תאריך 23.07.2018
שם המרצים: מני אדלר, מיכאל אלחדד, ירון גונן
מבחן בקורס: עקרונות שפות תכנות
קורס' מס: 202-1-2051
מיועד לתלמידי: מדעי המחשב והנדסת תוכנה
שנה: ב' סמסטר: ב' מועד ב'
משך הבוחן: 3 שעות
חומר עזר: אסור

הנחיות כלליות:

1. **ההוראות במבחן מנוסחות בלשון זכר, אך מכוונות לנבחנים ולנבחנות כאחד.**
2. **מבחן הכתוב בעיפרון חלש המקשה על הקריאה, לא יבדק**
3. **יש לענות על כל השאלות בגוף המבחן בלבד (בתוך השאלון). מומלץ לא לחרוג מהמקום המוקצה.**
4. **אם אינך יודע את התשובה, ניתן לכתוב "לא יודע" ולקבל 20% מהניקוד על הסעיף/השאלה.**
5. **18 דפים סה"כ במבחן**

שאלה 1: AST	**נק 26**
שאלה 2: ייצוג אובייקטים ב-L	**נק 14**
שאלה 3: מערכת טיפוסים	**נק 23**
שאלה 4: תכנות לוגי	**נק 21**
שאלה 5: רשימות עצלות וCPS	**נק 22**
סה"כ	**נק 106**

שאלה 1: AST

(26 נק)

בשאלה הזאת נפתח שיטה ליצירה של קוד ב-L5 בהינתן תיאור של Type.

1.1 התבונן ב-Type הבא ב-TypeScript:

(2 נק)

```
interface Student {tag: "Student", name: string; age: number;}
```

הגדרו את ה-value constructor ואת ה-type predicate עבור ה-type Student:

```
const makeStudent = (name: string, age: number) : Student =>

  ({tag: "Student", name: name, age: age})

const isStudent = (x : any) : x is Student =>

  x.tag === "Student";
```

1.2 נעביר את הקוד ל-L5:

כדי לממש את ה-Type Student ב-L5, הגדירו את הפרוצדורות הבאות:

(2 נק)

```
(define makeStudent (lambda ((name : string) (age : number)) : list
   (list "Student" name age)))

(define student? (lambda (x : list) : boolean

  (string=? (car x) "Student"))

(define student->name (lambda (s : list) : string
  (car (cdr s)))
```

1.3 ציירו את ה AST של הביטוים L5 של define עבור makeStudent, ושל ביטוי ה define עבור student?
(8 נק)

TEXP

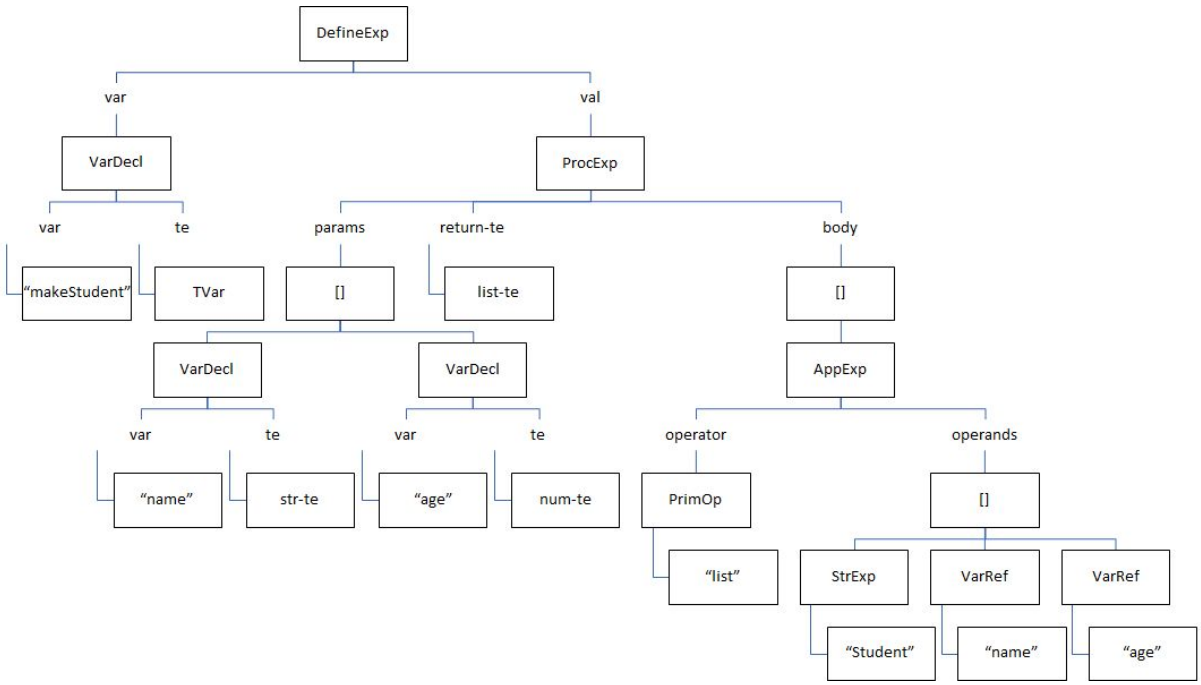
```
<texp>          ::= <atomic-te> | <compound-te> | <tvar>
<atomic-te>     ::= <num-te> | <bool-te> | <void-te>
<num-te>        ::= number   // num-te()
<bool-te>       ::= boolean  // bool-te()
<str-te>        ::= string   // str-te()
<list-te>       ::= list // list-te()
<compound-te>   ::= <proc-te> | <tuple-te>
<non-tuple-te> ::= <atomic-te> | <proc-te> | <tvar>
<proc-te>       ::= [ <tuple-te> -> <non-tuple-te> ]
                  / proc-te(param-tes: list(te), return-te: te)
<tuple-te>      ::= <non-empty-tuple-te> | <empty-te>
<non-empty-tuple-te> ::= ( <non-tuple-te> *)* <non-tuple-te>
                  / tuple-te(tes: list(te))
<tvar>          ::= a symbol starting with T
                  / tvar(id: Symbol, contents, Box(string|boolean))
```

L5

```
<exp> ::= <define> | <cexp>                / DefExp | CExp
<define> ::= ( define <var-decl> <cexp> )
               / DefExp(var:VarDecl, val:CExp)
<cexp> ::= <number>                        / NumExp(val:number)
        |  <boolean>                       / BoolExp(val:boolean)
        |  <string>                        / StrExp(val:string)
        |  <var-ref>
        |  ( lambda ( <var-decl>* ) <TExp>* <cexp>+ )
            / ProcExp(params:VarDecl[], body:CExp[], returnTE: TExp))
        |  ( if <cexp> <cexp> <cexp> )
            / IfExp(test: CExp, then: CExp, alt: CExp)
        |  ( <cexp> <cexp>* )
            / AppExp(operator:CExp, operands:CExp[]))
<prim-op>  ::= + | - | * | / | < | > | = | not |  eq? | string=?
                 | cons | car | cdr | list | list? | number?
                 | boolean? | symbol? | string?
<num-exp>  ::= a number token
<bool-exp> ::= #t | #f
<var-ref>  ::= an id token                / VarRef(var: string)
<var-decl> ::= an id token | (var : TExp) / VarDecl(var: string, TE: TExp)
```

makeStudent AST for Expression:

```
(define makeStudent (lambda ((name : string) (age : number)) : list
   (list "Student" name age)))
```



Important points about ASTs:

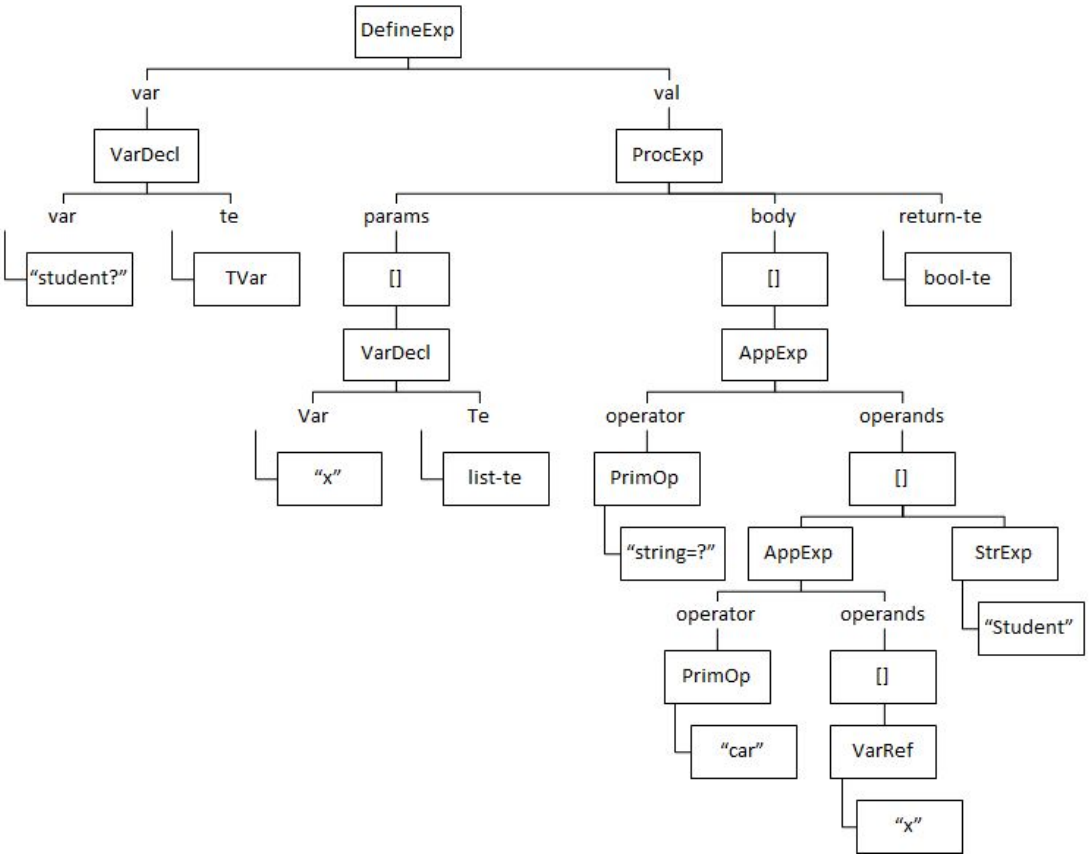
- The node types correspond to types listed in the abstract syntax (see p.2)
- For each node type, there are children according to the parameters of the type. For example, a node of type ProcExp has 3 children, labeled "params", "return-te" and "body".
- The edges connecting to the children must be labeled.
- The type of the children corresponds to the type of the params listed in the AST types. For example, a node of type VarDecl has 2 children of type string (labeled var) and TExp (labeled te).
- When the type of a parameter is a list of children, we add a node labeled [] to indicate the list and its items. For example, the child "params" of the node "ProcExp" is a list.
- All the information from the original expression must be recoverable from the AST.
- There are NEVER any abstract types in an AST. For example, the return-te child of the node "ProcExp" is declared of type TExp - which is abstract (it is a union type - which means it is abstract). But the actual value in our expression is "list" -- hence the node in the AST is of type "list-te" - not TExp with a child of type list-te (this would appear in a derivation tree, not in an AST

https://www.cs.bgu.ac.il/~ppl182/wiki.files/class/notebook/2.3Syntax.html#BNF-Specification

student?

AST for expression:

```
(define student? (lambda (x : list) : boolean
  (string=? (car x) "Student"))
```



1.4 השלימו את שני הביטויים הבאים, האחד בונה את ה-AST שמייצג את ה-value constructor makeStudent, והשני בונה את ה-AST שמייצג את ה type predicate student?

(6 נק)

```
const studentCtorExp : DefineExp =
   makeDefineExp(
     makeVarDecl("makeStudent", makeFreshTVar()),
     makeProcExp([makeVarDecl("name", makeStrTExp()),
                  makeVarDecl("age",  makeNumTExp())],
                 [makeAppExp(makePrimOp("list"),
                       [makeStrExp("Student"),

                        makeVarRef("name),

                        makeVarRef("age")])],
                 makeListTExp()));


const studentPredExp : DefineExp =
   makeDefineExp(
     makeVarDecl("student?", makeFreshTVar()),
     makeProcExp(
       [makeVarDecl("x", makeListTExp())],
       [makeAppExp(makePrimOp("string=?"),

                   [makeAppExp(makePrimOp("car"),

                               makeVarRef("x")),
                   makeStrExp("Student")])]),
       makeBoolTExp());
```

1.5 יצירת קוד

ברצוננו ליצור את הקוד של ה-value constructor וה-type predicate בצורה אוטומטית בהינתן תיאור הצהרתי (declarative) של ה-type.

(8 נק)

```
interface Field {name: string; typeName: string;}
interface Record {name: string; fields: Field[];}

const studentRecord : Record = {name: "Student",
          fields: [{name: "name", typeName: "string"},
                   {name: "age", typeName: "number"}]};

const studentCtorAuto = genCtor(studentRecord);
Const studentPredAuto = genPred(studentRecord);

console.log(unparse(studentCtorAuto))
→ (define makeStudent (lambda ((name : string) (age : number)) : list
(list "Student" name age)))
```

השלמו את הקוד של ה-code generator:

```
const genCtor = (rec: Record): DefineExp =>
 makeDefineExp(
   makeVarDecl("make"+rec.name, makeFreshTVar()),
   makeProcExp(
     map((field : Field) => makeVarDecl(field.name,
                                        parseTE(field.typeName)]),
         rec.fields),
     [makeAppExp(makePrimOp("list"),
       [makeStrExp(rec.name)].
         concat(map((field : Field) => makeVarRef(field.name),
                    rec.fields)))],
     makeListTExp()));
```

שאלה 2: ייצוג אובייקטים ב-L

(14 נקודות)

נתונים שלושה מימושים לייצוג אובייקט של בן-אדם (אחד ב TypeScript ושניים ב L5), וכן פונקציה הבודקת האם הוא גר בניו-יורק:

מימוש 1: כ-interface ב-TypeScript

```
interface Person {
    tag: "person";
      name: string;
    address: string
};

const isLiveInNY = (p : Person) : boolean =>
   p.address === "NY";
```

מימוש 2: כרשימה ב-L5

```
(define make-person-l
  (lambda ((name : string)
           (address : string)) : List
      (list "person" name address)))

(define is-live-in-NY-l
   (lambda ((p : List)) : boolean
      (and (eq? (car p) "person")
           (eq? (car (cdr (cdr p))) "NY"))))
```

מימוש 3: כ-closure ב-L5

```
(define make-person-c
  (lambda ((name : string)
           (address : string)) : (symbol -> T)
    (lambda (msg)
      (cond ((eq? msg 'tag) "person")
            ((eq? msg 'name) name)
            ((eq? msg 'address) address)))))
```

```
(define is-live-in-NY-c
   (lambda (p : (symbol -> T)) : boolean
      (and (eq? (p 'tag) "person")
           (eq? (p 'address) "NY"))))
```

2.1 ציינו את הערך של כל אחד משלושת הביטויים הבאים (כל אחד מהביטויים מתייחס, בהתאמה, לאחד משלושת המימושים למעלה):
(3 נקודות)

```
isLiveInNY({tag: "variable", name: "x", address: "NY"});
```

Type-checking/Compilation error (the parameter should be Student - a map with a 'student' tag)

```
(is-live-in-NY-l (list "variable" "x" "NY"))
```

#f

```
(is-live-in-NY-c
  (lambda (msg)
    (cond ((eq? msg 'tag) "variable")
          ((eq? msg 'name) "x")
          ((eq? msg 'address) "NY"))))
```

#f

2.2 מדוע אין צורך לבדוק את הערך של tag במימוש של **isLiveInNY**,אך צריך לבדוק את הערך של tag בשני המימושים האחרים **is-live-in-NY-c, is-live-in-NY-l** מה ההבדל העקרוני בתפקיד של tag בייצוג של Person ב TypeScript ובייצוגים שלו ב L5?

(5 נקודות)

ה-tag ב TypeScript מגדיר את הטיפוס Student כקבוצת כל ה map בהם השדה tag הוא המחרוזת "Student" (עם השדות name,address מסוג string). תכונתו זאת מאפשרת בדיקה בזמן ריצה של תאימות טיפוס הארגומט לטיפוס הפרמטר בפרוצדורה.

ה-tag ב L הינו סה"כ פריט מידע (ברשימה או ב-closure, תלוי באופן מימוש האובייקט) המאפשר לבדוק את תאימות הארגומט לפרמטר של הפרוצדורה בזמן ריצה, אך אין לו כל תפקיד תחבירי במערכת הטיפוסים.

2.3 נתונים שני אובייקטים p-c,p-l המייצגים בן אדם ע"פ שני המימושים ב L5,

כרשימה וכ-closure:

(6 נקודות)

```
(define p-l (make-person-l "Danny" "Beer Sheva"))
(define p-c (make-person-c "Danny" "Beer Sheva"))
```

עבור כל אחד מהמקרים הבאים, ציינו היכן מאוחסנים ה'שדות' של האובייקט (name, address):

האובייקט p-l, כאשר האינטרפרטר במודל הסביבות (environment model)

1. בסביבה הגלובלית
2. באחת הסביבות שאינה הגלובלית
3. כחלק מהקוד של body ב closure
4. בזיכרון של האינטרפרטר
5. במקום אחר

תשובות 1,4 נכונות (תלוי בנקודת המבט)

האובייקט p-c, כאשר האינטרפרטר במודל ההצבה (substitution model)

1. בסביבה הגלובלית
2. באחת הסביבות שאינה הגלובלית
3. כחלק מהקוד של body ב closure

4. בזיכרון של האינטרפרטר
5. במקום אחר

תשובה 3 נכונה. במודל ההצבה המופעים של הפרמטרים של ה closure מוחלפים בארגומנטים, במקרה זה בערכים name,address

האובייקט p-c, כאשר האינטרפרטר במודל הסביבות (environment model)

1. בסביבה הגלובלית
2. באחת הסביבות שאינה הגלובלית
3. כחלק מהקוד של body ב closure
4. בזיכרון של האינטרפרטר
5. במקום אחר

תשובה 2 נכונה. במודל הסביבות נבנית סביבה הכוללת את ההצבות של הפרמטרים של הפרוצדורה, במקרה זה ערכי הארגומנטים name,address

שאלה 3: מערכת טיפוסים

(23 נקודות)

בשאלה זו נרחיב את מערכת הטיפוסים שהוגדרה ב L5 כדי לתמוך באיחוד של טיפוסים (union types) כמו ב TypeScript.

לדוגמא, ניתן יהיה להגדיר טיפוס חדש של קבוצת כל המחרוזות וכל המספרים כאיחוד של string ו number:

```
(string | number)
```

לשם פשטות נניח כי ניתן לבצע union רק של טיפוסים לא מורכבים.

3.1. מוטיבציה: תארו מקרה בו נדרש להגדיר טיפוס שהוא איחוד של טיפוסים (כמו פרוצדורה בה נדרש לאחד טיפוסים כדי להגדיר את אחד הפרמטרים או את הערך המוחזר).
(3 נקודות)

במימוש האינטרפרטר, פונקציית ה eval החזירה את הערך של הביטוי, או שגיאה. כלומר הערך המוחזר שלה היה Value | Error

3.2. נתון התחביר המופשט והקונקרטי של מערכת הטיפוסים, כפי שנלמד בהרצאה. הרחיבו אותו עם מבנה של איחוד טיפוסים.
(3 נקודות)

```
<texp>          ::= <atomic-te> | <composite-te> | <tvar>
<atomic-te>     ::= <num-te> | <bool-te> | <void-te> | <str-te>
<num-te>        ::= number    / num-te()
<bool-te>       ::= boolean   / bool-te()
<str-te>        ::= string    / str-te()
<void-te>       ::= void      / void-te()
<composite-te> ::= <proc-te> | <tuple-te> | <union-te>
<non-tuple-te> ::= <atomic-te> | <proc-te> | <tvar>
<proc-te>       ::= [ <tuple-te> -> <non-tuple-te> ]
                     / proc-te(param-tes: list(te), return-te: te)
<tuple-te>      ::= <non-empty-tuple-te> | <empty-te>
<non-empty-tuple-te> ::= ( <non-tuple-te> *)* <non-tuple-te>
                         / tuple-te(tes: list(te))
<empty-te>      ::= Empty
<tvar>          ::= a symbol starting with T / tvar(id: Symbol)
```

<union-te> ::= (<atomic-te> | <atomic-te> [| <atomic-te>]*)
/ union-te(tes : list(atomic-te))

// Option 2: Union of only two atomic types
<union-te> ::= <atomic-te> | <atomic-te> / union-te(te1 : atomic-te, te2 : atomic-te)

3.3. השלימו את הגדרת מבנה ה union ב AST
(3 נקודות)

```
export interface UnionTExp = { tag: "UnionTExp";

            types : AtomicExp[] };

export const makeUnionTExp =

    (types : AtomicExp[]): UnionTExp =>
```

```
    ({tag: "UnionTExp"; types : tes});

export const isUnionTExp = (x: any): x is UnionTExp =>
     x.tag === "UnionTExp";
```

// Option 2: Union of only two atomic types

```
export interface UnionTExp = { tag: "UnionTExp";
            te1 : AtomicExp; te2 : AtomicExp };

export const makeUnionTExp =
    (te1 : AtomicExp, te2 : AtomicExp): UnionTExp =>
    ({tag: "UnionTExp"; te1 : te1; te2 : te2});
```

3.4 מתי ניתן לקבוע ש-type T1 יותר ספציפי מ-type T2?
(2 נק)

כאשר קבוצת הערכים המוגדרת ע"י T1 מוכלת בקבוצה המוגדרת ע"י T2

3.5. נניח כי מומש ב Parser הניתוח של מבנה איחוד הטיפוסים, כך שתאור טיפוס מאוחד, בקוד כמו ' string | number', יהפוך ב parsing לקודקוד מסוג UnionTExp ב AST (אופן המימוש אינו רלבנטי לשאלה זו).
(12 נקודות)

עדכנו את המתודה checkEqualType ב TypeChecker כך שייבדקו גם מקרים בהם הטיפוסים כוללים union types:

- במידה ואחד הפרמטרים הוא טיפוס מסוג union type, הטיפוס בפרמטר הראשון te1 צריך להיות **ספציפי יותר** מהטיפוס בפרמטר השני te2.
  לדוגמא: אם
  `te1 = number, te2 = (number | string)`
  אז הפרוצדורה מחזירה true

- אם
  `te1 = boolean, te2 = (number | string)`
  אז הפרוצדורה מחזירה error

- במידה ושני הפרמטרים הם מטיפוס פרוצדורה, יש לוודא תאימות של טיפוס הפרמטרים והערך המוחזר גם עבור union types.
  לדוגמא:
  אם

```
te1 = (number -> boolean)
te2 = ((number | string) -> boolean)
```

אז הפרוצדורה מחזירה true

אם

```
te1 = (number -> (boolean | string))
te2 = (number -> boolean)
```

אז הפרוצדורה מחזירה error

השתמשו בממשק ל-AST של TExp:

```
isUnionTExp, isProcTExp, isAtomicTExp, isTVar
And for values p of type procTExp - p.paramTEs and p.returnTE.

// Purpose: Check that type expressions are equivalent
// as part of a fully-annotated type check process of exp.
// Return an error if the types are different - true otherwise.
// Exp is only passed for documentation purposes.
const checkEqualType = (te1: TExp | Error,
                        te2: TExp | Error,
                        exp: Exp): true | Error =>
  isError(te1) ? te1 :
  isError(te2) ? te2 :
  deepEqual(te1, te2) ? true :

  (isAtomicTExp(te1) && isUnionTExp(te2)) ? te2.types.includes(te1) :

  (isUnionTExp(te1) && isUnionTExp(te2)) ?
     !te1.types.map((te1item : AtomicTExp) => te2.includes(te1item))
         .include(false) :

  (isProcTExp(te1) && isProcTExp(te2)) ? te2.types.includes(te1) :
     te1.paramTEs.length === t2.paramTEs.length &&
      !isError(checkEqualType(te1.returnTE,te2.returnTE,exp)) &&
      hasNoError(
         zipWith((param1TE, param2TE) =>
                   checkEqualType(param1TE, param2TE,exp),
              te1.paramTes, t2.paramTes))


:
Error(`Incompatible types: ${unparseTExp(te1)} and
${unparseTExp(te2)} in ${unparse(exp)}`);
```

// Option 2: Union of only two atomic types

```
const checkEqualType = (te1: TExp | Error,
                        te2: TExp | Error,
                        exp: Exp): true | Error =>
  isError(te1) ? te1 :
  isError(te2) ? te2 :
  deepEqual(te1, te2) ? true :
  isAtomicTExp(te1) && isUnionTExp(te2) ?
      te1 === te2.te1 || te1 === te2.te2 :
  isUnionTExp(te1) && isUnionTExp(te2) ?
      te1.te1 === te2.te1 && te1.te2 === te2.te2 ||
      te1.te1 === te2.te2 && te1.te2 === te2.te1
  :
  isProcTExp(te1) && isProcTExp(te2) ?
     te1.paramTEs.length === te2.paramTEs.length &&
      !isError(checkEqualType(te1.returnTE,te2.returnTE,exp)) &&
      hasNoError(
         zipWith((param1TE, param2TE) =>
                          checkEqualType(param1TE,param2TE,exp),
              te1.paramTes,te2.paramTes))
: Error(`Incompatible types: ${unparseTExp(te1)} and
         ${unparseTExp(te2)} in ${unparse(exp)}`);
```

שאלה 4: תכנות לוגי

(21 נק)

4.1: הסבירו בקצרה מדוע כל תוכנית ב-Relational Logic Programming היא ברת הכרעה:
(3 נק)

מס' ה-terms בתוכנית RLP כלשהי ובשאילתא נתונה הוא סופי (עד כדי שינוי שמות המשתנים)
כתוצאה מכך, מס' ה-goals האפשריים בעץ ההוכחה עבור השאילתא הוא סופי.
לכן, אם בנתיב מסויים בעץ ההוכחה מופיע אותו ה-goal יותר מפעם אחת (עד כדי שינוי שם המשתנה),
הרי זה אומר שנגזר עליו להופיע שוב, ואנו יכולים לעצור ולהכריז כי נתיב זה הוא אינסופי.
במקרים האחרים נגיע לעלה כישלון או הצלחה.

היזכרו בהגדרת מספרי צ'רץ':

```
natural_number(0).
natural_number(s(N)) :- natural_number(N).
```

נגדיר את היחס `gt` אשר מתקיים כאשר הארגומנט הראשון גדול יותר מן הארגומנט השני:

```
gt(s(X),0) :- natural_number(X).
gt(s(X), s(Y)) :- gt(X,Y).
```

4.2: פרטו את צעדי החישוב עבור מציאת ה-unifier הבא:
(3 נק)

```
unify( gt(s(s(0)), X), gt(s(X), 0) )
Let A=gt(s(s(0)), X), B=gt(s(X), 0)
s={} → A∘s=gt(s(s(0)), X), B∘s=gt(s(X), 0)
s={X=s(0)} → A∘s=gt(s(s(0)), s(0)), B∘s=gt(s(s(0)), 0)
Fail
```

4.3 הוסיפו את היחס lte/2 אשר מתקיים כאשר X קטן או שווה ל-Y
(5 נק)

```
lte( 0, 0 ).

lte( 0, s(N)) :- natural_number(N)

lte( s(A), s(B) ) :- lte(A, B)
```

4.4: השלימו את הקוד הבא עבור פרדיקט אשר בודק האם איבר מסוים נמצא במקום הנכון ברשימה ממוינת (של מספרי צ'רץ'):
(5 נק)

```
insert(H, [], [H]).insert(H, [X|Y], [H,X|Y]) :- gt(X, H).
insert(H, [X|Y], [X|Z]) :- insert(H, Y, Z).
```

```
insert(H, [], [H]).

insert(H, [X | Y], [H, X | Y]) :- lte(H, X).

insert(H, [X|Y], [X|Z]) :- insert(H, Y, Z), lte(X, H).
```

4.5: השלימו את הקוד הבא אשר ממין רשימה ע"י insertion sort :
(5 נק)

```
sort([],[]).

sort([H | T], R) :-
    sort(T,TR),
    insert(H,TR,R).
```

שאלה 5: רשימות עצלות ו-CPS

(22 נק)

5.1: האם ניתן להשוות בין שתי רשימות עצלות? אם כן, כתבו את הפרדיקט `?lzl-equal` אם לא, הסבירו מדוע. **(3 נק)**

לא ניתן להשוות בין רשימות עצלות:
לא ניתן להשוות בין האיברים שלהן כיוון שהן יכולות להיות אינסופיות.
כמו כן לא ניתן להשוות בין ה-closures אשר מייצרים את המשך הרשימה.

5.2: ניזכר באלגוריתם של ניוטון לחישוב שורש של מספר: **(9 נק)**

מטרה: חשב $\sqrt{x}$:

1. המשתנה y הוא ניחוש של הערך $\sqrt{x}$ (נתחיל תמיד עם ניחוש של 1)
2. ניחוש מוצלח יותר מתקבל מהחישוב הבא: $\frac{y+\frac{x}{y}}{2}$
3. חזור על החישוב עד שהניחוש בריבוע שווה בערך ל-x

כתבו את הרשימה העצלה sqrt-lzl אשר מכילה את כל הניחושים של השורש מהאלגוריתם. השתמשו בממשקים לעבודה עם רשימות עצלות: `cons-lzl, head, tail`. כמו כן נתונה לכם הפונקציה המחשבת את הניחוש המוצלח יותר, `improve`.

דוגמה:

```
> (take (sqrt-lzl 2) 5)
'(1 1.5 1.4166666666666665 1.4142156862745097 1.4142135623746899)
```

```
(define improve
  (λ (guess x)
    (/ (+ guess (/ x guess)) 2.0)))
```

```
(define sqrt-lzl
  (λ (x)
     (letrec ([iter
                   (λ (guess x)
                     (cons-lzl
                      guess
                      (λ ()
                        (iter
                         (improve guess x)
                         x))))])
           (iter 1 x))))
```

CPS 5.3

(10 נק)

ממשו את הפרוצדורה `$$filter` שמקבלת פרדיקט `$pred` שכתוב בצורת CPS רשימה `lst` ו-`cont` continuation– ומעבירה ל-`cont` את רשימת האיברים המקיימים את הפרדיקט.

See
https://www.cs.bgu.ac.il/~ppl182/wiki.files/class/notebook/4.2CPS.html#Summary:-CPS-Transformation

```
;; Purpose: filter in CPS

;; Type: [[T1 * [bool -> T2] -> T2] *
          List(T1) *
          [List(T1) -> T2] -> T2]


(define filter$$
  (lambda (pred$ lst cont)
    (cond
      ((empty? lst) (cont lst))
      (else
        (pred$ (car lst)
               (lambda (pred-res)
                 (cond (pred-res
                        (filter$$ pred$ (cdr lst)
                          (lambda (filter-cdr-res)
                            (cont (cons (car lst)
                                        filter-cdr-res)))))
                       (else (filter$$
                              pred$
                              (cdr lst)
                              cont))))))))
```