת האדמה.

מה נשאר? רק מלמעלה

כמו בהוריקן, הסיבוב גורם ללחץ מופחת במשפך של הטורנדו.

לחץ אטמוספרי נמוך עד 0.9 אטמוספירה נמדד במשפכים של טורנדו.

הלחץ המופחת במשפך מנסה למשוך פנימה כל מה שהוא יכול מכל מקום שהוא יכול. מאיפה?

לא מחוץ למשפך – כי זה יפר או את חוק שימור האנרגיה או את חוק שימור התנע הזוויתי.

לא מלמטה – כי שם נמצאת האדמה.

מה נשאר? רק מלמעלה

מה יש למעלה?

כמו בהוריקן, הסיבוב גורם ללחץ מופחת במשפך של הטורנדו.

לחץ אטמוספרי נמוך עד 0.9 אטמוספירה נמדד במשפכים של טורנדו.

הלחץ המופחת במשפך מנסה למשוך פנימה כל מה שהוא יכול מכל מקום שהוא יכול. מאיפה?

לא מחוץ למשפך – כי זה יפר או את חוק שימור האנרגיה או את חוק שימור התנע הזוויתי.

לא מלמטה – כי שם נמצאת האדמה.

מה נשאר? רק מלמעלה

מה יש למעלה?

רק מהענן למעלה. מעל כל טורנדו יש ענן!

הבדלים
בהוריקן יש אוקיינוס מלמטה.

הלחץ הנמוך מושך לחות ואדים
מהאוקיינוס מלמטה.

הזרימה במרכז ההוריקן היא כלפי
מעלה.

הזרימה במרכז הטורנדו היא כלפי **מטה**
מתחילה מהענן.

**מה יש בענן? זה תלוי אם בסיס הענן
עשיר באדי מים.**

**אם כן, משפך הטורנדו יונק אדי מים
מהענן למעלה.**

**אם אדי המים מתעבים בתוך המשפך,
מה קורה?**

(1) המשפך נהיה אטום כמו ענן.

(2) הלחץ מופחת אפילו יותר

(3) הכי חשוב, חום כמוס משתחרר,

מוסיף ומספק אנרגיה לטורנדו.

אם אין מספיק אדי מים בבסיס הענן:

(1) או שטורנדו לא נוצר,

(2) או שטורנדו קיים מתפוגג.

אנו מאמינים שזו האינפורמציה

המבוקשת זה זמן רב על ההבדל בין

ענן שיכול ליצור טורנדו, ובין ענן

שאינו יכול.

איך אפשר לנצל לטובתנו אינפורמציה זו?

עקרונית, טמפרטורת בסיס הענן ניתנת
למדידה במיכשור אינפרה אדום מרוחק.

איך אפשר לנצל לטובתנו אינפורמציה זו?

עקרונית, טמפרטורת בסיס הענן ניתנת
למדידה במיכשור אינפרה אדום מרוחק.
אבל, קל יותר להגיד מאשר לעשות.
הדיוק הקיים במיכשור זה הוא ± 2 מעלות
צלסיוס, כאשר הדיוק הדרוש הוא ± 0.1
מעלות צלסיוס.

איך אפשר לנצל לטובתנו אינפורמציה זו?

עקרונית, טמפרטורת בסיס הענן ניתנת
למדידה במיכשור אינפרה אדום מרוחק.

אבל, קל יותר להגיד מאשר לעשות.

הדיוק הקיים במיכשור זה הוא ± 2 מעלות
צלסיוס, כאשר הדיוק הדרוש הוא ± 0.1
מעלות צלסיוס.

מה אפשר לעשות?

איך אפשר לנצל לטובתנו אינפורמציה זו?

עקרונית, טמפרטורת בסיס הענן ניתנת למדידה
במיכשור אינפרה אדום מרוחק.

אבל, קל יותר להגיד מאשר לעשות.

הדיוק הקיים במיכשור זה הוא ± 2 מעלות צלסיוס,
כאשר הדיוק הדרוש הוא ± 0.1 מעלות צלסיוס.

מה אפשר לעשות?

לפתח מכשירים מספיק מדויקים למדידת אינפרה
אדום מרחוק

איך נקבע הדיוק הדרוש?

**איך נקבע הדיוק הדרוש?
מדידות בעמודי מים (טורנדו מעל ים או
אגם) הן קצת יותר פשוטות ופחות
מסוכנות מאשר בטורנדו, כי בהן יחסית אין
שברים מעופפים.**

איך נקבע הדיוק הדרוש?

**מדידות בעמודי מים (טורנדו מעל ים או אגם)
הן קצת יותר פשוטות ופחות מסוכנות
מאשר בטורנדו, כי בהן יחסית אין שברים
מעופפים.**

**בלושטיין ו-גולדן (1993) מצטטים את לברסון
et al. שמדדו בעמודי מים**

**"אזור מרכזי חמים בערך ב-0.3 מעלות
צלסיוס מאשר טמפרטורת הסביבה."**

צורת המשפך

- הפוטנציאל הניוטוני של נוזל סובב מתקבל מאינטגרציה של הכוח הצנטריפוגלי:

$$F = mv^2/r \quad (7)$$

הפוטנציאל הוא

$$\int (Fdr)/m = \int [v^2(r)/r]dr \quad (8)$$

בהצבת $v = L/mr$ מתוך (2) כאשר L קבוע, עבור r משתנה, במשוואה (7), מקבלים:

$$\begin{aligned} \int Fdr/m &= \int [(L/mr)^2/r]dr \\ &= -[(L/m)^2/2]/r^2 + \text{Const} \end{aligned} \quad (9)$$

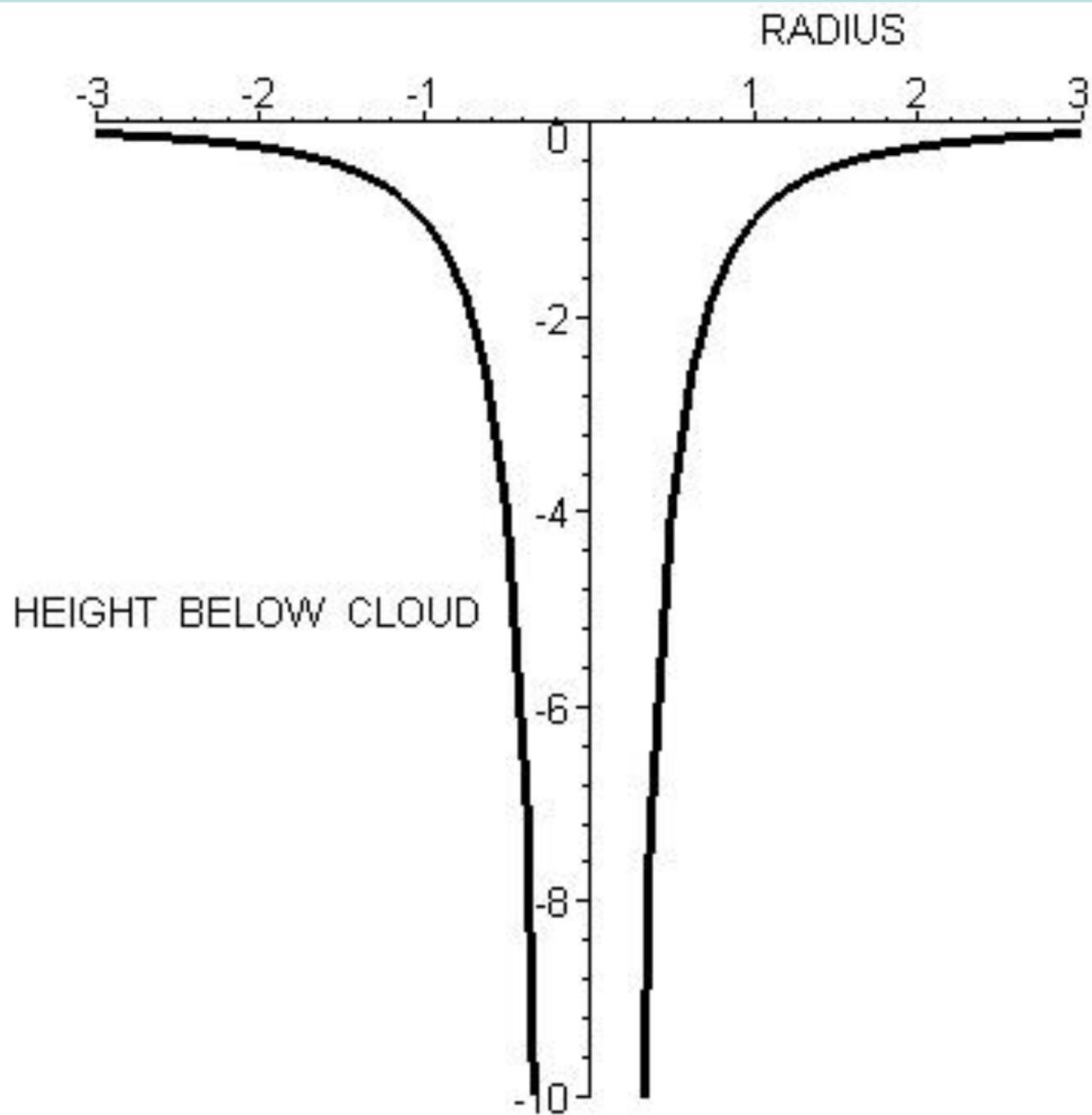
צורת המשפך

הוספת הפוטנציאל הגרביטציוני gz

$$gz = [(L/m)^2/2]/r^2 + \text{Constant} \quad (10)$$

התקבלה צורה דומה למשפך טורנדו בשלב הבשל, ודומה לציור 12-40 של פיינמן 1965 של פתרון עבור נוזל בלתי דחיס הסובב סביב חור ניקוז.

ראה ציור בהמשך



חישובי אנרגיה: גובה הטורנדו

חישוב מקורב לפי הפאראבולואיד של הדלי הסובב של ניוטון

$$z = v_c^2/2g + \text{constant} \quad (11)$$

כאשר v_c היא המהירות ההקפית (חישוב שנעשה עבור טורנדו ע"י Ferrel 1893)

מציבים $g=9.8[\text{m}/\text{sec}^2]$ ואת מהירות הרוח המקסימלית שנמדדה בטורנדו

$$v_c = 512[\text{km}/\text{hour}] = 142.2[\text{meter}/\text{sec}],$$

ומקבלים

$$z = 142.2^2/(2*9.8) + \text{const} \quad (12)$$

חישובי אנרגיה: גובה הטורנדו

מציבים במשוואה (12)

$$\text{constant} = (\text{Latent heat}) * \text{Efficiency} / g$$

ומקבלים

$$z =$$

$$1032[\text{meters}] + (\text{Latent heat}) * \text{Efficiency} / g$$

מציבים חום כמוס של עיבוי 532 Kcal/kg כאשר

427 kg-meter per Kcal, ומקבלים

$$z =$$

$$1032[\text{meters}] + (532 * 427) * \text{Efficiency} / 9.81$$

או

$$z = 1032[\text{meters}] + 23160 * \text{Efficiency}[\text{meters}]$$

עוד תרמודינמיקה

**המשפך ינק אדי מים מהענן למעלה אל תוך
המשפך. מה קורה אז?**

**הלחץ במשפך נמוך יותר, ויוצר עיבוי של
טיפות מים.**

**עיבוי מקטין את הנפח, וכך מקטין עוד את
הלחץ.**

**עיבוי משחרר חום כמוס, אשר מחמם את
הטיפות שהתעבו.**

**הכוח הצנטריפוגלי החזק במשפך הסובב
במהירות מעיף את טיפות המים
החוצה תוך עד 3-4 שניות.
לאן טיפות המים תגענה?**

**טיפות המים מהמשפך מגיעות לזרם האוויר
העולה מסביב לטורנדו, ומעבירות אליו
את החום שלהן.**

**זה מגדיל את כוח העילוי כלפי מעלה של
זרם האוויר העולה.**

וזה מגביר את זרימת הרוחות פנימה.

**שימור התנע הזוויתי מגדיל את מהירות
הרוחות הסובבות את הטורנדו.**

בסך הכול:

**אנרגית חום בענן הומרה ברוחות סובבות
מהירות והרסניות.**

חישובי אנרגיה: הספק POWER

$$\text{נפח לשניה} = \pi D^2 V_{\text{DOWNWARD}}/4$$

$$\text{משקל לשניה} = \text{נפח לשניה} * 4.2\% * 1.4 * 18/29 * 0.88$$

$$\text{משקל לשניה} * \text{חום כמוס} = \text{הספק}$$

$$\text{הספק} = 532 * 4270 * \pi * 4.2\% * 1.4 * 18 * 0.88 / 29 / 4 * D^2 V$$

$$\text{הספק} = 57300 * D^2 V$$

חישובי אנרגיה: הספק POWER

Assume tornado 200 m diameter

Assume downward wind 20 m/sec

Assume saturated 4.2% moisture

Assume height 1 kilometer

הספק $= 57300 \cdot D^2 \cdot V$

$57300 \cdot 200 \cdot 200 \cdot 20$ watt

תוצאה : 47500 Megawatts

תחנות כוח גדולות ≈ 40

חישובי אנרגיה: הספק POWER

Assume tornado 2000 m diameter

Assume downward wind 20 m/sec

Assume saturated 4.2% moisture

הספק $= 57300 \cdot D^2 \cdot V$

$57300 \cdot 2000 \cdot 2000 \cdot 20$ watt

תוצאה : 4750000 Megawatts

תחנות כוח גדולות ≈ 4000

חישובי אנרגיה: הספק POWER

Assume tornado 2000 m diameter

Assume downward wind 2 m/sec

Assume saturated 4.2% moisture

הספק $= 57300 \cdot D^2 \cdot V$

$57300 \cdot 2000 \cdot 2000 \cdot 2$ watt

תוצאה : 475000 Megawatts

תחנות כוח גדולות ≈ 400

לסיכום:

רוב אנרגית הטורנדו מגיעה מאדי מים מהענן למעלה.

את האינפורמציה הזו אפשר לנצל להגדלת זמן האזהרה לתושבים ע"י מדידת אינפרה אדום **מדויקת** מרחוק,

שיכולה לקבוע אם ענן מסוים יכול ליצור טורנדו, וכך להגדיל את זמן האזהרה לתושבים.

יש גם תקווה שבעתיד הרחוק אינפורמציה זו תוכל לאפשר החלשת טורנדו ואולי גם הפסקתו.



References

- Bluestein, HB, 1999. Tornado Alley - Monster Storms of the Great Planes. Oxford Univ. Press, NY, 159-160
- Bluestein, HB, Golden, JH, 1993. A review of tornado observations. In: Church, C, Burgess, D, Doswell, C, Davis-Jones, R (Eds.), The tornado – its structure, dynamics, prediction, and hazards. American Geophysical Union, Washington DC, pp. 319-352. See Fig. 4 in p. 323
- Draper, R, November 2013. The last chase. National Geographic, 28-61. See p. 37
- Ferrel, W, 1893. A Popular treatise on the winds. Wiley, NY
- Feynman, RP, Leighton, RB, Sands, M, 1965. The Feynman Lectures of Physics, Addison-Wesley, Reading, Mass., Vol. 2, p. 40-10. See fig. 40-12
- Leverson, VH, Sinclair, PC, Golden, JH, 1977. Waterspout wind, temperature and pressure structure deduced from aircraft measurements. Mon. Weather Rev. 105, 725-733
- Ben-Amots, N., 2016, Dynamics and thermodynamics of tornado: Rotation effects, Atmospheric Research, pp. 320-328